Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

30

Berichte aus dem TFZ

Ethanol aus Zuckerhirse

Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung

Projektpartner:

Technische Universität München

TFZ

Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanol-herstellung

Abschlussbericht

Technologie- und Förderzentrum (TFZ):
Josef Witzelsperger, Dr. Anja Hartmann,
Peter Emberger, Peter Turowski, Sabine Haselbeck,
Dr. Edgar Remmele, Dr. Maendy Fritz,
Dr. Hans Hartmann, Dr. Bernhard Widmann

Technische Universität München:
Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie
Bernd Rohowsky, Thomas Häßler, Anett Kästner,
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich

Projektpartner:

Technische Universität München

Berichte aus dem TFZ 30

Straubing, August 2012

Titel:	Ethanol aus Zuckerhirse - Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
Gesamtprojektleitung:	Dr. Edgar Remmele
Autoren:	Josef Witzelsperger, Dr. Anja Hartmann, Bernd Rohowsky, Peter Emberger, Thomas Häßler, Peter Turowski, Anett Kästner, Sabine Haselbeck, Dr. Edgar Remmele, Dr. Maendy Fritz, Dr. Hans Hartmann, Dr. Bernhard Widmann, Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
Bearbeiter:	Technologie- und Förderzentrum (TFZ): Josef Witzelsperger, Sabine Haselbeck, Peter Emberger, Thomas Gassner, Jakob Meyer, Sebastian Kirner, Anja Röcktäschel, Sonja Plankl, Roland Fleischmann, Rita Haas, Dr. Anja Hartmann, Alois Aigner, Josef Sennebogen, Michael Kandler, Benno Sötz, Peter Turowski, Elisabeth Rist, Stephan Winter Technische Universität München: Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie Bernd Rohowsky, Thomas Häßler, Anett Kästner, Marlit Köstler, Christina Sagmeister

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen K/08/18 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

© 2012
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

ISSN:	1614-1008
Hrsg.:	Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail:	poststelle@tfz.bayern.de
Internet:	www.tfz.bayern.de
Redaktion:	Peter Emberger, Ulrich Eidenschink
Verlag:	Eigenverlag, Straubing
Erscheinungsort:	Straubing
Erscheinungsjahr:	2012
Gestaltung:	Peter Emberger, Ulrich Eidenschink
Fotonachweis:	Hartmann (103, 124), Witzelsperger (134), Emberger (178, 198), Rohowsky (205), Rist (283, 284)

Vorwort

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Kolleginnen und Kollegen und Firmenvertretern die an dem Vorhaben „Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung“ beteiligt waren, möchten wir an dieser Stelle danken.

Insbesondere gilt unser Dank den nachfolgend genannten Firmen für die Materialbereitstellung sowie deren zuständigen Mitarbeitern für Ihr gezeigtes Interesse und Ihre Unterstützung im Forschungsvorhaben.

- BASF SE, 67056 Ludwigshafen, Herr Dr. Ulrich Roser: Bereitstellung von Amasil® NA (gepufferte Ameisensäure)
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung (ILT), 85354 Freising: Bereitstellung von Lagerbehältern
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft (ITE), 85586 Poing-Grub: Bereitstellung von Lagerbehältern
- Maschinenfabrik Reinartz GmbH & Co. KG, 41460 Neuss: Unterstützung und Beratung bei der Anpassung der Seiherstab-Schneckenpresse sowie Bereitstellung von Pressenbauteilen
- Technische Universität München, Versuchsgut Grünschwaige, 85462 Eittingermoos: Bereitstellung von Lagerbehältern

Für die Bereitstellung von Zuckerhirse-Saatgut danken wir folgenden Personen und Firmen:

- William Rooney, University of Minnesota, U.S.A.
- Todd Pfeiffer, University of Kentucky, U.S.A.
- Warren Turner, Rebecca's Garden, Columbia, U.S.A.
- Scott Seed Co., Texas, U.S.A.
- Milo Seeds inc., Québec, Kanada
- Randy Vaughn, MAFES, Mississippi State University, U.S.A.
- Walter Moss Seed Company, Texas, U.S.A.
- Warner Seeds, Texas, U.S.A.

Nicht zuletzt gilt unser Dank dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung der Forschungsarbeiten. Insbesondere bei Herrn Ltd. MR Dr. Rupert Schäfer möchten wir uns für die stets sehr gute Zusammenarbeit bedanken.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 7

Abbildungsverzeichnis 13

Tabellenverzeichnis 21

Formelzeichen und Abkürzungen 27

1 Rohstoffe zur Erzeugung von Ethanol als Kraftstoff 29

2 Zielstellung 31

3 Stand des Wissens 33

3.1 Systematik, Herkunft und Bedeutung von Zuckerhirse 33

3.2 Verwertungsmöglichkeiten der Zuckerhirse 34

3.3 Zuckerhirseanbau 34

3.3.1 Standortbedingungen, Anbau und Ertrag 34
3.3.2 Wertbestimmende Inhaltsstoffe von Zuckerhirse 36
3.3.3 Wachstumsverlauf und Stoffbildung 38
3.3.4 Morphologie der Zuckerhirsepflanze 40
3.3.5 Sortenwahl 42

3.4 Ernte von Zuckerhirse 42

3.4.1 Erntezeitraum 42
3.4.2 Erntetechnik 43
3.4.3 Ernteverluste 47

3.5 Transport-, Lager- und Umschlagtechnik 47

3.6 Lagerung und Konservierung von Zuckerhirse 48

3.6.1 Lagerung 49
3.6.2 Konservierung 51
3.6.3 Physikalische Lagerparameter 53

3.7 Technologie der Saftgewinnung 54

3.7.1 Walzenpresse 55
3.7.2 Stempelpresse 56
3.7.3 Schneckenpresse 56
3.7.4 Folgerungen 58

3.8 Bioethanol aus Zuckerhirse 58

3.8.1 Einsatz von Hefen 58
3.8.1.1 Mikrobiologische Grundlagen 59
3.8.1.2 Nährstoffbedarf und Inhibierungseinflüsse 60
3.8.1.3 Industrielle Hefepräparate 61
3.8.2 Konversionsverfahren 62
3.8.2.1 Verfahrensübersicht 63
3.8.2.2 Verfahren für gehäckseltes Pflanzenmaterial 64
3.8.2.2.1 Feststoff-Fermentation 65

3.8.2.2.2 Perkolat-Fermentation (Ex-Ferm-Verfahren) 67
3.8.2.3 Verfahren für Zuckersaft 67
3.8.2.3.1 Fermentationsverfahren 67
3.8.2.3.2 Aufbereitung von ameisensäurekonservierten Presssäften 68
3.8.2.4 Verfahren für Bagasse 70
3.8.2.4.1 Aufschlussverfahren 70
3.8.2.4.2 Fermentation 72
3.8.2.4.3 Verfahrenskonzepte 73
3.8.3 Thermische Verfahren zur Aufbereitung von Fermentationsmaischen 74
3.8.3.1 Destillation und Rektifikation 74
3.8.3.2 Absolutierung 75
3.8.4 Folgerungen 78

4 Probenaufbereitung und Analytik 81

4.1 Aufbereitung und Analytik von Feststoffproben 81
4.1.1 Trocknungsvarianten 81
4.1.2 Gefriertrocknung 84

4.2 Bestimmung von löslichen Zuckern 84

4.3 Vergleich der Bestimmungsmethoden für Zucker 86

4.4 Einfluss der Trocknungsmethode auf den Zuckergehalt 87

4.5 Analytik flüssiger Proben 89

5 Anbau von Zuckerhirse in Bayern 91

5.1 Vorgehensweise 91
5.1.1 Versuchsstandort, Klima- und Bodenparameter 91
5.1.2 Sortenscreening 95
5.1.3 Erntezeitpunkt 95
5.1.4 Ertragsverhältnis der Blatt- und Stängelfraktion 97
5.1.5 Bestandesführung - Stickstoff- und Kaliumversorgung 97
5.1.6 Bestandesführung - Saatstärke 98
5.1.7 Wasser- und Temperatureinfluss 98
5.1.8 Probenaufbereitung 99
5.1.9 Pflanzen- und Bodenanalyse 100
5.1.10 Statistik 101

5.2 Ergebnisse 101
5.2.1 Sortenscreening - Ertragspotential verschiedener Zuckerhirsesorten in Bayern 101
5.2.2 Optimaler Erntezeitpunkt von Zuckerhirse in Bayern 107
5.2.3 Nährstoffentzug durch den Zuckerhirseanbau unter bayerischen Klimabedingungen 112
5.2.4 Ertragsbildung der Pflanzenfraktionen Blatt und Stängel 114
5.2.5 Einfluss der Stickstoff- und Kalium-Versorgung auf Ertrag und Qualität von Zuckerhirse 117
5.2.6 Der Einfluss der Saatstärke auf Ertrag und Qualität von Zuckerhirsen 121
5.2.7 Einfluss von Wasser und Temperatur auf Wachstum und Zuckerbildung der Zuckerhirse unter Gewächshausbedingungen 123
5.2.8 Inhaltsstoffliche Zusammensetzung von Zuckerhirse 128

5.3 Fazit der Untersuchungen zum Anbau von Zuckerhirse in Bayern 130

6 Ernte von Zuckerhirse 133
6.1 Vorgehensweise 133
6.2 Ergebnisse 134

7 Transport von Zuckerhirse 137
7.1 Vorgehensweise 137
7.2 Ergebnisse 137

8 Lagerung und Konservierung von Zuckerhirse 141
8.1 Lagerungsvarianten 141
8.2 Konservierung 143
8.3 Vorgehensweise bei der Beprobung 147
8.4 Temperaturerfassung 148
8.5 Physikalische Lagerparameter 148
8.6 Lagerung von nicht konservierten Pflanzen 149
8.6.1 Äußere Qualität 149
8.6.2 Zuckergehalt 150
8.6.3 Einordnung und Bewertung der Ergebnisse 152
8.7 Lagerung von konservierten Pflanzen 154
8.7.1 Äußere Qualität 154
8.7.2 Zuckergehalte im Häckselgut und Sickersaft 154
8.7.3 Anforderungen an die bauliche Gestaltung von Lagerstätten 168
8.7.4 Physikalische Lagerparameter 170
8.8 Fazit 172

9 Zuckersaftgewinnung 173
9.1 Vorgehensweise 173
9.1.1 Saftgewinnung mit einer Lochseiher-Schneckenpresse 174
9.1.2 Saftgewinnung mit einer Seiherstab-Schneckenpresse 177
9.2 Ergebnisse Lochseiher-Schneckenpresse 182
9.3 Ergebnisse Seiherstab-Schneckenpresse 187
9.3.1 Einfluss verschiedener Presseinstellungen 187
9.3.2 Einfluss des Frischmaterials 189
9.3.3 Einfluss der Konservierung 194
9.4 Fazit 198

10 Konversion zu Ethanol 201
10.1 Vorgehensweise 201
10.1.1 Hefepräparate 201
10.1.2 Fermentation der gehäckselten Pflanze 203
10.1.3 Fermentation von Zuckerhirsepresssaft 206
10.1.3.1 Nährstoffzusammensetzung 206
10.1.3.2 Auswahl geeigneter Fermentationsverfahren und Reaktionsbedingungen 206

10.1.3.3 Haltbarkeit von vergorenem Zuckerhirsepresssaft 207
10.1.3.4 Aufbereitung und Fermentation mit ameisensäurekonservierten Presssäften 207
10.1.4 Fermentation von Bagasse 209
10.1.4.1 Verfahrenskonzept 209
10.1.4.2 Hydrothermale Vorbehandlung 211
10.1.4.3 Simultane Verzuckerung und Fermentation 213
10.1.4.4 Biogaspotenzial der Flüssigfraktion aus der hydrothermalen Vorbehandlung 216
10.1.5 Kenngrößen zur Bewertung der Fermentation 218
10.1.6 Thermische Aufbereitung der Fermentationsmaischen 218

10.2 Analytik 221

10.2.1 Parameter im Zuckerhirsepresssaft 221
10.2.2 Zusammensetzung von Bagasse 222
10.2.3 Bestimmung der Enzymaktivität 225
10.2.4 Bioethanol-Kraftstoffanalytik gemäß DIN EN 15376 226

10.3 Ergebnisse 226

10.3.1 Untersuchte Hefepräparate 226
10.3.2 Fermentation der gehäckselten Pflanze 228
10.3.2.1 Feststoff-Fermentation 228
10.3.2.2 Perkolat-Fermentation 233
10.3.2.3 Fazit 237
10.3.3 Fermentation von Zuckerhirsepresssaft 238
10.3.3.1 Nährstoffzusammensetzung von Zuckerhirsepresssäften 238
10.3.3.2 Auswahl geeigneter Fermentationsverfahren und Reaktionsbedingungen 241
10.3.3.3 Haltbarkeit von vergorenem Zuckerhirsepresssaft 243
10.3.3.4 Aufbereitung und Fermentation von ameisensäurekonservierten Presssäften 244
10.3.3.5 Fazit 250
10.3.4 Konversion von Bagasse 251
10.3.4.1 Bagassezusammensetzung 251
10.3.4.2 Hydrothermale Vorbehandlung 252
10.3.4.3 Simultane Verzuckerung und Fermentation 255
10.3.4.4 Biogaspotenzial der Flüssigfraktion aus hydrothermal vorbehandelter Zuckerhirsebagasse 262
10.3.4.5 Fazit 263
10.3.5 Thermische Aufbereitung der Fermentationsmaischen 264
10.3.5.1 Qualitätsbestimmende Eigenschaften des Gärrests 265
10.3.5.2 Fazit 266

11 Thermische Verwertung der Bagasse 267

11.1 Vorgehensweise 267

11.1.1 Beschreibung der ausgewählten Feuerungsanlage 267
11.1.2 Versuchsbrennstoff 268
11.1.3 Versuchsaufbau und Messanordnung 269

11.2 Brennstoffeigenschaften 273

11.3 Emissionen 275

11.4 Betriebserfahrungen 282

11.5 Fazit 284

12 Ökonomische Einordnung der Bioethanolerzeugung aus Zuckerhirse in dezentralen Kleinanlagen 287

12.1 Beschreibung des Modellszenarios 287

12.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 289

12.3 Fazit 301

13 Fazit und Ausblick 303

14 Zusammenfassung 311

15 Abstract 321

Quellenverzeichnis 325

Anhang 349

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung des Trockenmasseertrages und des Zuckergehaltes zweier Zuckerhirsesorten nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35].....39

Abbildung 2: Entwicklung des Zuckerertrages zweier Zuckerhirsesorten nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35].....39

Abbildung 3: Verlauf von Gesamtzucker, Saccharose-, Fructose- und Glucoseanteil von Zuckerhirse, verändert nach BLUDAU (1994) [33].....40

Abbildung 4: Erntetechniken und Erntegutformen für Zuckerhirse im Überblick.....44

Abbildung 5: Verfahrensübersichtsschema zur Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung.....64

Abbildung 6: Ergebnisvergleich der Zuckergehaltsanalysen nach der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung und der Methode zur Bestimmung löslicher Zucker nach VDLUFA durchgeführt mit dem Material einer Zuckerhirseprobe.....87

Abbildung 7: Vergleich des Gesamtzuckers von fünf Zuckerhirseproben (dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung) bei Trocknung des Häckselguts per Gefriertrocknung und bei 80 °C im Trockenschrank.....88

Abbildung 8: Übersicht über die Schwerpunkte im Teilprojekt „Anbautechnik und Bestandesführung“.....91

Abbildung 9: Witterungsverlauf in den Jahren 2009 bis 2011 am Versuchsstandort (Daten der Wetterstation Piering).....94

Abbildung 10: Sortenversuch mit 9 Zuckerhirsesorten im Versuchsjahr 2009.....103

Abbildung 11: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt der Zuckerhirsesorten im Mittel der Versuchsjahre 2009/2011 (Mittelwerte, einjährig geprüft n = 4, zweijährig geprüft n = 8).....103

Abbildung 12: Trockenmassegehalt der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4); Versuchsjahr 2009.....109

Abbildung 13: Trockenmassegehalt der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4); Versuchsjahr 2011.....109

Abbildung 14: Zuckergehalt (als Glucoseäquivalent) der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin, Versuchsjahr 2009 (n = 1).....110

Abbildung 15: Zuckergehalt (als Glucoseäquivalent) der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin, Versuchsjahr 2011 (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4).....110

Abbildung 16: Gesamtzuckergehalt als Glucoseäquivalent und Stärkegehalt von drei Zuckerhirsesorten im Gewächshausversuch 2010 zu unterschiedlichen Reifestadien (Zucker: Mittelwerte, n = 3; Stärke: n = 1).....112

Abbildung 17: Anteil von Stängel und Blatt am Biomasse- und Zuckerertrag ("Großfläche Zuckerhirse" 2010, n = 1)..... 116

Abbildung 18: Gesamtzuckergehalt der Pflanzenfraktionen Blatt und Stängel als Glucoseäquivalent ("Großfläche Zuckerhirse" 2010, n = 1)..... 116

Abbildung 19: Trockenmasseertrag von Zuckerhirse bei unterschiedlichen N- und K-Versorgungsstufen (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4) ... 118

Abbildung 20: N-Bilanz (N-Saldo) von zwei Zuckerhirsesorten bei unterschiedlichen N-Versorgungsstufen, Versuchsjahr 2011 (n =1) 121

Abbildung 21: Trockenmasseertrag von Zuckerhirse bei unterschiedlichen Saatstärken (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4) 122

Abbildung 22: Jugendentwicklung von Zuckerhirse bei warmen (links) und kühlen (rechts) Temperaturbedingungen im Gewächshaus)..... 124

Abbildung 23: Pflanzenhöhe von Zuckerhirse bei Kombination von zwei Wasser- und Temperaturstufen im Gewächshaus, (Mittelwerte, n = 3) 125

Abbildung 24: Entwicklung von Zuckerhirse bei Kombination von zwei Wasser- und Temperaturstufen im Gewächshaus, (Mittelwerte, n = 3) 125

Abbildung 25: TM-Ertrag und Zuckerertrag von Zuckerhirse bei Kombination von zwei Wasser- und Temperaturstufen im Gewächshau (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 3) 126

Abbildung 26: Beerntung von Zuckerhirseversuchsparzellen mit einem Mähbalken mit angehängter Ladeschale (links) und Bergung von Zuckerhirseganzpflanzen in Form von Erntebündeln (rechts) im Versuchsjahr 2009 134

Abbildung 27: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von vier Zuckerhirsesorten am Standort Aholfing an sechs Boniturterminen im September und Oktober 2011, jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung 136

Abbildung 28: Varianten zur Lagerung von Zuckerhirse im Versuchsjahr 2009..... 141

Abbildung 29: Varianten zur Lagerung von Zuckerhirse im Versuchsjahr 2010 (Sorte ‘Keller‘)..... 142

Abbildung 30: Varianten zur Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit Ameisensäure unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2010 (Sorte ‘Keller‘)..... 144

Abbildung 31: Varianten zur Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut bei unterschiedlichen Trockenmassegehalten mit Ameisensäure unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76') 145

Abbildung 32: Gesamtzucker von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 0,5 Masse-% Ameisensäure) 155

Abbildung 33: Zuckergehalt im Sickersaft von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 0,5 Masse-% Ameisensäure)..... 156

Abbildung 34: Zucker- und Ethanolgehalt im Sickersaft von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut mit zusätzlicher Hefebeigabe im Versuchsjahr 2010 (Variante 0,5 Masse-% Ameisensäure und 0,4 Masse-% Hefe) 158

Abbildung 35: Gesamtzucker von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 1,0 Masse-% Ameisensäure) 159

Abbildung 36: Zuckergehalt im Sickersaft von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 1,0 Masse-% Ameisensäure) 160

Abbildung 37: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte ‘Top 76‘, Erntetermin 06.10.2011, Häcksellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung 161

Abbildung 38: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte ‘Top 76‘, Erntetermin 13.10.2011, Häcksellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung 162

Abbildung 39: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte ‘Top 76‘, Erntetermin 20.10.2011, Häcksellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung 162

Abbildung 40: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte ‘Top 76‘, Erntetermin 24.10.2011, Häcksellänge 10 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung 163

Abbildung 41: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte ‘Top 76‘, Erntetermin 26.10.2011, Häcksellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung 163

Abbildung 42: Einfluss der Sickersaftentnahme auf Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Vergleich zum Frischmaterial im Versuchsjahr 2011 (Sorte ‘Top 76‘), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung 165

Abbildung 43: Systemmodell mit Eingangsgrößen, Einflussfaktoren und Zielgrößen der Zuckersaftgewinnung aus Zuckerhirse mit Schneckenpressen 174

Abbildung 44: Aufbau der verwendeten Lochseiher-Schneckenpresse 175

Abbildung 45: Versuchsplan für die Untersuchungen zur Verarbeitung von Zuckerhirse in einer Lochseiher-Schneckenpresse 176

Abbildung 46: Schematischer Versuchsaufbau der Seiherstab-Schneckenpresse 177

Abbildung 47: Pressschnecke der verwendeten Seiherstabpresse mit variablen Einsätzen zur Anpassung der Schneckengeometrie an das Pressgut 178

Abbildung 48: Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Schecken-Geometrien und Varianten des Bagasseauswurfs einer Seiherstab-Schneckenpresse 180

Abbildung 49: Versuchsplan zur Ermittlung des Einflusses einer vorherigen Materialabtrennung auf die Verarbeitung von Zuckerhirse in einer Seiherstab-Schneckenpresse 180

Abbildung 50: Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Erntezeitpunkte, Vorbehandlungen und Konservierungsarten von Zuckerhirse auf die Verarbeitung in einer Seiherstab-Schneckenpresse 181

Abbildung 51: Materialdurchsatz (Mittelwerte und Spannweiten) der Lochseiher-Schneckenpresse mit unterschiedlichen Düsendurchmessern und Drehzahlen bei Verarbeitung von zwei entblätterten Zuckerhirsesorten (Schneckengeometrie: 7 Windungen) (n=3) 184

Abbildung 52: Abpressgrad (Mittelwerte und Spannweiten) einer Lochseiher-Schneckenpresse mit unterschiedlichen Düsendurchmessern und Drehzahlen bei Verarbeitung von zwei verschiedenen entblätterten Zuckerhirsesorten (n=3) 184

Abbildung 53: TM-Gehalt (Mittelwerte und Spannweiten) der Bagasse in Abhängigkeit vom Abpressgrad bei Verarbeitung von zwei entblätterten Zuckerhirsesorten und verschiedenen Einstellungen einer Lochseiher-Schneckenpresse (n=3) 186

Abbildung 54: Mittelwerte und Spannweiten von Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei verschiedenen Presseinstellungen der Seiherstab-Schneckenpresse 188

Abbildung 55: Mittelwerte und Spannweiten der Temperaturen zwischen den Seiherstäben an verschiedenen Positionen des Seiherkorbs einer Schneckenpresse bei unterschiedlichen Presseinstellungen 188

Abbildung 56: Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei Verarbeitung von Zuckerhirse der Sorte 'Top 76' mit unterschiedlichem Erntetermin und Häcksellänge in einer Seiherstab-Schneckenpresse (Mittelwerte und Spannweiten) 190

Abbildung 57: Mittelwerte und Spannweiten des Abpressgrades, der Abtrenneffizienz und der Zuckerextraktionsrate in Abhängigkeit vom TM-Gehalt des Ausgangsmaterials bei vergleichbaren Presseneinstellungen der Seiherstab-Schneckenpresse 191

Abbildung 58: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) des gehäckselten Ausgangsmaterials für die Pressversuche zur Untersuchung des Einflusses von vorhergehender Materialabtrennung (Mittelwert und Spannweite) 192

Abbildung 59: Mittelwerte und Spannweiten von Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei verschiedenen Arten an Ausgangsmaterial der Seiherstab-Schneckenpresse (aufsteigend sortiert nach Erntetermin) 193

Abbildung 60: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) der Bagasse aus Frischmaterial mit unterschiedlichen Häckselängen (Mittelwerte und Spannweiten) 194

Abbildung 61: TM-Gehalt (Mittelwert und Spannweite) und Gesamtzucker (als Glucoseäquivalent) des konservierten Ausgangsmaterials für die Pressversuche (TM: n=2; Gesamtzucker n=1) 195

Abbildung 62: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) des konservierten Ausgangsmaterials nach Lagerung für die Pressversuche im Vergleich zum Frischmaterial (Mittelwerte und Spannweiten) 196

Abbildung 63: Mittelwerte und Spannweiten von Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei verschiedenen Arten von konserviertem Ausgangsmaterial bei Verarbeitung in einer Seiherstab-Schneckenpresse (n=3) 197

Abbildung 64: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) der Bagasse aus konserviertem Ausgangsmaterial im Vergleich zu Bagasse aus dem Frischmaterial (Mittelwerte und Spannweiten)....197

Abbildung 65: Verschleißerscheinungen an einer Druckschnecke der Seiherstab-Schneckenpresse nach Verarbeitung von ca. 2.000 kg säurekonservierter Zuckerhirse 198

Abbildung 66: Versuchsanordnung zum Gärversuch von gehäckselter Zuckerhirse mit Rollenmischer 205

Abbildung 67: Blockfließbild zur simultanen Verzuckerung und Fermentation (SSF) von Zuckerhirsebagasse unter Zugabe von Zuckerhirsepresssaft (in Anlehnung an ROHOWSKY et al. 2012 [224])...210

Abbildung 68: Zusammensetzung von Bagasse 223

Abbildung 69: Zuckerkonversion nach 48 Stunden auf Modellsubstrat unter Verwendung von vier Hefepräparaten mit jeweils 2 g/l ADY in einem Temperaturbereich von 25 bis 45 °C (n=2, max. Abweichung vom Mittelwert ± 0,03 g Ethanol / g Zucker) 227

Abbildung 70: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit verschiedenen Hefestartkonzentrationen in Standkolben, n=3 228

Abbildung 71: Maximale Ethanolausbeuten in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Hefeimpfmenge bei 30 °C in Standkolben, n=3 229

Abbildung 72: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen bei verschiedenen Ameisensäure- und Ameisensäurepufferkonzentrationen in Standkolben, n=2 230

Abbildung 73: pH-Wert der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit

1 x 10^8 Hefezellen bei verschiedenen Ameisensäure- und Ameisensäurepufferkonzentrationen in Standkolben, n=2 231

Abbildung 74: Maximale Ethanolausbeuten in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Zugabe von konzentrierter Ameisensäure und Ameisensäurepuffer bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen, n=2 232

Abbildung 75: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 25 °C und 35 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l bei 0 und 2,5 g/l Ameisensäure in Standkolben, n=3 233

Abbildung 76: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l bei verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen in rotierenden Kolben, n=3 234

Abbildung 77: pH-Wert in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l bei verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen in rotierenden Kolben, n=3 234

Abbildung 78: Maximale Ethanolausbeuten in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Konzentration von konzentrierter Ameisensäure und gepufferter Ameisensäurebei bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l in rotierenden Kolben, n=3 235

Abbildung 79: Ethanolkonzentration in der Maische von gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l und einer anfänglichen der wiederholten Perkolat-Fermentation Ameisensäurekonzentration (gepuffert) von 2,5 g/l in rotierenden Kolben, n=3..... 236

Abbildung 80: Maximale Ethanolausbeuten und Anzahl der Hefezellen je Zyklus bei der wiederholten Fermentation von gehäckselter Zuckerhirse der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ bei 30 °C mit 1x10^8 Hefezellen/l und einer anfänglichen Ameisensäurekonzentration (gepuffert) von 2,5 g/l in rotierenden Kolben, n=3..... 236

Abbildung 81: Ethanolkonzentration (von Zuckerhirsepresssaft der Sorte ‘Umbrella‘) in Abhängigkeit von der Lagerzeit und Temperatur im Außenlager („In-Field“-Verfahren) im 10 l-Maßstab, n=3..... 244

Abbildung 82: Ethanolkonzentration nach 24 und 48 Stunden von mit Schwefelsäure auf unterschiedliche Anfangs-pH-Werten eingestellten Zuckerhirsepresssäften mit 0,3 g ADY/l (Thermosacc® Dry) bei 35 °C°, n=2 246

Abbildung 83: Ethanolkonzentration nach 24 und 48 Stunden von mit Ameisensäure (AS) und Calciumcarbonat auf unterschiedliche Anfangs-pH-Werten eingestellten Zuckerhirsepresssäften mit 0,3 g ADY/l (Thermosacc® Dry) bei 35 °C, n=2..... 247

Abbildung 84: Ethanolausbeute nach 24 und 48 Stunden mit Zuckerhirsepresssäften aus Häckseln der Sorte 'Top 76' mit

unterschiedlichen Ameisensäurekonzentrationen, 0,3 ADY g/l Hefe Thermosacc® Dry bei 35 °C, pH=6, n=2 250

Abbildung 85: Hemicelluloselöslichkeit hydrothermal vorbehandelter Zuckerhirsebagasse der Sorte ‘Umbrella‘ bei verschiedenen Behandlungshärten und Zieltemperaturen, n=3 253

Abbildung 86: Glucangehalt von hydrothermal vorbehandelter Zuckerhirsebagasse der Sorte ‘Umbrella‘ bei verschiedenen Behandlungshärten und Zieltemperaturen, n=3 254

Abbildung 87: Konzentrationsverläufe der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse der Sorte ‘Umbrella‘ für verschiedene Vorbehandlungshärten und Feststoffkonzentrationen, n=3 256

Abbildung 88: Cellulosekonversionsraten der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse der Sorte ‘Umbrella‘ für verschiedene Vorbehandlungshärten und Feststoffkonzentrationen, n=3 257

Abbildung 89: Konzentrationsverläufe bei der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse für verschiedene Bagassevarianten, bei einer Feststoffkonzentration von 8 % WIS, n=3 258

Abbildung 90: Konzentrationsverläufe bei der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse für verschiedene hydrothermal vorbehandelten Bagassevarianten unter Zugabe des jeweiligen Presssaftes, bei einer Feststoffkonzentration von 8 % WIS, n=3 260

Abbildung 91: Konzentrationsverläufe bei der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse (Ganzpflanze) der Sorte 'Top 76' zur Überprüfung von Inhibierungseinflüssen der flüssigen Phase aus dem Aufschlussverfahren auf den Fermentationsprozess 261

Abbildung 92: Biogasbildung der untersuchten Flüssigfraktionen hydrothermal vorbehandelter Bagassen bei einer Versuchsdauer von 15 Tagen, n=3 262

Abbildung 93: Funktionsdarstellung und Ansicht der Anlage Guntamatic Powerchip 20/30 (Quelle: Guntamatic) 268

Abbildung 94: Schematischer Aufbau des Versuchs auf dem Prüfstand 271

Abbildung 95: CO-Emissionen beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus mindestens 3 Wiederholungen mit Spannweite) 276

Abbildung 96: Emissionen an Gesamt-C beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite) 277

Abbildung 97: Emissionen an Stickoxiden beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite)..... 278

Abbildung 98: Emissionen an Schwefeldioxid beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite)..... 279

Abbildung 99: Staubemissionen beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite) 280

Abbildung 100: Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Aerosolbildnern (K, Na, S und Cl) sowie den Staubemissionen bei Einsatz verschiedener anderer biogener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 281

Abbildung 101: Dosierung von Bagasse: Brückenbildung bei der Befüllung der Dosierschnecke (links) und unvollständige Befüllung der Dosierschnecke (rechts) 283

Abbildung 102: Asche- bzw. Schlacke im Feuerraum nach der Verbrennung von Bagasse: Erste Anbackungen an den Feuerraumwänden (links) und Schlacke am Übergang vom Rost in die Entaschungsschnecke (rechts) 284

Abbildung 103: Verwendetes Prozessschema und relevante Massenströme des Modellszenarios zur ökonomischen Einordnung der Bioethanolerzeugung aus Zuckerhirse in dezentralen Kleinanlagen 289

Abbildung 104: Zusammensetzung der Herstellungskosten (ohne Erlöse) für Ethanol aus Zuckerhirse nach dem Modellszenario 300

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwertungsmöglichkeiten von Zuckerhirse [150] 34

Tabelle 2: Zuckerhirseerträge – Literaturangaben 36

Tabelle 3: Wertbestimmende Inhaltsstoffe in der Gesamtpflanze von erntereifer Zuckerhirse 38

Tabelle 4: Masseanteile von Stängel, Blatt und Rispe am Frischmasse- und Trockenmasseertrag von erntereifer Zuckerhirse – Wertebereich verschiedener Literaturangaben [24] [148] [151] [260] [261] 41

Tabelle 5: Anteile von Stängeln, Blättern und Rispen am Gesamtertrag der Zuckerhirse nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] 41

Tabelle 6: Übersicht bezüglich erforderlicher Transport- und Umschlagtechnik für Zuckerhirse in unterschiedlichen Aufbereitungsformen 48

Tabelle 7: Lagerdauer von Zuckerhirse bis zum Unterschreiten von 90 % des Ausgangszuckergehaltes (nach BLUDAU und TUROWSKI [35]) 50

Tabelle 8: Empfohlene Nährstoffkonzentrationen zu Fermentationszwecken mit Hefen im Vergleich zu Nährstoffkonzentrationen von Zuckerhirsesaft 61

Tabelle 9: Kennwerte zur Feststoff-Fermentation – Parametersätze aus den jeweiligen Untersuchungen mit den höchsten Ausbeuten an Ethanol 66

Tabelle 10: Löslichkeiten, Gefahrenstoffkennzeichnung und Preise von Natriumhydroxid, Calciumdihydroxid und Calciumcarbonat zur pH-Wert-Anhebung 70

Tabelle 11: Maximale Ethanolausbeuten verschiedener Hefekulturen in Bezug auf die Verwertung von Xylose 73

Tabelle 12: Vergleich unterschiedlicher Ethanolabsolutierungsverfahren bezogen auf den Wärmeenergiebedarf 77

Tabelle 13: Abschätzung des Wärmeenergiebedarfs unterschiedlicher Verfahren zur Ethanolaufreinigung 77

Tabelle 14: Übersicht Trocknungsvarianten für Zuckerhirsehäckselgut zur Bestimmung des Trockenmassegehalts nach VDLUFA MB III, Kapitel 3.1 82

Tabelle 15: TM-Gehalte von erntefrischem Zuckerhirsehäckselgut an fünf Ernteterminen (A bis E) sowie zugehörige Standardabweichung S und Wiederholgrenze r nach Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C und im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar 83

Tabelle 16: Beschreibung der Versuchsstandorte Aholfing und Straubing 92

Tabelle 17: Bodenparameter an den Versuchsstandorten in den Jahren 2009, 2010 und 2011 vor der Aussaat und Angabe der Boden-Gehaltsklassen 93

Tabelle 18: Saat- und Erntetermine des Sortenscreenings 2009 und 2011 95

Tabelle 19: Geprüfte Zuckerhirsesorten aus den U.S.A. und Kanada 96

Tabelle 20: Tatsächliche Nährstoffgaben im Feldversuch zur Stickstoff- und Kaliumversorgung, Versuchsjahr 2011 97

Tabelle 21: Versuchsdesign des Feldversuches 2011 zur Saatstärke 98

Tabelle 22: Versuchsbedingungen des Gewächshausversuches mit unterschiedlichen Temperaturen und Bewässerungsstufen (2011)..... 99

Tabelle 23: Methodik der Bodenanalysen..... 100

Tabelle 24: Methodik der Pflanzenanalysen 101

Tabelle 25: Boniturdaten der Zuckerhirsesorten im Feldversuch 102

Tabelle 26: Ernteparameter zur Ernte am 5.10.2009; signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben angegeben (Mittelwerte: n = 4; Zuckerparameter: n = 1, Zucker nach VDLUFA Bd. III, Kap 7.1.1.) 104

Tabelle 27: Ernteparameter zur Ernte am 19.10.2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben angegeben (Mittelwerte; n = 4, Zucker nach Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (TUM)) 104

Tabelle 28: Bestandeshöhe der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2009 und 2011 (Mittelwerte, n = 4) zu verschiedenen Ernteterminen 108

Tabelle 29: Mineralstoffentzüge der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2009 zum 3. Erntetermin am 05.10. (n = 1) 113

Tabelle 30: Mineralstoffentzüge der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2011 zum 3. Erntetermin am 19.10. (n = 1) 114

Tabelle 31: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des Düngeversuches, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben angegeben 117

Tabelle 32: Kaliumgehalt und Lagerbonitur von Zuckerhirse bei unterschiedlichen N-Versorgungsstufen, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Mittelwerte, n = 4) 119

Tabelle 33: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des produktionstechnischen Versuchs bei einer Reihenweite von 37,5 cm, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet 123

Tabelle 34: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des produktionstechnischen Versuchs bei einer Reihenweite von 50 cm, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet 123

Tabelle 35: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des Gewächshausversuches zum Wasser- und Temperatureinfluss, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Mittelwerte, n = 3) 127

Tabelle 36: Inhaltsstoffe der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2009 und 2011 zum jeweils letzten Erntetermin am 05.10.2009 bzw. 19.10.2011 (n = 1) 129

Tabelle 37: Ertragsermittlung am Standort Irlbach für Futter- und Zuckerhirse im Versuchsjahr 2011 137

Tabelle 38: Zeitbedarf für Ernte und Transport von Futter- und Zuckerhirse am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 (pro Gespann) 138

Tabelle 39: Für Ernte und Transport von Futter- und Zuckerhirse am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 eingesetzte Technik und hierfür unterstellte Kosten 138

Tabelle 40: Erntekosten für Futter- und Zuckerhirse entsprechend der am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 erhobenen Daten....139

Tabelle 41: Transportkosten für Futter- und Zuckerhirse entsprechend der am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 erhobenen Daten....139

Tabelle 42: Mittlerer Zuckerverlust und Trockenmassegehalte von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte ‘Top 76‘) 164

Tabelle 43: Auswirkung einer Verwertung des zuckerhaltigen Sickersaftes auf den festgestellten Zuckerverlust bei der Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit Ameisensäure 167

Tabelle 44: pH-Wert (Mittelwerte) des Sickersaftes von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011, Sorte ‘Top 76‘, Erntetermin 06.10.2011, Häcksellänge 20 mm in Abhängigkeit von der Lagerdauer 167

Tabelle 45: Schüttdichte von Zuckerhirse in verschiedenen Erntegut- und Aufbereitungsformen im Versuchsjahr 2010 170

Tabelle 46: Zuckergehalt (Glucoseäquivalent), Dichte, Trockenmasse und Saftreinheit der aus den Versuchen gewonnenen Zuckersäfte....185

Tabelle 47: Mittelwerte und Standardabweichungen von Trockenmasse und Zuckergehalt der verwendeten Zuckerhirse zu den verschiedenen Ernteterminen 189

Tabelle 48: Übersicht zu den untersuchten kommerziell erhältlichen Hefepräparaten – Angaben gemäß Hersteller....202

Tabelle 49: Inhaltsstoffe des als Modellsubstrat verwendeten Zuckerhirsesirups gemäß Herstellerangaben bezogen auf 1 kg Sirup 203

Tabelle 50: Versuchsplan zur Feststoff-Fermentation in Standkolben mit gehäckselter Zuckerhirse (Sorte ‘Sucro Sorgo‘, Stängelfraktion)....204

Tabelle 51: Untersuchte Fermentationsverfahren und Reaktionsbedingungen mit Zuckerhirsepresssäften (teilweise mit Zucker angereichert) 207

Tabelle 52: Versuchsgestaltung zur Fermentation konservierter Presssäfte bei 35 °C mit 0,3 g ADY/l Thermosacc® Dry 209

Tabelle 53: Versuchsplan zur hydrothermalen Vorbehandlung von Zuckerhirsebagasse (Sorte ‘Umbrella‘, Ernte und Presstermin: 18.10.2010) für verschiedene Temperatur-/ Zeitkombinationen und einem Feststoffgehalt von 5 Masse-%. 212

Tabelle 54: Versuchsplan zur simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse für verschiedene Vorbehandlungshärten und Feststoffkonzentrationen (Sorte ‘Umbrella‘, Ernte- und Pressdatum: 18.10.2012), n=3 215

Tabelle 55: Versuchsplan zur simultanen Verzuckerung und Fermentation von verschiedenen Zuckerhirsebagassen, n=3 216

Tabelle 56: Wertbestimmende Inhaltstoffe und Inhibitorkonzentrationen für flüssige Fraktionen hydrothermal vorbehandelter Bagassen, n=3. Standardabweichung der Konzentrationsangaben ≤ 0,1 g/l 217

Tabelle 57: Fermentationsansätze zur Bereitstellung des Ausgangsmaterials für die Ethanol-Abtriebsversuche 219

Tabelle 58: Kenndaten zur Labor-Rektifikationsanlage ILUDEST® LM-2/S 220

Tabelle 59: Elementspezifische Parametereinstellungen der FAAS 221

Tabelle 60: Nährstoffe (Mittelwerte und Standardabweichung) in Presssäften von vier Zuckerhirsesorten aus dem Erntejahr 2010, n=3 239

Tabelle 61: Nährstoffe (Mittelwerte und Standardabweichung) im Zuckerhirsepresssaft zu unterschiedlichen Wachstumsstadien/Ernteterminen in der Ganzpflanze- und in der Stängelfraktion der Sorte ‘Top 76‘..... 239

Tabelle 62: Fermentation mit Saccharose angereicherter Zuckerhirsepresssäfte der Sorte ‘Sugar Drip‘ mit einer Aktivtrockenhefeanfangskonzentration (Thermosacc® Dry) von 0,3 g/l bei 35 °C, n=2 (Mittelwerte und Standardabweichung)..... 241

Tabelle 63: Ethanolbildung aus Zuckerhirsesaft bei verschiedenen Fermentationsverfahren, n=2 242

Tabelle 64: Anfangs-pH-Werte der mit unterschiedlichen Ameisensäurekonzentrationen versetzten Zuckerhirsepresssäfte, n=2 245

Tabelle 65: Ethanolausbeuten von Presssäften aus mit 0,75 Masse-% Ameisensäure konserviertem Ausgangsmaterial der Sorte 'Top 76' nach pH-Einstellung mit verschiedenen Basen bei 35 °C mit 0,3 ADY g/l Hefe (Thermosacc® Dry) nach 48 Stunden 248

Tabelle 66: Ethanolausbeute von Presssäften aus mit 1 Masse-% Ameisensäure konserviertem Ausgangsmaterial der Sorte 'Top 76' nach pH-Einstellung mit Calciumcarbonat bei 35 °C mit 0,3 ADY g/l Hefe (Thermosacc® Dry) nach 48 Stunden 249

Tabelle 67: Inhaltsstoffe von Zuckerhirsebagassen, n=3 251

Tabelle 68: Feststoffzusammensetzung von hydrothermal vorbehandelten Zuckerhirsebagassen bei 190 °C, log R_0=4,0, n=3 255

Tabelle 69: Ergebnisse (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Batch-Versuche zur Biogaserzeugung für flüssige Fraktionen hydrothermal vorbehandelter Bagassen nach 15 Tagen, n=3 263

Tabelle 70: Analyseergebnisse von Zuckerhirse-Ethanol zur Verwendung als Blendkomponente in Ottokraftstoff gemäß DIN EN 15376 vier verschiedener Versuchsansätze.....265

Tabelle 71: Versuchsbrennstoffe.....269

Tabelle 72: Untersuchte Brennstoffparameter und angewandte Prüfmethoden 269

Tabelle 73: Kontinuierlich erfasste Messgrößen und eingesetzte Messgeräte.....272

Tabelle 74: Heizwert sowie Asche- und Elementgehalte der untersuchten Brennstoffe (für Getreidestroh und Holz Datenbankangaben gemäß [121]).....273

Tabelle 75: Elementgehalte Bagasse (Mittelwert der 4 Versuchsbrennstoffe jeweils ± Standardabweichung) im Vergleich zu ausgewählten biogenen Festbrennstoffen (Daten der Vergleichsbrennstoffe gem. [121]); Alle Angaben in mg/kg i.d.TM.....274

Tabelle 76: Schüttdichte und Wassergehalt der verschiedenen Bagassebrennstoffe.....275

Tabelle 77: Betriebsbedingungen der Feuerung bei Betrieb mit verschiedenen Brennstoffen.....282

Tabelle 78: Produktionskosten von Zuckerhirse (in Anlehnung an Silomaisproduktionskosten [21]).....290

Tabelle 79: Ernte-, Konservierungs- und Lagerkosten von Zuckerhirse 291

Tabelle 80: Modellrechnung für den Anlagenteil der Zuckersaftgewinnung (in Anlehnung an REMMELE (2009) [219].....293

Tabelle 81: Jahreskosten einer dezentralen Brennerei mit einer Verarbeitungskapazität von 2.000 m³ pro Jahr (ohne Heizöl- und Abschreibungskosten) in Anlehnung an WETTER und BRÜGGING (2004) [296] und angepasst an das Modellszenario.....295

Tabelle 82: Modellrechnung des Anlagenteils der thermischen Verwertung von Bagasse zur Prozesswärmebereitstellung 296

Tabelle 83: Ableitung des Nährstoffwertes von Zuckerhirseschlempe.....297

Tabelle 84: Kalkulation der Erlöse durch Vermarktung der überschüssigen Bagasse als Brennstoff.....298

Tabelle 85: Kalkulation der Erlöse durch Vermarktung der überschüssigen Bagasse als Einstreu für Pferdehalter 298

Tabelle 86: Spezifische Herstellungskosten von Ethanol im Modellszenario bei Nutzung der überschüssigen Bagasse als Brennstoff.....299

Tabelle 87: Spezifische Herstellungskosten von Ethanol im Modellszenario bei Nutzung der überschüssigen Bagasse als Einstreu 299

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Zeichen

a	Jahr
c	Konzentration in g/l
d	Tage
n	Anzahl der Versuchswiederholungen
g	Erdbeschleunigung
h	Stunde
V	Volumen
m	Masse
$\dot{m}$	Massenstrom
APG	Abpressgrad in %
AE	Abtrenneffizienz in %
SR	Saftreinheit in %
r	Wiederholgrenze
S	Standardabweichung

Griechische Zeichen

ρ	Schüttdichte
σ	Wiederholstandardabweichung

Abkürzungen

% i.d.TM	Prozent in der Trockenmasse
ADF	Acid Detergent Fibre/Säure Detergentien Faser, Rückstand nach der Behandlung mit sauren Lösungsmitteln
ADL	Acid Detergent Lignin/Lignin
ADP	Adenosindiphosphat
ADY	Active dry yeast
AS	Ameisensäure
ASg	Ameisensäure gepuffert
ATP	Adenosintriphosphat
Ca	Calcium
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
ECC	Enzymatic convertibility of cellulose
FAAS	Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie
FAN	Free Amino Nitrogen
FID	Flammenionisationsdetektor
FM	Frischmasse
FPU	Filter paper Units
GC	Gas Chromatografie
GHS	Globally Harmonized System of Classification, Labelling and Packaging of Chemicals
h	hora (Stunde)
ha	Hektar (10.000 m²)
HET	Haupterntetermin

HPLC	High-Performance Liquid Chromatography
IU	International Units
IUPA	International Union of Pure and Applied Chemistry
K	Kalium
KG-Rohr	Kanalgrundrohr
l	Liter (0,001 m³)
LHW	Liquid Hot Water
l_N	Normliter bei 20°C
k. A.	keine Angabe
MB	Methodenbuch
Mg	Magnesium
min	Minute (60 s)
mol	Stoffmenge
N	Stickstoff
NDF	Neutral Detergent Fibre/Neutrale Detergentien Faser, Rückstand nach der Behandlung mit neutralen Lösungsmitteln, aschefrei
NfE	Stickstoff freie Extraktstoffe
NREL	National Renewable Energy Laboratory
oTM	organische Trockenmasse
P	Phosphor
PE	Polyethylen
pH	Negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität
pKs	Negativer dekadischer Logarithmus der Säurekonstanten KS
ppm	Parts per million
QTL	quantitative trait loci
R_0	Severity-Faktor
RZB	relative Zentrifugalbeschleunigung
SSF	Simultanious saccharification and fermentation
TM	Trockenmasse
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VE	vollentsalzt
wf	wasserfrei
WIS	Water insoluble solids
WLD	Wärmeleitfähigkeitsdetektor
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
XS	Stärke

1 Rohstoffe zur Erzeugung von Ethanol als Kraftstoff

Für die Erzeugung von Bioethanol steht mit zucker-, stärke- und lignocellulosehaltigen Rohstoffen eine breite Rohstoffbasis zur Verfügung. In Deutschland werden zur Herstellung von Bioethanol derzeit vor allem Getreide, Kartoffeln und zum Teil Zuckerrüben als Rohstoff eingesetzt. Zu den weiteren Rohstoffpflanzen, die möglicherweise für die Ethanolproduktion geeignet sind, zählt auch der Zuckertyp (Zuckerhirse) der Sorghum-Hirsen (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). In Sorten- und Produktionstechnikversuchen an einem umfangreichen Sortiment von Futterhirsen, die vorrangig für die Biogasproduktion eingesetzt werden, konnten bereits geeignete Anbautechniken für diese Kulturart bestimmt und zum Teil hohe Flächenerträge erzielt werden [226]. Auch der Zuckerhirsetyp kann je nach verwendeter Sorte und Standortbedingungen hohe Masse- und Zuckererträge erzielen, womit eine hohe energetische Flächeneffizienz erreicht werden kann. Zuckerhirse enthält den Zucker in direkt vergärbarer Form, was für die Produktion von Ethanol sehr günstig ist, einer längeren Lagerung des Erntegutes aber infolge auftretender Zuckerverluste entgegensteht.

Untersuchungen zur Nutzung von Zuckerhirse für die Produktion von Ethanol, die in den 1980er und 1990er Jahren durchgeführt wurden, weisen Ernte, Lagerung und Verarbeitung dieser C4-Pflanze als Problembereiche aus. Die Haltbarkeit frischer Zuckerhirse ist von der Beschaffenheit des Erntegutes und somit entscheidend von der Wahl des Ernteverfahrens abhängig, da durch die Form des Erntegutes (Zerkleinerungsgrad) die Abbaugeschwindigkeit des Zuckers im Erntegut maßgeblich beeinflusst wird. Die Zwischenlagerung des anfallenden Erntegutes unmittelbar nach der Ernte ist für den gesamten Verfahrensablauf von großer Bedeutung. Dabei sind Maßnahmen zum Erhalt der wertbestimmenden Inhaltsstoffe erforderlich (z. B. Konservierung). Nachdem im Herbst in Deutschland mit vier bis sechs Wochen nur ein relativ kurzer Erntezeitraum zur Verfügung steht und die Durchführung der Erntearbeiten stark witterungsabhängig ist, könnte durch eine qualitätserhaltende Lagerung des Erntegutes der Verarbeitungszeitraum verlängert und eine kontinuierliche Verarbeitung der Zuckerhirse auch während Schlechtwetterperioden oder über das ganze Jahr sichergestellt werden.

Die Rohstoffverarbeitung zur Ethanolerzeugung kann aus technischer Sicht grundsätzlich dezentral in kleineren Einheiten bzw. zentral in großen Anlagen erfolgen. Mögliche geeignete Technologien für die Zuckersaftgewinnung stehen aus anderen Anwendungsbereichen zur Verfügung, deren Anwendung für die Rohstoffpflanze Zuckerhirse wurde bislang allerdings noch kaum systematisch untersucht.

2 Zielstellung

Im Vorhaben soll untersucht werden, inwieweit sich die Zuckerhirse als Rohstoffpflanze für die Erzeugung von Ethanol nutzen lässt. Neben offenen Fragen zur pflanzenbaulichen Produktionstechnik sollen vor allem auch technologische Untersuchungen von der Rohstoffbereitstellung bis zur Konversion im Vordergrund stehen. Das Vorhaben gliedert sich in drei Teilprojekte:

Im Teilprojekt 1 „Anbautechnik und Bestandesführung“ sollen zuckerhirsespezifische pflanzenbauliche Fragestellungen in Gewächshausversuchen und in Parzellenversuchen im Freiland bearbeitet werden. Neben der Auswahl geeigneter Zuckerhirsesorten für die Ethanolerzeugung werden die Ansprüche der Zuckerhirse an Bestandesführung und Nährstoffbedarf ermittelt, sowie äußere Einflüsse (z. B. Wasserversorgung, Temperaturführung) auf den Gehalt an verwertbarem Zucker untersucht werden. Untersuchungen zum Wachstumsverlauf und Stoffbildung im Laufe der Vegetationsperiode ermöglichen die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunktes von Zuckerhirse.

Die Ziele von Teilprojekt 2 „Ernte, Nacherntetechnologie, Zuckersaftgewinnung und -aufbereitung, Konversion“ sind eine mit geringem technischem Aufwand durchführbare, verlustarme Bereitstellung der Zuckerhirse, einen bestmöglichen Rohstoffaufschluss und eine effiziente Konversion zu Ethanol darzustellen. Hierzu sollen geeignete Ernte- und Aufbereitungsverfahren unter Einbeziehung der technischen Eignung und Leistungsfähigkeit, sowie der tatsächlichen Verfügbarkeit gewählt, weiterentwickelt und in praktischen Feldversuchen getestet werden. Ein weiteres Ziel ist die Erarbeitung und Bewertung eines Logistikkonzeptes, abgestimmt auf das Gesamtverfahren. Für eine Verlängerung der Verarbeitungskampagne über den Erntezeitraum hinaus ist eine Lagerung der geernteten Zuckerhirse erforderlich. Ziel ist es deshalb auch, die Anforderungen an die Gestaltung und technische Ausstattung einer Lagerstätte in Abhängigkeit von der Form des Erntegutes zu definieren und den zeitlichen Verlauf der qualitätsbestimmenden Parameter der Zuckerhirse in Lagerungsversuchen zu erfassen. Des Weiteren sollen im Labor und Technikum verschiedene Verfahren des Rohstoffaufschlusses, der Zuckersaftreinigung, -eindickung, Fermentation und Destillation auf ihre Eignung für die Herstellung von Ethanol aus Zuckerhirse untersucht werden. Die Bewertung erfolgt anhand verfahrenstechnischer Kenndaten wie z. B. Stoffströme und soweit möglich Energiebedarf und Kosten. Darüber hinaus sollen auch verschiedene Verwertungswege des anfallenden Nebenprodukts Bagasse betrachtet werden z. B. die Ethanolerzeugung auf der Basis von lignocellulosehaltiger Biomasse „LCB“ oder die Verwendung als Brennstoff.

Die Bagasse weist je nach eingesetzter Ernte- und Verarbeitungstechnik eine unterschiedliche Zusammensetzung auf. Verschiedene Bagassequalitäten sollen im Teilprojekt 3 „Thermische Verwertung von Bagasse“ auf ihre Brennstoffeigenschaften analysiert und in Verbrennungsversuchen am Feuerungsprüfstand eingesetzt werden, um dabei die gas- und staubförmigen Emissionen sowie eine etwaige Neigung zur Schlackebildung zu ermitteln. Zur Bewertung der Bagasse als Brennstoff werden feuerungstechnische Kenngrößen, wesentliche Bestandteile der Elementarzusammensetzung der Baga-

sse und das Ascheschmelzverhalten untersucht. Anhand von Verbrennungsversuchen soll die grundsätzliche Eignung der Bagasse als Brennstoff für moderne Biomassekesselanlagen getestet werden. Neben der Überprüfung der Anlagenfunktion (Brennstoffdosierung, Leistung, Entaschung etc.) werden die Betriebsbedingungen der Kesselanlage, die Leistungsparameter, die feuerungstechnischen Kenngrößen und die Emissionen der Anlage erfasst und dokumentiert.

Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse soll das Gesamtverfahren zur Erzeugung von Ethanol aus Zuckerhirse auf Basis der einzelnen Teilschritte bezüglich ökonomischer Effekte bewertet werden.

3 Stand des Wissens

3.1 Systematik, Herkunft und Bedeutung von Zuckerhirse

Zuckerhirsen (engl. sweet sorghum) werden der Art (sp.) *Sorghum bicolor* (L.) Moench und der Unterart (ssp.) *bicolor* zugeordnet [222]. Sie gehören zu den C4-Pflanzen, sind unter unseren Bedingungen nicht winterhart und werden einjährig angebaut. Als C4-Pflanze besitzen sie einen speziellen Mechanismus der CO_2-Vorfixierung und können deshalb auch bei geringen CO_2-Konzentrationen und nahezu geschlossenen Stomata Photosynthese betreiben. Sie zeichnen sich deshalb durch niedrige Transpirationskoeffizienten, hohe Netto-Assimilationsraten, einen hohen Wärmeanspruch und hohe Toleranz gegenüber Trockenheit aus.

Als Ursprungsland von *Sorghum bicolor* wird Afrika, insbesondere die Region um Äthiopien oder der Sudan angegeben [86] [294]. Von dort aus verbreitete sich die Kultur nach Asien und Europa. Zunächst wurde Sorghum hauptsächlich zur Körnernutzung angebaut. Darin besteht als weltweit fünft-wichtigstes Getreide auch heute noch seine Hauptbedeutung [312]. In die U.S.A. wurden im 19. Jahrhundert aus China spezielle zuckerhaltige Sorten eingeführt [191] und von den Landwirten auf einen hohen Zuckergehalt selektiert und zum Teil auch züchterisch bearbeitet, um Sirup daraus herstellen zu können. Entsprechend dieser Nutzungsausrichtung ist der Begriff „sweet sorghum“ entstanden.

Der Begriff „Zuckerhirse“, wie er im deutschen Sprachgebrauch verwendet wird, entspringt nicht der taxonomischen Einordnung, sondern hat seinen Ursprung in einer Einteilung der Hirsen nach „Nutzungstypen“. Diese Bezeichnung wird in der Praxis oft auch gleichbedeutend mit „Futterhirse“ verwendet, die für die Biogas- oder Futternutzung angebaut wird. Korrekter ist es jedoch, den Zuckerhirsen nur spezielle Sorten zuzuordnen, die sich durch hohe Zuckergehalte im Stängel auszeichnen und deren zuckerhaltiger Saft in der Praxis zumeist für die Sirupherstellung genutzt wird. Nach SARATH et al. (2008) [238] liegen die Zuckergehalte von Zuckerhirse im Bereich zwischen 15 - 23 %, ZEGADA-LIZARAZU et al. (2012) [309] gehen jedoch von ca. 37 % Zucker im Stängel aus. Eine allgemeingültige Definition basierend auf dem Zuckergehalt gibt es nicht.

Für die Vererbung des hohen Zuckergehaltes von Zuckerhirse ist nach BANGARWA et al. (1987) [19] nur ein rezessives Gen verantwortlich. SHIRINGANI (2009) [252] identifizierten jedoch 15 QTL (merkmalsbeeinflussende Genorte) für den Zuckergehalt. Es ist daher wahrscheinlicher, dass es sich bei dem Zuckergehalt um ein polygenes Merkmal handelt.

Intensive Forschungsarbeiten und Züchtungsbemühungen im Bereich Zuckerhirse gibt es in Indien, China und den U.S.A. Dort wird neben dem Anbau zur Sirupherstellung und zur Fütterung auch eine Ausweitung der Ethanolproduktion aus Zuckerhirse angestrebt. In Deutschland gab es bereits in den 1990er Jahren Forschungsaktivitäten zur Nutzung der Zuckerhirse für die Ethanolproduktion [312]. Aufgrund der mangelnden Wirtschaftlichkeit, bedingt durch die damaligen Rohölpreise und den hohen Verlusten bei der Lagerung, wurden diese Bestrebungen jedoch wieder eingestellt.

3.2 Verwertungsmöglichkeiten der Zuckerhirse

Im Unterschied zu einer Nutzung stärkehaltiger Kulturen für die Ethanolproduktion, liegt in der Zuckerhirse der Zucker in direkt vergärbarer Form als Saccharose, Glucose und Fructose vor [268]. Für die Verarbeitung ist dies vorteilhaft, da keine Aufspaltung von Stärke in Zucker notwendig ist. Das bedeutet jedoch auch, dass nach Beerntung der Pflanze der Zucker sehr schnell durch Mikroorganismen abgebaut werden kann und deshalb die Lagerfähigkeit des Erntegutes begrenzt ist.

Nach BLUDAU (1994) [33] kann Zuckerhirse nicht nur als zuckerlieferndes Substrat, sondern genau wie Futterhirse auch als Futterpflanze genutzt werden. Eine Nutzung als Biogassubstrat kommt ebenfalls in Frage. KÖPPEN et al. (2009) [150] geben die in Tabelle 1 aufgeführten, weiteren Nutzungsmöglichkeiten an. Aufgrund etwas geringerer Erträge, höherer Fasergehalte sowie der Gefahr der Entstehung von Blausäure in den Blättern, können derzeit auf vielen Standorten weder Futter- noch Zuckerhirse mit dem Silomaisanbau für Fütterungszwecke oder eine Biogasnutzung ernsthaft konkurrieren. Dennoch ist in Deutschland durch die intensive Biogaserzeugung eine Zunahme der Anbaufläche von Futterhirse zu beobachten. Besonders auf leichten Böden oder in trockenen Gegenden (Maisgrenzlagen) kann diese Kultur eine sinnvolle Ergänzung zu Mais darstellen. Ebenso kann aus Gründen einer gesunden Fruchtfolgegestaltung und z. B. als phytosanitäre Maßnahme bei Maisanbaurestriktionen, der Anbau von Hirse eine Alternative für die Biogassubstratbereitstellung sein [225].

Tabelle 1: Verwertungsmöglichkeiten von Zuckerhirse [150]

Pflanzenteil	Verwertungsmöglichkeit
Korn	Futter, Nahrung, 1. Generation Bioethanol
Saft	Zucker, Sirup, 1. Generation Bioethanol
Bagasse	Futter, Bioenergie, 2. Generation Bioethanol, Kompost, Dünger
Blätter	Futter, Dünger, Bioenergie, 2. Generation Bioethanol

3.3 Zuckerhirseanbau

3.3.1 Standortbedingungen, Anbau und Ertrag

Faktoren wie Standort und Produktionstechnik beeinflussen wesentlich die Ertragsleistung der Zuckerhirse [35]. Als ursprünglich tropische Pflanze stellt Zuckerhirse vor allem an das Klima spezielle Ansprüche. An bayerische Klimabedingungen angepasste Sorten sind derzeit nicht verfügbar. Deshalb sind in Bayern und Deutschland in erster Linie die Temperaturverhältnisse ein begrenzender Faktor für den Zuckerhirseanbau bzw. für maximale Leistungen dieser Kultur. Nur bei ausreichender Temperatursumme kann eine schnelle Keimung und ein optimales Wachstum stattfinden [39]. Für den Anbau von Hir-

se im Allgemeinen geht man von einer minimalen Keimtemperatur von 12 °C aus [138]. ANDA und PINTER (1994) [9] fanden in einem Versuch heraus, dass unter 9 °C keine Versuchspflanze keimte. Die optimale Keimtemperatur liegt nach KANEMASU (1975) [143] bei 23 °C.

Um eine gute Ertragsbildung zu gewährleisten geht LEIBLE (1986) [170] von einer notwendigen Temperatursumme von > 2.000 °C (> 5 °C) aus. Ein optimales Wachstum der Hirse wurde erst bei mittleren Temperaturen von 20 bis 30 °C festgestellt [169]. Bei Temperaturen unter 15 °C traten in Untersuchungen von KRESOVICH (1982) [151] bereits Wachstumsstörungen auf. Anhand dieser Angaben wird deutlich, dass die Temperaturbedingungen in Bayern nicht den Anforderungen für ein maximales Wachstum entsprechen. Folglich kann das volle Ertragspotential dieser Kultur vermutlich nicht ausgeschöpft werden, es sei denn, die Züchtung stellt den hiesigen Bedingungen angepasste Sorten bereit.

Sorghumhirsen im Allgemeinen und somit auch Zuckerhirse sind mit sich selbst verträglich, stellen also keine besonderen Ansprüche an die Fruchtfolge. Die Ansprüche an Boden und Wasserversorgung sind ebenfalls gering. Sorghum gedeiht auf nahezu allen Böden in einem pH-Wert Bereich von 5,5 bis 8,5 und kann sogar auf salzhaltigen oder alkalischen Böden wachsen. Auch Trockenheit wird aufgrund der sehr effektiven Transpirationsrate und xerophytischen Blattcharakteristika, die den Wasserverlust der Pflanze verringern, gut toleriert [294]. Die gute Widerstandsfähigkeit von Sorghum wird auch mit dem sehr tiefgründigen Wurzelsystem in Verbindung gebracht [181]. Nichtsdestotrotz gedeiht Sorghum am besten bei ausreichender Wasserversorgung und auf tiefgründigen Böden, die ein gutes Wasserhaltevermögen besitzen [294]. Für einen angestrebten Trockenmasseertrag von 25 t/ha beziffert SCHÜTTE (1991) [246] den Wasserbedarf auf 650 bis 850 mm in einer Vegetationsperiode, wobei der Hauptwasserbedarf in der Zeit des Massewachstums (Bestockung bis Rispenschieben) liegt.

Als problematisch wird die sehr langsame Jugendentwicklung von Sorghum eingeschätzt. Dies kann zu einem großen Unkrautdruck führen, da die Reihen spät schließen. Bei später Saat kann es vorkommen, dass die eingestrahlte Energie aufgrund noch nicht ausreichend entwickelter Blattfläche nur ungenügend verwertet werden kann. Die maximale Photosyntheserate liegt in den Monaten Juni und Juli. Zu diesem Zeitpunkt sollte ausreichend Blattfläche vorhanden sein, um Ertragseinbußen zu vermeiden [246].

Kenntnisse zum Ertragspotential stellen für die Beurteilung einer „neuen“ Kulturpflanze wie der Zuckerhirse eine wichtige Voraussetzung dar. In der Literatur sind sehr unterschiedliche Angaben zum möglichen Ertragspotential von Zuckerhirse zu finden. Sie variieren je nach Klimabedingungen am genutzten Standort, der verwendeten Sorte, der Nährstoffverfügbarkeit und der angestrebten Verwertungsrichtung (Sirupherstellung, Körnernutzung, Ethanolproduktion) der Zuckerhirse. In Deutschland und Österreich wurden in Versuchen Trockenmasseerträge (TM-Ertrag) bis zu 360 dt/ha erzielt [96]. Ergebnisse weiterer Versuche sind in Tabelle 2 zu finden. Nach Untersuchungen des TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUMS (TFZ) in Straubing und an weiteren Standorten in Bayern sind mit Futterhirsesorten TM-Erträge bis 250 dt/ha möglich [227] [274]. Es hat sich je-

doch gezeigt, dass hohe Erträge nur bei günstigen Witterungsbedingungen und ausreichenden Temperatursummen möglich sind.

Tabelle 2: Zuckerhirseerträge – Literaturangaben

Trockenmasseertrag in dt/ha	Quelle
149 – 210	KIM (1982) [148]
204 – 235	DEMMLER (1984) [71]
180 – 220	WIKLICKY (1984) [299]
bis 150	SCHÜTTE (1991) [246]
130 – 360	EGHBAL (1993) [96]
182 – 290	BOLIK (1994) [39]
86 – 250	ROLLER und STICKSEL (2007) [227]; TFZ (2011) [274]

Für eine Nutzung der Zuckerhirse zur Ethanolproduktion ist nicht nur der Masseertrag, sondern insbesondere der Zuckerertrag von Bedeutung. Als erzielbare Zuckererträge werden für Deutschland 8 bis 10 t/ha [34], für amerikanische Klimaverhältnisse sogar bis zu 13 t/ha [14] angegeben. Die daraus möglichen Ethanolerträge belaufen sich auf ca. 5.000 l/ha [34] bzw. ca. 7.700 l/ha [14]. In einer neueren Literaturstudie zum Thema Energiepflanzenanbau in Europa werden die Ethanolerträge von Zuckerhirse etwas bescheidener auf 4.050 bis 4.300 l/ha geschätzt [287]. Der Energiegewinn (Output minus Input) wird für Zuckerhirse mit 85 bis 400 GJ/ha sogar höher bewertet als der Energiegewinn der Zuckerrübe (45 bis 130 GJ/ha) [287]. Allerdings liegen diesen Angaben Versuchsergebnisse aus Südeuropa zu Grunde, die mit den in Bayern erzielbaren Erträgen nicht vergleichbar sind. Eine Einschätzung der unter hiesigen Bedingungen und mit den verfügbaren Sorten möglichen Zucker- und Ethanolerträge sollen vorliegende Untersuchungen ermöglichen.

Die wichtigste Ursache der relativ großen Schwankungsbreite bezüglich der Trockenmasse- und Zuckererträge in den Literaturangaben, aber auch der Zuckergehalte von Zuckerhirse, wird im Klima- und Sorteneinfluss gesehen [268]. BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] stellen ebenfalls den Standort, aber auch die Produktionstechnik als wesentliche Einflussfaktoren auf die Ertragsleistung der Zuckerhirse dar. Zur Erzielung stabiler und zuverlässiger Zuckerhirseerträge müsste zudem bei der Züchtung eine Kombination der Eigenschaften Frühreife, Kältetoleranz sowie die Maximierung von Ertrag und Zuckergehalt realisiert werden.

3.3.2 Wertbestimmende Inhaltsstoffe von Zuckerhirse

Wichtigster Inhaltsstoff im Zuckerhirseanbau ist der Zucker. BOLIK (1994) [39] zeigte, dass unter den klimatischen Bedingungen Deutschlands Zuckergehalte von 7 bis 10 % in

der Frischmasse möglich sind. Bei einem durchschnittlichen TM-Gehalt von 26 % entspricht das einem Zuckergehalt von 29 bis 38 % in der Trockenmasse. BLUDAU und STREHLER (1992) [34] ermittelten Zuckergehalte von 32 bis 39 % i.d. TM, LEIBLE und KAHNT (1991) [171] geben Zuckergehalte von 31 % i.d. TM in der Ganzpflanze an. KRESOVICH (1981) [151] beziffern mögliche Zuckergehalte zwischen 35 und 50 % i.d. TM. Bei dem Maximum von 50 % handelt es sich allerdings nicht um einen für deutsche Standorte realistischen Wert. Des Weiteren ist nicht ersichtlich, ob sich die Angaben auf Zuckergehalte im Stängel oder in der Ganzpflanze beziehen.

Bei der Gewinnung von Kristallzucker ist ein hoher Anteil an Saccharose erwünscht, da Saccharose leichter kristallisiert als Glucose und Fructose. Bei der Herstellung von Sirup verhält es sich genau umgekehrt, da die Kristallisation bei der Sirupherstellung ein negatives Qualitätsmerkmal darstellt [64]. Für die Produktion von Ethanol ist vor allem ein hoher Gesamtzuckergehalt entscheidend, dem Zuckermuster kommt eine geringere Bedeutung zu [33]. Aus einer Tonne Saccharose können entsprechend der Stoffbilanz theoretisch 0,68 m³ Ethanol und aus 1 t Glucose und Fructose 0,65 m³ Ethanol erzeugt werden [280]. Mit reiner Saccharose können somit ca. 5 % mehr Ethanol produziert werden als bei einer Vergärung von Monosacchariden [11]. Ein hoher Anteil an Saccharose bezogen auf den Gesamtzuckergehalt ist folglich nicht unbedingt erforderlich, wirkt sich aber günstig auf die mögliche Ethanolausbeute aus. Nach den in Deutschland vorherrschenden Bedingungen besteht der Zuckerertrag der Zuckerhirse zu 50 bis 70 % aus Saccharose. Saccharose ist das Haupt-Nichtstrukturkohlehydrat im Sorghum-Stängel [5] und von C4-Pflanzen im Allgemeinen [104]. Die Monosaccharide Glucose und Fructose bilden den verbleibenden Teil des Zuckerertrages [10] [38] [100].

Durchschnittliche Gehalte weiterer wichtiger Stoffgruppen in Zuckerhirse, die z. B. den Gärverlauf beeinflussen können (Protein: Stickstoff-Quelle für mikrobielles Wachstum [139]) oder auch bei einer Verwertung der Bagasse zur Erzeugung von Alkohol (Cellulose) oder Biogas (z. B. Hemicellulose) bedeutend sein können, sind in Tabelle 3 dargestellt. Zu den N-freien Extraktstoffen gehören Zucker (Mono- und Disaccharide), Stärke, Cellulose und Hemicellulose. Der Rohfasergehalt, der von BRYAN et al. (1985) [46] mit einer Veränderung des Abpressgrades bei der Saftpressung in Verbindung gebracht wird, besteht vor allem aus Cellulose und dem mikrobiell nicht abbaubaren Lignin.

Tabelle 3: Wertbestimmende Inhaltsstoffe in der Gesamtpflanze von erntereifer Zuckerhirse

Inhaltsstoff	Gehalt in % i.d. TM	Quelle
Gesamtzucker	29 – 50	BOLIK (1994) [39], BLUDAU (1992) [35], LEIBLE (1991) [171], KRESOVICH (1981) [151]
Rohasche	4 – 7	BLUDAU (1992) [35], KIM et al.(1982) [148]
Rohprotein	6 – 11	BLUDAU (1992) [35], KIM et al.(1982) [148]
Rohfett	1 – 2	BLUDAU (1992) [35], KIM et al.(1982) [148]
Rohfaser	27 – 33	BLUDAU (1992) [35], KIM et al.(1982) [148]
N-freie Extraktstoffe	48 – 57	BLUDAU (1992) [35], KIM et al.(1982) [148]

3.3.3 Wachstumsverlauf und Stoffbildung

Für eine Optimierung des Zuckerhirseanbaus sind Informationen zum Wachstums- bzw. Ertragsverlauf nötig. Das Reifeverhalten der Pflanze bestimmt den optimalen Erntezeitpunkt und damit auch die mögliche zeitliche Ausdehnung der Ernte- und Verarbeitungskampagne, was wiederum die Wirtschaftlichkeit des Zuckerhirseanbaus zur Ethanolproduktion beeinflusst [35] [268]. Diesbezüglich stellt der Gesamtzuckerertrag das entscheidende Kriterium für die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunktes und die Verlängerung des Erntezeitraums dar, da er den erzielbaren Ethanolertrag bestimmt [33].

Die Untersuchungen von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] zeigen, dass bis ca. Anfang Oktober eine deutliche Erhöhung des Trockenmasseertrages und des Zuckergehaltes möglich ist (Abbildung 1). Maximale Zuckererträge werden, bedingt durch den kontinuierlichen Anstieg des Trockenmasseertrages und des Zuckergehaltes, ebenfalls erst ab Oktober erreicht, wenn das Wachstum der Pflanzen weitgehend abgeschlossen ist (Abbildung 2). Unter bayerischen Langtagsbedingungen ist zu beobachten, dass Zuckerhirsen oft nicht oder sehr spät zur Blüte kommen bzw. keinen Kornansatz erreichen. Somit kann die Rispe nicht als Senke für Assimilate wirksam werden und die Zuckerakkumulation in der Restpflanze nicht reduzieren. Von solch einer Reduktion des Zuckergehaltes nach Einsetzen der Kornbildung wird in Untersuchungen aus anderen Klimaregionen berichtet. Nach Ergebnissen von ALMODARES (2007) [4] wird ein Maximum an Kohlenhydraten im Stängel kurz nach der Blüte erreicht. Im Gegensatz dazu berichtet BOLIK (1994) [39] von einer deutlichen Erhöhung der Zuckermenge pro Pflanze zwischen Blüte und Kornreife, obwohl die Zuckereinlagerung im Stängel parallel zur Kornbildung verläuft und sowohl Rispe als auch Stängel um Assimilate konkurrieren. PETRINI et al. (1993) [213] schlussfolgern, dass die Zuckerbereitstellung in der Zuckerhirse höher ist als der Bedarf bzw. die Einlagerung für die Assimilatsenke während der Kornreifung.

Diese Unterschiede in den Literaturangaben können auf Sorten- oder Standortbedingungen zurückzuführen sein. Wie sich die Entwicklung des Zuckergehaltes unter hiesigen Bedingungen mit dem momentan verfügbaren Sortenmaterial darstellt, bleibt zu prüfen.

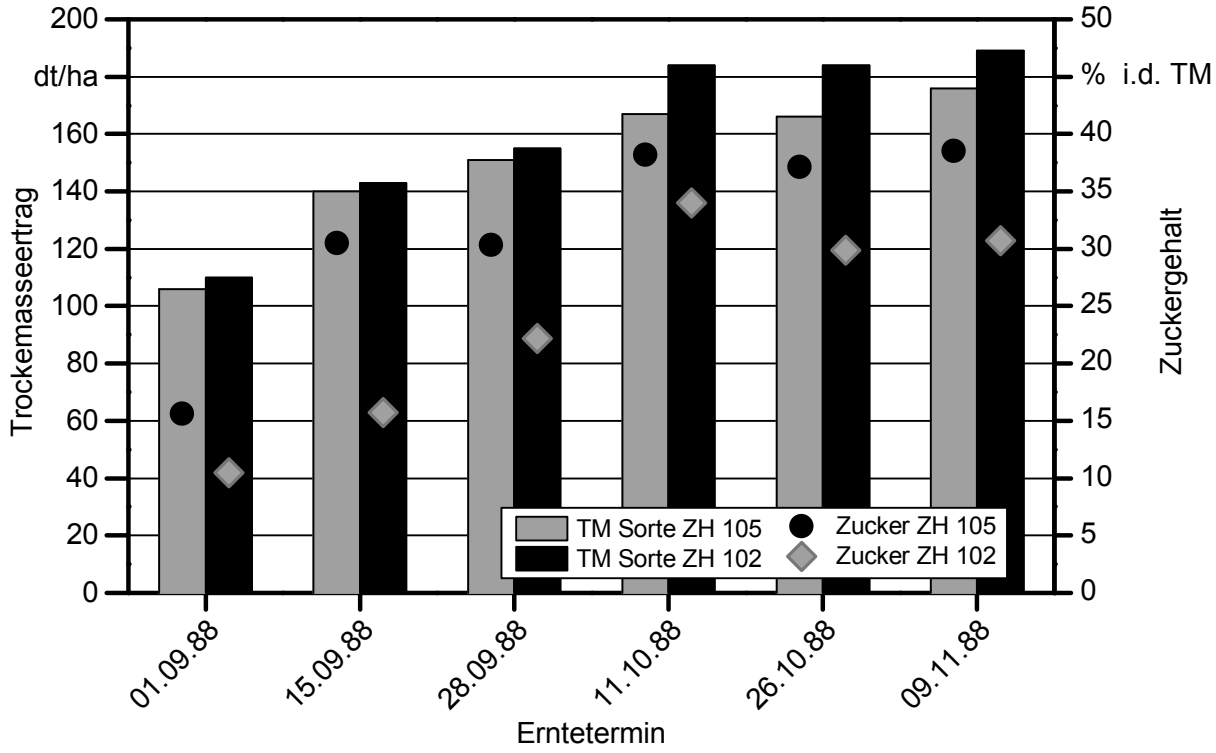


Abbildung 1: Entwicklung des Trockenmasseertrages und des Zuckergehaltes zweier Zuckerhirsesorten nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35]

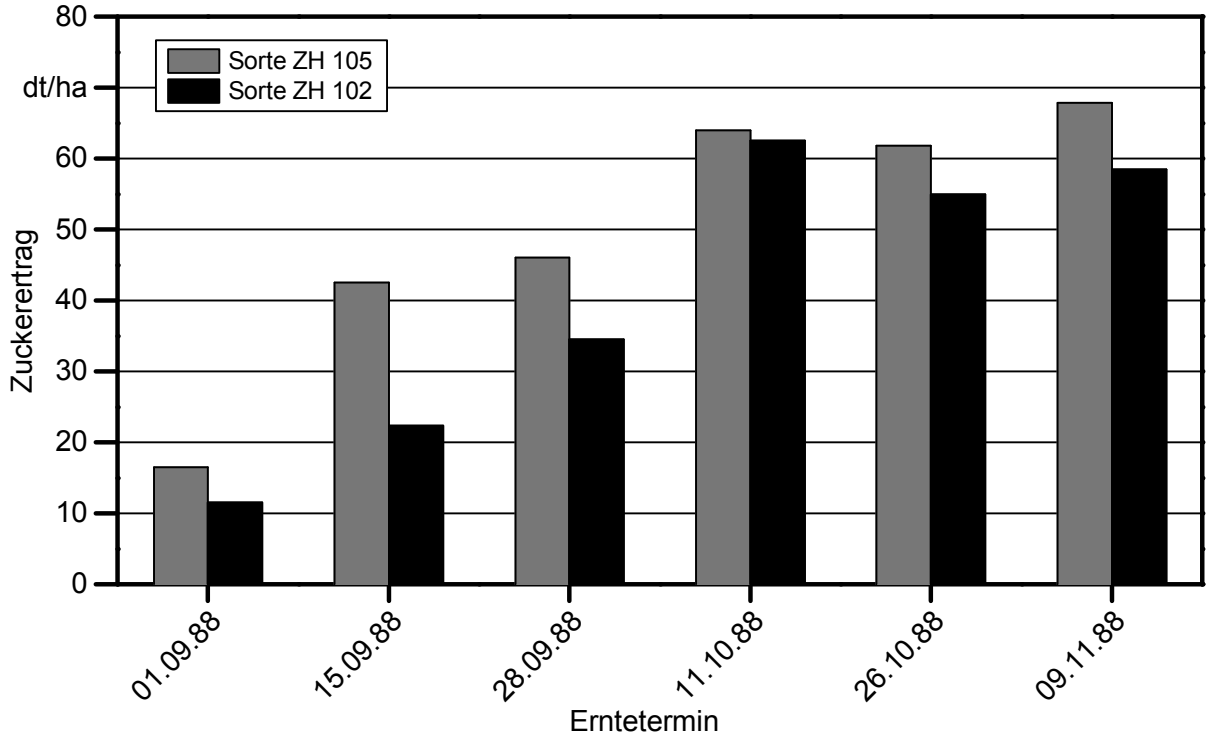


Abbildung 2: Entwicklung des Zuckerertrages zweier Zuckerhirsesorten nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35]

Hinsichtlich der Zusammensetzung des Zuckermusters ist ebenfalls ein deutlicher Einfluss des Erntezeitpunktes festzustellen. Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, verändern sich mit fortschreitender Vegetation die Glucose- und Fructoseanteile kaum, ihr Anteil am steigenden Gesamtzuckergehalt nimmt damit aber ab. Der Saccharoseanteil steigt dagegen deutlich an. Da die Zunahme des Zuckergehaltes also primär aus dem steigenden Saccharoseanteil resultiert, wird im vorhandenen Saccharoseanteil ein Indikator für den Reifegrad der Zuckerhirse gesehen, wobei es in diesem Zusammenhang Sorteneigenschaften zu berücksichtigen gilt [32].

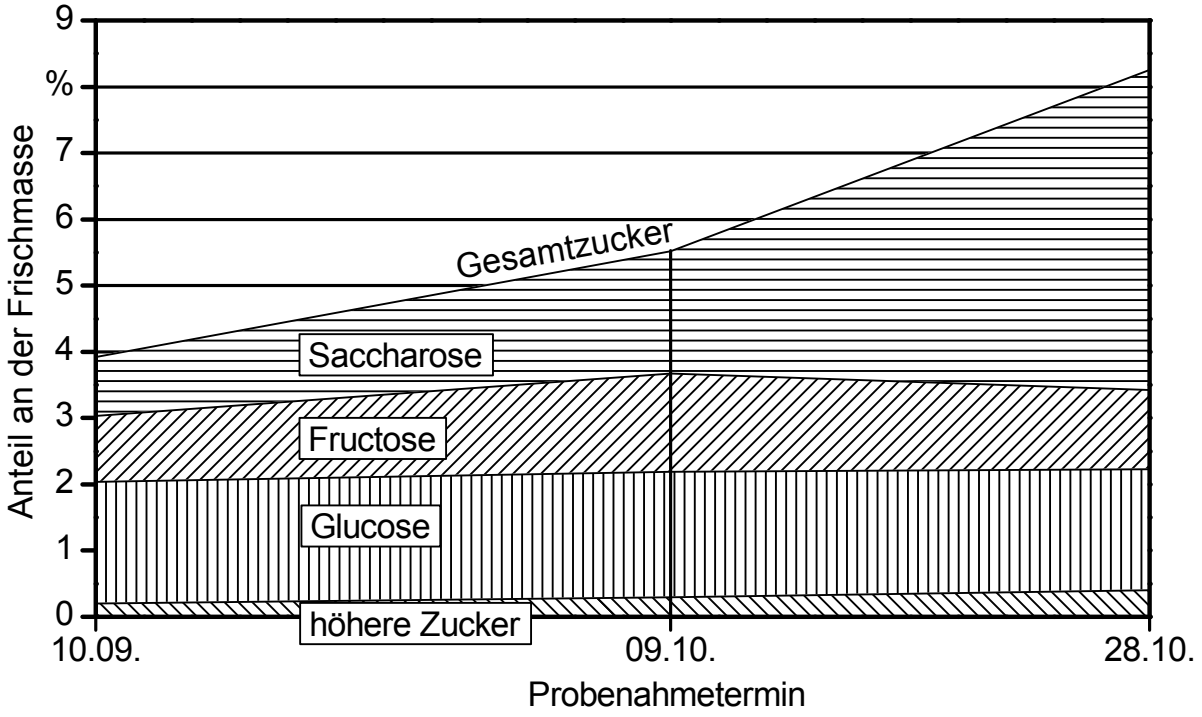


Abbildung 3: Verlauf von Gesamtzucker, Saccharose-, Fructose- und Glucoseanteil von Zuckerhirse, verändert nach BLUDAU (1994) [33]

3.3.4 Morphologie der Zuckerhirsepflanze

Der oberirdisch aufwachsende Teil der Zuckerhirse wird nach BLUDAU (1987) [32] in Stängel, Blatt und Rispe unterteilt. Der prozentuale Anteil dieser drei Komponenten am Frischmasse- (FM-Ertrag) und Trockenmasseertrag (TM-Ertrag) wird von den Faktoren Bestandesdichte, Sorte und Erntezeitpunkt beeinflusst. Tabelle 4 zeigt diesbezüglich die möglichen Spannweiten der Werte. Es handelt sich dabei um Angaben aus Australien [260] [261], Italien [24], den U.S.A. [151] und um Untersuchungen an Futtersorten aus Deutschland [148]. Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass der Stängel die wichtigste Komponente für den Masseertrag der Zuckerhirse darstellt.

Tabelle 4: Masseanteile von Stängel, Blatt und Rispe am Frischmasse- und Trockenmasseertrag von erntereifer Zuckerhirse – Wertebereich verschiedener Literaturangaben [24] [148] [151] [260] [261]

Pflanzenteil	Anteil an der	
	Frischmasse in %	Trockenmasse in %
Stängel	59 – 80	54 – 81
Blatt	15 – 35	17 – 36
Rispe	1 – 15	1 – 17

Die Zuckergehalte des Stängels, der Blätter und Rispen variieren ebenfalls stark. Die von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] ermittelten Zuckergehalte lagen bei 44,2 % i.d. TM im Stängel, 10,4 % i.d. TM in den Blättern und 5,8 % i.d. TM in der Rispe wie Tabelle 5 zeigt.

Aus verfahrenstechnischer Sicht ist die Kenntnis der Zusammensetzung des Zuckerertrages von Zuckerhirse, unterteilt nach Pflanzenfraktionen, von Interesse. Wie in Tabelle 5 dargestellt, beinhalten die Stängel durchschnittlich 93,8 % des Zuckerertrages. Dagegen ist der Anteil von Blättern und Rispen am Zuckerertrag relativ gering. Angesichts der anteiligen Zusammensetzung von Masse- und Zuckerertrag aus den drei genannten Komponenten stellt sich in Bezug auf die Durchführung des Erntevorgangs und der sich anschließenden Verarbeitung von Zuckerhirse die Frage, ob der gesamte oberirdische Aufwuchs geerntet werden muss, oder ob in Anlehnung an die Zuckerrohrernte Pflanzenteile mit geringerem Zuckergehalt (Rispe, Blätter) schon bei der Ernte abgetrennt werden sollten [35]. Auf diese Weise müssen insgesamt geringere Massen transportiert werden und die auf dem Feld verbleibenden Reststoffe können als Gründünger wirken. Allerdings entfällt dadurch auch die energetische Nutzung dieser Pflanzenteile (z. B. zur Bereitstellung von Prozessenergie bzw. Feuerung in einem Heizwerk). Deshalb ist eine Abwägung der Vor- bzw. Nachteile eines solchen Vorgehens erforderlich und zwar abgestimmt auf die gesamte Verfahrenskette (Ernte, Transport, Lagerung, Verarbeitung) und die verwendete Verarbeitungstechnik.

Tabelle 5: Anteile von Stängeln, Blättern und Rispen am Gesamtertrag der Zuckerhirse nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35]

Pflanzenanteil	Zuckergehalt in % i.d. TM	Anteil am Ertrag in % i.d. TM	Zuckerertrag in % i.d. TM
Stängel	44,2	75,2	93,8
Blätter	10,4	17,4	5,1
Rispen	5,8	7,4	1,1

3.3.5 Sortenwahl

Da Sorghum als C4-Pflanze einen hohen Wärmebedarf hat, der unter den klimatischen Bedingungen in Süddeutschland nur bedingt gegeben ist, ist die Wahl geeigneter Sorten ein maßgebender Faktor für den Erfolg des Zuckerhirseanbaus. Ein guter Feldaufgang, hohe Kühletoleranz und eine rasche Jugendentwicklung sind speziell in unserer Klimaregion sehr wichtig. Geeignete Zuckerhirsesorten sollten für den Anbau zur Ethanolproduktion in Bayern zudem ein hohes Zuckerertrags-Potenzial aufweisen, da der Zuckerertrag für den Ethanolertrag entscheidend ist [268]. Im Hinblick auf Ernte und Transport sind Sorten von Vorteil, mit denen ein hoher Zuckerertrag durch hohe Zuckergehalte bei geringem Wassergehalt erzielt wird. Eine verlustarme und problemlose Ernte wird durch standfeste Sorten ermöglicht. Generell werden Ernte und Verarbeitung durch Sorten erleichtert, die steril sind oder eine nur schwache Kornausbildung zeigen. In Form von Stärke sind die gebundenen Kohlehydrate entweder für den Prozess verloren oder müssen durch zusätzliche Prozessschritte aufgeschlossen werden und erschweren somit die Prozessführung. Bei den zurzeit verfügbaren Sorten stellt dies jedoch selten ein Problem dar, da das Reifestadium der Kornausbildung und Stärkeeinlagerung meist nicht erreicht wird. Speziell für deutsche Bedingungen gezüchtete Zuckerhirsesorten sind derzeit nicht auf dem Markt.

3.4 Ernte von Zuckerhirse

Für eine wirtschaftliche Nutzung der Zuckerhirse als Rohstoff zur Ethanolproduktion und Festbrennstoffbereitstellung wird eine möglichst verlustarme Ernte des Massen- und Zuckerertrages vorausgesetzt [33]. Damit eine hohe Auslastung von Ernte-, Transport- und Saftaufbereitungsgeräten erreicht werden kann, wird eine möglichst lange Erntekampagne angestrebt. Der Bedarf an nötigen Maschinenkapazitäten und das dafür erforderliche Kapital sind umso geringer, je länger die Erntekampagne angelegt werden kann. Einer möglichst langen Erntekampagne stehen bei frühem Erntebeginn niedrigere Zuckererträge entgegen und bei spätem Abschluss der Erntearbeiten drohen ungünstige Witterungsbedingungen (Niederschläge, Frost).

3.4.1 Erntezeitraum

Neben der Ertragshöhe stellt die mögliche Dauer der Erntekampagne ein wesentliches Kriterium für die Zuckerhirsenutzung dar. Durch sie wird die Dauer der Verfügbarkeit des Rohstoffes maßgeblich bestimmt [35]. Der Verlauf der Ertragsbildung gegen Ende der Vegetationsperiode ist für den Zeitpunkt und die Ausdehnung der Ernte als entscheidend zu betrachten [33]. Nach STREHLER et al. (1987) [268] ergibt sich der optimale Erntezeitraum als Kompromiss aus dem Wunsch nach hohen Zuckererträgen, einer langen Erntekampagne und guten Witterungsbedingungen zur Ernte. Gegen Ende der Vegetationsperiode findet noch eine erhebliche Zuckerbildung statt. Dies ist in Abbildung 2 auf Seite 39 und in Abbildung 3 auf Seite 40 dargestellt. Deshalb kann die Ernte der Zuckerhir-

se frühestens ab Mitte September beginnen. Eine frühzeitige Ernte bedeutet einen Verzicht auf Ertrag und somit Einnahmen. Der günstigste Zeitraum für die Ernte von Zuckerhirse hinsichtlich Ertragsverlauf und erzielbarem Zuckerertrag ist von Mitte Oktober bis Mitte November (vgl. Abbildung 2 auf Seite 39). Nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] birgt die Ausdehnung der Ernte bis in die zweite Novemberhälfte hinein ein erhebliches Wetterrisiko, nachdem die Befahrbarkeit der Felder stark eingeschränkt sein kann und es durch Abfrieren und/oder stürmische Witterung zu einem Abknicken und Lagern der Pflanzen kommen kann. Zur Vermeidung einer Ernte unter erschwerten Bedingungen, verbunden mit Ertragsverlusten, sollte die Ernte der Zuckerhirse auf den meisten süddeutschen Standorten bis Mitte November abgeschlossen sein. Für die Durchführung der Ernte steht ein Zeitfenster von maximal etwa sechs Wochen zur Verfügung. In diesem Zeitraum können witterungsbedingt wiederum nur wenige Tage tatsächlich zur Ernte genutzt werden. Im Zusammenhang mit der Haltbarkeit des gewonnenen Erntegutes resultiert aus dieser Zeitspanne, ob im Erntezeitraum eine kontinuierliche Rohstoffverarbeitung möglich ist und von welchem Verarbeitungszeitraum insgesamt ausgegangen werden kann.

3.4.2 Erntetechnik

Anforderungen

Für die Nutzung von Zuckerhirse als zuckerliefernder Rohstoff zur Ethanolproduktion geht es bei der Ernte primär darum, die Stängel vollständig zu erfassen, nachdem dieser Pflanzenteil zum Gesamtzuckerertrag einen Anteil von über 90 % liefert. Bei der Ernte der Zuckerhirse ist deshalb auf einen tiefen Schnitt der Stängel knapp über der Bodenoberfläche zu achten. Eine unvollständige Ernte der Stängel kann zu überproportional hohen Verlusten am Zuckerertrag führen. Der Beitrag von Blättern und Rispen zum Zuckerertrag kann dagegen vernachlässigt werden. Durch den Verbleib dieser beiden Pflanzenkomponenten auf dem Feld kann der geerntete Massenertrag deutlich reduziert werden. Die zu transportierende und zu verarbeitende Erntemasse lässt sich um 18 % verringern, der Gesamtzuckerertrag sinkt aber nur um 5 %. Auf diese Weise können Kosten bei Transport und Verarbeitung eingespart werden, allerdings geht damit auch der Verzicht auf einen Anteil erntefähiger Trockenmasse in Form von Bagasse einher, die energetisch genutzt werden kann [35] (vgl. Kapitel 3.2 Verwertungsmöglichkeiten der Zuckerhirse auf Seite 34).

Nach STREHLER et al. (1987) [268] ist es für die Verarbeitung von besonderer Bedeutung, dass die Zuckerhirse den Zucker in direkt vergärbarer Form – als Saccharose, Glucose, Fructose – enthält. Das Erntegut ist deshalb aber nur begrenzt lagerfähig. Zur Vermeidung von Lagerverlusten ist eine unverzügliche Haltbarmachung oder Verarbeitung erforderlich. Aus diesem Grund muss das Ernteverfahren bezüglich der Leistungsfähigkeit den nachfolgenden Verarbeitungsschritten angepasst sein. Die Beschaffenheit des Erntegutes sollte eine Zwischenlagerung zur Überbrückung von Schlechtwetterperioden, Feiertagen oder technischen Störungen ohne hohe Zuckerverluste ermöglichen.

Maschinen zur Ernte von Zuckerhirse

Nachdem die Zuckerhirse Ähnlichkeiten mit Mais und Zuckerrohr aufweist, geht BLUDAU (1994) [33] davon aus, dass die bei diesen Kulturen eingesetzten Erntetechniken grundsätzlich auch für die Zuckerhirse genutzt werden können. Mähbinder, Zuckerrohrernter und Feldhäcksler kommen nach KRESOVICH (1981) [151] und RICAUD et al. (1981) [220] für die Ernte der Zuckerhirse in Frage.

Aus Italien sind zwei Prototypen für Erntemaschinen bekannt, die speziell für die Ernte von Zuckerhirse entwickelt wurden. Mit der von der Firma Pasquali (Florenz) entwickelten selbstfahrenden Erntemaschine wird die Zuckerhirsepflanze entblättert in Form von unzerkleinerten Stängeln hinter der Maschine am Boden abgelegt [117] [210]. Mit dem an einem Schlepper im Heck angebauten „Otma“ Prototyp der Firma Spapperi (Perugia) werden Stängelstücke erzeugt [210]. Aufgrund der unzureichenden Flächenleistungen von 0,11 ha/h (Pasquali) bzw. 0,05 ha/h (Spapperi) wurden diese beiden Prototypen aber nicht weiterentwickelt [210]. In den U.S.A. wurde von LAMB et al. (1982) [160] sowie NUESE und HUNT (1983) [198] ein Zuckerhirsesafternter entwickelt. BELLMER und HUHNKE (2007) [27] verwenden zur Ernte von Zuckerhirse ebenfalls eine Maschine zur Stängelentsaftung am Acker.

Beim Einsatz der beschriebenen Erntetechniken fallen Biomassefraktionen an, deren Bergung vom Acker mit der vorhandenen Ausstattung nicht möglich ist. Der Zuckerrohrernter liefert als Nebenprodukt die vom Stängel abgetrennten Blätter und Rispen, der Safternter erzeugt bei der Stängelpressung das Nebenprodukt Bagasse. Einen Überblick gibt Abbildung 4.

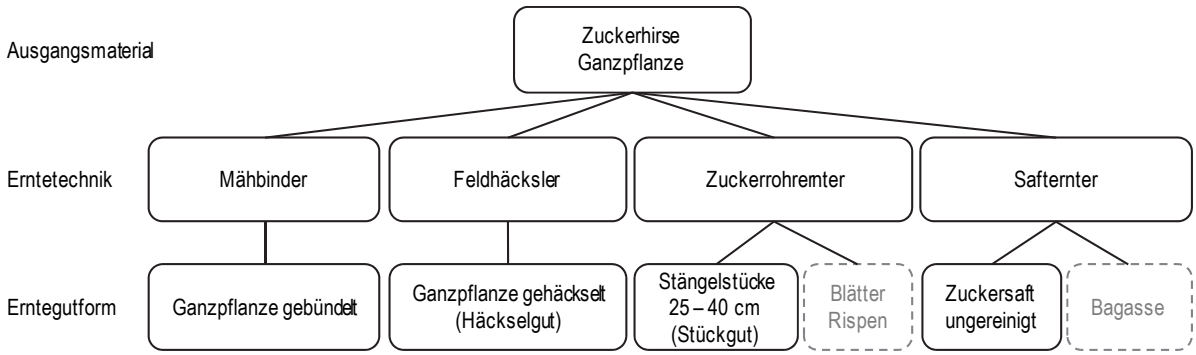


Abbildung 4: Erntetechniken und Erntegutformen für Zuckerhirse im Überblick

Mähbinder

Mit einem Mähbinder werden die Pflanzen knapp über dem Boden abgeschnitten und mehrere unzerkleinerte Pflanzen zu einem Bündel zusammengebunden. Der Mähbinder stellt grundsätzlich ein mögliches Erntegerät für die Zuckerhirse dar, weil die unzerkleinerte Ganzpflanze bzw. langstieliges Erntegut länger ohne größere Zuckerverluste lagerfähig ist als gehäckseltes Material [31] [99]. Nachdem das Abtrennen von Blättern und

Rispen nicht durchführbar ist, bedingt die Verwendung des Mähbinders den Anbau steriler Sorten, weil es ansonsten zu Problemen bei der Ethanolproduktion durch die stärkehaltigen Körner kommt [32] [268]. In Italien wurde versuchsweise ein selbstfahrender Mähbinder des Herstellers Tanesini für die Ernte von Zuckerhirse eingesetzt. Mit diesem Prototyp konnte jedoch nur eine Flächenleistung von 0,08 ha/h erreicht werden [208] [210]. Nachdem zum Einsatz dieser Maschine vier Arbeitskräfte nötig waren, wurde dieses Verfahren infolge der hohen Personalkosten wieder aufgegeben [24] [210]. Die Möglichkeit des Einsatzes dieser Technik zur Ernte von Zuckerhirse ist nach BLUDAU (1994) [33] dennoch in die Überlegungen zur Auswahl eines geeigneten Ernteverfahrens für diese Kulturpflanze mit einzubeziehen, weil unzerkleinerte Ganzpflanzen oder Stängel gegenüber anderen Formen des Erntegutes die beste Lagerfähigkeit aufweisen. Dies ist für eine beabsichtigte Produktion von Ethanol aufgrund der deutlich geringeren Zuckerverluste von sehr großer Bedeutung.

Zuckerrohrernter

Für die Ernte von Zuckerhirse kommen nach DOBBS (1984) [87] nur solche Zuckerrohrernter in Frage, mit denen auch grüne und lagernde Pflanzen geerntet werden können. Bei der durchgeführten Recherche wurden als Hersteller von prinzipiell für Zuckerhirse geeignet erscheinende Zuckerrohrerntern die Unternehmen AGCO-MF (U.S.A.) [2], CASE IH-AUSTOFT (BRA-AUS) [54], JOHN DEERE-CAMECO (U.S.A.) [134] und CLAAS (D) [61] ermittelt.

Bei der Zuckerrohrernte wird das Zuckerrohr in ca. 35 cm lange Stücke (30 – 40 cm) geschnitten [31]. Ähnlich wie ganze Pflanzen sind diese Stängelstücke länger ohne größere Zuckerverluste lagerfähig als gehäckseltes Material [41] [97]. Der Forderung nach einer möglichst verlustarmen Ernte des Massen- und Zuckerertrages der Zuckerhirse kann durch den Einsatz eines Zuckerrohrernters nachgekommen werden. In Österreich und Italien wurde der Zuckerrohrernter CC 1400 der Firma CLAAS bei mehreren Versuchseinsätzen erfolgreich zur Ernte von Zuckerhirse eingesetzt [61] [210] [236] [277]. Des Weiteren kam in den U.S.A. ein Zuckerrohrernter für Zuckerhirse zum Einsatz [98] [220]. Entsprechend der Erfahrungen in Österreich zur Zuckerhirseernte mit einem Zuckerrohrernter bei einem Frischmasseertrag von 70 bis 100 t/ha wird die durchschnittliche Flächenleistung von STREHLER et al. (1987) [268] auf 1,1 ha/h geschätzt. Bei Versuchen mit derselben Maschine konnte in Italien eine Fläche von 0,77 ha/h geerntet werden [209] [210], den Angaben von GRASSI et al. (2002) [116] zufolge ist eine Flächenleistung von etwa 1,0 ha/h zu erwarten.

Feldhäcksler

Für die Ernte von Zuckerhirse sind prinzipiell Feldhäcksler geeignet, mit denen stängeliges Material wie Mais geerntet werden kann [87] [151] [220] [236] [277]. Die Verfahrensketten der Silomaisernte stehen theoretisch somit auch für eine Nutzung bei der Zuckerhirse zur Verfügung. Diese Technik kann als ausgereift bezeichnet werden und ist in verschiedenen Bauformen und Leistungsklassen verfügbar. Zur Ernte von Zuckerhirse sind spezielle Maishäcksler und Universalhäcksler mit Maisschneidwerk geeignet. Reihenun-

abhängige Häcksler, die für den dichten Zuckerhirsebestand mit vielen Bestockungstrieben gut geeignet erscheinen [268], sind bei überbetrieblichem Maschineneinsatz zur Silomaisernte als Stand der Technik anzunehmen [179]. Bei der Zuckerhirseernte mit Feldhäckslern wird die durchschnittliche Flächenleistung von STREHLER et al. (1987) [268] auf 1,5 bis 2 ha/h geschätzt. Dies entspricht dem Leistungsniveau der überbetrieblich durchgeführten Silomaisernte [179]. Aus der angeführten Flächenleistung resultieren für die Zuckerhirse wiederum hohe Anforderungen an die Organisation der Erntegutabfuhr. Erntekosten für Zuckerhirse sind in ähnlicher Höhe zu erwarten wie bei Silomais [33] [268], aktuell etwa 130 bis 250 Euro/ha [157]. Als Hauptproblem bei der Ernte von Zuckerhirse mit Feldhäckslern ist die geringe Lagerfähigkeit des Ernteguts anzuführen [116]. Dies liegt an der großen Oberfläche des produzierten Materials, das infolge von Häcksellängen zwischen 30 bis 40 mm gegenüber unzerkleinerten Zuckerhirsepflanzen eine deutlich geringere Haltbarkeit aufweist [33] [268].

Safternter

Bei der Durchführung der Zuckerhirseernte mit den bereits beschriebenen Maschinen muss die gesamte Erntemenge zur Saftgewinnung in eine zentrale oder dezentrale Verarbeitungsanlage transportiert werden [268]. Mit einem Safternter werden dagegen Ernte und Saftgewinnung in einem einzigen Arbeitsgang durchgeführt. Indem der zuckerhaltige Saft direkt beim Erntevorgang aus der Zuckerhirsepflanze gewonnen wird und der anfallende Pressrückstand (Bagasse) auf dem Feld verbleibt, wird in erster Linie das Ziel verfolgt, Transportkosten einzusparen [33]. Von LAMB et al. (1982) [160] und NUESE und HUNT (1983) [198] wurden aus gezogenen Maishäckslern Safternter für Zuckerhirse entwickelt, indem Häckselaggregat und Auswurf durch Beschickungs- und Pressvorrichtungen ersetzt wurden. Dabei handelt es sich um eine Drei-Walzen-Presse mit hydraulisch regelbarem Antrieb der Presswalzen sowie Sammel- und Reinigungseinrichtungen für den gewonnenen Presssaft. Die mögliche Flächenleistung dieser Safternter lag aufgrund niedriger Vorfahrtgeschwindigkeiten nur bei knapp 0,1 ha/h [268]. Nachdem mit den Safterntern nur Abpressgrade unter 25 % erreicht werden konnten, wurde weniger als 30 % des in den Pflanzen vorhandenen Zuckers gewonnen. Mit stationären mehrstufigen Anlagen oder einer Extraktion mit Wasser ist es dagegen möglich, mehr als 90 % des Zuckers aus der Zuckerhirse zu gewinnen [236]. Safternter mit den beschriebenen Eigenschaften sind angesichts des relativ kurzen Erntezeitraums sowie der niedrigen Extraktionswirkungsgrade und den daraus resultierenden hohen spezifischen Kosten als nicht praxistauglich einzustufen [268]. Beim Verfahren von BELLMER und HUHNKE (2007) [27] zur Saftgewinnung aus Zuckerhirse wird der Zuckersaft während des Erntevorgangs gepresst und in einem auf der Maschine mitgeführten Behälter zwischengelagert. In größeren Behältern erfolgen die Lagerung und die unkontrollierte Fermentation des unbehandelten Zuckersaftes, entweder In-Field auf dem Acker oder „On-farm“ auf dem landwirtschaftlichen Betriebsgelände bzw. andernorts.

3.4.3 Ernteverluste

Bei der Ernte von Zuckerhirse entstehen kaum vermeidbare Verluste durch auf dem Feld verbleibende Stoppeln – unabhängig von der eingesetzten Erntetechnik. Des Weiteren kommt es zu Verlusten, wenn Blätter und Rispen abgetrennt werden sollen [35]. Dabei handelt es sich in erster Linie um Verluste an Frisch- und Trockenmasse, nicht an Zucker, wie bereits angeführt in Tabelle 4 auf Seite 41.

Bei der Durchführung der Zuckerhirseernte mit Feldhäckslern verbleiben nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] bei Schnitthöhen von 9 bis 14 cm mit den Stoppeln etwa 5 bis 11 % der aufgewachsenen Frisch- bzw. Trockenmasse und etwa 6 bis 9 % des Zuckerertrages auf dem Feld. Die Verluste erhöhen sich dabei linear mit der Schnitthöhe.

Das Abtrennen der Rispen zielt auf eine Erleichterung der Verarbeitung und eine Reduzierung der Erntemenge ab. Nachdem die Wuchshöhe der Pflanzen stark schwankt, ist es technisch nicht möglich, die einzelnen Rispen am Stängelende abzutrennen. Deshalb muss der gesamte Zuckerhirsebestand beim Erntevorgang auf einer bestimmten Höhe gekappt werden. Damit werden je nach Köpfhöhe entweder nicht alle Rispen entfernt oder es werden auch Stängelteile abgetrennt. Beim Abschneiden der Pflanzen 50 cm unterhalb der maximalen Wuchshöhe wurden Ertragsverluste an Frischmasse von etwa 3 bis 5 %, an Trockenmasse von etwa 6 bis 9 % und an Zucker von etwa 1 % festgestellt [35]. Beim Köpfen der Zuckerhirsepflanzen in einer einheitlichen Höhe entstehen durch die teilweise auch abgetrennten oberen Stängelabschnitte also keine nennenswert höheren Zuckerverluste. Eine Anpassung der Köpfhöhe an die Verhältnisse des jeweiligen Bestandes ist hierbei erforderlich.

3.5 Transport-, Lager- und Umschlagtechnik

In Abhängigkeit von der eingesetzten Erntetechnik (Mähbinder, Zuckerrohrernter, Feldhäcksler, Safternter) wird Zuckerhirse in verschiedenen Aufbereitungsformen mit jeweils unterschiedlichen Anforderungen an die Transport- und Umschlagtechnik erzeugt (vgl. Tabelle 6).

In Deutschland ist die erforderliche Transport- und Umschlagtechnik für die vorgestellten Aufbereitungsformen verfügbar, mit Ausnahme für das vom Zuckerrohrernter erzeugte Stückgut. Für den Umschlag von Stückgut müsste ähnliche und verfügbare Fördertechnik aus den Bereichen Getreide und Kartoffeln auf die speziellen Anforderungen des Zuckerhirsestückguts angepasst werden.

Von DÖRING und SCHLEICHER (2010) [90] wurden unterschiedliche Verfahrensalternativen für Biomassetransporte (Silageernteketten) eingehend beschrieben und verglichen. Die Auswahl der Transporttechnik ist im Einzelfall in Abhängigkeit von den tatsächlich existierenden Rahmenbedingungen (Erntegut, Geländeverhältnisse und Befahrbarkeit der Ackerflächen, Transportentfernung, Gesamterntemenge) zu treffen.

Für Ernte und Transport von Silomais kommen in der Praxis üblicherweise reihenunabhängige SF-Feldhäcksler in Verbindung mit einer auf die örtlichen Verhältnisse (Frischmasseertrag, Transportentfernung und Silobefüll- bzw. Verdichtungskapazität) angepassten Zahl an landwirtschaftlichen Transportgespannen, bestehend aus Ackerschlepper und Muldenkipper bzw. Abschiebewagen, zum Einsatz [28].

Nach DURST und EBERLEIN (2010) [93] müssen bei der Silobefüllung nicht nur für den Biomassetransport, sondern auch für die Verteilung und Verdichtung des Häckselguts im Silostock ausreichend Kapazitäten vorgehalten werden. Für die Praxis werden zum Verteilen des Häckselguts Fahrzeuge mit Räumschild oder Schaufel empfohlen, zum Verdichten Fahrzeuge bzw. Walzgeräte mit ausreichend hohem Gewicht, damit Lufteinschlüsse im verdichteten Häckselgut vermieden werden können. Sobald die Befüllung der Siloanlage sowie das Verdichten des Häckselguts abgeschlossen sind, ist die Abdeckung der Silostocks mit Folien unmittelbar durchzuführen, wobei auf ausreichende Folienüberlappung und beschädigungsfreie Anbringung zu achten ist. Bei Siloanlagen im Außenbereich sollen Netze vor Beschädigungen durch Wildtiere verwendet werden.

Tabelle 6: Übersicht bezüglich erforderlicher Transport- und Umschlagtechnik für Zuckerhirse in unterschiedlichen Aufbereitungsformen

Erntetechnik	Aufbereitungsform	Transporttechnik	Umschlagtechnik	Verfügbarkeit
Mähbinder	Ganzpflanzen	herkömmliche land- bzw. forstwirtschaftliche Transportgespanne	Technik analog Stroh- bzw. Stammholzumschlag	ja
Zuckerrohrernter	Stückgut	Fahrzeuge analog Zuckerrohrernte	Technik analog Zuckerrohrstückgutumschlag	nein
Feldhäcksler	Häckselgut	Fahrzeuge analog Silomaisernte	Technik analog Silomaisumschlag	ja
Safternter	Zuckersaft	Tankbehälter bzw. Tankfahrzeuge	Rohr- und Pumpentechnik	ja

3.6 Lagerung und Konservierung von Zuckerhirse

Prinzipiell wird eine Verarbeitung von Zuckerhirse über das ganze Jahr hinweg angestrebt bzw. sofern dies nicht umgesetzt werden kann, zumindest über einen möglichst langen Zeitraum. Die Möglichkeit einer langfristigen Lagerung des Erntegutes ist für eine industrielle Verarbeitung von großer Bedeutung.

Eine mögliche Option zur längerfristigen Haltbarmachung der im Zuckerhirsesaft enthaltenen Zucker stellt die Safteindickung dar. Laut Untersuchungen von STREHLER et al. (1987) [268] ist eingedickter Zuckerhirsesaft bereits mit einem TM-Gehalt von 55 % bei Lagertemperaturen von 18 bis 25 °C für mehrere Monate haltbar. Die Rohsafteindickung

ist allerdings ein äußerst energieintensiver Prozess und erscheint deshalb nur dann sinnvoll zu sein, wenn, wie bei der Bioethanolherstellung aus Zuckerrohr, ein bei der Herstellung anfallendes Nebenprodukt wie Bagasse als Energieträger verwendet werden kann. Zur Vermeidung von Ablagerungen und Verkrustungen in der Verdampferstation, ist vor der eigentlichen Eindampfung eine Saftreinigung erforderlich [317]. Sowohl die Reinigung als auch die Eindickung von Zuckersäften kann, in Anlehnung an die Zuckerherstellung aus Zuckerrübe oder Zuckerrohr, als eine ausgereifte Technologie angesehen werden und ist in der angegebenen Literatur beschrieben [215] [218] [218] [248]. Bei beiden Verfahrensschritten kann es, aufgrund chemischer und thermischer Reaktionen, zu Zuckerverlusten kommen [215].

Der hier im Projekt verfolgte Ansatz sieht eine Lagerung bzw. Konservierung der Ganzpflanzen ohne Presssafteindickung als Konservierungsmethode vor.

3.6.1 Lagerung

Lagerung bei Außentemperaturen

Von BLUDAU (1987) [32] sowie BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] wurde das Lagerverhalten von Zuckerhirse in Form von Ganzpflanzen, Stückgut und Häckselgut bei Außentemperaturen eingehend anhand einschlägiger Literatur von ANDERLEI (1986) [10], BROADHEAD (1972) [41], EILAND (1982) [97], EILAND (1983) [98] und TUSCHL (1983) [279] sowie der Ergebnisse eigener Versuche beschrieben.

Ganze Pflanzen weisen bei Außenlagerung unter Umgebungstemperaturen gegenüber Stück- und Häckselgut die beste Lagerfähigkeit auf [35] [97]. Nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] weisen Zuckerhirsestücke auch bei der Lagerung größerer Mengen eine wesentlich bessere Haltbarkeit auf als Häckselgut. Um eine Selbsterwärmung bei der Lagerung des Stückguts in großen Schüttungen zu vermeiden, wird eine Belüftung als sinnvoll erachtet.

Kühllagerung

Durch Kühlung kann bei Häckselgut eine Selbsterwärmung zwar verhindert werden, allerdings sinkt der Zuckergehalt auch bei Kühlung stetig [35]. Auch bei Stückgut konnte ein gewisser Temperatureinfluss auf die Haltbarkeit beobachtet werden, der allerdings nicht so stark ausgeprägt ist wie bei Häckselgut.

Bei Temperaturen von 1 bzw. 5 °C lag der Zuckergehalt nach 25 Tagen nur geringfügig unter dem ursprünglichen Zuckergehalt, bei 10 °C kommt es zu einem deutlichen Absinken. Das alleinige Unterbinden der Selbsterwärmung bei gehäckselter Zuckerhirse reicht nicht aus, um eine ähnlich gute Haltbarkeit wie bei Stückgut zu erzielen. Der Zuckergehalt im Häckselgut sinkt etwa um das zehnfache schneller als bei gleicher Temperatur gelagertem Stückgut. Ohne Kühlung beträgt der Unterschied das Zwanzigfache. Bei Kühlung von Häckselgut auf 1 °C verläuft der Zuckerabbau etwa dreimal schneller als bei 10 °C gelagertem Stückgut.

Nach BLUDAU (1994) [33] sowie BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] hat die Materialform einen größeren Einfluss auf die Haltbarkeit von Zuckerhirse als die Lagerungstemperatur.

Folgerungen zur Lagerung von Zuckerhirse

Die Form des Erntegutes und damit die Wahl des Ernteverfahrens übt einen wesentlichen Einfluss auf die Haltbarkeit von Zuckerhirse nach der Ernte aus. Im Temperaturbereich 1 bis 10 °C hat die Form des Erntegutes bei einer Lagerdauer bis zu 30 Tagen einen größeren Einfluss auf die Haltbarkeit als die Temperatur, wobei diese dennoch eine wichtige Rolle beim Abbau des Zuckers spielt. Die entsprechenden Unterschiede zwischen den einzelnen Materialformen sind auf den unterschiedlichen Zerkleinerungsgrad zurückzuführen. Die Zuckerhirsepflanze wird beim Häckselvorgang nicht nur zerschnitten, sondern auch in Längsrichtung aufgefasert, wodurch sich das zuckerhaltige Mark frei mit dem übrigen Erntegut vermischt. Somit ergeben sich optimale Lebensbedingungen für Mikroorganismen. Beim Stückgut bleibt die Struktur des Stängels dagegen erhalten. Das Mark bleibt von der Rinde weiterhin umschlossen und liegt nur an den Schnittstellen frei [35].

Für die Abschätzung der maximalen Dauer einer Zwischenlagerung von Zuckerhirse für die verschiedenen Formen des Erntegutes nahmen BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] – ebenso wie GRASSI et al. (1992) [117] – 90 % des ursprünglichen Zuckergehaltes in der Trockenmasse als Grenzwert an. Höhere Verluste erscheinen nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] aus wirtschaftlichen Gründen nicht akzeptabel. Tabelle 7 zeigt die jeweils ermittelte mögliche Lagerdauer in Abhängigkeit von der Materialform ohne bzw. mit Kühlung. Daraus gehen die Unterschiede hinsichtlich der Lagerfähigkeit von verschiedenem Erntegut hervor.

Tabelle 7: Lagerdauer von Zuckerhirse bis zum Unterschreiten von 90 % des Ausgangszuckergehaltes (nach BLUDAU und TUROWSKI [35])

Material		Lagerung ungekühlt (6-7 °C Außentemperatur)	Lagerung gekühlt 1 °C	5 °C	10 °C
Häckselgut [1)]		16 Stunden	2 Tage	2 Tage	20 Stunden
Stücke [2)]	10 cm	12 Tage			
	25 cm	19 Tage	28 Tage	22 Tage	8 Tage
	40 cm	19 Tage			
unzerkleinert [2)]		28 Tage			

1) Ausgangszuckergehalt: 36,5 % i.d. TM (Gesamtpflanze)
2) Ausgangszuckergehalt: 46,5 % i.d. TM (im Stängel)

Die Erzeugung von Stückgut z. B. mittels Zuckerrohrernter und die Kühlung auf 1 °C ermöglicht eine Lagerdauer wie bei unzerkleinerten Ganzpflanzen [35], wie in Tabelle 7 dargestellt.

Bei Nutzung der Häcksellinie für die Zuckerhirseernte müsste das Erntegut ohne weitere Konservierungsmaßnahmen innerhalb eines halben Tages verarbeitet werden, um entsprechende Verluste vermeiden zu können. Nachdem in der Erntekampagne eine tägliche Ernte von Zuckerhirse witterungsbedingt nicht gewährleistet ist, kann beim Einsatz von Häckslern zur Ernte eine kontinuierliche Verarbeitung von erntefrischem Häckselgut nicht einmal im Erntezeitraum sichergestellt werden.

Bei Durchführung der Zuckerhirseernte mit einem Zuckerrohrernter kann nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] eine weitgehend kontinuierliche Verarbeitung des stückigen Erntegutes sichergestellt werden. Bei kühleren Außentemperaturen ist mit Stückgut eine Verlängerung des Verarbeitungszeitraums um ein bis drei Wochen möglich. Durch Kühlung des Erntegutes von 10 °C auf 1 °C kann die Haltbarkeit von Zuckerhirse in Form von 25 cm langen Stücken von 8 Tagen auf 4 Wochen verlängert werden. Die Vorteile einer um fast drei Wochen längeren Zwischenlagerung im Hinblick auf die Verarbeitung der Zuckerhirse lassen eine Kühlung bei Stückgut wesentlich sinnvoller erscheinen als bei Häckselgut [35].

Die Lagerung von Zuckerhirse in Form von unzerkleinerten Ganzpflanzen ist nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] bei niedrigen Außentemperaturen von 0 bis 5 °C auch in größeren Mengen über einen Zeitraum von etwa einem Monat möglich. Unzerkleinerte Ganzpflanzen ermöglichen somit die Überbrückung von Schlechtwetterperioden, eine kontinuierliche Verarbeitung während des Erntezeitraums und eine Verlängerung des Verarbeitungszeitraums um etwa 4 Wochen. Für Zuckerhirse sind aus verarbeitungstechnischer Sicht unzerkleinerte Ganzpflanzen als die günstigste Form des Erntegutes anzusehen. Für die Durchführung der Ernte geeignete Mähbinder, verlustarme Lagermöglichkeiten und Umschlagtechniken sowie eine optimierte Logistikkette stellen für ein wirtschaftliches Ernteverfahren wesentliche Voraussetzungen dar.

3.6.2 Konservierung

Ohne Konservierungsmaßnahmen ist eine längere Lagerung des Zuckerhirse-Erntegutes bei tolerierbaren Zuckerverlusten nicht möglich [236].

Eine Konservierung der geernteten Zuckerhirse durch Trocknung von 75 auf 15 % Wassergehalt ist aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar [65].

JASBERGER et al. (1983) [132] führten Untersuchungen zur Konservierung von Zuckerhirsestängeln (Zuckergehalt 42 % i.d. TM, 29 % TM-Gehalt) unter anaeroben und aeroben Bedingungen durch. Dabei wurden unter anaeroben Bedingungen eine Sprühbehandlung mit Propionsäure (2 %ige Lösung) oder Ammoniumhydroxid (1,2 %ige Lösung) und die Lagerung in einer CO_2- oder SO_2-Atmosphäre untersucht. Bei der Lagerung unter aeroben Bedingungen wurden getrocknete Stängel (41 % TM-Gehalt) einer Sprühbe-

handlung mit Propionsäure (1 %ige Lösung) unterzogen. Für die Versuche wurden entblätterte Ganzpflanzen ohne Rispen der Sorten ‘Wray‘ und ‘Keller‘ verwendet. Bei der Lagerung von Stängeln unter aeroben Bedingungen war nach 200 Tagen kein Zucker mehr feststellbar. Auch die Lagerung von Stängeln unter anaeroben Bedingungen in einer CO_2-Atmosphäre und mit Ammoniumhydroxidbehandlung waren nicht zielführend. Bei der Propionsäurebehandlung waren noch 34 % des ursprünglich enthaltenen Zuckers feststellbar, in SO_2-Atmosphäre 19 % bei geringerem Schimmelbefall.

Als zuckerliefernder Rohstoff scheidet für die Zuckerhirse eine Konservierung in Form von Silage aus, nachdem beim Silieren im Rahmen der stattfindenden Milchsäuregärung über 70 % des vorhandenen Zuckers durch die Gärprozesse verloren gehen [155]. Auch GRASSI et al. (2002) [116] erachten die auftretenden Zuckerverluste infolge einer Silierung von Zuckerhirse als zu hoch.

Hingegen stellt nach LINDGREN et al. (1983) [175] die Silierung mit milchsäurebildenden Bakterien eine praktikable Methode zur stabilen Lagerung von gehäckselter Zuckerhirse dar. Dabei kann der pH-Wert soweit abgesenkt werden, dass andere Mikroorganismen in ihrer Aktivität eingeschränkt werden. Allerdings wird der enthaltene Zucker durch Milchsäurebakterien verstoffwechselt. Durch die Bildung von Milchsäure kommt es zu einem enormen Verlust an gärfähigem Substrat, da Hefen wie Sacharomyces cerevisiae dieses nicht weiter zu Ethanol fermentieren können. Mit dem Einsatz von Inhibierungsstoffen zur pH-Wert Absenkung [125] kann unter anaeroben Bedingungen die natürliche Bildung von Milchsäure unterbunden werden. Für diesen Zweck können sowohl mineralische als auch organische Säuren eingesetzt werden, wobei aufgrund von Korrosionseffekten mineralische Säuren seltener zum Einsatz kommen [175]. Ameisensäure ist als ein selektiver Inhibitor für zahlreiche Mikroorganismen wie Milchsäurebakterien und Clostridien bekannt, nicht aber jedoch für Hefen [243]. In der Praxis wird Ameisensäure vorwiegend in Skandinavien verwendet, um Silageprozesse zu steuern [175]. Für einen anwenderfreundlicheren Einsatz in der Praxis kann gepufferte Ameisensäure genutzt werden.

Von SCHMIDT et al. (1997) [243] wurden mit Zuckerhirsehäckselgut (Häcksellänge 5 bis 10 mm) Konservierungsversuche mit Ameisensäurezugabe in verschiedenen Konzentrationen bei einer Lagerdauer von 60 Tagen durchgeführt. Mit Ameisensäure konnte der pH-Wert auf ca. 3,7 (0,5 Masse-%) und 3,3 (1,0 Masse-%) abgesenkt werden. Bei einer Konzentration von Ameisensäure zwischen 0,5 und 1,0 Masse-% bezogen auf die Frischmasse wurden keine Zuckerverluste während der gesamten Lagerung festgestellt.

HENK und LINDEN (1996) [125] strebten bei Ihren Versuchen eine direkte Fermentation (Silofermentation) von gehäckselter Hirse an, wobei neben Hefen auch Ameisensäure zugesetzt wurde. Mit der Zugabe von Ameisensäure kann nach HENK und LINDEN (1996) [125] eine Bildung von Hitzenestern umgangen werden. Neben der Zugabe von Aktivtrockenhefe, wurde Ameisensäure mit einer Beladung von 0,3 Masse-% zur gehäckselten Hirse gegeben, wobei ein pH-Wert von 4,6 vorlag. Die höchsten Ethanolkonzentrationen wurden nach 231 Tagen detektiert. Bezogen auf den ursprünglichen Zuckergehalt wurde eine Ausbeute von 0,43 g/g erzielt.

Nach BLUDAU (1994) [33] erscheint die Eindickung des gereinigten Zuckerhirsesaftes auf ca. 55 % Trockenmasse als die einzige sinnvolle Möglichkeit zur längerfristigen Haltbarmachung von Zuckerhirse. Auf diese Weise kann bei Temperaturen von 18 bis 25 °C eine Lagerfähigkeit des Zuckerhirsesaftes von mehreren Monaten erreicht werden [49]. Aus energetischer Sicht erscheint die Eindickung von Zuckerhirsesäften aber nur bei zentraler Verarbeitung der Zuckerhirse sinnvoll, weil dann durch die Dampfverbundweise die bei der Extraktion- und Schlempeeindampfung nötige Abwärme genutzt werden kann [49]. Dieses aus der Zuckerindustrie bekannte Verfahren setzt eine Saftgewinnung und die Eindickung bzw. Kühlung der Säfte sofort nach der Ernte voraus [33]. Darüber hinaus erscheint für den Zweck der Eindickung von Zuckerhirsesäften auch die Nutzung der Abwärme aus der Verstromung von Biogas möglich [32]. Nach SENN (2003) [249] kann Ethanol in dezentralen Anlagen unter Einbeziehung der Produktion von Biogas nachhaltig erzeugt werden. Auf diese Weise werden eine deutlich verbesserte Energiebilanz, eine positive Ökobilanz und wettbewerbsfähige Preise für das erzeugte Ethanol erreicht [249]. Die Abwärme aus einer parallel zur Ethanolerzeugung aus Zuckerhirse durchgeführten Biogasproduktion könnte somit auch als Energiequelle für die Eindickung von Zuckerhirsesaft genutzt werden.

Die Möglichkeit einer kurzfristigen Zwischenlagerung des Erntegutes ist aber selbst bei der Verarbeitung direkt im Anschluss an die Ernte eine wesentliche Voraussetzung für eine industrielle Nutzung der Zuckerhirse. Die ersten Verarbeitungsschritte Saftgewinnung, -reinigung und -eindickung können aufgrund des kurzen Erntezeitraums nur im Kampagnebetrieb erfolgen. Für eine günstige Auslastung der Verarbeitungskapazitäten ist ein durchgehender 24-Stunden-Betrieb während der Kampagne nötig, wie dies z. B. in der Zuckerindustrie der Fall ist. Dazu müssen Schlechtwetterperioden durch eine Zwischenlagerung des Erntegutes überbrückt werden können [33].

3.6.3 Physikalische Lagerparameter

Das aus der Literatur für Zuckerhirse bekannte mögliche Ertragspotential von bis zu 100 t FM/ha [35] [39] [96] weist angesichts der erforderlichen Verfahrensschritte Transport, Umschlag und Lagerung auf die Bedeutung der Kenngröße Schüttdichte des Erntegutes als physikalischer Lagerparameter hin. Die Schüttdichte von Zuckerhirse in den jeweiligen Erntegut- bzw. Aufbereitungsformen zeigt den zugehörigen Bedarf an Transport- und Lagerkapazitäten auf.

Die Schüttdichte ρ_{Sch} gibt das Verhältnis der Masse der Schüttung m_{Sch} zum eingenommenen Schüttvolumen V_{Sch} an:

$$\text{Schüttdichte } \rho_{Sch} \text{ in } \frac{kg}{m^3} = \frac{\text{Masse der Schüttung } m_{Sch}}{\text{Schüttvolumen } V_{Sch}} \qquad 3\text{-}1$$

Die Schüttdichte von Zuckerhirse in Form von Stückgut variiert entsprechend Literaturangaben in Abhängigkeit von der Stückgutlänge (10 bis 40 cm) sehr stark (370 bis 112 kg/m³), wie in Anhang 1 dargestellt. Bei der Schüttdichte von Zuckerhirsehäckselgut wird in der Literatur zwischen erntefrischem, das heißt losem sowie abgesetztem Zu-

stand unterschieden. Die Schüttdichte von Zuckerhirsehäckselgut ist dabei auch von der Häckselläng abhängig und schwankt zwischen 292 kg/m³ (10 mm lose) und 238 kg/m³ (20 mm lose) bzw. 380 kg/m³ (10 mm abgesetzt) und 322 kg/m³ (20 mm abgesetzt). Weitere Literaturangaben zur Schüttdichte von Häckselgut sind in Anhang 1 angegeben.

3.7 Technologie der Saftgewinnung

Der in der Zuckerhirse enthaltene Zucker kann durch Extraktion mit Wasser oder durch Abpressen des zuckerhaltigen Saftes aus dem Erntegut gewonnen werden [236].

Bei der mechanischen Saftgewinnung weist der Pressrückstand (Bagasse) niedrigere Feuchtegehalte auf, was eine energetische Nutzung durch Verbrennung ermöglicht. Die mechanische Pressung ist für eine dezentrale Verarbeitung zur Saftgewinnung prinzipiell geeignet [33]. Hierzu bieten sich Walzen-, Stempel-, und Schneckenpressen an.

Mit Hilfe des Diffusionsverfahrens, bei dem der Zucker durch Extraktion mit Wasser aus der Zuckerhirse gewonnen werden kann, ist eine Steigerung der Zuckerextraktion gegenüber zentralen Mühlenanlagen mit Walzenpressen auf 96 bis 98 % möglich [40]. Nach BLUDAU (1994) [33] liegen Bagasseanfall und Feuchtegehalt der Bagasse durch eine anschließende mechanische Entwässerung der Bagasse in der Größenordnung wie bei Mühlenanlagen.

Als wichtige Kenngrößen zur Bewertung der Saftgewinnungstechnologie werden der Abpressgrad, die Zuckerextraktion und die Saftreinheit herangezogen [268] [278].

Der Abpressgrad APG (Saftausbeute) gibt das Verhältnis aus gewonnener Saftmasse m_S zur Masse des gepressten Ausgangsmaterials m_A an [268] [278]:

$$APG = \frac{m_S}{m_A} \qquad 3\text{-}2$$

Die Zuckerextraktion ZE ist der Anteil der im Saft enthaltenen Zuckermasse $m_{Z,S}$ an der im Ausgangsmaterial enthaltenen Zuckermasse $m_{Z,A}$ und wird folgendermaßen berechnet [268] [278]:

$$ZE = \frac{m_{Z,S}}{m_{Z,A}} \qquad 3\text{-}3$$

Die Saftreinheit SR gibt den Anteil des Zuckers an der im Saft enthaltenen Trockenmasse an und errechnet sich aus der im Saft enthaltenen Zuckermasse $m_{Z,S}$ und der getrockneten Masse des Saftes $m_{S,tr}$ [268] [278]:

$$SR = \frac{m_{Z,S}}{m_{S,tr}} \qquad 3\text{-}4$$

Ein Vergleich der Untersuchungen zur Zuckersaftgewinnung in der Literatur ist, insbesondere wegen der sehr unterschiedlichen Trockenmasse- und Zuckergehalte des Ausgangsmaterials unter den unterschiedlichen Anbaubedingungen in Europa, kaum möglich. Noch deutlichere Unterschiede liegen zu den Werten bei den Arbeiten aus den U.S.A., Brasilien, Indien und China vor. Ebenso erfolgten häufig unvollständige Angaben zur Charakterisierung der Abpressergebnisse.

3.7.1 Walzenpresse

Walzenpressen (Walzenmühlen) werden zur Verarbeitung von Zuckerrohr eingesetzt [31]. Das Pressgut wird von zwei oder mehreren gegenläufig rotierenden Walzen eingezogen und in dem enger werdenden Spalt zwischen den Walzen verdichtet. Die abgepresste Flüssigkeit wird seitlich in axialer Richtung abgeleitet [221].

Mit mehrstufigen Mühlenanlagen können über 90 % des im Erntegut enthaltenen Zuckers extrahiert werden [40] [236]. Bei der Verarbeitung fallen etwa 25 % des Erntegutes als Bagasse mit einem Feuchtegehalt von etwa 50 % und einem Restzuckergehalt von 1,5 bis 4 % an [31] [40] [201] [277]. Die Verarbeitungskapazität von Mühlenanlagen bewegt sich nach Größe und Zahl der Mühlen zwischen 9 und 400 t/h [40] [58]. Bei einem Ertrag von 80 t/ha könnte im 24-Stunden-Betrieb an einem Tag etwa 3 bis 120 ha Zuckerhirse verarbeitet werden [33].

Der versuchsweise Einsatz kleiner Walzenmühlen in den U.S.A. zur dezentralen Saftgewinnung aus Zuckerhirse lieferte keine befriedigenden Ergebnisse. Mit diesen einstufigen Walzenmühlen waren nur geringe Durchsätze (< 2 t/h) und schlechte Zuckerextraktionen von weniger als 50 % des im Erntegut enthaltenen Zuckers erreichbar [43] [186]. Von BELLMER (2008) [25] werden in Oklahoma Versuche zur In-Field-Fermentation durchgeführt. Hierbei wird eine sofortige Saftgewinnung am Feld angestrebt (Safternter), siehe hierzu das Kapitel 3.4.2 auf Seite 46. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Abpressgrade von ca. 55 % erreicht. In einer Studie von SCHAFFERT (2008) [240] werden Abpressgrade von 60 bis 65 % mit einer Walzenpresse angenommen. Des Weiteren wurde von TSUCHIHASHI und GOTO (2004) [276] eine Steigerung des Abpressgrads von 50 auf 75 % mit einer erneuten Abpressung der wiederbefeuchteten Bagasse mit Walzenpressen erreicht.

Mit der Sonderform „Safternter“ der Walzenpresse wurden von BELLMER (2008) [25] Abpressgrade zwischen 10 und 47 % angegeben [160] [197] [211]. Darüber hinaus wurde in einer theoretischen Studie sogar von einem Abpressgrad von 65 % ausgegangen [263]. Die weiteren Bewertungskriterien dieser Ernte- und Saftgewinnungstechnologie, wie beispielsweise die geringe Flächenleistung, sind im Kapitel 3.4.2 dargestellt.

3.7.2 Stempelpresse

Als weitere Technologie wurde die Stempelpresse im Batch-Verfahren untersucht [278]. Bei der Stempelpresse wird durch einen beweglichen Kolben Druck auf das Pressmaterial ausgeübt und die Flüssigkeit läuft durch Schlitze oder Siebplatten ab.

TUROWSKI (1991) [278] untersuchte an einer Stempelpresse den Einfluss des Pressdrucks von 0,08 bis 1,23 MPa auf den Abpressgrad. Mit steigendem Pressdruck konnte auch ein logarithmisch ansteigender Abpressgrad beobachtet werden. Der maximale Abpressgrad lag bei gehäckselter Zuckerhirse (Ganzpflanze) bei etwa 40 bis 45 %. Bei der Verwendung von gehäckselter und entblätterter Zuckerhirse waren höhere Abpressgrade von bis zu ca. 53 % festzustellen.

MAMA et al. (1995) [177] und COBLE et al. (1984) [63] führten in ihren Untersuchungen ebenfalls Entsaftungen von gehäckselter Zuckerhirse bei Drücken von 7,0 bzw. 10,0 MPa durch. Hierbei wurden in beiden Fällen Abpressgrade von etwa 50 % erreicht.

3.7.3 Schneckenpresse

In mehreren Untersuchungen wird der Einsatz von Schneckenpressen als am besten geeignete Saftgewinnungstechnik beschrieben [13] [268] [278]. Bei der Schneckenpresse wird mit einer sich drehenden Schnecke durch einen zylindrischen Seiher das zugeführte Pressmaterial gefördert und durch einen definierten Austritt (Bohrungen des Seihers bzw. axial angeordnete Stäbe mit veränderbarem Abstand) gezwungen. Gegenüber Walzenmühlen können mit Schneckenpressen bei einmaligem Abpressen höhere Zuckerextraktionen erreicht werden [45].

Lochseiher-Schneckenpresse

TUROWSKI (1991) [278] untersuchte bei seinen Versuchen mit einer Schneckenpresse sowohl den Einfluss der Materialaufbereitung als auch die Auswirkungen der Presseinstellungen auf die Abpressergebnisse. Als Ausgangsmaterial stand Zuckerhirse mit einem TM-Gehalt von 19,6 - 26,7 % bei einem Zuckergehalt von 7,4 – 12,7 % in der Frischmasse zur Verfügung. Damit wurden sehr gute Abpressgrade von 70,8 – 80,1 % erreicht. Wichtig dabei ist die Beziehung zwischen dem TM-Gehalt der Pflanzen und dem Abpressgrad, denn dieser sinkt mit zunehmendem TM-Gehalt. Zudem stellte er fest, dass die Presseneinstellung und eine Steigerung der Zerkleinerung des Materials keinen Einfluss, die Entblätterung hingegen einen hoch signifikanten Einfluss auf den Abpressgrad haben. Die Abpressgrade bei Versuchen mit entblätterten Ganzpflanzen liegen deutlich über denen mit Ganzpflanzen. Ebenso die Ergebnisse der Zuckerextraktion, die in einem Bereich zwischen 72,7 und 96,7 % lagen. Durch Wiederbefeuchten und erneutes Abpressen der Bagasse konnte eine Zuckerextrahierung von 97,6 % erreicht werden. Die Extraktionsrate ließ sich dabei durch eine Abtrennung der Blätter nicht steigern. Dafür hatte die feinere Zerkleinerung einen positiven Effekt. Anders als beim Abpressgrad erzielten die Presseinstellungen einen hohen Einfluss auf die Zuckerextraktion. Diese

sank mit zunehmendem Pressdüsendurchmesser, ebenso wie mit der Erhöhung der Schneckendrehzahl. Darüber hinaus untersuchte er den Zusammenhang zwischen Abpressgrad und Zuckerextraktion. Hierbei zeigte ein um ein Prozent höherer Abpressgrad eine um 1,13 % höhere Zuckerextraktion, bei einem Abpressgrad zwischen 3 und 83 % (Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,97$). Die Auswertungen der Saftproben ergaben einen prozentualen Zuckeranteil von 8,5 – 13,8 %. Der TM-Gehalt lag zwischen 9,8 und 14,4 %. Darüber hinaus wurde auch der TM-Gehalt der Bagasse bestimmt. Dieser betrug zwischen 46,0 und 64,4 %, wobei die höchsten Werte mit den gehäckselten ganzen Pflanzen erreicht wurden. Nach Wiederbefeuchten der Bagasse und erneutem Abpressen konnte dieser auf 66,7 % gesteigert werden.

Mit Lochseiher-Schneckenpressen können bei einmaligem Abpressen zwar deutlich höhere Zuckerextraktionen erreicht werden als mit Walzenmühlen, diese sind trotzdem als nicht zufriedenstellend einzustufen [33]. Deshalb wird ein weiterer Abpressvorgang auch bei Schneckenpressen gefordert, um Zuckerertragsverluste von 20 bis 30 % vermeiden zu können [33] [278].

Mit Lochseiher-Schneckenpressen können hohe Abpressgrade und hohe Zuckerextraktionen erzielt werden. Untersuchungen ergaben eine lineare Abhängigkeit dieser beiden Kenngrößen voneinander. Eine Untersuchung der Presseinstellungen zeigte, dass mit höher werdenden Schneckendrehzahlen und größeren Pressdüsendurchmessern die Zuckerextraktion abnimmt. Darüber hinaus wurde auch der Einfluss des abzupressenden Materials betrachtet. Dabei zeigte sich, dass mit steigendem TM-Gehalt, der vor allem vom Erntezeitpunkt abhängt, die Abpressgrade niedriger werden. Ein Abtrennen von Blättern und Rispen bewirken höhere Abpressgrade und Zuckergehalte im Saft. Ferner hat der Zerkleinerungsgrad des Materials einen entscheidenden Einfluss. Je feiner das Ausgangsmaterial zerkleinert wird, desto höher ist das Zuckerextraktionsergebnis. Zudem waren auch die Werte der TM-Gehalte der Bagasse zufriedenstellend, wobei sich die besten Ergebnisse mit verarbeiteten ganzen Pflanzen ergaben. Eine weitere Möglichkeit bietet die Pressung der Bagasse. Diese ist durch ein feines Besprühen mit Wasser leicht in einen feuchten und faserigen Zustand zurückzuführen. Dadurch kann sowohl der TM-Gehalt der Bagasse als auch die Zuckerextraktionsrate erhöht werden [268] [278].

Seiherstab-Schneckenpressen

STREHLER et al. (1987) [268] konnten bei einem Versuch mit Ganzpflanzen einen Abpressgrad von 63,6 % und eine Zuckerextraktionen von 80 %, bei einem Durchsatz von 5,2 t/h erreichen. Wasserverdampfungsverluste wurden dabei außer Acht gelassen.

Von ARSEN (2008) [13] wurde mit der Presse „CP-4“ von Vincent Corporation, U.S.A. (Verwendung in der Saftgewinnung aus Citrusfrüchten, „weichen“ Früchten und Tomaten) eine Zuckerextraktion von über 80 % und ein TM-Gehalt der Bagasse von ca. 60 % erreicht. Durch ein erneutes Abpressen der wiederbefeuchteten Bagasse soll eine Zuckerextraktion von mindestens 95 % erreicht werden können. Des Weiteren wird mit die-

sem Vorgehen weniger als 50 % der Energie benötigt, die für die herkömmliche Methode mit einer Walzenpresse nötig wäre.

3.7.4 Folgerungen

In den bisherigen Untersuchungen wurde meist die Verarbeitung von Zuckerhirse in die Mühlenanlagen (Walzenpressen) der Zuckerrohrverarbeitung integriert. Ziel hierbei ist die Effizienzsteigerung dieser zentral angelegten Anlagen ohne weitere Modifikationen der Saftgewinnungstechnologie für den Rohstoff „Zuckerhirse“.

Weitere Untersuchungen mit Walzenpressen wurden mit der Sonderform, dem Safternter zur direkten Verarbeitung am Feld angestellt. Mit dieser mobilen Walzenpresse, aber auch mit stationären Walzenpressen, wurden niedrigere Werte sowohl beim Abpressgrad als auch bei der Zuckerextraktion im Vergleich zu den Untersuchungen mit einer Schneckenpresse erreicht. Weitere Informationen zum Safternter sind auf Seite 46 zusammengefasst.

Die Untersuchungen mit Stempelpressen fanden überwiegend im Labormaßstab statt. Die erreichten Abpressgrade lagen deutlich unter denen der Untersuchungen mit Lochseiher-Schneckenpressen. Darüber hinaus handelt es sich um einen Batch-Betrieb.

Die Schneckenpresse zeigte sich als die am besten geeignete Saftgewinnungstechnologie. Darüber hinaus kann diese Technologie in ein dezentrales Konzept mit landwirtschaftlichen Brennereien integriert werden [265]. Die Versuche ergaben sowohl gute Abpressgrade, als auch gute Zuckerextraktionswerte.

Des Weiteren wird in der Diskussion der vorliegenden Untersuchungen überwiegend auf die Erkenntnisse von TUROWSKI (1991) [278] und STREHLER et al. (1987) [268] zurückgegriffen. Ausschlaggebend hierfür ist neben der fast vollständigen Darstellung der Ausgangswerte wie auch der Kennzahlen zur Bewertung der Technologie auch, dass die Untersuchungen mit vergleichbarem Zuckerhirsematerial durchgeführt wurden.

3.8 Bioethanol aus Zuckerhirse

Um die in Zuckerhirse enthaltenen Zucker in Ethanol umzuwandeln, ist ein geeigneter Gärorganismus verfahrenstechnisch einzusetzen. Nachfolgend wird im Speziellen auf die Hefe und Konversionsverfahren eingegangen. Zudem wird die thermische Aufbereitung des erhaltenen Fermentationsprodukts aus energetischer und ökonomischer Sicht diskutiert.

3.8.1 Einsatz von Hefen

Für die industrielle Bioethanolproduktion aus zuckerhaltigen Substanzen werden in der Praxis vor allem Hefen (*Saccharomyces ssp*.) als ethanolbildende Mikroorganismen ein-

gesetzt, Bakterienkulturen spielen derzeit nur eine untergeordnete Rolle [131] [142] [223]. Im Vergleich zu Hefen können mit Bakterienkulturen, wie z. B. *Zymomonas mobilis,* aufgrund einer geringeren spezifischen Biomassebildung höhere Ethanolausbeuten von bis zu 97 %, bezogen auf das theoretische Potenzial, erreicht werden. Außerdem ist die Ethanolbildung durch diese Bakterien schneller [142]. Dem gegenüber sind die Hefestämme im Verfahren einfacher zu handhaben, besitzen robustere Eigenschaften und sind bei vergleichsweise niedrigeren pH-Wertbereichen einsetzbar. Letzteres trägt zu einem verminderten Kontaminationsrisiko durch Fremdorganismen (z. B. Milchsäurebakterien) bei, somit ist eine aufwändige Sterilisation des Fermentationsmediums nicht zwingend erforderlich [131] [142] [223] [235].

3.8.1.1 Mikrobiologische Grundlagen

Die alkoholische Gärung mit Hefen, hauptsächlich des Hefestammes *Saccharomyces cerevisiae*, ist hinreichend bekannt und entwickelt (z. B. Brauereiwesen, Spirituosenherstellung, Kraftstoffproduktion). Die Ethanolbildung ist an den primären Energiehaushalt gekoppelt [313] [129]. Ethanol wird bei Fermentationen durch Hefen aus Sacchariden unter anaeroben Bedingungen gewonnen, wobei für die Umwandlung in Ethanol monomere Zuckermoleküle (Einfachzucker) für den Stoffwechselweg zur Verfügung stehen müssen [242]. Daher werden Disaccharide wie Saccharose zuvor extrazellulär durch hefeeigene Enzyme, z. B. der Invertase, in die Monomerform überführt [231]. Danach werden diese gemäß folgender Reaktionsgleichung exotherm in Ethanol umgewandelt (Glykolyse, Embden-Meyerhof-Parnas-Weg) [216] [242]:

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ ADP + 2\ P_i \rightarrow 2\ C_2H_5OH + 2\ CO_2 + 2\ ATP + Wärme \qquad 3\text{-}5$$

Aus der Stoffbilanz ergibt sich eine maximale theoretische Ethanolausbeute von 0,51 g Ethanol pro g Glucose bzw. Fructose und 0,54 g Ethanol pro g Saccharose. Theoretisch können dadurch 91 % der in Glucose enthaltenen Energie in Ethanol umgewandelt werden [156], 6,9 % finden sich in Adenosintriphopshat wieder und 2,1 % werden in Form von Reaktionswärme frei [156]. Da allerdings ein Teil des Zuckers auch für den Aufbau von Zellsubstanz (Biomassewachstum) verwendet wird und zudem Nebenprodukte gebildet werden können, werden in der Praxis lediglich 90 bis 94 % der theoretischen Ausbeute erzielt [142] [194] [306], was einer Ethanolbildung von 0,46 - 0,48 g Ethanol pro g Glucose entspricht.

Bei Hefen handelt es sich um fakultativ anaerobe Mikroorganismen, die in Gegenwart von Sauerstoff die Zucker verstärkt aerob zu Wasser und Kohlenstoffdioxid verstoffwechseln [242]. Ab einer Konzentration in einer Größenordnung von 1 g/l Glucose wird der aerobe Stoffwechselweg aber bereits gehemmt (Crabtree-Effekt), so dass es auch unter aeroben Bedingungen zur Ethanolbildung kommt, solange sich die Zuckerkonzentration oberhalb der Hemmkonzentration befindet [142].

Unter optimierten Bedingungen sind mit der Hefe *Saccharomyces cerevisiae*, je nach Verfahrensweise, volumetrische Ethanolbildungsraten von ca. 2 g l^{-1} h^{-1} (batch) bis zu 50 g l^{-1} h^{-1} (kontinuierliche Prozessführung) möglich [142]. In der exponentiellen Wachs-

tumsphase produzieren Hefen 33-mal schneller Ethanol als im stationären Zustand. Es sollte deshalb versucht werden, die Hefen möglichst lange in der exponentiellen Wachstumsphase zu halten [129] [231].

Mit Erhöhung der Kultivierungstemperatur steigt, in Abhängigkeit vom Hefestamm, die Bildung von Nebenprodukten wie Glycerol, Essigsäure, Estern, höheren Alkoholen und so genannten Fuselölen [131]. Für die Bioethanolproduktion sind diese Verbindungen jedoch unerwünscht, da zum einen weniger Zucker zur Ethanolgewinnung zur Verfügung steht und zum anderen Nebenprodukte wie Fuselöle das Destillationsverfahren bzw. die Reinheit des Ethanols negativ beeinflussen können [83] [223] [304]. Zudem steigt mit der Temperatur das Kontaminationsrisiko und die Ethanolresistenz nimmt ab [131] [199] [305]. *Saccharomyces cerevisiae* ist in einem weiten Temperaturbereich von 5 bis 43 °C einsetzbar, wobei als optimale Fermentationstemperaturen 30 bis 35 °C gelten [202]. Die optimalen pH-Werte liegen zwischen 3,5 und 6,0 [232].

3.8.1.2 Nährstoffbedarf und Inhibierungseinflüsse

Damit sich die Hefen vermehren und Ethanol produzieren können, müssen Nähstoffe in ausreichender Menge vorhanden sein. So wird für die Synthese von Proteinen, Stickstoff benötigt. Dieser variiert in der Hefe zwischen 3 – 10 % i.d. TM [232]. Die Stickstoffzugabe erfolgt in der Regel durch Aminosäuren und/oder Ammonium-Stickstoff [232]. Neben Stickstoff, sind Schwefel und Phosphor wichtige Nährstoffe, welche im ausreichenden Maße vorhanden sein müssen.

Abgesehen von den Elementen, die den Zellaufbau betreffen, sind zusätzlich Mineralstoffe notwendig, um eine störungsfreie Fermentation zu gewährleisten. Man unterscheidet zwischen Makro- und Spurenelementen. Zu den Makroelementen gehören z. B. Kalium und Magnesium, die in einem Konzentrationsbereich zwischen 2 und 4 mmol/l vorliegen sollten. Magnesium ist essentiell für viele physiologischen Funktionen, wie Wachstum, Zellteilung und Enzymaktivität und besitzt außerdem eine Schutzfunktion bei Stresssituationen [30]. Wichtige Spurenelemente sind Eisen, Kupfer, Mangan, Zink, Selen, Cobalt, Molybdän, Chrom und Arsen [232].

Ebenfalls sind Vitamine und Wuchsstoffe für die Hefen unabkömmlich. So müssen z. B. Vitamin B2, B3, B5, B6, B7 und B9 für verschiedene Stoffwechselvorgänge verfügbar sein. Diese sind allerdings bereits bei Verwendung von z. B. Aktivtrockenhefepräparaten ausreichend vorhanden, solange kein Zellrecycling durchgeführt wird [232].

In Tabelle 8 sind die empfohlenen Konzentrationen [232] [12] [135] einiger essentieller Nährstoffe für eine optimale Fermentation mit Hefe dargestellt und mit Literaturdaten für Zuckerhirsesaft gegenübergestellt [8] [161].

Tabelle 8: Empfohlene Nährstoffkonzentrationen zu Fermentationszwecken mit Hefen im Vergleich zu Nährstoffkonzentrationen von Zuckerhirsesaft

Nährstoff	Empfohlene Konzentration in mg/l	im Zuckerhirsesaft vorhanden in mg/l
Calcium	180	166[1] - 1.100
Eisen	0,20	2[1] - 34
Natrium	keine	170[1]
Kalium	156	800 - 2.356
Kupfer	> 0,01	0,3[1]
Magnesium	97	194[1] - 600
Mangan	k. A.	3[1] - 35
Zink	0,20	1,4[1] - 9
(Ammonium)Stickstoff	k. A.	21,4[1]
(Nitrat)Stickstoff	k. A.	4,4[1]
Phosphor	k. A.	20 - 200
Schwefel	k. A.	120[1]

[1] umgerechnet von ppm auf mg/l mit einer Dichte von 1.000 g/l
k. A.: keine Angaben

Die empfohlenen Nährstoffmengen können durch den Zuckerhirsesaft in ausreichendem Maße zur Verfügung gestellt werden. SIPOS et al. (2009) [254] und KUNDIYANA et al. (2010) [154] bestätigten, dass eine Zugabe von Nährstoffen zum Zuckerhirsepresssaft zu keiner höheren Ausbeute an Ethanol führte. Erfolgreiche Fermentationen ohne Zugabe von Nährstoffen zeigten auch CHOHNAN et al. (2011) [60]. Eingehender untersuchten LAOPAIBOON et al. (2009) [161] und NUANPENG et al. (2011) [196] den Einfluss und den Verbrauch an fermentierbarem Stickstoff (Free Amino Nitrogen, FAN). Eine Zugabe von Hefeextrakt und Pepton, als Quelle von Aminosäuren bzw. Stickstoff und Vitaminen führte zu keiner deutlichen Steigerung der Ausbeute oder Konversionsleistung. Ammoniumsulfat bewirkte sogar eine Reduktion der Konversion des Zuckers.

3.8.1.3 Industrielle Hefepräparate

Für industrielle Anwendungen werden Hefen als Trockenpräparate (Active Dry Yeast, ADY) und in verschiedenen Flüssigpräparaten angeboten.

ADY werden bevorzugt in industriellen Batch-Fermentationen eingesetzt [223] [231]. Sie haben den Vorteil einer langen Lagerfähigkeit und können bis zu vier Jahre bei trockener und kühler Lagerung ohne Qualitätsverluste aufbewahrt werden. ADY sind ständig verfügbar, haben ein geringes mikrobiologisches Risiko und eine reproduzierbare Hefequalität [231].

Verschiedene Hefepräparathersteller bieten in ihren Portfolios Hochleistungshefen als ADY an, die nicht gentechnisch modifiziert und speziell für den Verwendungszeck einer effizienten alkoholischen Gärung gezüchtet wurden. Die Hochleistungsstämme zeichnen sich gegenüber herkömmlichen Hefen oder sogenannten Weinhefen, durch eine hohe Ethanoltoleranz von bis zu ca. 20 Vol.-% und einer Temperaturtoleranz bis mindestens 38 °C und/oder einer geringen Nebenproduktbildung aus [158] [159]. Weiterhin geben einige Hersteller an, dass bestimmte Hefestämme einen so genannten Killerfaktor besitzen („Killer-Hefe“). Diese Hefen können ein bestimmtes Toxin freisetzen, wodurch Kontaminationen verringert werden können und eine stabilere Prozessführung möglich sein soll [131].

ADY können entweder direkt, ohne weitere Vorbehandlung, zum Fermentationsmedium zugegeben werden oder im resuspendierten Zustand [158]. Im Vergleich zu einer Hefeanzüchtung, wie sie häufig auch in Brennereien durchgeführt wird, kann dieses Verfahren als einfacher und kostengünstiger angesehen werden [223] [231].

Fermentationen werden in der Regel mit 0,10 - 0,50 g ADY pro Liter gestartet [136] [146] [158] [159] [231]. Diese entsprechen ca. 5×10^6 bis 2×10^7 Lebendzellen pro Milliliter. Störeinflüsse durch Kontaminationen könnten durch Zugabe hinreichend vieler Hefezellen überwunden werden, zusätzlich verkürzen höhere Zelldichten die Fermentationszeit. Allerdings führen höhere Animpfzellzahlen auch zu einer Verringerung der Ethanolausbeute [44] [162].

3.8.2 Konversionsverfahren

Das Potential der Zuckerhirse als Rohstoffpflanze für die Bioethanolherstellung nutzbar zu machen, ist in der Praxis hinreichend beschrieben und es existieren bereits erste Bioethanolanlagen auf Zuckerhirsebasis. So haben die Unternehmen TATA CHEMICALS LTD. und PRAJ INDUSTRIES LTD. in Indien die erste kommerzielle Ethanolanlage mit einer Kapazität von 12.000 m³/a für den Einsatz von Zuckerhirsesaft in Betrieb genommen. Die verbleibende Bagasse wird als Futtermittel verwendet [48] [272]. Auch werden bereits entwickelte Verfahren zur Zuckerhirsepresssaftfermentation durch Unternehmen wie UBF, ULTIMATE BIOFUELS, INC. (U.S.A.), in Zusammenarbeit mit RUSNI DESTILLERIES LTD. (Indien), angeboten. Dabei werden die Hirsestängel im ersten Schritt gewaschen und danach gepresst. Der Saft wird in weiteren Prozessschritten pasteurisiert und eingedampft und mit *Saccharomyces cerevisiae*-Stämmen fermentiert. Mit diesem Verfahren sollen Produktionsmengen von 48 bis 64 Liter Ethanol pro t Zuckerhirsestängel möglich sein [281].

Erste europäische Erfahrungen zur Zuckerhirsepresssaftfermentation sind aus den 1980er Jahren aus Österreich bekannt. Dabei stellte der Bereich der Fermentation verfahrenstechnisch kein großes Problem dar [277]. Eine Zugabe von Nährstoffen war nicht zwingend erforderlich. Im Pilotmaßstab stellte sich allerdings heraus, dass Pasteurisieren für kontinuierliche Fermentationen notwendig war [236]. WU et al. (2010) [304] zeig-

ten jedoch, dass sich eine Hitzesterilisation negativ auf den Ethanolertrag auswirken kann und somit möglichst vermieden werden sollte.

Seit 2009 werden im Rahmen des von der EU („Intelligent-Energy-Programm“) geförderten Projekts „SWEETHANOL“ Möglichkeiten und Potenziale zur dezentralen Zuckerhirsekonversion zu Bioethanol in südlichen Regionen Europas untersucht [272]. Hierzu sollen verschiedene Fallstudien entlang der gesamten Wertschöpfungskette betrachtet werden, um anschließend Empfehlungen für eine möglichst nachhaltige Ethanolerzeugung aus Zuckerhirse bereitstellen zu können. Obwohl, wie bereits dargelegt, ein Pasteurisieren bzw. Sterilisieren von Zuckerhirsepresssaft nicht zwingend notwendig erscheint, geht der Sweethanol-Ansatz auch von einer Pasteurisierung des Saftes aus.

3.8.2.1 Verfahrensübersicht

Für die Ethanolgewinnung aus Zuckerhirse sind verschiedene Verfahrensvarianten denkbar. Diese sind abhängig vom verwendeten Substrat und der Prozessführung. Als Substrat können Häckselgut, Presssaft aber auch Bagasse nutzbar gemacht werden. Die im Häckselgut in löslicher Form vorliegenden Zucker können in einer sogenannten Feststoff- oder Perkolatfermentation zu Ethanol umgesetzt werden. Die Fermentation von Presssaft erfolgt entweder direkt auf dem Feld in einer sogenannten In-Field Fermentation oder in einer Anlage als Batch-Ansatz mit oder ohne Zellrückführung. Vorbehandelte Bagasse kann als Substrat für Ethanol der sogenannten zweiten Generation dienen, wobei diese separat oder im Beisein von Zuckerhirsepresssaft fermentiert werden kann.

In diesem Kapitel wird genauer auf die einzelnen Verfahren eingegangen und deren Vor- und Nachteile aufgeführt. Eine Gesamtübersicht der Verfahren vom Zuckerhirseanbau bis zur Ethanolgewinnung ist in Abbildung 5 dargestellt.

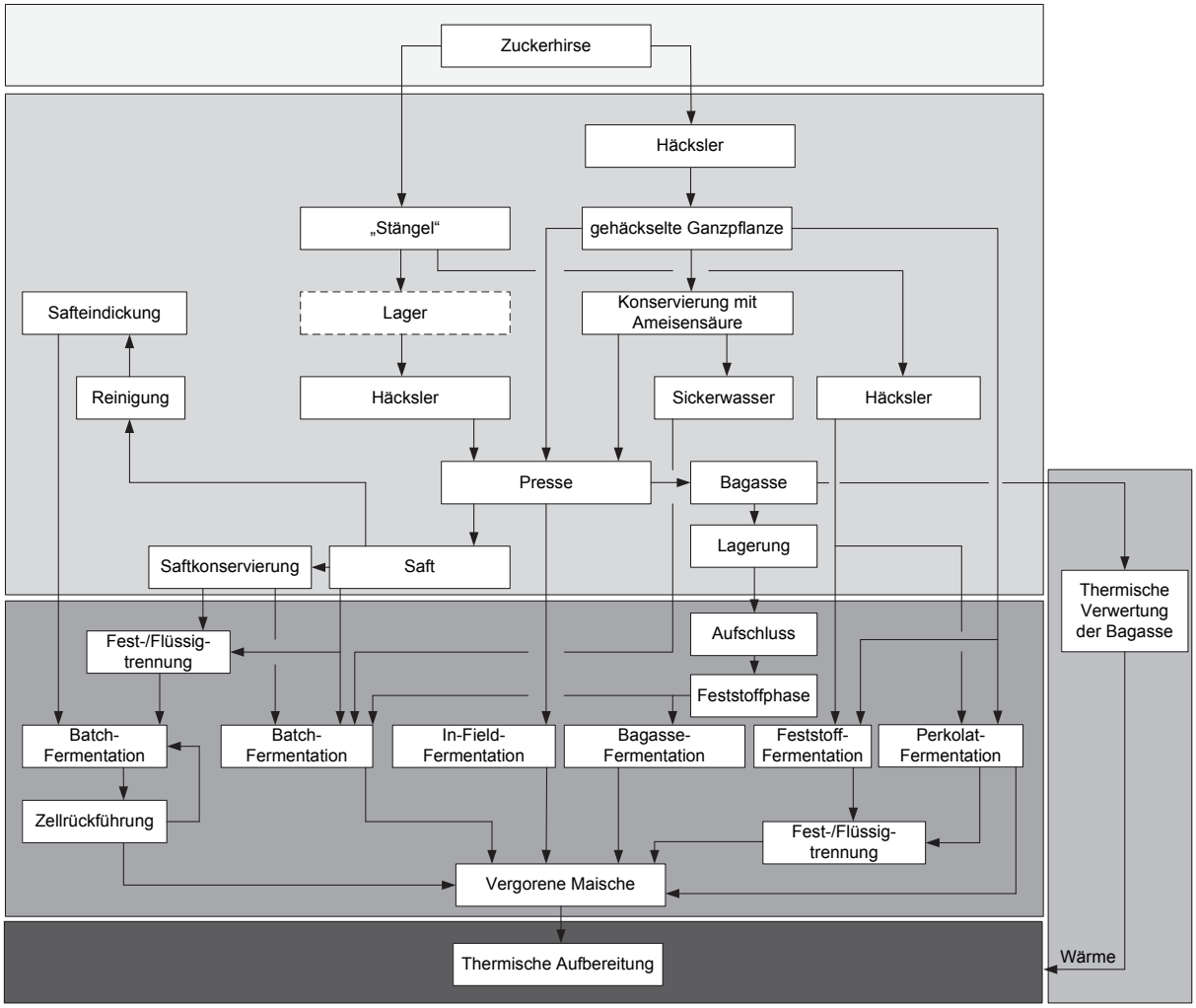


Abbildung 5: Verfahrensübersichtsschema zur Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung

3.8.2.2 Verfahren für gehäckseltes Pflanzenmaterial

Zuckerhirse kann, auch ohne vorherige Pressung, bereits in zerkleinerter Form direkt mit Hefen versetzt werden, um die im Zellsaft der Häcksel in gelöster Form vorliegenden Zucker zu Ethanol umzusetzen. Bei dieser Art der Fermentation findet in einem Reaktor gleichzeitig die Zuckerextraktion und Fermentation statt, ohne dass dabei zusätzlich Wasser hinzugegeben werden muss. In der angloamerikanischen Fachliteratur wird diese Verfahrensweise als „Solid-State Fermentation“ bezeichnet [145] [268] [306]. Im Weiteren wird die deutsche Übersetzung „Feststoff-Fermentation“ verwendet.

Eine Abwandlung des Verfahrens stellt das mit Zuckerrohr erprobte so genannte „Ex-Ferm-Verfahren“ dar, bei dem die Fermentation unter Beisein eines Perkolats (Perkolat-Fermentation) betrieben wird.

3.8.2.2.1 Feststoff-Fermentation

Unter Feststoff-Fermentation wird ein Fermentationsverfahren verstanden, bei dem ein Feuchtegehalt des Substrats zwischen 30 und 85 % vorhanden ist [306]. Der Feuchtegehalt der Häcksel hat einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der Feststoff-Fermentation. Ein niedriger Feuchtegehalt ist förderlich, um eine möglichst hohe Ethanolkonzentration zu erzielen und um den Energieeinsatz in der Destillation möglichst gering zu halten. Jedoch benötigen die Hefen einen bestimmten Mindestgehalt an Feuchtigkeit, um einen störungsfreien Fermentationsvorgang zu gewährleisten [307]. Ebenfalls für das Verfahren entscheidend sind die Partikelgrößen der Häcksel. Durch das Oberflächen-Volumenverhältnis wird die Zugänglichkeit der Zucker für die Hefen beeinflusst. Darüber hinaus haben Agglomerierung (Verklumpung), Gasaustausch und Substratquellung Auswirkungen auf die Güte der Fermentation. Ungleichmäßige Temperaturverteilungen (Hot-Spots) können bei der Feststoff-Fermentation zu Problemen führen.

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass den Hefen prinzipiell alle in der Zuckerhirse in löslicher Form vorhandenen Zucker zur Verfügung gestellt werden und somit potenziell höhere Ethanolausbeuten bzw. Flächenerträge als bei einer Saftgärung zu erwarten sind. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass für eine anschließende Destillation in der Regel der Feststoff von der fermentierten Maische abgetrennt werden muss. Dies führt ebenfalls zu entsprechenden Verlusten in Abhängigkeit des Abpressgrades. Bisher konnte sich die Feststoff-Fermentation im industriellen Maßstab nicht durchsetzen.

In den U.S.A wurden bereits in den 1980er Jahren Versuche zur Feststoff-Fermentation von Zuckerhirse mit *Saccharomyces cerevisiae* durchgeführt [112] [144] [145]. Bei den Versuchen von KARGI et al. (1985) [145] wurden feuchte Zuckerhirsehäcksel der entblätterten und speziell aufbereiteten Pflanze im Labormaßstab mit Weinhefen versetzt und in einem Temperaturbereich von 20 bis 40 °C fermentiert. Bei einer Feuchtigkeit von ca. 70 % und Temperaturen von 26 °C konnten Konzentrationen von 67 g Ethanol pro Liter bei einer maximalen Ethanolproduktivität von 6 g l^{-1} h^{-1} erzielt werden. Die Ausbeuten von Ethanol, bezogen auf die Ausgangszucker lagen zwischen 0,31 und 0,37 g Ethanol pro g Zucker, wobei die Ausbeuten mit dem Feuchtegehalt der Häcksel anstiegen. Die höchste Konzentration von 75 g Ethanol pro Liter wurde bei 25 °C gebildet, wo hingegen die schnellsten Produktbildungsraten bei 35 °C gefunden wurden (Ethanolendkonzentration ca. 71 g Ethanol pro Liter). Die höchsten Ethanolkonzentrationen konnten mit Animpfzelldichten zwischen 1 x 10^6 und 1 x 10^7 Zellen pro g Ausgangsmaterial gefunden werden. Höhere Animpfzelldichten von 1 x 10^8 bis 7 x 10^8 Zellen pro g Häckselgut führten zu einer geringere Endethanolkonzentration.

Ebenfalls untersuchten YU et al. (2008) [307] die Feststoff-Fermentation von gehäckselter Zuckerhirse (Stängelfraktion der Sorte ‘Rio‘, TM = 29 %, 590 mg Zucker pro g TM) auf die Parameter der Anfangszelldichte, des Feuchtegehalts und zusätzlich der Partikelgröße (0,5 mm bis 10 mm). Die Fermentationen wurden bei 37 °C durchgeführt. Die höchsten Ausbeuten und Ethanolbildungsraten wurden mit den kleinsten Partikeln er-

zielt. Als optimale Animpfzelldichte wurden Werte von 4 x 10^6 Zellen pro g Ausgangsmaterial genannt. Der Feuchtegehalt wurde zwischen 60 % und 85 % variiert, wobei ein Feuchtegehalt von 75 % bis 80 % in den höchsten Ausbeuten resultierte. Die maximale Ethanolausbeute lag bei 0,46 g Ethanol pro g Zucker.

SHEN und LIU (2009) [251] verwendeten für Ihre Untersuchungen als Ausgangsmaterial auf unter 15 % Feuchtegehalt getrocknete und für sechs Monate gelagerte Zuckerhirse (Stängelfraktion der Sorte 'Liaotian No. 1', 300 bis 377 mg Zucker pro g TM). Die untersuchten Fraktionen hatten Durchmesser bis 2,8 mm. Die höchsten Ausbeuten wurden mit Partikelgrößen zwischen 0,9 mm und 1,6 mm erzielt. In Bezug auf die Animpfzelldichte und den Wassergehalt konnte gezeigt werden, dass das Hefewachstum zwar von diesen Parametern beeinflusst wurde, die Ethanolausbeute jedoch nicht betroffen war. Die höchste in dieser Arbeit erzielte Ausbeute ist mit 0,27 g Ethanol pro g Zucker allerdings als äußerst gering einzustufen.

GIBBONS et al. (1986) [112] entwickelten im Pilot-Maßstab ein Verfahren für Farmen, dass die Feststoff-Fermentation im semi-kontinuierlichen Betrieb erlaubt. Dazu wurde ein waagerechter Feststoff-Fermenter mit Förderschnecke eingesetzt, wobei als Ausgangsmaterial getrocknete Zuckerhirse mit einem Feuchtegehalt von 15 % diente. Für die Versuche wurden die Häcksel auf 70 % Feuchtigkeit rehydriert. Der pH-Wert wurde mit Schwefelsäure unterhalb von drei eingestellt, wobei die Fermentationstemperatur zwischen 30 und 35 °C lag. Mit dem Verfahren konnten ca. 85 % der theoretisch möglichen Ethanolausbeute erzielt werden.

Tabelle 9 liefert eine Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Untersuchungen zur Feststofffermentation, wobei nur die Parameter aufgelistet sind, die zu den höchsten Ethanolausbeuten führten.

Tabelle 9: Kennwerte zur Feststoff-Fermentation – Parametersätze aus den jeweiligen Untersuchungen mit den höchsten Ausbeuten an Ethanol

Studie	Temperatur in °C	Animpfzellmenge in Anzahl / g Häcksel	Partikelgröße in mm	Feuchtegehalt in %	Ethanolausbeute in g Ethanol / g Zucker
KARGI et al. (1985) [145]	25	1 x 10^7	k. A.	70	k. A.
KARGI und CURME (1985) [144]	35	k. A.	0,2 - 7,0	65	0,43
GIBBONS et al. (1986) [112]	30	1 x 10^7	< 2,54	70	0,43
YU et al. (2008) [307]	37	4 x 10^6	0,5 - 1,5	75 - 80	0,46
SHEN und LIU (2009) [251]	30	k. A.	0,9 - 1,6	71,4	0,27

3.8.2.2.2 Perkolat-Fermentation (Ex-Ferm-Verfahren)

Beim Ex-Ferm-Verfahren werden gehäckselte zuckerhaltige Partikel mit einer Länge von 4 bis 10 mm mit ca. 1,4 Teilen Wasser verdünnt und mit Hefen beimpft [228]. Nach Beendigung der Fermentation wird die wässrige Phase von der festen Phase abgetrennt und die feste Phase weiter ausgepresst. Die vereinten Flüssigkeiten können anschließend im nächsten Fermentationsschritt nochmals verwendet werden. Der Vorgang kann prinzipiell solange wiederholt werden, bis die Ethanoltoleranz der Hefen erschöpft ist [228]. Bereits von STREHLER et al. (1987) [268] wurde der mögliche Einsatz des Ex-Ferm-Verfahrens diskutiert, bei dem kleingehäckseltes zuckerhaltiges Material mit Hilfe eines Perkolatstroms fermentiert wird. Die erzielten Ethanolausbeuten lagen zwischen 80 bis 90 % der theoretisch möglichen Ausbeute [268]. Das Ex-Ferm-Verfahren hat den großen Vorteil, dass durch das Perkolat die Temperaturen während der Fermentation kontrolliert werden können, andererseits ist die Zugabe von Prozesswasser und die damit verbundene Verdünnung ein nicht vernachlässigbarer Nachteil dieses Verfahrens. Für einen dezentralen Ansatz ist ein Verfahren denkbar, welches in analoger Weise zu dem bei der Biogasherstellung im Einsatz befindlicher Feststoffvergärung in „Garagenbauweise“ funktioniert.

3.8.2.3 Verfahren für Zuckersaft

3.8.2.3.1 Fermentationsverfahren

Für die Fermentation mit Presssaft, können prinzipiell Batch-, repetitive und kontinuierliche Verfahren eingesetzt werden. Im Folgenden werden die Fermentationsverfahren dargestellt und auf dessen Vor- und Nachteile hingewiesen.

Verfahren im Batch-Ansatz (satzweiser Betrieb) sind gekennzeichnet durch eine einmalige Substratvorlage zu Fermentationsbeginn [59]. Aufgrund der Einfachheit und eines geringeren Kontaminationsrisikos der Batch-Vorgehensweise, wird dieses Verfahren seit Jahrzehnten bevorzugt eingesetzt [272]. Die Batch-Fermentation beginnt entweder mit der Hefevermehrung (Erhöhung der Zellzahl/Propagation) in einem Vorkulturfermenter oder mit der Vorbereitung einer erforderlichen Menge an Hefe, z. B. Rehydration von Trockenhefe. Zwangsläufig startet die Fermentation bei einer relativ hohen Zuckerkonzentration. Diese kann sich jedoch stammabhängig nachteilig auf den Stoffwechsel der Hefe auswirken oder zu einer erhöhten Bildung an Nebenprodukten führen [223]. Nach Fermentationsende kann die Hefe vom Fermentationsmedium abgetrennt werden und nach einem Waschschritt (z. B. mit Säure bei pH 2 oder mit 40 - 50 ppm Chlordioxid) wieder verwendet werden [131]. Das Verfahren mit recycelter und gewaschener Hefe wird als Melle-Boinot-Prozess bezeichnet [230]. Dieser Prozess stellt den am häufigsten in Brasilien zur Bioethanolherstellung aus Zuckerrohr eingesetzten Prozess dar [8]. Eine weitere Option besteht darin, die Fermentation repetitiv als Batch zu betreiben. Dabei wird ein Teil des Ansatzes im Anschluss an die Fermentation im Fermenter belassen, um dieses als Inokulum für frisches Medium zu verwenden. Das Kontaminationsrisiko ist bei dieser Prozessführung höher, kann allerdings durch eine Säure- bzw. Chlordioxidbehandlung (wie oben beschrieben) minimiert werden [131] [218].

Im Labormaßstab wurde die Fermentation von Zuckerhirsepresssaft mit Zuckerkonzentrationen von bis zu 20 % bereits eingehend untersucht [162] [254] [304]. Es konnten Substratausbeuten von 0,42 bis 0,45 g Ethanol pro Gramm Zucker erzielt werden. Durch die repetitiv geführte Batch-Strategie, bei der nach Erreichen von 20 % des Ausgangsgehaltes an Zucker noch einmal ca. 30 % der Saftmenge zugegeben wurde, konnte die Ausbeute sogar auf 0,48 Ethanol pro Gramm Zucker gesteigert werden.

Bei der Anwendung eines kontinuierlichen Fermentationsverfahrens können die Reaktionsvolumina kleiner gehalten werden. Das hat den Vorteil, dass die Anlagen effizienter betrieben werden können und ein geringerer Arbeitsbedarf besteht [223] [244]. Jedoch ist dieses Verfahren anfälliger gegenüber Kontaminationen und bedarf eines genetisch stabilen Organismus, um eine gleichbleibende Prozessqualität zu gewährleisten [223] [231] [147].

Ein weiteres im Pilotmaßstab untersuchtes Verfahren ist die sogenannte „In-Field Fermentation“. Um Zuckerverluste zu minimieren und einen höchstmöglichen Ethanolertrag zu erhalten, erfolgt hierbei die Pressung und das Ansetzen der Fermentation direkt nach der Ernte, entweder auf dem Feld („In-Field“) oder am Lagerort. Der Zuckerhirsepresssaft wird anschließend in Tanks gefüllt und mit Hefe versetzt. Die Gärung verläuft selbstständig, ohne einen Eintrag an zusätzlichen Nährstoffen, einer pH-Wert-Korrektur oder einer Durchmischung. Untersuchungen zum Verfahren zeigten, dass das Fermentationsprodukt als sehr lagerstabil eingeschätzt werden kann [27] [26] [25] [154].

3.8.2.3.2 Aufbereitung von ameisensäurekonservierten Presssäften

Bei SCHMIDT et al. (1997) [243] wurde eine erfolgreiche Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut mit Ameisensäure beschrieben. Ameisensäure kann sich inhibierend auf die Hefen auswirken, wobei der Einfluss in komplexen Medien geringer ist als in synthetischen, nährstoffärmeren Medien. Die hemmende Wirkung der Säure geht vor allem von der undissoziierten Form aus [172] [192]. Durch die kleine Molekülgröße kann die Ameisensäure durch die Plasmamembran diffundieren und senkt den intrazellulären pH-Wert ab [288] [289] [207]. Die Absenkung des pH-Werts wird teilweise mit der in der Plasmamembran befindlichen ATPase durch Protonenabgabe kompensiert, was jedoch zur Folge hat, dass weniger ATP für die Ethanolbildung zur Verfügung steht. Liegt die Säure allerdings in sehr geringen Konzentrationen vor, kann das ATP-System stimuliert werden und es können sogar höhere Ethanolausbeuten erreicht werden [165] [205].

Die inhibierende Wirkung ist demnach stark von der Säurekonzentration und dem Dissoziationsgrad abhängig. Ameisensäure hat einen pKs-Wert von 3,75 [109]. Um eine Inhibierung der Hefen weitestgehend zu verhindern, sollte der pH-Wert deshalb zu Fermentationszwecken größer als 3,75 vorliegen. Hinzu kommt, dass das pH-Optimum der Hefen ebenfalls oberhalb von 3,5 liegt. Aus den genannten Gründen sollte der pH-Wert vor Fermentationsbeginn angehoben werden. Hierzu eignen sich z. B. Laugen, wie Calcium- und Natriumhydroxid.

Für die Reaktion von Natriumhydroxid mit Säuren gilt:

$$H^+ + NaOH \rightarrow Na^+ + H_2O \qquad 3\text{-}6$$

Natronlauge ist auf Grund seiner hohen Basizität und der sehr guten Wasserlöslichkeit (siehe Tabelle 10) ein gängiges Neutralisationsmittel. Jedoch ist ihre stark reizende Wirkung und der hohe Preis für eine großtechnische Anwendung nachteilig. Eine pH-Einstellung zu Fermentationszwecken erfolgt meist mit Calciumdihydroxid, als wässrige Suspension oder durch direkte Zugabe im Saft [218].

Für die Reaktion von Calciumdihydroxid mit Säuren gilt:

$$2H^+ + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2H_2O \qquad 3\text{-}7$$

Für dessen Einsatz sprechen der günstige Preis, die gute Verfügbarkeit und die gesundheitliche Unbedenklichkeit [56] [140]. Ebenfalls ist Calciumcarbonat für die pH-Wertkorrektur denkbar:

$$2H^+ + CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + H_2O + CO_2 \qquad 3\text{-}8$$

Aufgrund der sehr geringen Wasserlöslichkeit von Calciumcarbonat kann es im Fermenter im Überschuss vorgelegt werden, ohne dass es zu einer hemmenden Wirkung auf Mikroorganismen kommt. Sollte während der Fermentation Calciumcarbonat verbraucht werden, z. B. durch Säurebildung, geht weiteres Calciumcarbonat aus der vorgelegten Menge in Lösung. Damit kann der pH-Wert während der Fermentation relativ konstant gehalten werden, da gebildete Säure weithin mit Calciumcarbonat sukzessive weiterreagieren kann [267]. Die pH-Wert-Einstellung mit Calciumcarbonat kann von Vorteil sein, wenn die pH-Korrektur nicht, wie z. B. in Serumflaschenversuchen, gesteuert werden kann. Stöchiometrisch werden für die Neutralisation von 1 g Ameisensäure 1,09 g Calciumcarbonat, 0,87 g Natriumhydroxid oder 0,80 g Calciumdihydroxid benötigt. Die tatsächlich benötigte Menge wird jedoch zusätzlich vom jeweiligen Löslichkeitsverhalten beeinflusst.

Eine Übersicht der Löslichkeiten, der Gefahrenkennzeichnung und der Preise der vorgestellten Basen bietet die folgende Tabelle:

Tabelle 10: Löslichkeiten, Gefahrenstoffkennzeichnung und Preise von Natriumhydroxid, Calciumdihydroxid und Calciumcarbonat zur pH-Wert-Anhebung

Base	Löslichkeit in Wasser bei 20 °C in g/l	Gefahren-bezeichnung	GHS-Kennzeichnung	Preis in €/t zzgl. MwSt.
NaOH	1.090 [53]	Ätzend [53]	GHS05 [53]	750[1]
$Ca(OH)_2$	1,7 [52]	Reizend [52]	GHS07 [52]	60[2]
$CaCO_3$	0,0013 [51]	keine [51]	keine [51]	60[2]

[1] *Preisauskunft HEMA-Rohstoffe, Nürnberg, 31.05.2012*
[2] *Preisauskunft Walhalla Kalk GmbH & Co. KG, Regensburg, 08.12.2011*

3.8.2.4 Verfahren für Bagasse

Der bei der Pressung von Zuckerhirse anfallende Pressrückstand, die Bagasse, kann sowohl thermisch als auch, nach einer entsprechenden Vorbehandlung, stofflich durch mikrobielle Konversion z. B. zu Ethanol oder Biogas genutzt werden. Wenn Prozesswärmeenergie zur Ethanolherstellung benötigt wird und diese nicht aus anderen Abwärmeströmen bereitgestellt werden kann, ist der Einsatz der Bagasse als Brennstoff sinnvoll. Dadurch kann eine weitestgehend energieautarke Verfahrensweise der Ethanolanlage realisiert und der Einsatz fossiler Energieträger minimiert werden. Eine direkte Verbrennung zur Wärmebereitstellung verspricht, im Vergleich zu anderen Verfahrenspfaden, die besten Wirkungsgrade. Für die Überschussbagasse, die nicht zur Wärmebereitstellung benötigt wird, kann es aus ökonomischer Sicht durchaus Sinn machen, diese stofflich zu nutzen, anstelle thermisch (z. B. zur Stromgewinnung) zu verwerten. Verschiedene Studien, die die thermische Nutzung zur anschließenden Stromerzeugung der stofflichen Nutzung als Rohstoff für die Ethanolerzeugung gegenüberstellen, kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen und es sind fallspezifisch separate Wirtschaftlichkeitsberechnungen erforderlich [114] [247].

3.8.2.4.1 Aufschlussverfahren

Das Lignocellulosegerüst der Bagasse besteht hauptsächlich aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Zuckerhirsebagasse, z. B. der Sorte ‘Bereny‘, setzt sich nach Untersuchungen von SIPOS et al. (2009) [254] anteilig, bezogen auf die Lignocellulose, zu 44 % aus Cellulose, 33 % aus Hemicellulose und 23 % aus Lignin zusammen, wobei die Mengenanteile unabhängig vom Erntezeitpunkt waren. Für die Bereitstellung niedermolekularen Zuckers für eine Fermentation, können prinzipiell die in der Hemicellulose und Cellulose vorliegenden Polysaccharide dienen. Allerdings ist eine Nutzung der in Hemicellulose als Hauptzucker enthaltenen Xylose zur Ethanolgewinnung derzeit noch nicht Stand der Technik. Handelsübliche, nicht gentechnisch modifizierte Hefen, können diesen Zucker nur unzureichend verstoffwechseln (siehe Kapitel 3.8.2.4.2). Eine alternative Nutzung der in Hemicellulose enthaltenen Xylose, wie beispielsweise als Biogassubstrat, ist daher anzustreben.

Die Cellulose setzt sich aus linearen Ketten von ß-1,4-verknüpften D-Glucose-Einheiten zusammen. Die mikrobiologische Konversion von Cellulose zu Bioethanol erfordert eine angepasste Aufbereitung, um die in Polymerform vorliegenden Zucker einer mikrobiologischen Nutzung zugänglich zu machen. Der für eine alkoholische Gärung notwendige Schritt des Abbaus der Polysaccharide zu monomeren Zuckern kann auf chemischem oder enzymatischem Weg erfolgen.

Eine Möglichkeit zur Nutzbarmachung lignocellulosebasierter Substrate stellt z. B. der chemische Totalaufschluss des Ligno-Cellulosegerüsts mit Säure dar. Diese Vorbehandlungsvariante ist gekennzeichnet durch eine schnelle Reaktionszeit von nur wenigen Minuten, die auch eine kontinuierliche Prozessführung ermöglicht [17] [108]. Nachteilig ist, dass der Einsatzstoff auf Korngrößen von wenigen Millimetern vorzerkleinert werden muss [166]. Durch Nebenreaktionen werden auch teilweise Zucker abgebaut, wodurch das nutzbare Zuckerpotenzial verringert wird. Zudem erfordert das Verfahren, aufgrund der vorherrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse im sauren Milieu, den Einsatz kostenintensiver Reaktorwerkstoffe.

Eine vielfach untersuchte Alternative zum Totalaufschluss stellt die biologische Hydrolyse durch Enzyme dar. Die Enzyme ermöglichen eine sehr selektive und damit nebenproduktarme Hydrolyse der Cellulose. Für die schrittweise Hydrolyse von Cellulose zu Glucose (Verzuckerung) sind unterschiedlich wirkende Enzyme (Cellulase) notwendig. Für die kommerzielle Produktion von Enzympräparaten werden die Pilzkulturen *Trichoderma reseei* und *Aspergillus niger* bevorzugt eingesetzt [291] [242]. Als optimale Temperaturen für eine konventionelle enzymatische Hydrolyse von Cellulose gelten 45-50 °C [273].

Um die enzymatische Hydrolyse der Cellulose zu beschleunigen, ist eine Vorbehandlung (Aufschluss) zur Lockerung des Lignin-Cellulose-Komplexes nützlich. Der Aufschluss des Lignin-Cellulose-Verbundes kann physikalisch und/oder chemisch erfolgen. Die Aufschlüsse können durch druckthermische Behandlung mit Wasser, Dampf, schwachen Säuren oder Laugen, Oxidationsmitteln, durch Extraktion mit organischen Lösungsmitteln (Organosolv) sowie durch verschiedenartigste Kombinationen dieser Verfahren geschehen [244]. Die Wahl der Vorbehandlung hängt unter anderem von dem eingesetzten Substrat und dem Verwendungszweck ab. In Abhängigkeit des gewählten Aufschlussverfahrens und den eingesetzten Prozessparametern kann es zur Bildung unerwünschter Nebenprodukte wie Furfural, Hydroxymethylfurfural (HMF), Methansäure sowie Lävulinsäure kommen, die sich inhibierend auf Mikroorganismen wie Hefen auswirken können [206]. Eine mechanische Zerkleinerung im Vorfeld zum Aufschluss wirkt sich förderlich aus, da somit im Vorfeld eine Verringerung des Polymerisationsgrads der Lignocellulose erzielt und die kristalline Struktur von Cellulose teilweise aufgebrochen werden kann [142].

Bei hydrothermalen Vorbehandlungsverfahren, mit Wasser im flüssigen Aggregatzustand (Liquid Hot Water, LHW), erfolgt während des Aufschlussprozesses eine Fraktionierung in eine cellulosereiche Feststoff- und eine hemicellulosereiche Flüssigphase. Dieses Verfahren ist dann von Vorteil, wenn für die Fraktionen unterschiedliche Verwertungspfade vorgesehen sind. Beim LHW-Verfahren wird das Ausgangsmaterial Temperaturen von

mehr als 100 °C und entsprechendem Druck, zur Aufrechterhaltung der flüssigen Phase, ohne Zusatz von Chemikalien, ausgesetzt [108]. Bei stringenteren Bedingungen kann es auch zur teilweisen Degradation von Zuckern und zu unerwünschten Nebenprodukten kommen. Dieses Risiko ist allerdings vergleichsweise gering [166]. Im Anschluss an die thermische Druckbehandlung kann eine Abkühlung entweder kontrolliert oder durch eine schlagartige Entspannung geschehen. Wird der Druck sehr schnell gesenkt, entstehen Dampfblasen, durch welche die Gewebestrukturen der Lignocellulose aufreißen, was sich zusätzlich förderlich für die anschließende enzymatische Hydrolyse auswirken kann. Das beschriebene LHW-Verfahren eignet sich vor allem für Rohstoffe, die einen geringen Ligningehalt aufweisen, wie es für Zuckerhirsebagasse der Fall ist.

In der Literatur wird für die Beschreibung der Behandlungshärte des LHW-Verfahrens der sogenannte „Severity-Faktor“ R_0 verwendet [283] [88] [3] [254]. Dieser stellt einen Zusammenhang zwischen der Vorbehandlungsdauer t im Reaktor und der Reaktionstemperatur T_t in °C dar und soll den Einfluss auf die Löslichkeit der Hemicellulose beschreiben.

Die empirisch ermittelte Formel beschreibt den Zusammenhang folgendermaßen [204]:

$$R_o = \int_{t=0}^{t} \exp\left(\frac{T_t - 100}{14{,}75}\right) dt \qquad 3\text{-}9$$

Der im Nenner in Gleichung 3-9 enthaltene Wert von 14,75 stellt einen experimentell ermittelten Wert dar und steht im Zusammenhang mit der Aktivierungsenergie einer Reaktion erster Ordnung [204].

Für einen Vergleich verschiedener Behandlungshärten dient in der Praxis der dekadische Logarithmus von R_0.

3.8.2.4.2 Fermentation

Neben der Verwertung von Glucose aus der Cellulose könnten potenziell auch die Zucker der Hemicellulose, vor allem Pentosen, für die Ethanolherstellung Verwendung finden. *Saccharomyces cerevisiae* kann, wie auch *Zymomonas mobilis*, auf natürliche Weise keine Pentosen verstoffwechseln [223]. Andere Spezies von Bakterien, Fadenpilze und Hefen können zwar Pentosen zu Ethanol fermentieren, bilden jedoch meist eine Reihe von Nebenprodukten und besitzen eine vergleichsweise geringe Produktivität oder benötigen eine äußerst komplexe Prozessführung [50] [133] [163] [164] [167] [168] [290]. Z. B. kann *Pichia stipitis* Ethanol aus Xylose zu Ethanol umsetzen, dies ist aber nur unter Einsatz einer äußerst komplexen Sauerstoffregelung möglich [290]. DELGENES et al. (1998) [70] kultivierten *Saccharomyces cerevisiae* und *Pichia stipitis* gemeinsam. Dabei konnten 100 % der eingesetzten Glucose aber nur 60 % der Xylose zu Ethanol umgewandelt werden.

In Tabelle 11 sind die maximalen Ethanol-Ausbeuten bezogen auf den eingesetzten Zucker durch verschiedene Mikroorganismen dargestellt. Maximal konnten 78 % der eingesetzten Xylose für die Ethanolherstellung genutzt werden [133].

Tabelle 11: Maximale Ethanolausbeuten verschiedener Hefekulturen in Bezug auf die Verwertung von Xylose

Studie	Stamm	Ethanolausbeute
LEBEAU et al. (1998) [168]	*Saccharomyces cerevisiae, Candida shehatae*	0,48 g Ethanol pro g (Glucose + Xylose)
DELGENES et al. (1998) [70]	*Saccharomyces cerevisiae, Pichia stipitis* NRRL 11545	0,43 g Ethanol pro g (Glucose + Xylose)
LAPLACE et al. (1991) [163]	*Pichia stipitis* NRRL Y 7124	0,36 g Ethanol pro g Xylose
JEFFRIES (1985) [133]	*Candida shehatae* ATCC 22984	0,40 g Ethanol pro g Xylose

Da die Fermentation von Xylose zu Ethanol im industriellen Maßstab bisher nicht befriedigend umgesetzt wurde, sind für eine praktische Nutzung der Xylose alternative Pfade vorzuziehen.

3.8.2.4.3 Verfahrenskonzepte

Für die Konversion von Cellulose zu Ethanol sind prinzipiell zwei grundlegende Verfahrensweisen zu unterscheiden. Zum einen können die enzymatische Hydrolyse von Cellulose und die Fermentation in zwei aufeinanderfolgenden Schritten erfolgen. Zum anderen ist eine Kopplung beider Prozessschritte im sogenannten SSF-Verfahren (SSF, Simultaneous Saccharification and Fermentation) möglich. Die Trennung von enzymatischer Hydrolyse und Fermentation hat den Vorteil, dass beide Verfahrensschritte bei den jeweiligen optimalen Temperaturbedingungen betrieben werden können. Bei der enzymatischen Hydrolyse wirken jedoch Inhibierungsmechanismen durch die entstandenen Produkte wie Cellobiose und Glucose, welche zu einer Herabsetzung der Reaktionsgeschwindigkeit führen [273]. Der Vorteil der gleichzeitigen Verzuckerung und Fermentation (SSF) ist darin zu sehen, dass die von den Enzymen (Cellulasen, ß-Glucosidasen) freigesetzte Glucose sofort von den Hefen genutzt werden kann und es zu keiner Produkthemmung der Enzyme durch Glucose kommt. Dadurch kann die notwendige Enzymeinsatzmenge verringert und gleichzeitig die Ethanolausbeute erhöht werden [245] [271]. Als nachteilig können die verschiedenen Prozessanforderungen der Enzyme und Hefen bezüglich Temperatur und pH-Wert angesehen werden. Durch die geringere Temperaturverträglichkeit der Hefen gegenüber der von Enzymen, ist mit einer Herabsetzung der Enzymaktivitäten zu rechnen [177] [305]. Insgesamt kann jedoch davon ausgegangen werden, dass im SSF-Verfahren im Vergleich zur separaten enzymatischen Hydrolyse

und Fermentation kürzere Prozesszeiten erzielt werden können [271]. Derzeit stellt das SSF-Verfahren eines der am erfolgversprechendsten Konzepte zur Ethanolgewinnung aus lignocellulosehaltiger Biomasse dar [273].

Eine große Herausforderung bei der Ethanolherstellung aus Lignocellulose stellt derzeit die Erzielung ökonomisch vertretbarer Ethanolkonzentrationen dar. Um diese zu erreichen, sind in der Regel hohe Feststoffkonzentrationen erforderlich, was die Verwendung von Spezialapparaturen notwendig macht [137]. Konventionelle Werte für den Feststoffgehalt liegen zwischen 5 und 10 % [202]. Feststoffgehalte von ≥ 10 % werden als hohe Feststoffgehalte bezeichnet. Bei diesen Gehalten kann es verstärkt zu Problemen bei der enzymatischen Hydrolyse und Fermentation kommen, die zu einer Verringerung der Umsatzleistung führen kann [202] [239].

3.8.3 Thermische Verfahren zur Aufbereitung von Fermentationsmaischen

Ein energetisch bedeutsamer Verfahrensschritt bei der Ethanolherstellung stellt die Aufbereitung bzw. Abtrennung des Ethanols im Anschluss an die Fermentation dar. Hierbei gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten, um verdünnte ethanolhaltige Lösungen aufzukonzentrieren, wobei für einen kommerziellen Einsatz in der Praxis, trotz des damit verbundenen hohen Energiebedarfs, fast ausschließlich thermische Verfahren, wie Destillation und Rektifikation zum Einsatz kommen [158]. Eine energetische Optimierung dieses Verfahrensschrittes ist besonders wichtig, um fossile Energieträger bzw. Bagasse einzusparen.

Der verfolgte dezentrale Ansatz soll neben neuen Verfahren auch die Nutzung von bereits existierenden Kapazitäten, wie sie in landwirtschaftlichen Brennereien derzeit vorherrschen, miteinbeziehen. In einer landwirtschaftlichen Kleinbrennerei werden pro Jahr ca. 1.000 bis 4.500 m³ Ethanol erzeugt, wobei aufgrund der saisonal anfallenden Substrate die existierenden Kapazitäten bei weitem nicht ausgelastet sind [142]. Die Produktionskapazität einer durchschnittlichen landwirtschaftlichen Brennerei kann mit rund 2.000 m³/a angegeben werden [297]. Von SENN und LUCA (2002) [250] werden für bestehende Brennereien Kapazitäten von 2.000 und 5.000 m³ Ethanol pro Jahr, unter Berücksichtigung eines Mehrschichtbetriebs, genannt. Die Brennereien gehören zu den Kleinanlagen für die Ethanolherstellung. Anlagen im mittleren Maßstab besitzen im Vergleich dazu eine Kapazität von 10.000 bis 50.000 m³/a [142]. Gemäß Berechnungen von WETTER et al. (2004) [296] ergibt sich eine maximale Anlagenkapazität aller landwirtschaftlichen Brennereien in Deutschland von ca. 700.000 m³/a.

3.8.3.1 Destillation und Rektifikation

Unter Destillation wird die teilweise Verdampfung und anschließende Kondensation engsiedender Gemische verstanden, wobei sich die Produktfraktionen in ihrer Zusammensetzung unterscheiden [185]. Hauptaufgabe der Destillation stellt die Feststoffabtrennung und Entgeistung der Maische dar. In kontinuierlich arbeitenden Maischedestillationskolonnen wird in der Regel ein Rohalkohol mit einem Anteil zwischen 42 bis 50 Masse-%

an Ethanol erzeugt [106] [142]. Die weitere Aufkonzentrierung des nun feststofffreien Ethanol-Wasser-Gemisches geschieht durch Rektifikation, welche vom Prinzip eine wiederholte Destillation mit externem Kondensationsrücklauf am Kolonnenkopf darstellt [185]. Mit diesem Verfahren wird das Ethanol bis in die Nähe des Azeotrops, meistens bis 90 - 94 Masse-%, aufkonzentriert [106]. In landwirtschaftlichen Brennereien wird Alkohol mit einer Qualität von ca. 82 Masse-% (85 Vol.-%) erzeugt. Typisch ist die Verwendung einer kontinuierlich arbeitenden Rohalkoholkolonne, die am Kolonnenkopf einen Dephlegmator (Teilkondensator) besitzt. Die Kolonne hat neben der Maischekolonne auch einen Verstärkerteil, der zusammen mit dem Dephlegmator Alkoholkonzentrationen zwischen 79 und 84 Masse-% erlaubt [142]. Die Beheizung landwirtschaftlicher Kolonnen geschieht entweder durch eine direkte Dampfeinspeisung oder durch den Einsatz eines Heizregisters. In neueren Anlagen dient die zu destillierende Maische als Kühlmittel im Kolonnenkopf. Für die Lagerung des Ethanol-Wasser-Gemisches wird der Ethanoldampf in einem weiteren Kühler auf unter 20 °C abgekühlt.

In Tabelle 13 sind unterschiedliche Verfahren der Destillation/Rektifikation in Bezug auf den Wärmeenergiebedarf gegenübergestellt. Einflüsse auf den Energieverbrauch haben neben dem Ethanolgehalt der Maische, die Kolonnenstufenzahl, das Rücklaufverhältnis, die Kolonnengröße und das Wärmeverbundnetz. So kann in einer von GALBE et al. (2007) [108] betrachteten wärmeintegrierten Destillations- und Rektifikationseinheit der Energiebedarf in Abhängigkeit der Ethanolkonzentration in der Maische (1 bis 8 Masse-% Ethanol) zwischen 25 und 4 MJ/l Ethanol schwanken. Im Vergleich dazu besitzt Ethanol eine Heizwert von 21,16 MJ/l [118] [130]. Aus ökonomischer Sicht sollten Konzentrationen von mindestens 4 bis 5 Masse-% Ethanol in der Maische vorhanden sein [108] [284]. Einen bedeutenden Einfluss auf den Energiedarf hat ebenfalls die Anlagengröße. Je kleiner die Anlage ist, und damit auch der Durchmesser der Kolonnen, desto geringer ist die Trenneffektivität der einzelnen Stufen. Bei einer Rektifikationskolonne mit einer Anlagenkapazität von 15.000 t/a ist z. B. die Trenneffektivität um ca. 23 % niedriger als bei einer Anlage mit einer Kapazität mit 100.000 t/a [106].

Die aus der Destillation erhaltene Schlempe (Destillationsrückstand) kann auf verschiedene Weise verwertet werden, wobei die Zusammensetzung stark vom eingesetzten Substrat, ob zucker- oder stärkehaltig, abhängig ist. Zu den gängigsten Verwertungspfaden zuckerhaltiger Substrate zählen die direkte Verwendung als Dünger auf dem Feld, die Eindampfung zu Düngemittelzwecken (Vinasse) und die Verwendung als Biogassubstrat [142]. In Abhängigkeit des gewählten Weiterbehandlungsverfahrens ist oft mit einem zusätzlichen und nicht unerheblichen Energieaufwand zu rechnen.

3.8.3.2 Absolutierung

Da die maximal erreichbare Konzentration von Ethanol aufgrund des in Ethanol-Wasser-Gemischen vorhandenen Minimumazeotrops auf ca. 96 Masse-% begrenzt ist, bedarf es nach der Rektifikation für eine weitere Entwässerung gesonderte Absolutierungsverfahren. Gemäß der aktuell gültigen Norm DIN EN 15376 darf Ethanol für einen Einsatz als Blendkomponente in Ottokraftstoffen eine maximale Wasserkonzentration von

0,300 Masse-% aufweisen [85]. Für die Entwässerung (Trocknung) im industriellen Maßstab werden die Azeotrop- bzw. Schleppmittelrektifikation, das Molekularsieb- oder das Membranverfahren eingesetzt.

Die Azeotroprektifikation von Ethanol unter Verwendung eines Schleppmittels stellte lange Zeit das Standardverfahren dar [142] [185] [293]. Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch eine potenzielle Abwasserbelastung und eine mögliche Produktverunreinigung mit dem Schleppmittel. Zudem ist ein hoher apparativer Aufwand zu nennen, da dieses Verfahren vergleichsweise komplex ist und es werden erhebliche Mengen an Energie benötigt [131] [142]. Eine Alternative zur Azeotroprektifikation ist die sogenannte Extraktivrektifikation, bei der die Rektifikation mit einer Absorption kombiniert wird und ein hygroskopisches Schleppmittel z. B. Ethylenglykol, im oberen Kolonnenteil eingespeist wird [36] [185].

Das Molekularsiebverfahren ist ein weiteres, und bei Neuanlagen das gebräuchlichste Verfahren [106]. Es basiert auf dem Grundprinzip der Adsorption, wobei Wasser unter bestimmten Bedingungen an das als Trocknungsmittel eingesetzte Zeolith selektiv aber reversibel gebunden wird [297]. Das Adsorptionsverfahren ist relativ flexibel, bezogen auf die Ethanolkonzentration in der Vorlage. Damit können auch Ethanolkonzentrationen unterhalb von 90 Masse-% entwässert werden. Jedoch ist bei diesem Verfahren mit schwankenden Produktqualitäten und hohen Instandhaltungskosten zu rechnen [106] [142].

Eine weitere Möglichkeit Ethanol zu absolutieren, ist das Membranverfahren. Dieses Verfahren lässt sich auch in bereits bestehende kleinere und mittlere Anlagen integrieren [142] [297]. Dabei können zwei Techniken zum Einsatz kommen. Zum einen die Dampfpermeation, bei der das Ethanol-Wasser-Gemisch dampfförmig der Membran zugeführt wird und zum anderen die Pervaporation, bei der im flüssigen Zustand die Zuführung erfolgt. Die Dampfpermeation ist im Gegensatz zur Pervaporation weniger anfällig gegenüber Ablagerungen auf der Membranoberfläche (Fouling). Zudem kann der zu trocknende Alkohol ohne eine vorherige Kondensation direkt auf die Membranmodule gegeben werden, was Vorteile im Energieverbrauch haben kann [95] [297]. Membranverfahren haben sich allerdings im Vergleich zum Adsorptionsverfahren bisher noch nicht großtechnisch durchsetzen können. Zu den Hauptgründen zählen die hohen Membrankosten, die mit steigender zu erzielender Ziel-Ethanolkonzentration drastisch zunehmen, die notwendige Vorreinigung der Membran zur Vermeidung von Membranfouling und die geringe Betriebserfahrung mit dieser Technologie [297].

Eine Gegenüberstellung der Verfahren zur Ethanolabsolutierung aus energetischer Sicht ist in Tabelle 12 wiedergegeben.

Tabelle 12: Vergleich unterschiedlicher Ethanolabsolutierungsverfahren bezogen auf den Wärmeenergiebedarf

	Schleppmittel-rektifikation [142]	Adsorption [142]	Pervaporation [123]
Wärmeenergiebedarf in MJ/l Ethanol	~5,3	~2,9	~3,2

Aus energetischer Sicht haben das Adsorptions- und das Membranverfahren deutliche Vorteile gegenüber der Schleppmittelrektifikation. In Tabelle 13 sind zudem theoretische Werte in Bezug auf den Gesamtenergiebedarf angegeben, um Ethanol vollständig zu entwässern. Dabei wurden für die Absolutierung die Werte für das Adsorptionsverfahren verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass großtechnisch wärmeoptimierte Verfahren gegenüber den landwirtschaftlichen Brennereien einen um mindestens 18 % geringeren Energiebedarf haben.

Tabelle 13: Abschätzung des Wärmeenergiebedarfs unterschiedlicher Verfahren zur Ethanolaufreinigung

Verfahren Destillation/ Rektifikation	Ethanol-konzentration (am Austritt Destillation/ Rektifikation) in Vol.-%	Wärme-energiebedarf (Destillation/ Rektifikation) in MJ/l Ethanol	Gesamtwärme-energiebedarf (Destillation/ Rektifikation und Ab-solutierung) in MJ/l Ethanol
Großtechnisch bei Atmosphärendruck[3] [142]	94,5	~16,4[1]	~19,3
Großtechnisch-wärmeoptimiert[3] [142]	94,5	~7,3[1]	~10,2
Landwirtschaftliche Brennerei [296]	85,0	~7,2	~16,2[2]
Landwirtschaftliche Brennerei im Mehr-schichtbetrieb [190]	85,0	~3,5	~12,4[2]

[1] *Berechnung unter Berücksichtigung eines Kesselwirkungsgrads von 80 %.*
[2] *Werte errechnet unter der Annahme, dass der Energiebedarf der Adsorption unabhängig von der Ethanolkonzentration ist. Für das zu entfernende Wasser wurde ein Wert von 50,2 MJ/l H_2O angenommen.*
[3] *Verfahren mit fünf Kolonnen zur zusätzlichen Abtrennung von Methanol und Fuselölen.*

Für eine vollständige Entwässerung von Ethanol, z. B. aus landwirtschaftlichen Kleinbrennereien, kann es aus wirtschaftlichen Gründen durchaus vorteilhaft sein, diesen in einer zentralen Gemeinschafts- oder Lohnabsolutierungsanlage weiter zu verarbeiten. In

einer Machbarkeitsstudie zur Absolutierung von Bioethanol aus landwirtschaftlichen Brennereien wurde ermittelt, dass eine Entwässerung aus ökonomischer Sicht in einer zentralen Anlage gegenüber einer Hofanlage vorzuziehen ist. Für die spezifischen Produktionskosten einer zentralen Anlage mit einer Kapazität zwischen 25.000 und 50.000 t/a wurden Absolutierungskosten in Höhe von 0,03 bis 0,04 €/l errechnet. Für die Kosten einer dezentralen Anlage mit einer Kapazität von 2.000 m³/a werden Werte zwischen 0,06 und 0,08 €/l genannt [297].

3.8.4 Folgerungen

Für die fermentative Herstellung von Ethanol aus Zuckerhirse besitzt der Hefestamm *Saccharomyces cerevisiae* auf Grund seiner positiven Eigenschaften wie pH-Toleranz, Stabilität und der einfachen Verfahrensanwendung (keine sterilen Bedingungen erforderlich) ideale Voraussetzungen.

Die Ethanolherstellung aus Zuckerhirse kann auf unterschiedlichem Wege erfolgen. Zum einen ist es möglich, die gehäckselte Pflanze einzusetzen und mittels Feststoff- oder Perkolat-Verfahren in Ethanol umzusetzen. Die Feststoff-Fermentation könnte zudem eine alternative Lagerungsvariante für Zuckerhirse darstellen. Die Perkolat-Fermentation stellt hingegen eine interessante Alternative zur Presssaftfermentation in dezentralen Anlagen dar, dessen Umsetzung in Anlehnung zur Biogasherstellung in Garagenbauweise umgesetzt werden könnte. Zum anderen haben verschiedene Arbeiten die Eignung von Zuckerhirsepresssaft zur Gewinnung von Bioethanol gezeigt. Erste Anlagen für Zuckerhirse sind bereits im kommerziellen Maßstab verfügbar bzw. schon in Betrieb. Forschungsarbeiten zu Zuckerhirse haben gezeigt, dass eine Zugabe von Nährsalzen oder einer Stickstoffquelle bei den untersuchten Presssäften nicht unbedingt notwendig ist, um die Fermentationen erfolgreich durchzuführen. Da auch Fermentationen ohne pH-Kontrolle, einer aktiven Temperierung oder mechanischen Durchmischung sehr gute Ausbeuten ergaben, ist die Möglichkeit zur direkten Verwertung des Saftes als Fermentationssubstrat gegeben. Je nach Zielstellung können die Fermentationen in Richtung Geschwindigkeit oder Ausbeute optimiert werden.

Eine weitere Möglichkeit, um aus Zuckerhirse Ethanol zu gewinnen, stellt die zusätzliche Verwertung des bei der Saftpressung entstandenen Pressrückstands, der Bagasse, dar. Durch die Nutzung des lignocellulosehaltigen Substrats kann das Ethanolertragspotenzial je Fläche erhöht werden. Die Verwendung von Bagasse für die Ethanolherstellung bedarf allerdings eines zusätzlichen Verfahrensschrittes, um das Lignocellulosegerüst für celluloseabbauende Enzyme (Cellulasen) zugänglich zu machen. Durch die Vorbehandlung und den Enzymeinsatz sind die Prozesskosten zur Ethanolherstellung zwangsläufig höher als bei Verfahren, bei denen der Zucker bereits in frei zugänglicher Form vorhanden ist, sodass die Differenz durch einen kostengünstigeren Rohstoffpreis kompensiert werden muss, um konkurrenzfähig Ethanol produzieren zu können [113]. Eine Herausforderung für die Wirtschaftlichkeit stellen zudem die erzielbaren Ethanolkonzentrationen in der fermentierten Maische dar. Erste Anlagen, die einen kommerziellen Betrieb zur

Nutzung von lignocellulosehaltiger Biomasse zur Ethanolgewinnung im großindustriellen Maßstab anstreben, befinden sich derzeit im Bau [241] [128].

Bei der Abtrennung des Ethanols aus der Fermentationsbrühe durch Destillation und Rektifikation muss ein großes Augenmerk auf die Effizienz gelegt werden, um einen möglichst hohen Nettoenergiegewinn, bezogen auf den Energieinhalt von Ethanol, zu erzielen. Für einen niedrigen Prozessenergieeinsatz sollten neben einem hohen Ethanolgehalt in der Maische, die Anlage bestmöglich unter Zuhilfenahme von Druckstufen und Pinchtechnologie wärmeintegriert und die Anlagenkapazität möglichst groß sein.

Aus wirtschaftlicher und energetischer Sicht sollten die im Fermentationsprozess erzielten Ethanolkonzentrationen mindestens 4 bis 5 Masse-% Ethanol betragen.

4 Probenaufbereitung und Analytik

Im folgenden Kapitel wird die praktizierte Vorgehensweise zur Aufbereitung von Materialproben beschrieben. Dabei wird für Zuckerhirsefeststoffproben (erntefrisch, gelagert, konserviert bzw. Bagasse) unterschieden zwischen Proben für die Bestimmung des Trockenmassegehalts sowie für die Analyse des Zuckergehalts. Die in flüssigen Proben (Zuckersaft und Sickersaft) bestimmten Parameter werden ebenfalls angeführt.

4.1 Aufbereitung und Analytik von Feststoffproben

Im Versuchsjahr 2009 wurden von erntefrischen Zuckerhirseganzpflanzen Rispe und Blätter entfernt, die Stängel mit einem Laborprobenhäcksler zerkleinert und das erzeugte Häckselgut homogenisiert. Aus einem Ganzpflanzenlagerversuch wurden zu den Beprobungsterminen aus den Ganzpflanzenbündeln acht bis zwölf Stängel aus der Mitte des jeweiligen Bündels entnommen. Von diesen Stängeln wurden Rispe und Blätter entfernt und die Stängel wiederum mit einem Laborprobenhäcksler zu Häckselgut verarbeitet. Bei der Beprobung der als Stückgut gelagerten Zuckerhirse wurden jeweils 40 Stängelstücke aus der Mitte des Lagerbehälters entnommen und mit einem Laborprobenhäcksler zerkleinert.

Die Bestimmung des Trockenmassegehalts erfolgte entsprechend VDLUFA Methodenbuch III, Kapitel 3.1, Absatz 4.2.1 im Trockenschrank bei 105 °C. Das Material für die Bestimmung des Zuckergehaltes wurde 48 h im Trockenschrank bei 60 °C getrocknet. Mit einer Laborschneidmühle wurde das getrocknete Zuckerhirsematerial zunächst auf eine Korngröße von 1 mm vermahlen und mit einer Ultra-Zentrifugalmühle auf eine Korngröße von 0,25 mm vermahlen.

Im Versuchsjahr 2010 wurden die erntefrischen Zuckerhirseganzpflanzen analog dem Vorjahr aufbereitet und die Stängel zerkleinert. Zu den Beprobungsterminen wurden Stängel und Stückgut mit dem Laborprobenhäcksler zerkleinert, das Häckselgut homogenisiert und an fünf Stellen eine Probe von ca. 400 g entnommen.

Die Bestimmung des Trockenmassegehalts erfolgte wiederum entsprechend VDLUFA Methodenbuch III, Kapitel 3.1, Absatz 4.2.1 im Trockenschrank bei 105 °C. Das Material für die Bestimmung des Zuckergehalts wurde bei -20 °C eingefroren. Davon wurden ca. 100 g gefriergetrocknet, mit einer Laborschneidmühle zunächst auf eine Korngröße von 1 mm und anschließend mit einer Ultra-Zentrifugalmühle auf 0,25 mm Korngröße vermahlen.

4.1.1 Trocknungsvarianten

Anhand der in den Versuchsjahren 2009 und 2010 erzielten Ergebnisse für die Parameter Trockenmasse- und Zuckergehalt wurden Unregelmäßigkeiten festgestellt. Dies betrifft zum einen die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse an sich und zum anderen aufge-

tretene Verluste bei durchgeführten Massenbilanzierungen. Versuchsweise erfolgte die Bestimmung des Trockenmassegehalts entsprechend VDLUFA Methodenbuch III, Kapitel 3.1, Absatz 4.2.3 im Trockenschrank bei 80 °C und einem angelegten Vakuum bei 0,133 bar. Auf diese Weise konnten die bisherigen Unstimmigkeiten abgestellt werden.

Im Versuchsjahr 2011 wurde der Trockenmassegehalt von erntefrischem bzw. (säure-) konserviertem Zuckerhirsehäckselgut zum einen durch Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C (VDLUFA Methodenbuch III, Kapitel 3.1, Absatz 4.2.1) und zum anderen durch Trocknung im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar Druck (VDLUFA Methodenbuch III, Kapitel 3.1, Absatz 4.2.3) bestimmt. Nähere Informationen zu den beiden Trocknungsvarianten enthält Tabelle 14. Anhand der gewonnenen Daten sollten die beiden Methoden speziell für die Anwendung bei Zuckerhirse statistisch bewertet werden.

Tabelle 14: Übersicht Trocknungsvarianten für Zuckerhirsehäckselgut zur Bestimmung des Trockenmassegehalts nach VDLUFA MB III, Kapitel 3.1

Position	Trocknungsvariante I. bei 105 °C	Trocknungsvariante II. bei 80 °C-Vakuum
Einwaage	500 – 600 g je Lagerbehälter bzw. Probe	70 – 80 g je Lagerbehälter bzw. Probe
Vorgehen	nach Einwaage Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C	nach Einwaage: 1. Vortrocknung im Trockenschrank bei 80 °C 2. Trocknung im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar
Wiederholung	n = 2	n = 2
Methode, Spezifizierung	VDLUFA MB III, Kapitel 3.1, Absatz 4.2.1	VDLUFA MB III, Kapitel 3.1, Absatz 4.2.3
Anwendung für	übrige Futtermittel, außer nach Absatz 4.2.2: Getreide, Mehl, Grütze, Grieß und Absatz 4.2.3	Mischfuttermittel mit mehr als 4 % Saccharose oder Laktose

Die Verwiegung (Einwaage/Auswaage) der jeweiligen Proben erfolgte mit einer Waage (Typ XT1200 C, Hersteller Precisa, d = 0,1 g). Die Bestimmung des TM-Gehalts von Bagasse erfolgte analog.

Anhand der für erntefrisches Häckselgut ermittelten Trockenmassegehalte durch Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C und im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C wurde jeweils die Standardabweichung S für diese beiden Trocknungsvarianten errechnet.

Nach DIN 1319-1:1995-01 [72] kann bei genügender Anzahl von Messwerten x_i (i=1, …, n) die (empirische) Standardabweichung S die Wiederholstandardabweichung σ_r ersetzen. Im vorliegenden Fall wird angenommen, dass die gewonnene Anzahl an Messwerten als ausreichend betrachtet und im weiteren die (empirische) Standardabweichung S verwendet werden kann. Bei bekannter Wiederholstandardabweichung σ_r wird die Wiederholpräzision / Wiederholgrenze r (früher auch Wiederholbarkeit, repeatability) für zwei einzelne Messwerte entsprechend der Formel 4-1 berechnet.

$$r = 1{,}96 \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma_r} \approx 2{,}8 \cdot \sigma_r \qquad \text{4-1}$$

Der TM-Gehalt von Zuckerhirsehäckselgut der Sorte 'Top 76' wurde für das geerntete Frischmaterial jeweils per Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C und per Trocknung im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar bestimmt, um etwaige Unterschiede erfassen und aus diesem Datenpool die zur jeweiligen Trocknungsvariante gehörige Standardabweichung S sowie die Wiederholgrenze r berechnen zu können. Die bestimmten TM-Gehalte (Minimum, Maximum, Median und Mittelwerte) und die daraus berechneten Parameter sind in Tabelle 15 für die fünf Erntetermine dargestellt.

Tabelle 15: TM-Gehalte von erntefrischem Zuckerhirsehäckselgut an fünf Erntetermin (A bis E) sowie zugehörige Standardabweichung S und Wiederholgrenze r nach Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C und im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar

Erntetermin	A	A	B	B	C	C	D	D	E	E
Behandlung	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	TM-Gehalt in %									
Minimum	18,75	19,64	19,07	20,91	19,42	22,49	19,86	21,88	20,66	23,83
Maximum	20,82	21,43	21,51	22,10	23,15	24,53	22,68	23,19	26,10	25,79
Median	19,99	20,79	20,68	21,64	22,14	23,23	21,65	22,52	23,09	24,80
Mittelwert	19,96	20,76	20,60	21,63	21,51	23,25	21,44	22,55	23,07	24,75
S	0,5	0,4	0,5	0,3	1,1	0,4	0,9	0,3	1,2	0,4
R	1,3	1,0	1,5	0,8	3,2	1,2	2,6	0,7	3,5	1,1
n	52	52	54	54	54	54	32	32	62	62

I Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C
II Trocknung im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C, 0,133 bar
A: 06.10.2011, B: 13.10.2011, C: 20.10.2011, E: 26.10.2011, Sorte 'Top 76', Häcksellänge 20 mm
D: 24.10.2011, Sorte 'Top 76', Häcksellänge 10 mm

Die Bestimmung des TM-Gehalts durch Trocknung im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar erweist sich anhand der jeweils deutlich niedrigeren Wiederholgrenze r als besser für Zuckerhirse geeignet, weshalb für die Auswertung der Analyseergeb-

nisse des Versuchsjahres 2011 ausschließlich die auf diese Weise bestimmten TM-Gehalte herangezogen wurden. Des Weiteren zeigte sich, dass die mittels Trocknung im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar bestimmten Trockenmassegehalte jeweils einen höheren Absolutwert hatten gegenüber der Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C.

4.1.2 Gefriertrocknung

Bekanntermaßen treten bei der Trocknung von Zuckerhirse Zuckerverluste durch mikrobielles Wachstum bis ca. 80 °C sowie durch thermische Degradation ab Trocknungstemperaturen von ca. 95 °C auf und verfälschen somit die Ergebnisse. Für die Analytik des Zuckergehalts wurden deshalb Häckselgut (Frischmaterial und (säure-) konserviertes Material) und Bagasse einer für den enthaltenen Zucker schonenden Gefriertrocknung unterzogen.

Die Häckselgutproben wurden in Chargen von jeweils 150 g sofort nach der Probenahme in Aluschalen eingewogen, mit einem passgenauen Deckel versehen und bei -22 °C zwischengelagert. Die Gefriertrocknung des jeweiligen Zuckerhirsematerials wurde durch die auf Gefriertrocknung zuckerhaltiger Früchte spezialisierte Firma NaProFood GmbH & Co. KG in 84079 Bruckberg durchgeführt. Der Transport des gefrorenen Zuckerhirsematerials nach Bruckberg erfolgte in Isolierbehältern mit Kühlakkus, um ein An- bzw. Auftauen der gefrorenen Proben sicher ausschließen zu können. Die gefrorenen Häckselgut- (Frischmaterial und (säure-) konserviertes Material) sowie Bagasseproben wurden im Temperaturbereich von -25 °C bis +20 °C gefriergetrocknet. Das angelegte Vakuum wird mit einem Minimalwert von ca. 0,3 mbar angegeben.

Die Vermahlung von jeweils ca. 30 g des gefriergetrockneten Zuckerhirsematerials (Häckselgut und Bagasse) erfolgte wiederum in zwei Schritten mit einer Laborschneidmühle (Korngröße 1 mm) und einer Ultra-Zentrifugalmühle (Korngröße 0,25 mm).

4.2 Bestimmung von löslichen Zuckern

Für die Analyse des Zuckergehalts von zuckerhaltigen Pflanzen bzw. Pflanzenteilen ist als offiziell anerkannte Methode die Bestimmung löslicher Zucker nach VDLUFA, Methodenbuch Band III, Kapitel 7.1.1 [286] bekannt. Nachdem bislang aber keine offizielle, auf die besonderen Anforderungen der Zuckerhirse optimierte Analysemethode existiert, wurde im Rahmen des Projektes die Methode nach VDLUFA, Methodenbuch Band III, Kapitel 7.1.1 [286] optimiert und als Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung angepasst.

Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung von Mono- und Disacchariden in Zuckerhirse

Lösliche Zuckerbestandteile der Zuckerhirse wurden unter Anwendung des Prinzips der Extraktion bestimmt. Die hier verwendete Methode wurde in Anlehnung an die von SMITH und BUXTON 1993 [262] für Zuckerhirse beschriebene Methode weiterentwickelt. Als Extraktionsmittel wurde gemäß VDLUFA-Vorschrift (Methodenbuch Band 3, [286]) und EG-Verordnung (Nr. 121/2008, [101]) eine Ethanol-Wassermischung mit 40 Vol.-% Ethanol eingesetzt und 60 Minuten extrahiert. Durch die Ethanolzugabe kann das Kontaminationsrisiko durch Fremdkeime während der Extraktion minimiert werden [212]. In Zuckerhirse können zudem, wie auch bei Zuckerrübe und Zuckerrohr üblich, Invertasen als ein natürlicher Bestandteil vorkommen [35] [218] [282] [69]. Durch die Extraktion mit 40 Vol.-% Ethanol konnte im Vergleich zu einer reinen Wasserextraktion der Einfluss von Invertasen auf die Zusammensetzung des Zuckerspektrums verringert werden, sodass innerhalb von 24 Stunden eine Saccharosekonversion von weniger als 8 % festgestellt wurde, wobei der Gesamtzuckergehalt insgesamt konstant blieb.

Für die Extraktion wurde 1 g der getrockneten und zerkleinerten Probe in 45 ml Kunststoff-Zentrifugengefäße eingewogen und mit 30 ml 40 Vol.-% Ethanol aufgefüllt und anschließend 60 Minuten bei Raumtemperatur auf einer Rotationsschüttelplatte in waagerechter Position bei 350 min^{-1} geschüttelt. Danach wurden die Gefäße für 20 Minuten bei 4.400 min^{-1} (RZB=5.350 x g) und 20 °C zentrifugiert. Aus dem Überstand wurde eine Probe für die HPLC zur Detektion der Einzelzucker entnommen.

Die Konzentrationsbestimmung löslicher Zucker (Glucose, Fructose, Saccharose) in g/l erfolgte mit einer Monosaccharid-Säule (Supelcogel^{TM} Pb, 300 x 7,8 mm ID, Laufmittel: Vollentsalztes Wasser, Fluss: 0,5 ml/min, Ofentemperatur: 60 °C, Injektionsvolumen: 25 µl) in Kombination mit einem RI-Detektor (RID-10) in einem HPLC-System der Firma Shimadzu (Kyoto, Japan). Zur Herstellung der Standardlösungen für die Kalibrierung der HPLC-Analytik wurden ausschließlich Substanzen der Reinheit „für Analytik“ oder „reinst“ der Firmen Fluka, Carl-Roth und Sigma Aldrich verwendet. Für die Analytik wurden die Proben durch einen 0,2 µm PVDF-Filter der Firma Machery & Nagel in ein 1,5 ml Probengefäß überführt und mit einem luftdicht abschließendem Septum verschlossen.

Das Ergebnis in mg des jeweiligen löslichen Zuckers (Saccharose, Glucose, Fructose) bezogen auf die Trockenmasse wurde wie folgt berechnet:

$$\text{löslicher Zucker in mg/gTM} = \frac{\text{Zucker (g/l)} \cdot V_{\text{Extraktionsflüssigkeit+Feuchtigkeit Probenmaterial}}\ \text{(l)}}{\text{TM in der Einwaage (g)}} \cdot 1000 \qquad 4\text{-}2$$

Für die Berechnung des Gesamtzuckergehalts als Glucoseäquivalent erfolgte eine Umrechnung des Disaccharides Saccharose in Glucose unter Berücksichtigung der folgenden Hydrolysereaktion:

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 2\,C_6H_{12}O_6 \qquad 4\text{-}3$$

Aus dem Molmassenverhältnis für Glucose (2 x 180 g/mol) und Saccharose (342 g/mol) ergibt sich ein Korrekturfaktor bezogen auf den Saccharosegehalt von 1,053.

4.3 Vergleich der Bestimmungsmethoden für Zucker

Im Rahmen der im Versuchsjahr 2011 durchgeführten Untersuchungen wurde anhand einer identischen Probe ein Vergleich der Methode zur Bestimmung löslicher Zucker nach VDLUFA, Methodenbuch Band III, Kapitel 7.1.1 [286] und der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (vgl. Kapitel 4.2) angestellt. Um einen möglichen Einfluss der Analysemethode auf den analysierten Zuckergehalt von Zuckerhirsehäckselgut zu ermitteln, wurde eine Einzelprobe durch Gefriertrocknung getrocknet, vermahlen und anschließend homogenisiert. Daraus wurden 20 Teilproben erzeugt und jeweils zehn nach der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung sowie zehn nach VDLUFA analysiert. Die Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung liefert den Gesamtzuckergehalt als Summe der Einzelzucker Saccharose, Glucose und Fructose. Bei der Analyse nach VDLUFA wird nur der Gesamtzuckergehalt angegeben, ohne die Einzelzucker auszuweisen.

Für eine objektive Bewertung und Einordnung der Zuckeranalyseergebnisse von Zuckerhirseproben sind Informationen hinsichtlich der Präzision der Analysemethode erforderlich, d. h. mit welchem Messfehler die Analyseergebnisse behaftet sind.

Anhand der Messwerte für den Zuckergehalt der zehn Einzelproben (erntefrisches Zuckerhirsehäckselgut) wurde die Wiederholgrenze r für die Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung entsprechend der Formel 4-1 berechnet.

Außerdem wurde auch für Proben von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut (Häcksellänge 20 mm, 90 Tage gelagert, behandelt mit 1,0 Masse-% Ameisensäurelösung) die Wiederholgrenze r bestimmt.

Unter Anwendung der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (vgl. Kapitel 4.2) wurden für die zehn zur Analyse vorgelegten Einzelproben Werte für den Gesamtzuckergehalt als Glucoseäquivalent zwischen 33,3 und 34,9 % i.d. TM ermittelt. Der Mittelwert errechnet sich zu 33,9 % i.d. TM und der Median zu 33,8 % i.d. TM. Unter Anwendung der Analysemethode nach VDLUFA bewegen sich die Werte zwischen 32,4 und 33,9 % i.d. TM bei einem Mittelwert und Median zu 33,3 % i.d. TM. Aus den Datensätzen beider Methoden errechnen sich jeweils eine Standardabweichung von 0,5 % sowie eine Wiederholgrenze r von 1,4 %.

Die in Abbildung 7 dargestellten Boxen beschreiben den Wertebereich für 50 % der Analysewerte, weitere 25 % der Analysewerte sind unterhalb sowie oberhalb der Box angeordnet. Bei Anwendung der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung errechnet sich für die Analysewerte ein Schwankungsbereich (Maximum - Minimum) von 1,6 % i.d. TM und bei der Analysemethode nach VDLUFA von 1,5 % i.d. TM. Dabei befinden sich

diese beiden Schwankungsbereiche von der Box aus betrachtet nach oben bzw. unten versetzt.

Bei Anwendung der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung wurden für die zehn Einzelproben also in der Tendenz um 1 % i.d. TM höhere Analysewerte ermittelt als bei der Analysemethode nach VDLUFA.

Die Ergebnisse der beiden Methoden unterscheiden sich entsprechend eines durchgeführten Tukey-Mittelwertvergleichs mit der Software Origin (OriginLab Corporation, Northampton, U.S.A.) signifikant. Für die Bewertung von Zuckeranalyseergebnissen hat allerdings nicht die zugrunde liegende Analysemethode, sondern vielmehr die Art der Materialtrocknung (Gefriertrocknung bzw. Trocknung bei 80 °C) den entscheidenden Einfluss, wie in Abbildung 7 bereits dargestellt.

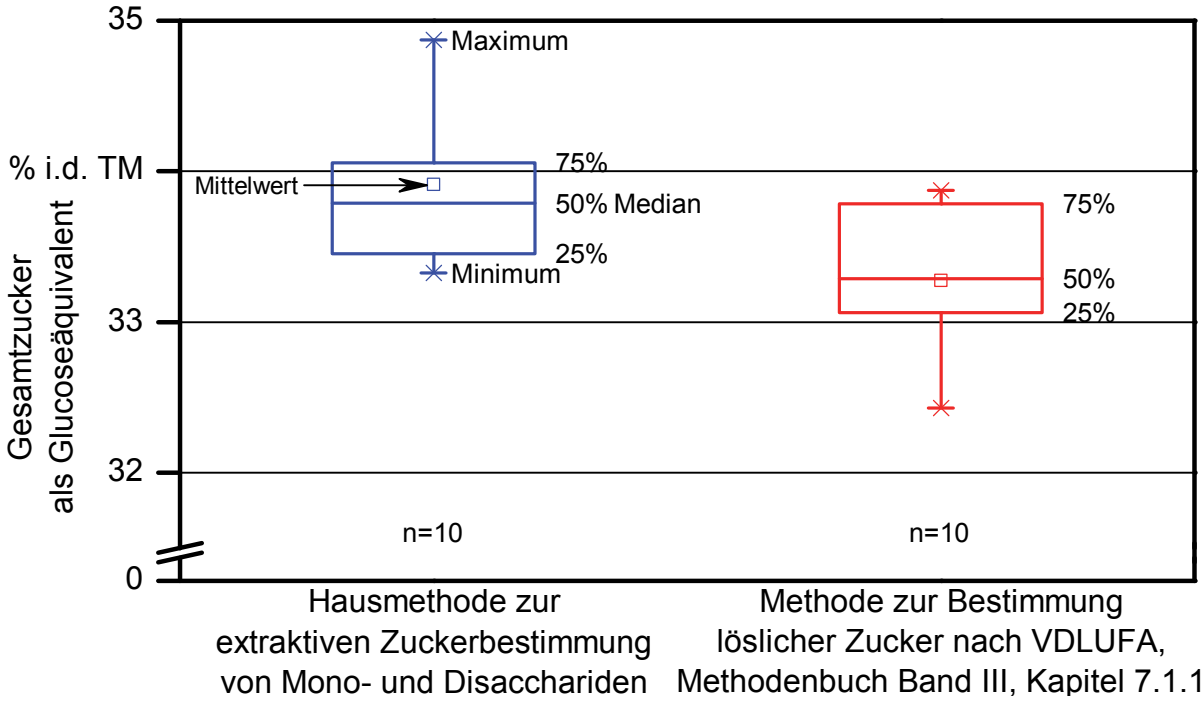


Abbildung 6: Ergebnisvergleich der Zuckergehaltsanalysen nach der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung und der Methode zur Bestimmung löslicher Zucker nach VDLUFA durchgeführt mit dem Material einer Zuckerhirseprobe

4.4 Einfluss der Trocknungsmethode auf den Zuckergehalt

Auf Grundlage der Untersuchungen zur Bestimmung des TM-Gehalts hat sich die Trocknung im Vakuum-Trockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar als erfolgreich bewiesen, aufgrund dessen wurde versucht, auch die Zuckergehaltsbestimmung bei 80 °C durchzuführen, um kostenintensive Gefriertrocknung zu umgehen.

Um einen möglichen Einfluss der Trocknungsmethode auf den Zuckergehalt von Zuckerhirsehäckselgut zu ermitteln, wurden im Versuchsjahr 2011 fünf Einzelproben der Sorte ‘Top 76‘ (geerntet am 06.10.2011) jeweils per Gefriertrocknung bzw. bei 80 °C im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wurden die getrockneten Proben jeweils in zwei Schritten auf eine Korngröße von 0,25 mm vermahlen und unter Anwendung der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (vgl. Kapitel 4.2) der Zuckergehalt analysiert. Die Analyseergebnisse, dargestellt in Abbildung 7, veranschaulichen für alle fünf Proben die ungünstige Wirkung einer Trocknung des gehäckselten Zuckerhirsematerials bei 80 °C gegenüber einer Gefriertrocknung auf den Gesamtzuckergehalt.

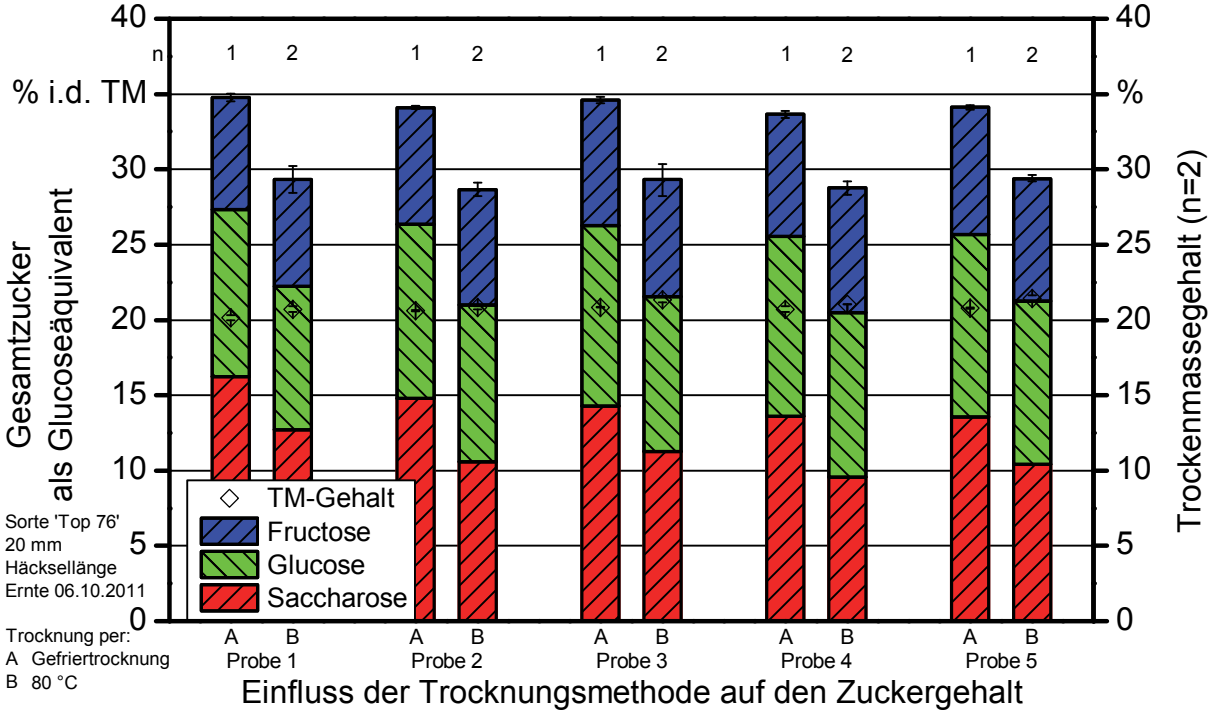


Abbildung 7: Vergleich des Gesamtzuckers von fünf Zuckerhirseproben (dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung) bei Trocknung des Häckselguts per Gefriertrocknung und bei 80 °C im Trockenschrank

Die Trocknung bei 80 °C führt zu einer mittleren Abnahme des Gesamtzuckers von relativ 15,1 %. Dabei entfällt ein Anteil von 10,5 % auf Saccharose, 3,9 % auf Glucose und 0,6 % auf Fructose. Somit stellt die Gefriertrocknung die für Zuckerhirse besser geeignete Trocknungsmethode dar, um anschließend den in den Zuckerhirsepflanzen vorhandenen Zuckergehalt ohne Trocknungstemperatur bedingte Verluste analysieren zu können.

4.5 Analytik flüssiger Proben

TM-Gehalt, Dichte und pH-Wert

Von flüssigen Proben wurden 10 ml in Metalltiegel mit 70 ml Volumen eingewogen und anschließend im Konvektionsofen bei 80 °C über Nacht vorgetrocknet und weiter im Vakuumtrockenschrank bei 80 °C und 0,133 bar Druck bis zur Gewichtskonstanz getrocknet [286] [255].

Der pH-Wert flüssiger Proben bei 25 °C wurde mit einer pH-Elektrode mit integrierter Temperatursonde und automatischer Temperaturkompensation bestimmt (Gerät: SevenEasy™ pH Meter S20, Elektrode: InLab® Micro Pro, Hersteller: Mettler-Toledo).

Die Dichte der flüssigen Proben (Press- und Sickersaft) wurde per Pyknometer (Carl Roth GmbH & Co. KG) bestimmt.

Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC)

Die Konzentrationsbestimmung von Glucose, Fructose und Saccharose erfolgte mit einer Monosaccharid-Säule (Supelcogel™ Pb, 300 x 7,8 mm ID, Laufmittel: Vollentsalztes Wasser, Fluss: 0,5 ml/min, Ofentemperatur: 60 °C, Injektionsvolumen: 5-25 µl) in Kombination mit einem RI-Detektor (RID-10).

Ethanol, Glycerol, Essigsäure, Milchsäure, Ameisensäure, HMF und Furfural wurden mit einer Rezex™-Säule für organische Säuren (Phenomenex® ROA-H^+, 300 x 7,8 mm, Laufmittel 0,005 N H_2SO_4; Fluss: 0,5 ml/min, Ofentemperatur: 70 °C, Injektionsvolumen: 5 - 25 µl), bestimmt. Die Analyse erfolgte in Kombination eines RI-Detektors (RID-10) mit einem Photo-Dioden-Array-Detektor (SPD-M20A) bei 210 nm.

Vor der Analytik wurden die Proben bei 16.000 x g 10 min zentrifugiert. Danach wurde der Überstand durch einen 0,2 µm PVDF-Filter der Firma Machery & Nagel in ein 1,5 ml Probengefäß überführt, welches mit einem luftdicht abschließendem Septum verschlossen wurde. Für den Fall, dass die Analytik nicht direkt nach der Probenahme erfolgte, wurden die Proben im 1,5 ml Probengefäß bei -20 °C zwischengelagert.

5 Anbau von Zuckerhirse in Bayern

Grundlage für die Ethanolherstellung aus Zuckerhirse ist die Substratproduktion bzw. die Bereitstellung des pflanzlichen Materials für die weiteren Verarbeitungsprozesse. Zuckerhirse wird in Deutschland bisher nicht angebaut. Anbauverfahren aus anderen Regionen/Ländern sind aufgrund der für einen Zuckerhirseanbau nicht optimalen klimatischen Bedingungen in Bayern nur zum Teil übertragbar. Untersuchungen zur Anbautechnik und Bestandesführung sind deshalb essentiell für einen erfolgreichen und effizienten Anbau von Zuckerhirse in Bayern.

5.1 Vorgehensweise

Die Untersuchungen zur „Anbautechnik und Bestandesführung“ umfassten Feld- und Gewächshausversuche zu den in Abbildung 8 dargestellten Versuchsschwerpunkten.

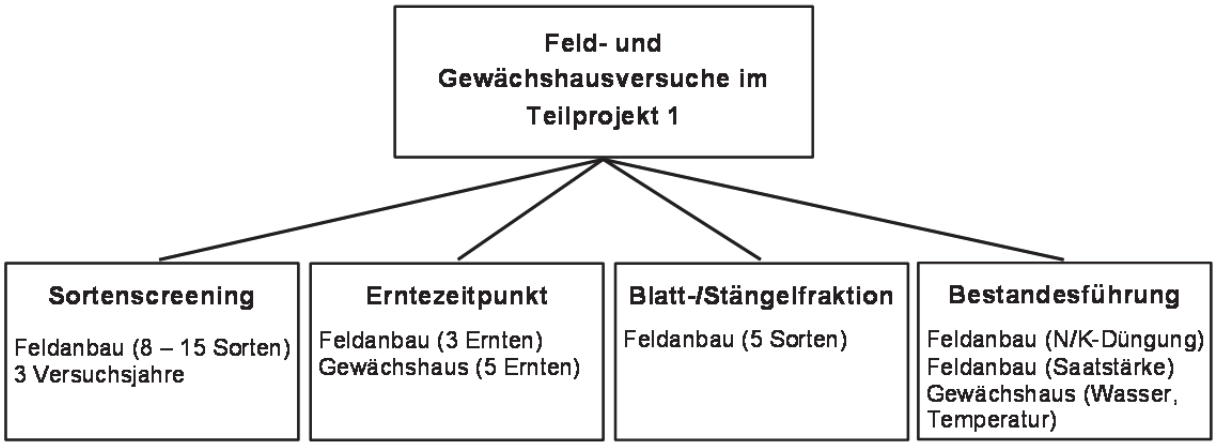


Abbildung 8: Übersicht über die Schwerpunkte im Teilprojekt „Anbautechnik und Bestandesführung“

5.1.1 Versuchsstandort, Klima- und Bodenparameter

Die Versuchsflächen für die Durchführung der Feldversuche befanden sich in Straubing (2009 und 2010) und im von Straubing 10 km entfernten Aholfing (2011) im Gebiet der Donauauen. In der von ROßBERGER et al. (2007) [229] erarbeiteten Gebietsgliederung der Bundesrepublik nach Boden-Klima-Räumen wird der Standort als „Gäu, Donau- und Inntal“ ausgewiesen. Eine eigene, etwas mehr den örtlichen Bodengegebenheiten angepasste Definition bezeichnet den Standort als „Donauniederung/niederbayerische Schotterebene“. Das Klima ist kontinental geprägt. In Straubing und Aholfing beträgt die durchschnittliche Jahrestemperatur 8,3 °C mit einer mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 783 mm (langjährige Mittel 1961 bis 1990 der Wettermessstation Piering). Die Bodenart in Aholfing ist bedingt durch die Flusssedimente überwiegend lehmiger

Sand bis sandiger Lehm. Die leichten Böden weisen eine hohe Durchlässigkeit bei geringer Wasserspeicherkapazität auf, so dass es in trockenen Phasen im Sommer schnell zu Wassermangel kommen kann. Am Standort Straubing sind nährstoffreiche, schwere Parabraunerden aus Löss mit hohen Ackerzahlen der verbreitetste Bodentyp. Weitere Eigenschaften beider Standorte sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Für die Standorte wurden zu Versuchsbeginn die Nährstoffgehalte an P_2O_5, K_2O, Mg, Stickstoff (N_{min}), sowie der pH-Wert bestimmt. Die Ergebnisse lassen auf eine gute Stickstoffversorgung des Bodens schließen. Besonders im Jahr 2009 wurden hohe N_{min}-Gehalte ermittelt. Die Phosphor-, Kali- und Magnesiumversorgung lag zumeist im Bereich der optimalen Gehaltsklasse C (Tabelle 17). Als Düngungsmaßnahme im Sortenscreening und im Versuch zur Bestandesführung (Saatstärke) wurden 2009 und 2010 eine Stickstoffdüngung in Höhe von einheitlich 120 kg N/ha mit Kalkammonsalpeter (KAS) vorgenommen. 2011 wurden 70 kg N/ha (Straubing) bzw. 80 kg N/ha (Aholfing) gedüngt. Die Düngemengen im Düngeversuch sind Kap. 5.1.5 zu entnehmen.

Tabelle 16: Beschreibung der Versuchsstandorte Aholfing und Straubing

Merkmal	Aholfing	Straubing
Höhenlage	324 m über NN	325 m über NN
Geografische Lage	48° 54‘ N Breite 12° 46‘ O Länge	48° 87‘ N Breite 12° 58‘ O Länge
Mittlere Jahrestemperatur	8,3 °C	8,3 °C
Jahresniederschlag	783 mm	783 mm
Bodentyp	Braunerde	Parabraunerde
Bodenart des Oberbodens	lehmiger Sand bis sandiger Lehm	schluffiger Lehm
Ackerzahl	45 – 49	73 – 76

Weiterhin wurde zweijährig am Standort Straubing (2010) bzw. Aholfing (2011), eine streifenartig angeordnete „Großfläche“ mit fünf bzw. vier Zuckerhirsesorten angelegt um Pflanzenmaterial für Press- und Lagerungsversuche der Projektpartner zur Verfügung zu stellen. Die Standortdaten sind der obigen Beschreibung und Tabelle 17 zu entnehmen.

Am Standort Irlbach wurden 2011 zwei Zuckerhirsesorten auf einer etwa 0,8 ha großen „Praxisfläche“, die den Einsatz praxisüblicher Erntemaschinen erlaubt, vom dort ansässigen Landwirt für unsere Versuche angebaut. Der Standort Irlbach zeichnet sich durch Böden mit Gley oder Anmoorgley aus Schluff und Lehm aus. Die langjährige gemessene Jahresmitteltemperatur am Standort (nächst gelegene Wetterstation ist Uttenkofen) beträgt 7,7 °C mit einer Niederschlagsmenge von 973 mm im Jahr.

Tabelle 17: Bodenparameter an den Versuchsstandorten in den Jahren 2009, 2010 und 2011 vor der Aussaat und Angabe der Boden-Gehaltsklassen

Parameter	Jahr Standort Versuch	2009 Straubing alle	2010 Straubing alle	2011 Aholfing Bestandesführung	2011 Aholfing Sortenscreening
N_{min} in kg/ha*		154,0	70,0	120,0	402,0
pH-Wert**		6,7	6,5	7,0	7,6
P_2O_5 in mg/100 g Boden**		14,0 C	14,0 C	33,0 E	21,0 D
K_2O in mg/100 g Boden**		12,0 C	14,0 C	22,0 C	23,0 D
Mg in mg/100 g Boden**		14,0 C	6,0 B	6,4 B	16,6 C

** Bodenschicht 0 – 60 cm, ** Bodenschicht 0 – 30 cm*

Der Witterungsverlauf in den drei Versuchsjahren stellte sich recht unterschiedlich dar (Abbildung 9). Der Mai war jedoch in allen drei Jahren geprägt von überdurchschnittlichen Niederschlägen, die die Aussaat erschwerten und verzögerten. Auffallend sind auch die hohen Niederschlagssummen im August (2010) und Juli (2011), die insbesondere 2010 zu hohen Lagerverlusten und Versuchsausfällen führten. Trockenstress trat bedingt durch die gute Wasserversorgung während der Hauptwachstumsphase nicht auf. Unterdurchschnittliche Niederschläge im September und Oktober in allen drei Jahren waren für das Pflanzenwachstum nicht mehr relevant, konnten aber auch die Trockensubstanzgehalte zur Ernte nicht wesentlich verbessern.

Die Temperaturen in den Versuchsjahren 2009 und 2011 lagen zur Aussaat und im Spätsommer eher über dem langjährigen Mittel, wohingegen der Juli eher durchschnittlich bis kühl war. Im Jahr 2010 waren die Monate Juni und Juli durch hohe Temperaturen gekennzeichnet. Der Herbst war in diesem Jahr eher kühl, was die Trockensubstanzgehalte nur langsam ansteigen ließ.

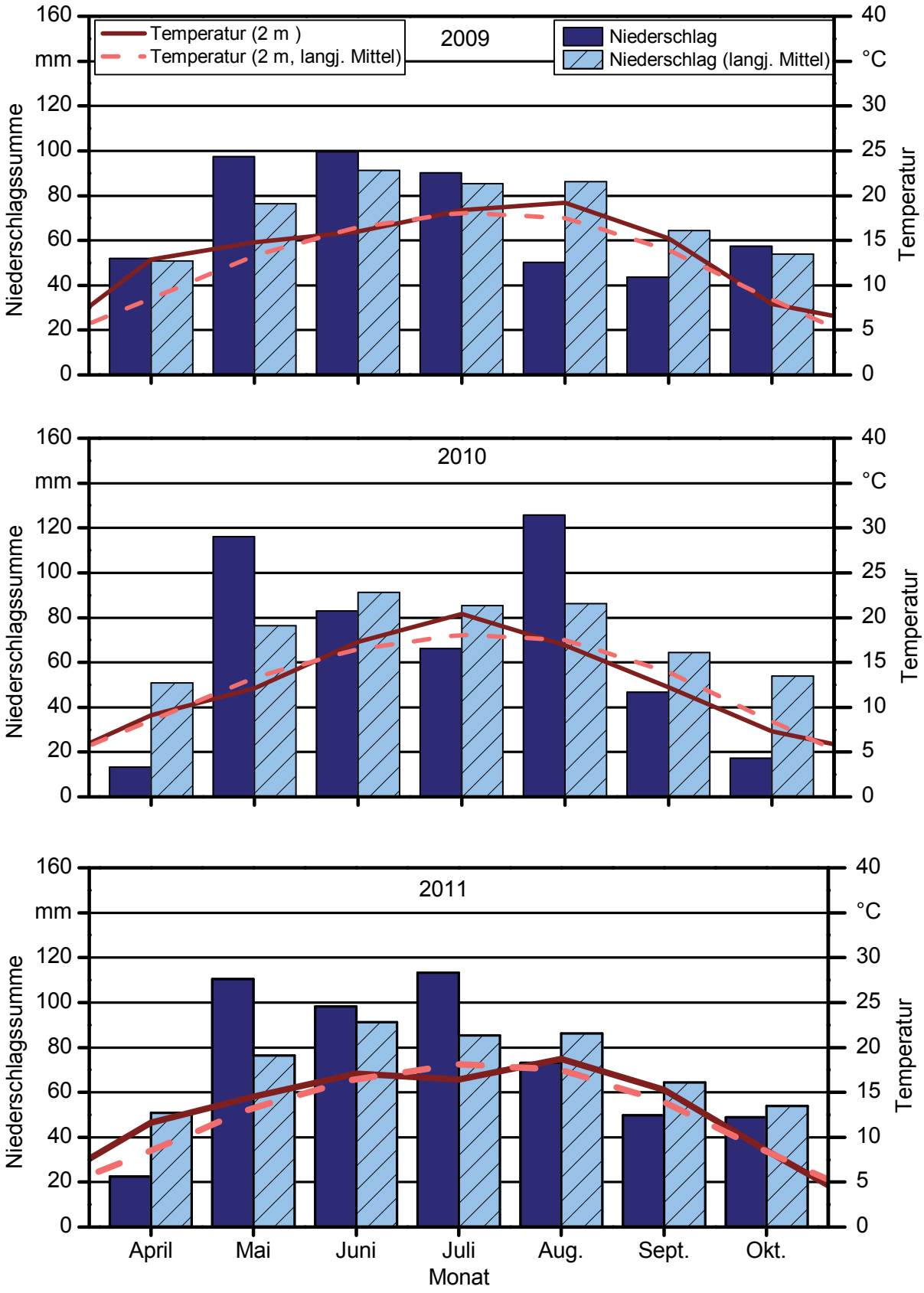


Abbildung 9: Witterungsverlauf in den Jahren 2009 bis 2011 am Versuchsstandort (Daten der Wetterstation Piering)

5.1.2 Sortenscreening

Das **Sortenscreening** wurde in einem dreijährigen Feldversuch, in den Versuchsjahren 2009 und 2010 am Standort Straubing und 2011 am Standort Aholfing durchgeführt. Es wurden 2009 neun, 2010 acht und 2011 15 Zuckerhirsesorten geprüft. Die im Versuch geprüften Sorten sind Tabelle 19, die Saat- und Erntetermine Tabelle 18 zu entnehmen. Der Versuch wurde jeweils in einer randomisierten Blockanlage mit vier Wiederholungen angelegt. Die Größe der Versuchsparzellen betrug 10,5 m², bei einer Breite von 3 m (Doppelparzelle) und einer Länge von 7 m. Für die Ertragsbestimmung wurden lediglich Kernparzellen mit 1,5 m Breite herangezogen. Die Zuckerhirse wurde mit einer Aussaatstärke von 25 keimfähigen Körner/m² und einer Reihenweite von 37,5 cm mit einer Getreidedrillmaschine gesät. Als Vorfrucht auf der Fläche standen 2009 und 2010 Winterweizen und in 2011 Kartoffeln. Die Unkrautkontrolle erfolgte mit 1,5 l Certrol B/ha (2009 und 2010) bzw. einer Mischung aus 2 l Gardo Gold + 0,5 l Certrol B/ha (2011). Zur Ernte wurden eine Ertragsbestimmung sowie die Analyse des TM-Gehaltes und weiterer Inhaltsstoffe (Rohasche, Rohfaser, Rohfett, Rohprotein, Hemicellulose, Cellulose, Lignin und Stärke) vorgenommen. Weiterhin wurden wesentliche Ernteparameter wie BBCH-Stadium und Bestandeshöhe erfasst.

Der 2010 angelegte Sortenversuch musste wegen Totallager verworfen werden.

5.1.3 Erntezeitpunkt

Untersuchungen zum geeigneten **Erntezeitpunkt** von Zuckerhirse waren jeweils in die **Feldversuche** des Sortenscreenings integriert. Die Bestimmung des Trockenmasse- und des Zuckergehaltes sowie Bonituren zum BBCH-Stadium und zur Bestandeshöhe wurden zu drei Terminen im Erntezeitfenster von mehreren Wochen durchgeführt (Tabelle 18). Es wurden alle im Sortenscreening geprüften Sorten miteinbezogen. Die Entnahme von Probeschnitten erfolgte aus den Randreihen um eine Beeinflussung der Ertragsbestimmung auszuschließen.

Tabelle 18: Saat- und Erntetermine des Sortenscreenings 2009 und 2011

2009			2010			2011		
Saat	Ernte	Tage*	Saat	Ernte	Tage*	Saat	Ernte	Tage*
05.06.	15.09.	102	10.06.	ist entfallen		31.05.	22.09.	114
	25.09.	112					04.10.	126
	05.10.	122					19.10.	141

** =Anzahl an Vegetationstagen (Saat bis Ernte)*

Tabelle 19: Geprüfte Zuckerhirsesorten aus den U.S.A. und Kanada

Sorte	Saatgutbereitsteller/-produzent	Anbaujahr		
		2009	2010	2011
Sweet Bee	Warner Seeds, Texas	x		x
2 Way	Warner Seeds, Texas	x		x
Rio	Texas A&M University	x	x	x
Rox Orange	University of Kentucky	x	x	
Keller	University of Kentucky	x	x	
Della	Univ. of Kentucky; Rebecca's Garden, Columbia	x	x	x
KN Morris	Univ. of Kentucky; Rebecca's Garden, Columbia	x	x	x
Umbrella	Univ. of Kentucky	x	x	
Sugar Drip	Univ. of Kentucky; Rebecca's Garden	x	x	x
Millennium BMR	Walter Moss Seed Company		x	x
Black Gold	Scott Seed Co., Texas		x	
CSSH45	Milo Seeds inc., Québec		x	
Dale	Rebecca's Garden; MAFES, Mississippi		x	
Simon	Rebecca's Garden, Columbia		x	
Theis	MAFES, Mississippi		x	
Top 76	MAFES, Mississippi		x	
M81E	MAFES, Mississippi		x	
Premium Stock	Scott Seed Co., Texas		x	

In Ergänzung zum Feldversuch wurde 2011 ein **Gewächshausversuch** zur Bestimmung des optimalen Erntezeitpunktes angelegt. Die Durchführung unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus erlaubt eine von Witterungseinflüssen unabhängige Ernte zu definierten BBCH-Stadien. Somit ist es möglich auch Entwicklungsstadien zu erfassen, die unter unseren klimatischen Bedingungen im Freiland nicht erreicht werden. Dafür wurden drei Zuckerhirsesorten, eine früh (‘2 Way‘), eine normal abreifende (‘Keller‘) und eine sterile Sorte (‘Sweet Bee‘) im Gewächshaus bis zur Ernte zu BBCH 39, 55, 65, 75 und 85 kultiviert. Die Voranzucht erfolgte in Einzeltopfpaletten bis zu BBCH 13 (Saat 05.05.2010). Anschließend wurden jeweils drei Pflanzen in einen 20 l-Topf mit einem Substratgemisch aus Sand, Ackerboden und Torf im Verhältnis 1/2/1 umgetopft und bei Temperaturen von ca. 27/15 °C (Tag/Nacht) kultiviert. Die Düngung erfolgte mit dem Umtopfen der Pflanzen. Die Pflanzen wurden mit 250 kg N/ha und 280 kg K/ha, sowie P, Mg, Ca und Mineralnährstoffen in Höhe des durchschnittlichen Entzuges bzw. den entsprechenden Mengen je 20 l Topf gedüngt. Der Versuch wurde mit sechsfacher Wiederholung je Variante/BBCH-Stadium durchgeführt und zwischen dem 13.07.2010 und 29.10.2010 beerntet und die TM-Gewichte und die TM-Gehalte bestimmt. Eine Teilprobe wurde nach Vortrocknung bei 60°C auf Zucker und Stärke untersucht.

5.1.4 Ertragsverhältnis der Blatt- und Stängelfraktion

Für die im Versuchsjahr 2010 geplante Ermittlung des Ertragsanteils und der Inhaltsstoffe der Blatt- und Stängelfraktion, konnte wegen Ernteausfall aufgrund von Totallager nicht auf Proben des Sortenscreenings zurückgegriffen werden. Die Beprobung erfolgte daher auf der zur Bereitstellung von Pflanzenmaterial für Press- und Gärversuche angelegten "Großfläche" mit fünf Sorten am Standort Straubing. Es wurden per Hand Proben (jeweils ca. drei bis fünf Pflanzen) der Sorten ‘KN Morris‘, ‘Della‘, ‘Umbrella‘, ‘Keller‘ und ‘Sugar Drip‘ entnommen (Saat 26.06.2010, Ernte 14.10.2010). Blätter und Stängel wurden voneinander getrennt und anschließend verwogen. Weiterhin wurden der Trockenmassegehalt und der Zuckergehalt im Pflanzenmaterial bestimmt. Eine gesonderte Analyse der Rispen erfolgte nicht, da das Stadium des Rispenschiebens bei Ernte noch nicht erreicht war.

5.1.5 Bestandesführung - Stickstoff- und Kaliumversorgung

Der Einfluss von Stickstoff und Kalium auf den Zuckergehalt und das Wachstum bzw. den Ertrag der Pflanzen wurde 2011 in einem Feldversuch mit den Zuckerhirsesorten ‘Della‘ und ‘Sugar Drip‘ untersucht. Der Versuch bestand aus einer randomisierten Blockanlage mit Doppelparzellen (Kernbeerntung, 10,5 m²) und vier Wiederholungen. Die Saat erfolgte am 26.05.2011 mit einer Getreidedrillmaschine. Die Saatstärke betrug 25 Körner/m² bei einer Reihenweite von 37,5 cm. Geerntet wurde am 20.10.2011. Die N-Stufen waren mit 100, 150 und 200 kg N/ha jeweils mit und ohne zusätzliche Kalium-Gabe festgelegt. Von der angestrebten N-Versorgung wurde zur Berechnung der tatsächlichen zu düngenden N-Menge der N_{min}-Gehalt des Bodens vor Aussaat (120 kg N/ha) abgezogen. Da der N_{min}-Gehalt im Boden die erste Düngestufe überschritt, mussten die N-Versorgungsstufen leicht nach oben korrigiert werden. Die Applikation der in Tabelle 20 dargestellten Düngemengen erfolgte am 07.07.2011 (Stickstoff) und am 12.07.2011 (Kalium). Eine Unkrautkontrolle wurde mit einer Mischung aus 2 l Gardo Gold + 0,5 l Certrol B/ha am 06.07.2011 durchgeführt. Zielparameter zur Ernte waren der TM-Ertrag, der TM-Gehalt sowie die Gehalte an Stickstoff, Zucker und Kalium im Erntegut.

Tabelle 20: Tatsächliche Nährstoffgaben im Feldversuch zur Stickstoff- und Kaliumversorgung, Versuchsjahr 2011

Düngestufe	120	120+	170	170+	220	220+
Faktor	Tatsächliche Nährstoffgabe in kg/ha					
Stickstoff	0	0	50	50	100	100
Kalium	0	220	0	220	0	220

5.1.6 Bestandesführung - Saatstärke

Zur Ermittlung der optimalen Saatstärke mit dem Ziel einer Maximierung des Zuckerertrages wurde ein Feldversuch mit unterschiedlichen Varianten mit den zwei Zuckerhirsesorten ‘Della‘‘ und ‘Sugar Drip‘ angelegt (siehe Tabelle 21). Der Versuch bestand aus zwei auf unterschiedlichen Flächen aber am gleichen Standort gelegenen Blöcken mit den Reihenweiten 37,5 cm und 50 cm. Innerhalb der Blöcke waren die Saatstärken randomisiert und in Doppelparzellen (Kernbeerntung, 10,5 m²) mit vier Wiederholungen angelegt. Die Aussaat mit einer Getreidedrillmaschine erfolgte am 26. und 30.05.2011. Die Ernte des Versuches fand am 20.10.2011 statt. Als Pflanzenschutzmaßnahme zur Unkrautbekämpfung wurde eine Mischung aus 2 l Gardo Gold + 0,5 l Certrol B/ha am 11./16.07.2011 eingesetzt. Zur Ernte wurden der TM-Ertrag, der TM-Gehalt sowie die Gehalte an Rohfaser und Zucker im Erntegut bestimmt.

Tabelle 21: Versuchsdesign des Feldversuches 2011 zur Saatstärke

Faktor	Reihenweite 37,5 cm			Reihenweite 50 cm		
Saatstärke in Körner/m²	15	25	35	15	25	35

5.1.7 Wasser- und Temperatureinfluss

Literaturangaben zeigen mögliche Zuckergehalte und -erträge auf, die unter unseren klimatischen Bedingungen in bisherigen Versuchen kaum erreicht wurden. Temperatur und Wasserversorgung können einen Einfluss nicht nur auf den Ertrag sondern auch auf die Zusammensetzung der Zuckerhirse bzw. die Inhaltsstoffgehalte insbesondere den Zuckergehalt haben. Um Wachstum und Zuckerbildung bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen sowie unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit zu untersuchen, wurde ein Gewächshausversuch unter standardisierten Bedingungen mit zwei Wasser- und zwei Temperaturstufen durchgeführt (Versuchsdesign siehe Tabelle 22).

Die Zuckerhirsesorte ‘2 Way‘ wurde im Gewächshaus bis zur Ernte bei BBCH 65 – 75 kultiviert. Die Aussaat erfolgte am 28.02.2011 direkt in 20 l-Gefäße mit einem Substratgemisch aus einem Teil Sand und einem Teil Mutterboden sowie einer 1. Düngegabe (220 kg N/ha, 280 kg K/ha, sowie P, Mg, Ca und Mineralnährstoffe in Höhe des durchschnittlichen Entzuges). Die Saattiefe betrug 2 cm. Es wurden zunächst fünf Samen je Topf gelegt. Der Aufgang wurde am 10.03. (optimale Temperatur) und am 15.03. (kühle Temperatur) verzeichnet. Nach dem Auflaufen erfolgte das Vereinzeln der Pflanzen, so dass nur die am besten entwickelte Pflanze im Topf verblieb (07.04.2011 optimale Temperatur; 11.04.2011 kühle Temperatur). Eine zweite Düngegabe wurde am 03.05.2011 gegeben (100 kg N/ha + 10 kg Mg/ha sowie Mineralnährstoffe). Der Versuch bestand aus drei Wiederholungen je Variante mit jeweils sechs Pflanzen pro Wiederholung. Der Tag-Nacht-Rhythmus war auf zwölf Stunden eingestellt. Bewässert wurden die Pflanzen mittels Tröpfchenbewässerung. Die Versuchsbedingungen sind Tabelle 22 zu entnehmen. Die Reduzierung der Bewässerungsmenge für die trockene Versuchsvariante be-

gann erst mit Beginn des Schossens um ein optimales Auflaufen der Pflanzen zu gewährleisten. Aufgrund der unterschiedlichen Reifegeschwindigkeiten wurde gestaffelt geerntet um annähernd gleiche Entwicklungsstadien zur Ernte zu erreichen. Die Pflanzenhöhen und Entwicklungsstadien aller Einzelpflanzen wurden zur Ernte und während des Versuchs alle drei bis vier Wochen gemessen. Zur Ernte erfolgte dann eine Bestimmung der Trockenmasseerträge, der TM-Gehalte sowie der Zuckergehalte je Wiederholung und Variante.

Tabelle 22: Versuchsbedingungen des Gewächshausversuches mit unterschiedlichen Temperaturen und Bewässerungsstufen (2011)

Temperatur Tag/Nacht in °C	Bewässerung ab Saugspannung in hPa	Saat	Wärmesumme in °C (> 10°C)	Erntedatum
warm = 28/20	feucht = 60	28.02.	1.488	30.05.
	trocken = 500	28.02.	1.488	30.05.
kühl = 23/15	feucht = 60	28.02.	1.321	09.06.
	trocken = 500	28.02.	1.321	09.06.

5.1.8 Probenaufbereitung

Die Versuchsparzellen der **Feldversuche** wurden mit einem reihenunabhängigen Parzellenhäcksler beerntet, dabei das Erntegut auf eine Schnittlänge von ca. 1 cm zerkleinert und auf dem Feld im Probenehmer verwogen. Aus dieser Masse, bezogen auf die Parzellengröße, konnten die Frischmasseerträge je Hektar berechnet werden. Aus dem laufenden Erntegutstrom wurde ca. 1 – 2 kg Probematerial entnommen und in drei Teile geteilt. Ein Teil diente der Bestimmung der Inhaltsstoffe nach einer Trocknung mittels Gebläsetrocknung bei 60 °C. Ein weiterer Teil wurde zur Bestimmung des Trockenmassegehaltes (TM-Gehalt) bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Bestimmung des TM-Gehaltes erfolgte parzellenweise und wurde zur Berechnung des Trockenmasseertrages (TM-Ertrag) herangezogen. Der dritte Teil der Substratprobe diente der Bestimmung des Zuckergehaltes und wurde zunächst eingefroren und anschließend bei der Firma NaProFood GmbH & Co. KG in 84079 Bruckberg gefriergetrocknet um einen mikrobiellen Abbau des Zuckers bei Erwärmung durch Lüftungstrocknung zu vermeiden.

Das Erntegut aus den **Gewächshausversuchen** wurde per Hand geerntet und mit einem Laborhäcksler auf eine Schnittlänge von ca. 1 cm zerkleinert um daraus den TM-Gehalt zu bestimmen sowie das Material für die Zucker- und weitere Inhaltsstoffanalysen analog des oben beschriebenen Trocknungsverfahrens bereitzustellen.

Abweichend von der beschriebenen Vorgehensweise erfolgte in den Versuchsjahren 2009 und 2010 die Trocknung des Pflanzenmaterials für die Zuckerbestimmung ebenfalls bei 60°C mittels Gebläsetrocknung. Dieses Verfahren hatte sich in anderen Projek-

ten zur Vorbereitung des Pflanzenmaterials für Inhaltsstoffanalysen bewährt. Da sich im Rahmen der Projektarbeiten jedoch herausstellte, dass das Trocknungsverfahren den Zuckergehalt beeinflussen kann (siehe Kapitel 4.4), wurde im Versuchsjahr 2011 die Gefriertrocknung als schonenderes Verfahren für alle Proben gewählt. Eine Vergleichbarkeit der Zuckergehalte der Pflanzenproben zwischen den Versuchsjahren ist deshalb nur eingeschränkt möglich, Vergleiche innerhalb eines Versuches können dennoch gezogen werden.

5.1.9 Pflanzen- und Bodenanalyse

Die Bestimmung der pflanzlichen Inhaltsstoffe sowie die Bodenanalysen wurden in akkreditierten Laboren nach den in Tabelle 23 und Tabelle 24 dargestellten Methoden durchgeführt.

In den Versuchsjahren 2009 und 2010 wurden die Gesamtzuckergehalte nach offizieller VDLUFA Methode MB. Bd. III, Kap. 7.1.1 [286] bestimmt. In Fällen in denen die Kenntnis des Zuckermusters (Einzelzucker) interessant war, erfolgte die Bestimmung nach DIN CEN/TS 15754:2008. Im Laufe des Projektes und im Rahmen einer Methodenüberprüfung zeigten sich jedoch Unterschiede zwischen verschiedenen beauftragten Laboren und den verwendeten Methoden wie in Kapitel 4.3 dargestellt. Deshalb wurden ab 2011 alle Proben einheitlich nach der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (TUM) analysiert (Kapitel 4.2). Absolute Werte der Zuckerbestimmung nach verschiedenen Methoden sollten deshalb nicht miteinander verglichen werden.

Tabelle 23: Methodik der Bodenanalysen

Parameter	Methode
Phosphat	VDLUFA MB. Bd. I, Kap. 6.2.1.1
Kalium	VDLUFA MB. Bd. I, Kap. 6.2.1.1
Magnesium	VDLUFA MB. Bd. I, Kap. 6.2.4.1
Nmin	VDLUFA MB. Bd. I, Kap. 6.1.4.1
pH-Wert	VDLUFA MB. Bd. I, Kap. 6.2.1.1

Tabelle 24: Methodik der Pflanzenanalysen

Parameter	Methode
Trockenmassegehalt	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 3.1
Rohasche	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 8.1
Rohprotein	ICC 105/2
Rohfett	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 5.1.1
Rohfaser	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 6.1.2
Summe der Gerüstsubstanzen (NDF)	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 6.5.1
Gehalte an Cellulose und Lignin (ADF)	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 6.5.2
Gehalt an Lignin (ADL)	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 6.5.3
Stickstofffreie Extraktstoffe (NfE)	rechnerisch bestimmt
Stärke	VDLUFA, MB Bd. III, Kap. 7.2.1
Gesamtzuckergehalt	VDLUFA MB. Bd. III, Kap. 7.1.1
Einzelzucker	DIN CEN/TS 15754:2008
Einzelzucker	Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (TUM, Kap 4.2)
Mikronährstoffanalytik	VDLUFA MB Bd. III, Kap. 2.2.2.6

5.1.10 Statistik

Für die statistische Datenanalyse wurde die Software SAS Version 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) verwendet. Die Berechnung der Mittelwerte und die Varianzanalysen wurden mittels der MEAN- und GLM-Prozeduren ausgeführt. Signifikante Unterschiede zwischen Faktorstufen sind in den Tabellen mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet und beziehen sich auf eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Sortenscreening - Ertragspotential verschiedener Zuckerhirsesorten in Bayern

Neben klimatischen und produktionstechnischen Einflussfaktoren hängt die Leistung bzw. das Potential des Zuckerhirseanbaus ganz entscheidend von der gewählten Sorte ab. Im Rahmen eines Sortenscreenings wurde deshalb das Potential des Zuckerhirseanbaus unter bayerischen Klimabedingungen mit unterschiedlichem Sortenmaterial über drei Jahre im Feldversuch getestet (Abbildung 10). Die Aussaat des Sortenscreenings erfolgte Ende Mai (31.05.2011) bis Mitte Juni (15.06.2009 und 10.06.2010). Der Feldaufgang der einzelnen Sorten variierte zwischen den Versuchsjahren (Tabelle 25). 2009 zeigten insbesondere die Sorten ‘Rox Orange‘, ‘Sugar Drip‘ und ‘Umbrella‘ sehr schlechte Auflaufraten. 2010 fiel die Sorte ‘Rox Orange‘ durch einen sehr schlechten Feldauf-

gang auf. 2011 erreichten mit Ausnahme der Sorte ‘Theis‘ alle geprüften Sorten einen guten Feldaufgang.

Die relativ zögerliche Jugendentwicklung der Zuckerhirse, zum Teil bedingt durch den nicht optimalen Aussaattermin, machte sich 2009 durch eine verspätete Reife bemerkbar. Lediglich die Sorte ‘2 Way’ erreichte bis zur Ernte den Beginn der Milchreife. Im Jahr 2010 konnten aufgrund von Lager keine der Sorten geerntet bzw. deren BBCH-Stadium oder Ertrag bestimmt werden. 2011 wurden die meisten Sorten optimal zwischen Blüte und Milchreife geerntet. Die Sorten ‘KN Morris‘ und ‘Dale‘ lagen jedoch deutlich zurück. Als früh abreifende Sorten sind ‘Sweet Bee‘, ‘Millenium BMR‘ und ‘CSSH45‘ einzuordnen und deshalb für unsere Klimaregion am besten geeignet. Spätere Sorten wie ‘Umbrella‘, ‘Rox Orange‘, ‘Dale’ oder ‘KN Morris‘ sind aufgrund ihrer verzögerten Entwicklung eher nicht zu empfehlen.

Tabelle 25: Boniturdaten der Zuckerhirsesorten im Feldversuch

Sorten	Feldaufgang in %			BBCH-Stadium z. Ernte			Lager z. Ernte		
Jahr	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
2 Way	92	-	100	71	-	73	1	-	2
Black Gold	-	-	86	-	-	68	-	-	9
CSSH45	-	-	81	-	-	76	-	-	3
Dale	-	-	100	-	-	54	-	-	7
Della	92	90	99	63	n.b.	69	5	9	8
Keller	71	77	-	61	n.b.	-	4	9	-
KN Morris	85	75	73	39	n.b.	52	1	9	8
M81E	-	-	100	-	-	67	-	-	7
Millen. BMR	-	73	85	-	n.b.	75	-	9	2
Premium Stock	-	-	90	-	-	63	-	-	1
Rio	74	81	88	55	n.b.	73	3	9	7
Rox Orange	56	53	-	55	n.b.	-	1	9	-
Simon	-	-	100	-	-	72	-	-	8
Sugar Drip	54	95	100	51	n.b.	67	1	9	5
Sweet Bee	96	-	97	69	-	75	1	-	3
Umbrella	62	76	-	39-51	n.b.	-	1	9	-
Theis	-	-	65	-	-	68	-	-	4
Top 76	-	-	94	-	-	73	-	-	1

n.b. = nicht bestimmt, - = nicht im Sortiment

Abbildung 10: Sortenversuch mit 9 Zuckerhirsesorten im Versuchsjahr 2009

Die erzielten Trockenmasseerträge (TM-Ertrag) schwankten zwischen den geprüften Sorten deutlich, um bis zu 90 dt/ha (Abbildung 11 und Tabelle 26, Tabelle 27). Die Sorte ‘Keller‘ und ‘Sweet Bee‘ erzielten mit 206 und 193 dt/ha mit Abstand die höchsten Erträge. Insbesondere letztere scheint für einen Anbau unter hiesigen Bedingungen am ehesten geeignet. Für die Sorte ‘Keller‘ stand 2011 leider kein Saatgut mehr zur Verfügung, die Ergebnisse aus 2009 konnten somit nicht durch ein zweites Prüfjahr untermauert werden. Der Großteil der Sorten lieferte etwas niedrigere Erträge zwischen 150 und 175 dt/ha.

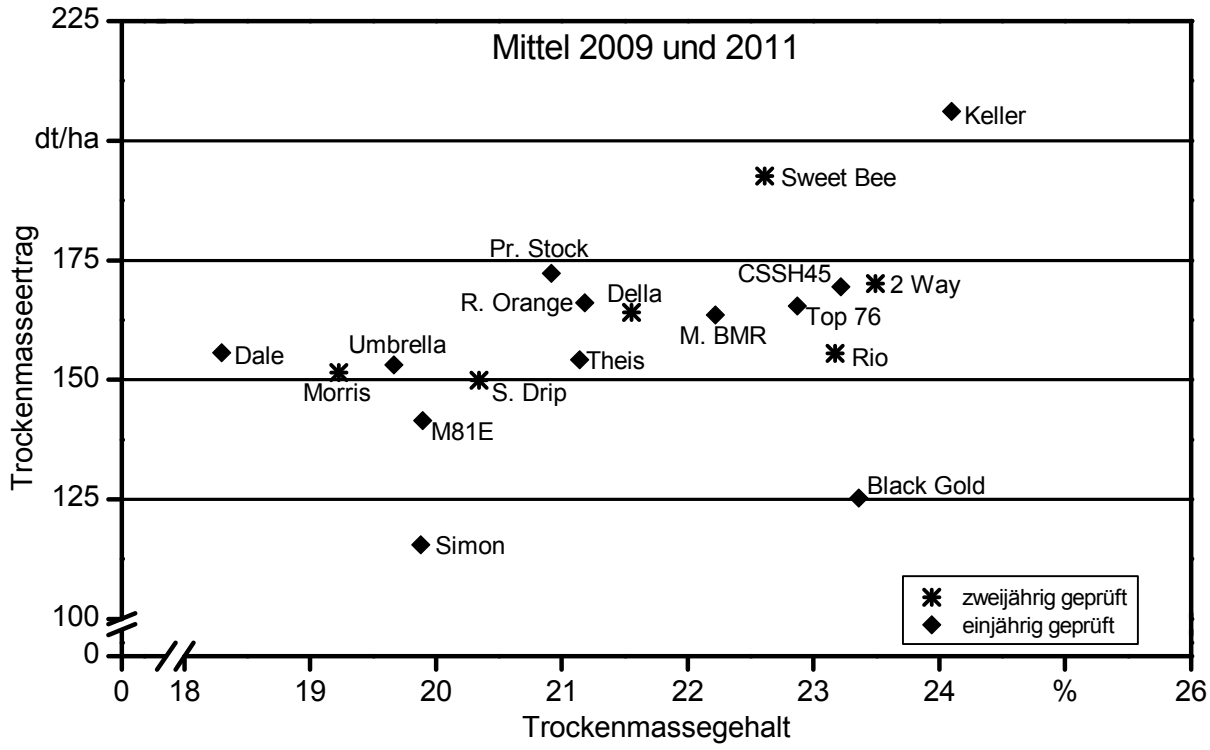


Abbildung 11: Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt der Zuckerhirsesorten im Mittel der Versuchsjahre 2009/2011 (Mittelwerte, einjährig geprüft n = 4, zweijährig geprüft n = 8)

Tabelle 26: Ernteparameter zur Ernte am 5.10.2009; signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben angegeben (Mittelwerte: n = 4; Zuckerparameter: n = 1, Zucker nach VDLUFA Bd. III, Kap 7.1.1.)

Sorte	TM-Gehalt in %	TM-Ertrag in dt/ha	Zuckergehalt* in % i.d. TM	Zuckerertrag in dt/ha
2 Way	25,4 a	178,4 abc	19,9	33,9
Della	22,4 bc	190,9 ab	19,4	34,7
Keller	24,1 ab	206,2 a	32,0	58,7
KN Morris	18,9 e	193,0 ab	27,5	51,7
Rio	24,0 ab	179,4 abc	25,4	43,4
Rox Orange	21,2 cd	166,0 bc	29,2	49,6
Sugar Drip	20,4 cde	149,0 c	25,8	40,3
Sweet Bee	23,7 ab	180,3 abc	30,5	49,1
Umbrella	19,7 de	153,2 c	17,8	22,0

** = als Glucoseäquivalent*

Tabelle 27: Ernteparameter zur Ernte am 19.10.2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben angegeben (Mittelwerte; n = 4, Zucker nach Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (TUM))

Sorte	TM-Gehalt in %	TM-Ertrag in dt/ha	Zuckergehalt* in % i.d. TM	Zuckerertrag in dt/ha
2 Way	21,6 abcd	161,9 bcd	28,8 bc	46,7 cdefg
Black Gold	23,4 a	125,3 def	23,9 abc	40,5 defg
CSSH45	23,2 a	169,5 ab	37,8 a	64,2 ab
Dale	18,3 f	155,7 bcd	31,4 abc	48,9 bcdef
Della	20,7 ced	137,2 bcdef	24,7 ab	44,8 defg
KN Morris	19,6 fe	110,0 f	28,8 bc	31,7 g
M81E	19,9 def	141,4 bcdef	28,5 bc	39,9 efg
Millen. BMR	22,2 abc	163,5 bc	35,0 ab	57,2 bcd
Premium Stock	20,9 ced	172,3 ab	25,1 c	43,3 defg
Rio	22,3 abc	131,5 cdef	32,1 abc	41,8 defg
Simon	19,9 def	115,4 ef	32,4 ab	37,5 fg
Sugar Drip	20,3 de	150,9 bcde	37,2 a	56,6 bcde
Sweet Bee	21,5 abcd	204,9 a	37,3 a	76,6 a
Theis	21,1 bcde	154,2 bcd	35,2 ab	54,4 bcde
Top 76	22,9 ab	165,4 bc	38,3 a	63,4 abc

** = als Glucoseäquivalent*

Im Vergleich zu Ergebnissen von ZHAO et al. (2009) [314] und MACESIC et al. (2008) [176], die die TM-Leistung von Zuckerhirse mit bis zu 350 bzw. 300 dt TM/ha in China und Kroatien angeben, sind die eigenen Ergebnisse als unteres Ertragsniveau einzustufen. Eine zusammenfassende Studie von VENTURI et al. (2003) [287] berichtet von möglichen TM-Erträgen für Zuckerhirse von 150 bis 250 dt/ha, wobei sich die Autoren dabei hauptsächlich auf Ergebnisse aus Südeuropa (Griechenland und Italien) stützen. Die Unterschiede zu den dargestellten Ergebnissen können mit den in Südeuropa günstigeren Standortgegebenheiten aufgrund höherer Temperaturen begründet werden. Am Standort Straubing fällt zwar ausreichend Niederschlag, die Temperaturen sind aber nicht optimal für den Anbau dieser wärmeliebenden Kultur. Eine Studie aus Süddeutschland von LEIBLE und KAHNT (1991) [171] gibt eine Spannbreite von 27 bis 230 dt TM/ha an und weist auf das zur Ausschöpfung maximaler Erträge recht hohe Wärmebedürfnis von Zuckerhirse hin. In umfangreichen Versuchen des TFZ mit Futterhirse zur Biogasnutzung wurden mit den besten Sorten unter günstigen Bedingungen Erträge bis 230 dt TM/ha erzielt [227]. Nach ZEISE und FRITZ (2011) [310] sind 250 dt/ha möglich. Diese Ergebnisse zeigen, dass am Standort Straubing eine gute Biomasseleistung zu erwarten ist, die durchaus an die Ertragserwartungen anderer europäischer Ländern heranreicht. Allerdings sind die Erträge stark von der gewählten Sorte abhängig. Erträge wie sie von ZHAO et al. (2009) [314] oder MACESIC et al. (2008) [176] gemessen wurden, sind mittelfristig an bayerischen Standorten nicht zu erwarten.

Eine Betrachtung der zur Ernte erreichten Trockenmassegehalte (TM-Gehalt) zeigt einen Schwachpunkt der Zuckerhirse (Abbildung 11 und Tabelle 26, Tabelle 27). Mit 18 bis knapp 25 % TM-Gehalt unterschritten alle Zuckerhirsesorten deutlich den insbesondere im Hinblick auf eine problemlose Ernte und Lagerung angestrebten TM-Gehalt von 28 %. LEIBLE und KAHNT (1991) [171] geben ebenfalls nur niedrige TM-Gehalte für Zuckerhirse zur Ernte an (15 bis 25 %). Selbst in einer Studie aus Italien [287] wird auf die Problematik und die Auswirkungen hoher Wassergehalte bei Zuckerhirse auf Transport- und Lagerkosten hingewiesen. Hier ist insbesondere die Züchtung gefordert, für den Sektor Zuckerhirse frühreifere Sorten mit ausreichenden TM-Gehalten und dennoch hoher Zuckerproduktion bereitzustellen. Bei den für die Biogasproduktion eingesetzten Futterhirsesorten ist bereits ein deutlicher Zuchtfortschritt zu erkennen. Weiterhin könnte der TM-Gehalt positiv durch eine sehr frühzeitige Saat (Anfang bis Mitte Mai) beeinflusst werden. Für vorliegende Untersuchungen lag der früheste Saattermin aufgrund ungünstiger Witterungsbedingungen Ende Mai. Eine gesicherte Aussage dazu ist demnach nicht möglich. Generell gilt, dass eine verspätete Saat nur schwer durch eine verlängerte Vegetationsperiode und späte Ernte wieder wett zu machen ist. Eine Saat vor den „Eisheiligen“ Mitte Mai ist jedoch riskant, da Schäden an den Pflanzen bis hin zum Totalausfall aufgrund ihrer Kälteempfindlichkeit nicht auszuschließen sind.

Für die Ethanolgewinnung stehen neben der produzierten Biomasse der Zuckergehalt und der Zuckerertrag je Hektar im Vordergrund. Tabelle 26 und Tabelle 27 zeigen eine deutliche Variation zwischen den Sorten im Zuckergehalt (i.d. TM). Die höchsten Werte wurden 2011 bei ‘Top 76’ (38,3 %), ‘Sweet Bee‘ (37,3 %), ‘CSSH45’ (37,8 %) und ‘Sugar Drip’ (37,2 %) ermittelt. Am wenigsten Zucker enthielten 2011 die Sorten ‘M81E‘

(28,5 %), ‘2 Way‘ (28,8 %), ‘KN Morris’ (28,8 %) und ’Black Gold’. Die Sorte ‘Premium Stock’ stellt mit 25,1 % eine Ausnahme dar. Die angestrebte Nutzungsrichtung dieser Sorte ist die LCB-Ethanol-Herstellung, folglich steht der Zuckergehalt nicht im Vordergrund. 2009 lagen die Werte für den Zuckergehalt insgesamt etwas niedriger. Die absoluten Werte sind jedoch nicht direkt mit den Ergebnissen aus 2011 vergleichbar, da für die Trocknung und die Bestimmung des Zuckergehaltes andere Methoden angewendet wurden (siehe Kapitel 5.1.9.). Sortenunterschiede werden dennoch abgebildet und erlauben einen Vergleich der Sortenleistung.

Die Zuckergehalte der geprüften Sorten sind vielversprechend. BLUDAU und STREHLER (1992) [34] sowie BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] berichten von 36 bis 39 % Gesamtzucker (i.d. TM) an vergleichbarem Standort. EGHBAL (1993) [96] ermittelte in seinen Versuchen Zuckergehalte von bis zu 30 %. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die geprüften Sorten z. T. das unter bayerischen Bedingungen mögliche Zuckerbildungspotential bereits weitgehend ausschöpfen.

Die rechnerisch aus Ertrag und Zuckergehalt ermittelten Zuckererträge der geprüften Sorten (Tabelle 27) – eine Korrektur für die sicherlich unter 100 % liegende Extraktionsrate oder ein Praxisabschlag wurden hier nicht berücksichtigt – lagen im Versuchsjahr 2011 zwischen 31,7 (‘Morris’) und 76,6 (‘Sweet Bee’) dt Zucker/ha. Aufgrund niedrigerer Zuckergehalte liegen die Zuckererträge 2009 mit dem höchsten Wert von 58,7 dt/ha etwas unter den 2011 ermittelten Ergebnissen. Die von BLUDAU und STREHLER (1992) [34] geschätzten möglichen 80 bis 100 dt Zucker/ha wurden damit nicht ganz erreicht. Mit den Ergebnissen der Versuche von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35], die unter bayerischen Bedingungen Zuckererträge von etwa 55 bis 65 dt Zucker/ha erzielten, sind die geernteten Zuckermengen jedoch durchaus vergleichbar. In ausländischen Studien werden die für Zuckerhirse möglichen Zuckererträge auf etwa 80 [68], aber auch bis zu 100 [126] und 130 [34] [193] dt/ha beziffert. Letztere Erträge sind aber unter unseren klimatischen Bedingungen eher nicht zu erreichen.

Ausschlaggebender für die Zuckerhirseproduktion in Deutschland als eine Gegenüberstellung der Produktionsleistung von Zuckerhirse in anderen Klimaregionen dürfte jedoch eher der Vergleich zu möglichen Zuckererträgen anderer Kulturen wie z. B. der Zuckerrübe sein. Nach Angaben der bayerischen Agrarstatistik beliefen sich die Zuckererträge aus Zuckerrübe in Bayern in den Jahren 2008 bis 2009 auf 110 bis 130 dt/ha [22]. Diese Zahlen verdeutlichen den Nachteil von Zuckerhirse gegenüber der heimischen Zuckerrübe. Allerdings ermöglicht der Anbau von Zuckerhirse, bedingt durch die spätere Aussaat, eine volle Ausnutzung der Vegetationszeit und des Flächenpotentials. Dazu kann ihr Anbau als frühe Zweitfrucht Mitte Mai erfolgen, z. B. nach Grünroggen, der als Futter oder als Biogassubstrat genutzt wird. Zudem ist der Anbau von Zuckerhirse im Vergleich zur Zuckerrübe durch einen geringeren Aufwand für Pflanzenschutz (in der Regel nur eine Herbizid-Behandlung) und Saat (Drillmaschine) sowie geringere Saatgutkosten etwas günstiger (vergleiche Kapitel 12).

5.2.2 Optimaler Erntezeitpunkt von Zuckerhirse in Bayern

Feldanbau

Der Erntetermin ist neben Aussaat und Wachstumsbedingungen ein entscheidender Faktor für den erzielbaren Ertrag und die Qualität des Erntegutes. Über den Erntetermin können der TM-Gehalt, der Ertrag aber auch qualitätsbestimmende Parameter wie der Zuckergehalt beeinflusst werden. Um Erkenntnisse zum optimalen Zeitpunkt bzw. dem geeigneten Reifestadium für die Ernte von Zuckerhirse zu gewinnen, wurden Probeschnitte zu drei Terminen aus den Randreihen des Sortenscreening 2009 und 2011 entnommen. Eine Masse- bzw. Ertragsbestimmung wurde dabei nicht durchgeführt. Im Versuchsjahr 2010 konnten aufgrund von Totallager im gesamten Sortenversuch keine Erhebungen durchgeführt werden.

Die Angaben zu den Bestandeshöhen in Tabelle 28 zeigen, dass zum ersten Erntetermin das Wachstum der Zuckerhirsen noch nicht abgeschlossen war. Eine zu frühe Ernte würde bedeuten, nicht den maximalen Ertrag zu erreichen. Insbesondere im Versuchsjahr 2009 waren zwischen zweiter und dritter Ernte noch Zuwächse in der Bestandeshöhe um gut 10 – 20 cm zu verzeichnen. Eine Ernte im September erscheint nach diesen Ergebnissen nicht empfehlenswert. Um das volle Ertragspotential auszuschöpfen, sollte die Erntekampagne eher im Oktober beginnen. Die vereinzelt abnehmenden Werte zwischen zweiter und dritter Ernte im Versuchsjahr 2011 sind vermutlich auf zunehmendes Lager der Bestände zurückzuführen, wodurch sich die Höhenmessung erheblich erschwerte und Ungenauigkeiten in Kauf genommen werden mussten.

Die Erhebungen zur Entwicklung des TM-Gehaltes im potentiellen Erntezeitraum zeichnen ein ähnliches Bild (Abbildung 12 und Abbildung 13). Die TM-Gehalte stiegen bis zum dritten Erntetermin im Oktober besonders 2009 noch deutlich an. Sie lagen trotzdem immer noch unterhalb von 25 %. 2011 war zwischen zweitem und drittem Erntetermin nur noch vereinzelt ein Anstieg zu sehen. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich jedoch eher in den teilweise lagernden Parzellen und den sehr feuchten Bedingungen, bedingt durch starken Tau beim letzten Erntetermin, zu suchen. Die insgesamt sehr niedrigen TM-Gehalte auch bei einer Ernte im Oktober bestätigen die oben getroffene Aussage und sprechen für eine möglichst späte Ernte der Zuckerhirse, nicht vor Oktober.

Der Zuckerertrag ist zum einen durch eine Maximierung der produzierten Biomasse zu erhöhen, zum anderen wird ein möglichst hoher Zuckergehalt in der Trockenmasse angestrebt. Die Zuckergehalte verändern sich im Vegetationsverlauf, was aus Abbildung 14 und Abbildung 15 deutlich wird. Im Jahr 2009 war mit Ausnahme der Sorte ‘Umbrella’ bei allen Sorten ein deutlicher Anstieg vom ersten bis zum dritten Erntetermin zu verzeichnen. Die Frage, ob das Maximum der Zuckerbildung bereits erreicht war oder noch mit einem weiteren Anstieg zu rechnen wäre, bleibt unbeantwortet, da aufgrund der Witterungsbedingungen und der Gefahr von Lager und Frostschäden eine spätere Ernte nicht möglich war.

Tabelle 28: Bestandeshöhe der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2009 und 2011 (Mittelwerte, n = 4) zu verschiedenen Ernteterminen

Sorte	Höhe in cm					
	15.09.09	25.10.09	05.10.09	22.09.11	04.10.11	19.10.11
2 Way	261	274	281	270	290	273
Black Gold	-	-	-	293	308	324
CSSH45	-	-	-	304	310	314
Dale	-	-	-	274	300	295
Della	275	311	319	295	313	340
Keller	284	302	315	-	-	-
KN Morris	268	278	296	278	298	325
M81E	-	-	-	263	293	285
Millennium BMR	-	-	-	300	300	306
Premium Stock	-	-	-	274	303	325
Rio	260	290	300	278	306	307
Rox Orange	254	280	298	-	-	-
Simon	-	-	-	269	295	291
Sugar Drip	245	271	284	258	285	281
Sweet Bee	261	273	278	294	318	318
Theis	-	-	-	288	305	309
Top 76	-	-	-	239	258	250
Umbrella	249	271	293	-	-	-

Im Versuchsjahr 2011 war zwischen erster und zweiter Ernte ebenfalls ein deutlicher Anstieg des Zuckers zu verzeichnen. Danach sanken die Zuckergehalte z. T. wieder ab. Die Gründe hierfür sind nicht ganz klar. Von einem mikrobiellen Abbau zwischen Ernte und Weiterverarbeitung ist nicht auszugehen, da untersuchte Stichproben keinerlei Spuren von Abbauprodukten (beispielsweise Säuren oder Alkohole) aufwiesen. Möglich ist eine Reduktion der Zuckergehalte bedingt durch eine Zellschädigung durch das Lagern der Pflanzen (Abknicken) oder nach einer Kälteperiode kurz vor Ernte. Auch ZHAO et al. (2012) [315] berichten von signifikant niedrigeren Zuckergehalten nach Frost. Aber auch andere Einflussfaktoren wie z. B. das Überschreiten physiologischen Maximums der Zuckerproduktion können zu einer Reduktion des Zuckergehaltes führen. Da im Feld maximal das Stadium der Milchreife und von einigen Sorten gar nur das Rispenschieben erreicht wurde, lässt sich hierzu keine Aussagen treffen. Um Erkenntnisse bezüglich des Zuckermaximums im Entwicklungsverlauf von Zuckerhirse zu gewinnen, wurde ein Versuch mit unterschiedlichen Erntezeitpunkten unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus durchgeführt (siehe folgender Abschnitt).

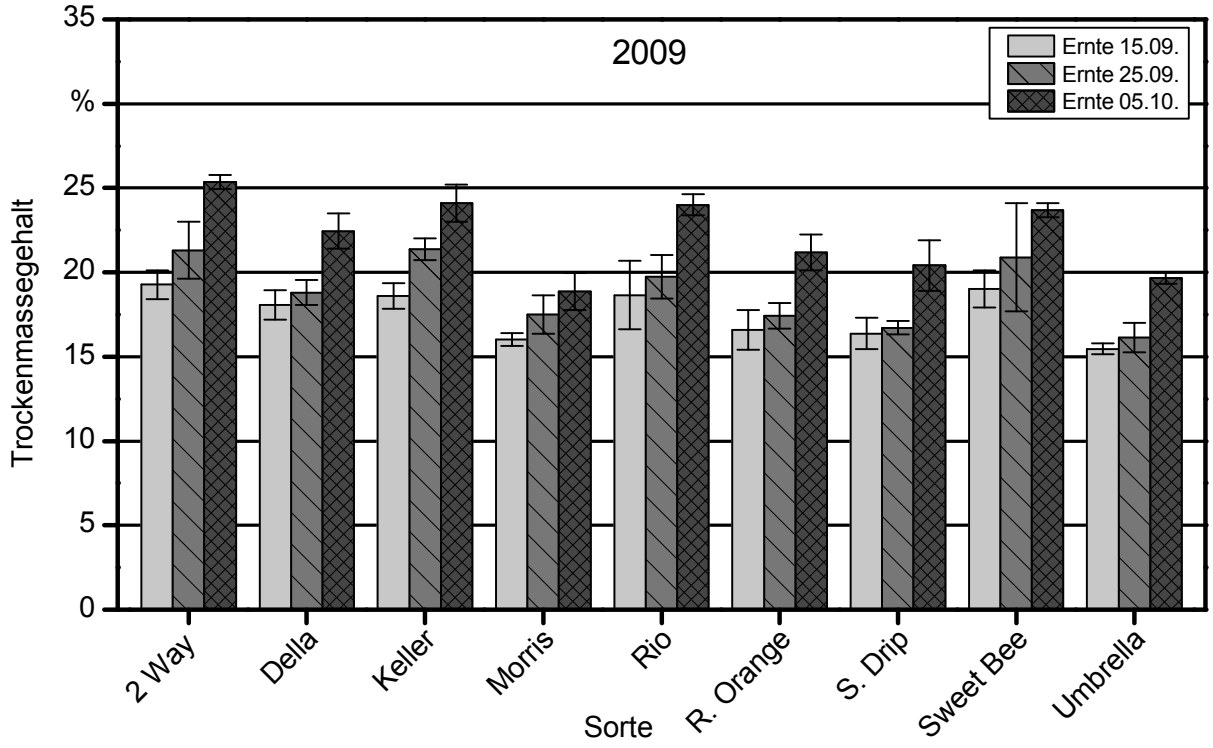


Abbildung 12: Trockenmassegehalt der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4); Versuchsjahr 2009

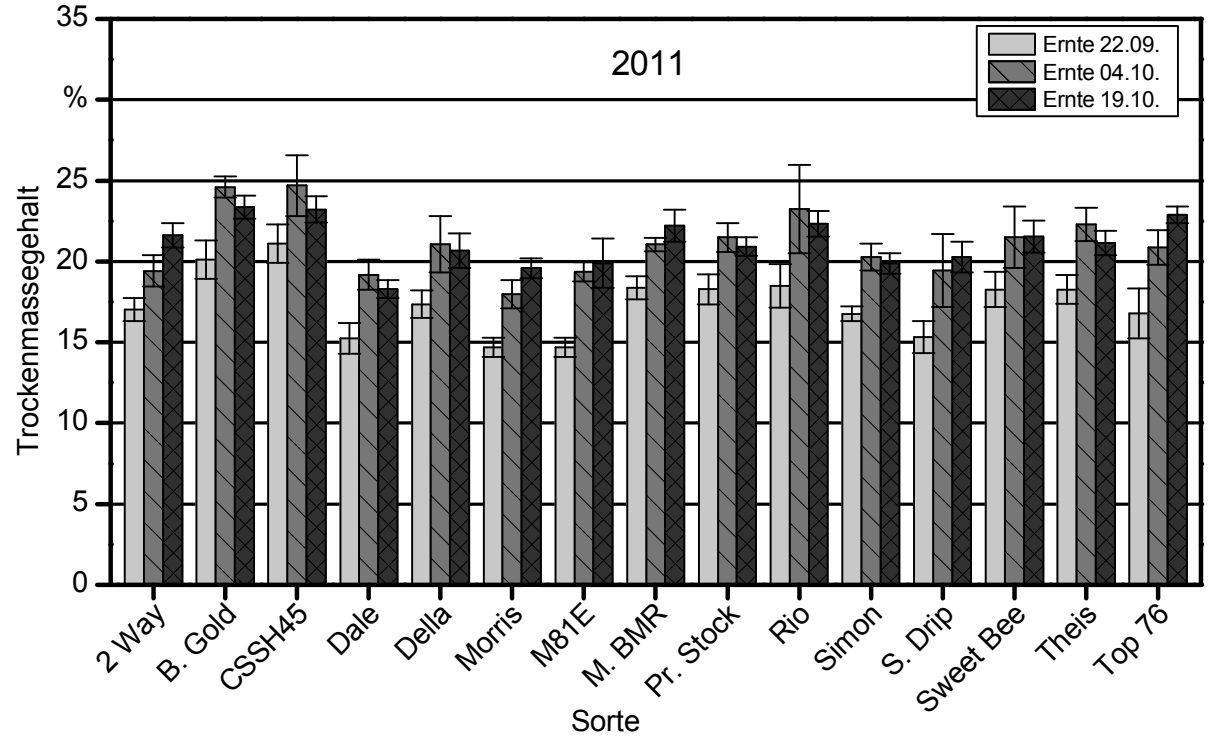


Abbildung 13: Trockenmassegehalt der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4); Versuchsjahr 2011

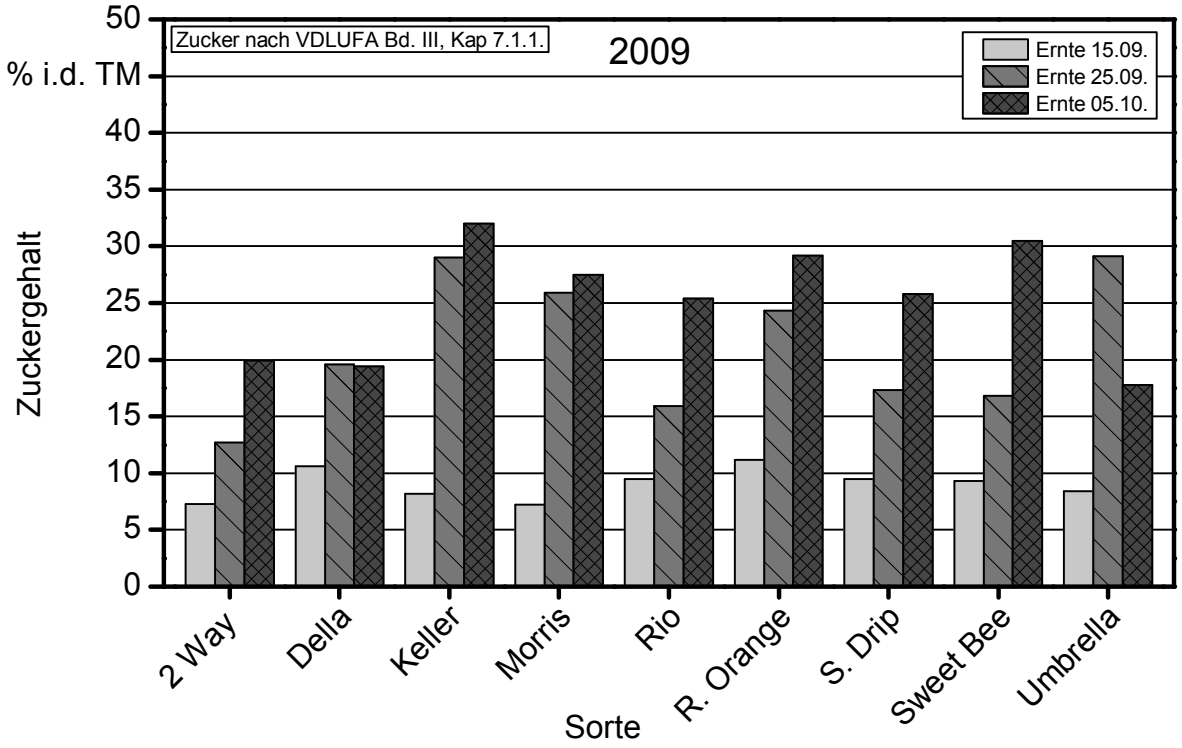


Abbildung 14: Zuckergehalt (als Glucoseäquivalent) der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin, Versuchsjahr 2009 (n = 1)

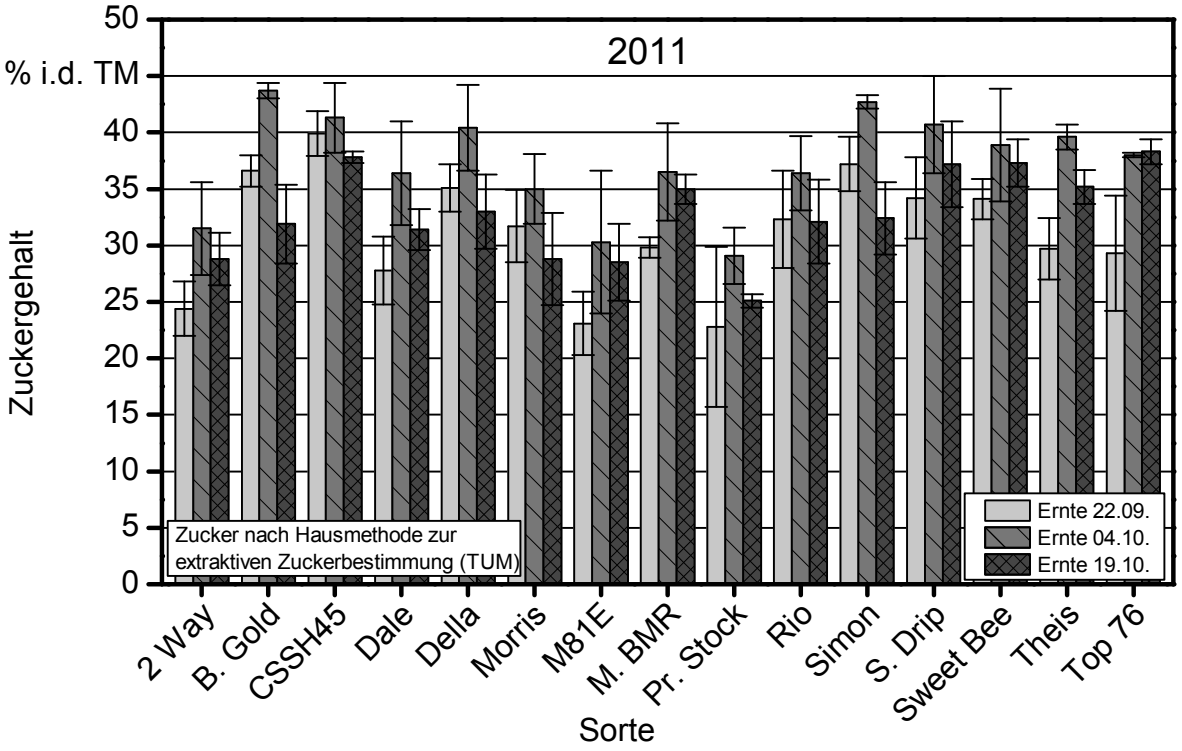


Abbildung 15: Zuckergehalt (als Glucoseäquivalent) der Zuckerhirsesorten in Abhängigkeit von dem Erntetermin, Versuchsjahr 2011 (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4)

Gewächshaus

Im Gewächshausversuch wurden die drei Zuckerhirsesorten ‘Keller’, ‘2 Way’ und ‘Sweet Bee’ kultiviert, und jeweils zu fünf BBCH-Stadien zwischen „Fahnenblatt entwickelt“ (BBCH 39) und „Teigreife“ (BBCH 85) beerntet und auf ihre Zuckergehalte analysiert. Die Ergebnisse der Laboranalysen in Abbildung 16 zeigen bei allen drei Sorten zunächst einen kontinuierlichen Anstieg des Gesamtzuckers. Die Gesamtzuckergehalte der nicht sterilen Sorten (‘2 Way‘, ‘Keller‘) fielen nach einem Maximum der Zuckereinlagerung wieder ab. Für die Sorte ‘2 Way‘ lag das Maximum zur Milchreife (BBCH 75). Für die Sorte ‘Keller‘ hingegen wurde die maximale Zuckerakkumulation zur Blüte (BBCH 65) beobachtet. Die sterile Sorte ‘Sweet Bee‘ zeigte keinen Abfall des Gesamtzuckergehaltes. Allerdings mussten hier die Ernte zu BBCH 75 und 85 als ein zeitgleicher Erntetermin betrachtet werden, da aufgrund der Sterilität und mangelnden Kornausbildung eine Differenzierung der Entwicklung zwischen BBCH 75 und 85 nicht mehr möglich war. Der insgesamt sehr geringe Zuckergehalt dieser Sorte ist auf ihre schlechte Entwicklung unter Gewächshausbedingungen zurückzuführen. Warum sich diese Sorte so schlecht entwickelte kann nicht näher begründet werden.

Aus Abbildung 16 wird ersichtlich, dass bei den fertilen Sorten ‘Keller‘ und ‘2 Way‘ die Stärkeeinlagerung im Korn eine Assimilatsenke für den Zucker im Stängel darstellt. Mit zunehmender Stärkeeinlagerung sinkt der Gesamtzuckergehalt in den Pflanzen, da Zuckerbausteine zu Stärkemolekülen verknüpft werden. Die Gesamtsumme an Zucker und Stärke ändert sich nur geringfügig. Die leichte Abnahme der Gesamtsumme könnte durch die etwas höhere Masse des Zuckers gegenüber der Stärke bedingt sein. Stärke besteht aus Glucosebausteinen, diese sind aber im Unterschied zum Zucker miteinander verknüpft. Bei der Verknüpfung werden Wassermoleküle abgespalten, deren Masse dann im Gesamtmolekül nicht mehr enthalten ist. Die Literaturangaben zeichnen hinsichtlich des Reifestadiums mit maximaler Zuckerbildung kein ganz einheitliches Bild. MORRIS und MCCORMICK (1994) [188] sowie CHAVAN et al. (2009) [57] zeigen in ihren Untersuchungen, dass die höchsten Zuckergehalte bei physiologischer Reife der Hirse zu erwarten ist. Auch PETRINI et al. (1993) [213] berichten von höchsten Zuckergehalten und einer Maximierung des Zuckerertrages bei möglichst später Ernte, da der Zuckergehalt nach der Blüte kontinuierlich ansteigt. Sie schlussfolgern, dass in Zuckerhirsen die Zuckerbildung den Zuckerbedarf zur Kornbildung übersteigt und diese somit keine Assimilatsenke darstellt. Diese Beschreibung der Zuckerbildung unterscheidet sich von dem, was über die Zuckerbildung z. B. in Weidelgräsern bekannt ist. Man geht dort von einem maximalen Zuckergehalt bis Beginn des Ährenschiebens aus [184]. Ebenso wurden in Untersuchungen von SAHARA et al. (1979) [233] und FÜRBETH (1963) [107] gegenteilige Entwicklungen beobachtet und von einem Maximum des Gehaltes an Mono- und Oligosacchariden zur Milchreife berichtet, was die eigenen Ergebnisse bestätigt. Die Gegensätzlichkeit der Literaturergebnisse ist eventuell auf unterschiedliche Sorteneigenschaften oder Wachstumsbedingungen, die den Versuchen zu Grunde liegen, zurückzuführen.

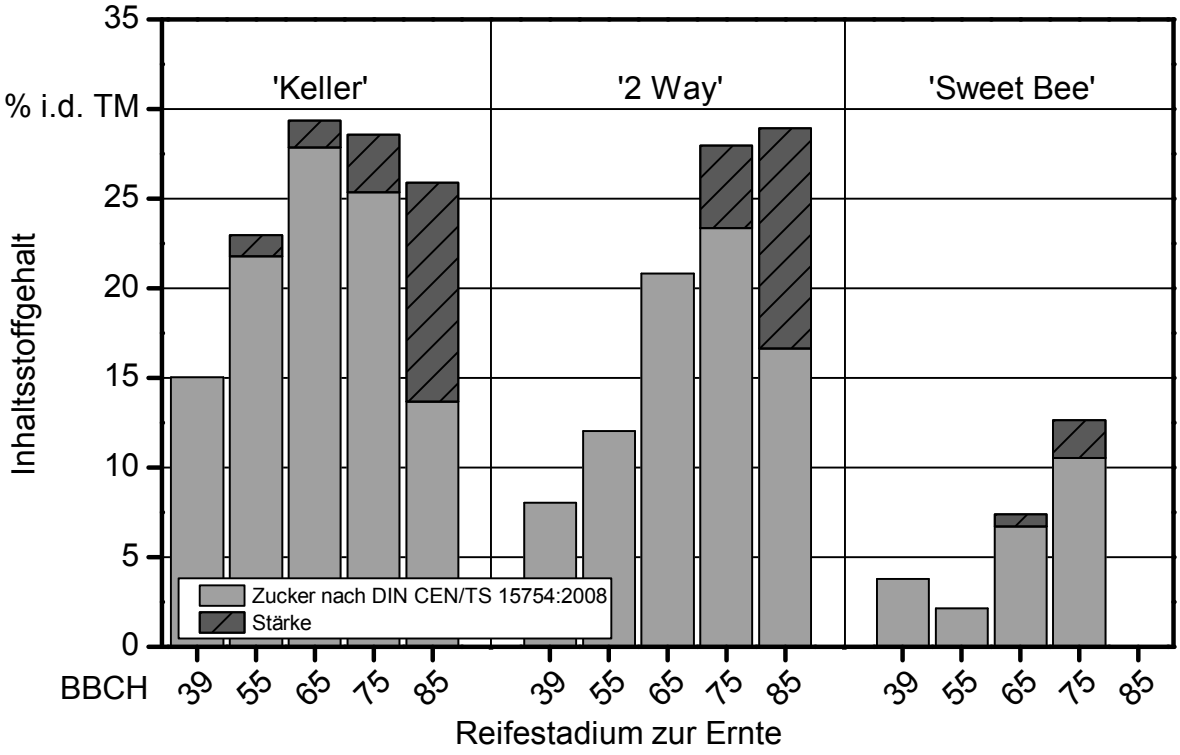


Abbildung 16: Gesamtzuckergehalt als Glucoseäquivalent und Stärkegehalt von drei Zuckerhirsesorten im Gewächshausversuch 2010 zu unterschiedlichen Reifestadien (Zucker: Mittelwerte, n = 3; Stärke: n = 1)

Für die geprüften Sorten scheint eine Ernte zwischen Blüte und Milchreife vorteilhaft, da bei späterer Ernte eine Umwandlung von Zucker in Stärke und somit niedrigere Zuckererträge nicht auszuschließen sind. Eine spätere Ernte dürfte mit der sehr spät abreifenden Zuckerhirse unter süddeutschen Klimabedingungen ohnehin kaum zu erreichen sein.

Die Abnahme der Zuckergehalte zum dritten Erntetermin des Feldversuches 2011, wie in Abbildung 15, zu sehen, lässt sich mit den gewonnen Erkenntnissen jedoch nicht erklären, da keine der Sorten das Stadium der Milchreife überschritten hatte (Tabelle 25) und keine Stärke im Erntegut und somit keine Assimilatsenke nachgewiesen werden konnte. Die Gründe für die reduzierten Zuckergehalte sind wahrscheinlich eher in einem Zuckerabbau bedingt durch Kälte, Lager oder bedingt durch andere unbekannte physiologische Umwelt-Reaktionen zu suchen.

5.2.3 Nährstoffentzug durch den Zuckerhirseanbau unter bayerischen Klimabedingungen

Neben optimierten Erträgen durch geeignete Sortenwahl sind auch die durch eine Abfuhr der Biomasse entzogenen Nährstoffe von Bedeutung, um den Nährstoffbedarf von Zuckerhirse zur Versorgung der Pflanzen und Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit richtig einschätzen zu können. Die Gehalte an Mineralstoffen im Erntegut sind in Tabelle 29 und Tabelle 30 dargestellt. Durchschnittlich sind in etwa 1,3 % Stickstoff, 1,6 - 1,7 % Kalium

und 0,2 % Phosphor enthalten. Damit werden dem Boden je Tonne Biomasse etwa 13 kg N, 16 - 17 kg K und 2 kg P entzogen. Im Vergleich zu in Bayern angebauten Futterhirsen liegen die Stickstoffgehalte etwas höher, die Phosphorgehalte niedriger und die Kaligehalte auf gleichem Niveau (Vergleichswerte Futterhirse: ca. 12 kg N, 3 kg P und 16 kg K je Tonne TM) [311]. Für die ermittelte Ertragsleistung der im Sortenscreening geprüften Zuckerhirsesorten ergibt sich ein mittlerer Entzug an Stickstoff durch die Pflanzen von 225 kg/ha im Versuchsjahr 2009 und 192 kg N/ha im Versuchsjahr 2011. Die mit dem Erntegut entzogene Kalimenge belief sich 2009 auf 281 kg K/ha und 2011 auf 245 kg K/ha. Bei dem Nährstoff Phosphor ist mit einem Entzug von 25 (2011) bis 32 (2009) kg/ha zu rechnen. Der Entzug an Ca und Mg war ebenfalls mit den Ergebnissen der Futterhirsen vergleichbar (eigene Ergebnisse). Die ermittelten Werte weisen auf einen hohen Nährstoff- und insbesondere Kalientzug durch diese Kulturart hin, der beim Anbau der Folgekultur berücksichtigt werden muss.

Für eine effektive Düngestrategie wurden neben den berechneten Entzügen auch die Auswirkungen der Hauptnährstoffe Stickstoff und Kalium auf den Ertrag und insbesondere die Qualität des Erntegutes (TM- und Zuckergehalt) sowie die Lagerneigung der Pflanzen in einem weiteren Versuch analysiert (siehe 5.2.5). Denn nicht die gesamte aufgenommene Nährstoffenge wird immer effizient in Biomasse umgesetzt.

Tabelle 29: Mineralstoffentzüge der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2009 zum 3. Erntetermin am 05.10. (n = 1)

Sorte	N	P	K	Ca	Mg	TM	N	P	K	Ca	Mg
	in % i.d. TM					in dt/ha	Entzug in kg/ha				
2 Way	1,2	0,2	1,8	0,3	0,3	178,4	219,4	35,7	317,6	58,9	44,6
Della	1,1	0,1	1,5	0,2	0,2	190,9	210,0	26,7	278,8	40,1	36,2
Keller	1,4	0,2	1,5	0,3	0,2	206,2	278,3	35,0	311,3	63,9	47,4
KN Morris	1,3	0,2	1,6	0,3	0,2	193,0	249,0	32,8	314,6	50,2	42,5
Rio	1,2	0,2	1,6	0,3	0,3	179,4	222,5	30,4	283,5	52,0	50,2
Rox Orange	1,4	0,2	1,5	0,3	0,2	166,0	225,8	31,6	250,7	48,1	33,2
Sugar Drip	1,2	0,2	1,5	0,3	0,2	149,0	171,3	29,8	220,5	38,7	26,8
Sweet Bee	1,2	0,2	1,7	0,3	0,2	180,3	212,7	37,9	313,7	57,7	43,3
Umbrella	1,5	0,2	1,5	0,3	0,2	153,2	234,3	32,2	235,9	42,9	24,5
Mittelwert	1,3	0,2	1,6	0,3	0,2	177,4	224,8	32,5	280,7	50,3	38,7

Tabelle 30: Mineralstoffentzüge der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2011 zum 3. Erntetermin am 19.10. (n = 1)

Sorte	N	P	K	Ca	Mg	TM	N	P	K	Ca	Mg
	in % i.d. TM					in dt/ha	Entzug in kg/ha				
2 Way	1,5	0,2	1,8	0,4	0,2	161,9	238,9	32,5	298,4	58,6	39,4
Black Gold	1,3	0,2	1,4	0,3	0,2	125,3	162,4	24,1	179,1	41,6	29,6
CSSH45	1,2	0,2	1,6	0,3	0,2	169,5	197,0	28,5	272,3	56,2	33,3
Dale	1,3	0,1	1,7	0,3	0,2	155,7	205,3	20,7	263,0	46,6	33,5
Della	1,4	0,2	1,8	0,3	0,2	137,2	185,1	24,1	252,0	44,0	33,3
KN Morris	1,4	0,2	1,6	0,4	0,3	110,0	158,6	24,9	172,8	43,1	32,8
M81E	1,3	0,2	1,7	0,3	0,3	141,4	182,0	21,6	238,1	40,9	34,8
Mill.BMR	1,1	0,2	1,5	0,3	0,2	163,5	181,0	24,0	246,4	53,9	39,3
Pr. Stock	1,4	0,2	1,9	0,4	0,2	172,3	237,8	29,7	334,7	69,6	42,1
Rio	1,3	0,2	1,7	0,3	0,2	131,5	188,1	24,8	197,5	42,5	41,5
Simon	1,3	0,2	1,7	0,3	0,2	115,4	146,8	24,6	179,4	39,7	22,4
Sugar Drip	1,3	0,2	1,7	0,3	0,2	150,9	179,0	25,2	226,6	46,8	29,6
Sweet Bee	1,3	0,2	1,7	0,3	0,2	204,9	241,3	32,0	350,4	69,0	47,1
Theis	1,3	0,2	1,7	0,3	0,2	154,2	176,3	17,3	229,5	42,3	31,7
Top 76	1,3	0,2	1,7	0,3	0,2	165,4	193,7	22,5	231,8	62,4	41,4
Mittelwert	1,3	0,2	1,7	0,3	0,2	150,6	191,6	25,1	244,8	50,5	35,5

5.2.4 Ertragsbildung der Pflanzenfraktionen Blatt und Stängel

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass im Stängel der Zuckerhirse die höchsten Zuckergehalte zu finden sind [35] [39]. Nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] bildet der Stängel ca. 94 % des Zuckerertrages. Bei einem Einsatz von Zuckerrohrerntetechnik wird die Abtrennung der Blätter und eine ausschließliche Ernte der Stängel praktiziert. Die Abschätzung des Anteils der Blatt- und Stängelfraktion am Zuckerertrag sollte für die im vorliegenden Projekt angebauten Sorten und den hiesigen Standort potentielle Ertragsverluste durch die Nichtnutzung der Blattmasse bei genanntem Ernteverfahren aufzeigen. Als Grundlage dafür dienten wiederum per Hand gezogene Probeschnitte aus dem 2010 für Press- und Gärversuche angelegten "Großfläche" mit fünf Zuckerhirsesorten.

Die getrennt nach Blatt und Stängel bestimmten Biomasseanteile und deren Zuckergehalte stimmen im Wesentlichen mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen von BLUDAU und STREHLER (1992) [34] und BOLIK (1994) [39] überein. Den Hauptanteil mit über 70 % des Biomasseertrages bildeten die Stängel (Abbildung 17). In der Literatur werden noch höhere Stängelanteile von bis zu 81 % (siehe Kapitel 3.3.4) beschrieben. Diese Unterschiede sind vermutlich auf das frühe Entwicklungsstadium der Pflanzen zur Ernte in den hier vorliegenden Versuchen aus dem Jahr 2010 zurückzuführen (BBCH 35 – 39).

Keine der Sorten hatte zur Ernte das Rispenschieben erreicht, die Entwicklung der Pflanzen, insbesondere das Längenwachstum, war somit noch nicht abgeschlossen. Ähnliche Untersuchungen mit einer Erne vor der Rispenentwicklung geben einen Stängelanteil von ca. 72 % und damit vergleichbare Ergebnisse an [66]. Wie Abbildung 18 zeigt, lagen die Zuckeranteile im Stängel zwischen 29,5 und 44,3 % i.d. TM und waren damit deutlich höher als in den Blättern (12,5 bis 20,1 % i.d. TM). Aus Abbildung 17 wird ersichtlich, dass der Hauptanteil des Zuckerertrages wie in der Literatur beschrieben in den Pflanzenstängeln gebildet wird (83 - 87 %).

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen ermittelten Ergebnisse weisen einen mit den Angaben von BOLIK (1994) [39] annähernd vergleichbaren Zuckerertragsanteil der Stängel auf (bis zu 90 %). Eine Abtrennung der Blätter würde Vorteile im Bereich Transport und Transportkosten bringen, da die zu transportierende und zu verarbeitende Pflanzenmasse deutlich reduziert werden könnte. Dennoch gehen dadurch bis zu 17 % des Zuckerertrages und wertvolles Material für eine Bagassenutzung verloren. Zudem sind für eine kombinierte Ernte und Entblätterung von Ganzpflanzen hierzulande keine technischen Lösungen verfügbar. Können die ganzen Pflanzen mit üblicher Häckseltechnik geerntet werden, vereinfacht sich das Ernteverfahren erheblich, da diese Technik durch den Silomaisanbau weit verbreitet und vielerorts vorhanden ist. Da sich das Verfahren der Silierung als sinnvolle Konservierungsmethode erwiesen hat (vgl. Kapitel 8.8), stellt Häckselgut für eine verlustarme Lagerung ebenfalls kein Problem mehr dar. Eine Ernte und Nutzung der gehäckselten Ganzpflanze erscheint ausgehend von diesen Ergebnisse sinnvoll.

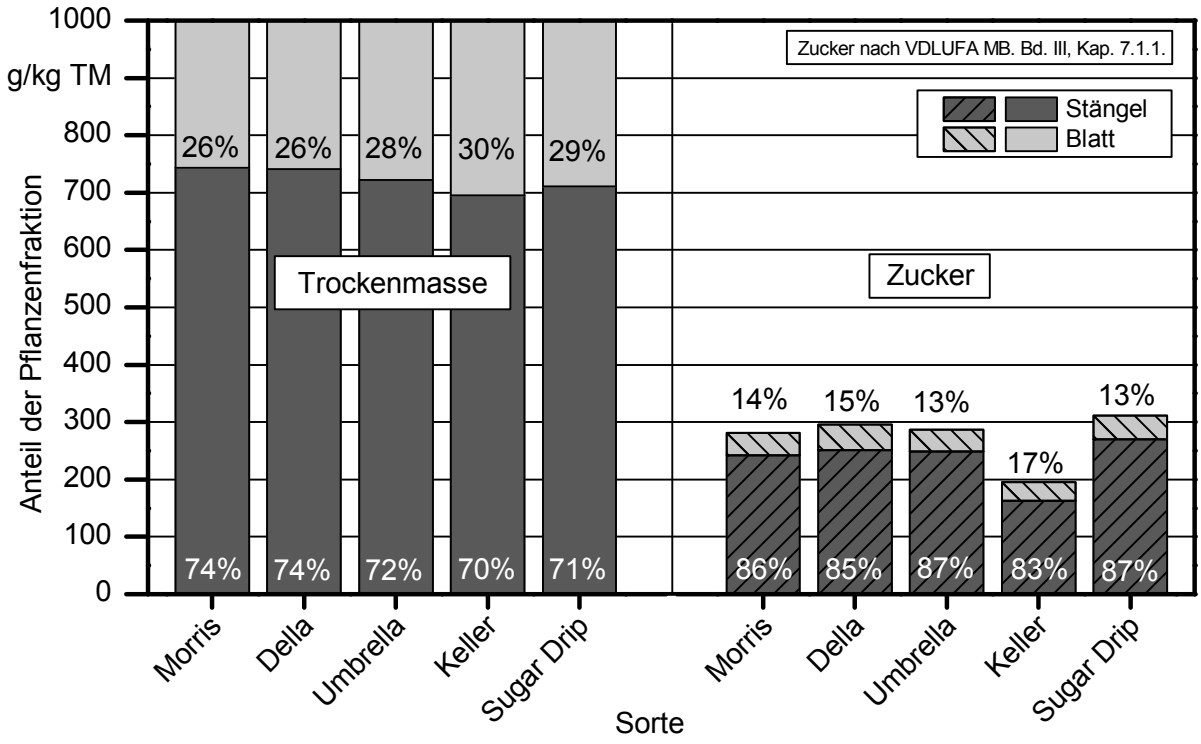


Abbildung 17: Anteil von Stängel und Blatt am Biomasse- und Zuckerertrag ("Großfläche Zuckerhirse" 2010, n = 1)

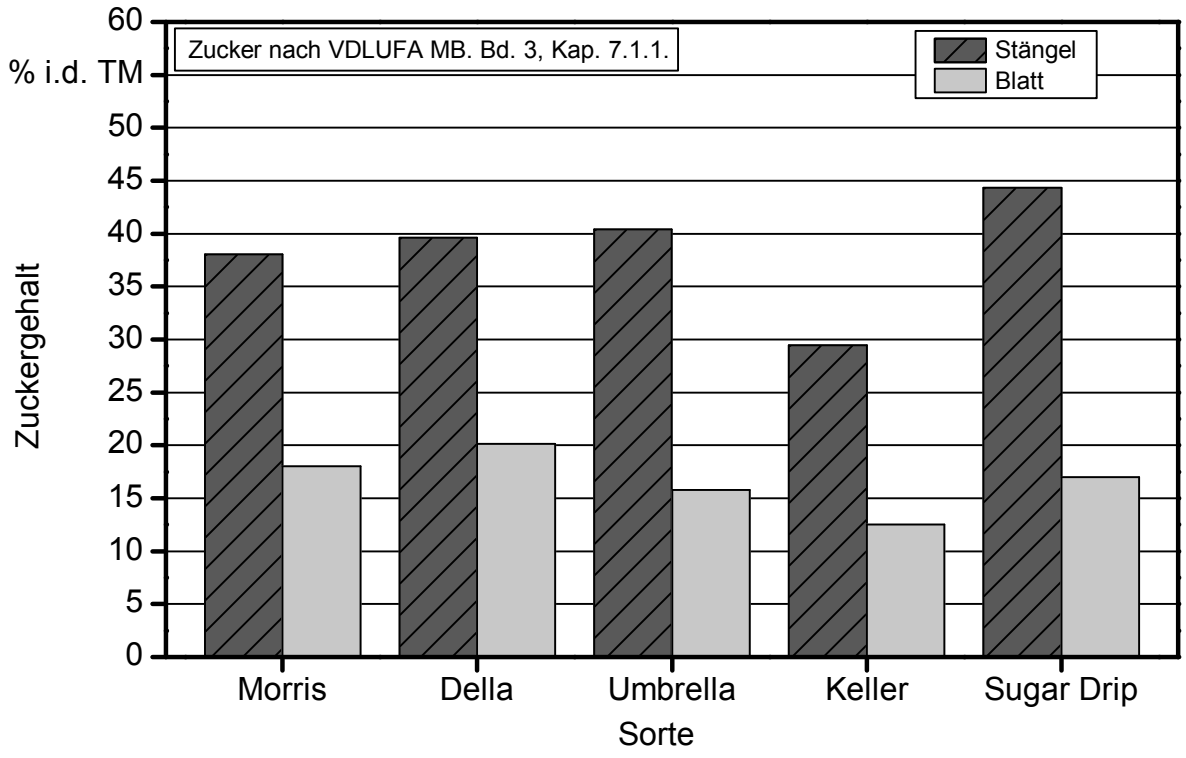


Abbildung 18: Gesamtzuckergehalt der Pflanzenfraktionen Blatt und Stängel als Glucoseäquivalent ("Großfläche Zuckerhirse" 2010, n = 1)

5.2.5 Einfluss der Stickstoff- und Kalium-Versorgung auf Ertrag und Qualität von Zuckerhirse

Hohe Stickstoff- und Kalientzüge im Futterhirseanbau sind bekannt [311] und wurden auch in den eigenen Untersuchungen festgestellt (siehe 5.2.3). Der Frage, in wieweit sich die Stickstoff- und Kali-Düngung tatsächlich ertragssteigernd auswirken und die Qualität des Erntegutes (bzgl. TM- und Zuckergehalt) beeinflussen kann, wurde in einem Feldversuch mit drei Stickstoff-Varianten und einer zusätzlichen Kalidüngung nachgegangen. Die statistische Auswertung ergab einen signifikanten Einfluss von Stickstoff und Kali auf den TM-Ertrag (N: P-Wert = 0,03, K: P-Wert = 0,02). Durch Erhöhung der N-Versorgung von 120 auf 220 kg N/ha (unter Anrechnung von N_{min}) ließ sich der Ertrag um 11 dt TM/ha signifikant steigern (Tabelle 31). Mit einer Kali-Gabe von 220 kg/ha wurde der Ertrag um etwa 8 dt TM/ha gesteigert. Zudem scheint es Wechselwirkungen zwischen der N-Düngung und der Sorte zu geben, d. h. nicht jede Sorte reagiert gleichermaßen auf die Düngegabe. Abbildung 19 verdeutlicht, wie die Sorten unterschiedlich auf die N-Düngung reagieren. Allerdings trat bei der Sorte ‘Della‘ verstärkt Lager auf (siehe Tabelle 32) was oft auch einen Ertragsverlust bei der Ernte bedeutet. Diese Ertragsverluste könnten hier eventuell die ertragssteigernde Wirkung des Stickstoffs überdeckt haben.

Tabelle 31: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des Düngeversuches, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben angegeben

Faktor	TM-Ertrag in dt/ha	TM-Gehalt in %	Zucker in % i.d. TM*	Zuckerertrag in dt/ha	Kalium in %	Protein in %	Triebe#	Lager
Stickstoff								
120 kg/ha	184,2 a	23,8 a	42,4 a	78,2 a	1,3 a	4,5 a	0,8 a	2 a
170 kg/ha	191,4 ab	22,9 b	42,7 a	81,9 a	1,4 ab	5,3 b	1,9 ab	2 ab
220 kg/ha	196,0 b	22,7 b	41,9 a	82,1 a	1,5 b	5,8 c	4,0 b	3 b
Kalium								
0 kg/ha	186,2 a	23,1 a	43,0 a	80,0 a	1,3 a	5,2 a	3,5 a	2 a
220 kg/ha	194,2 b	23,1 a	41,7 a	81,5 a	1,5 b	5,1 a	1,5 b	3 a
Sorte								
Della	185,2 a	23,0 a	40,2 a	74,7 a	1,4 a	5,1 a	2,2 a	4 a
Sugar Drip	195,9 b	23,2 a	44,2 b	86,8 b	1,4 a	5,3 a	2,6 a	1 b

** = als Glucoseäquivalent,*
 # = Anzahl Bestockungstriebe

Eine Erhöhung der Erträge bis zu einem gewissen Punkt (Maximalertrag) durch erhöhte N-Versorgung entspricht den allgemeinen pflanzenphysiologischen Grundsätzen und

den Literaturangaben [37] [171]. WIEDENFELD (1984) [298] stellte in seinen Untersuchungen fest, dass mit einer Stickstoffmenge von 112 kg N/ha im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle signifikante Mehrerträge zu erzielen sind. Eine weitere Erhöhung der N-Zufuhr führte dann aber zu keinem Ertragszuwachs mehr. ALMODARES et al. (2007) [6] konnten wiederum keinen signifikanten Einfluss der N-Düngung auf den Stängelertrag zeigen. Allerdings wird nicht angegeben, ob eventuell eine höhere Biomasseleistung durch mehr Blattmasse erzielt wurde, da im untersuchten Verfahren nur die Stängel zur Zuckerproduktion von Bedeutung waren. Diese Ergebnisse sowie die eigenen Erkenntnisse hinsichtlich einer nur moderaten Erhöhung der Erträge mit steigender N-Stufe sprechen für das gute Nährstoffaneignungsvermögen [217] und die gute Stickstoffverwertungseffizienz [11] dieser Kultur. Auch bei niedrigster Düngestufe (120 kg N/ha), was unter Anrechnung von N_{min} einer tatsächlichen mineralischen Stickstoff-Düngung von 0 kg N/ha entsprach, konnten sehr gute 18 t Frischmasse/ha erzielt werden. Der Effekt der Kaliumdüngung war moderat ertragssteigernd, was gut mit den Ergebnissen von PHOLSEN und SUKSRI (2007) [214] übereinstimmt.

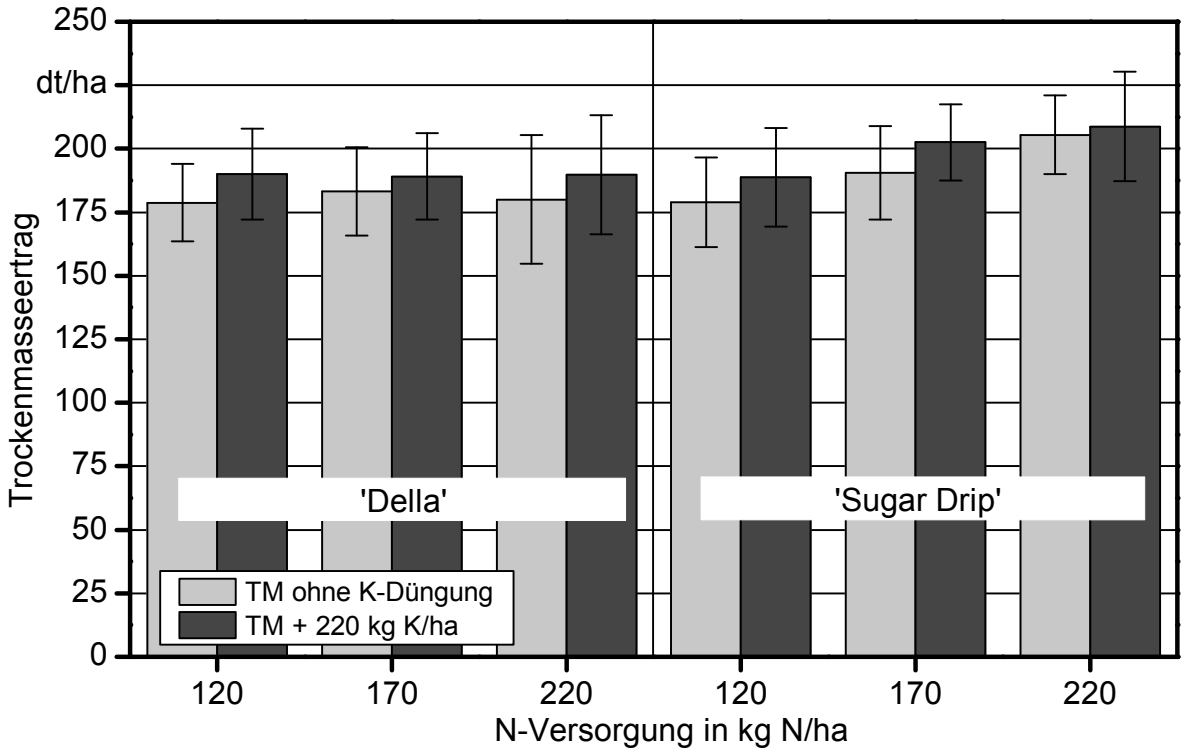


Abbildung 19: Trockenmasseertrag von Zuckerhirse bei unterschiedlichen N- und K-Versorgungsstufen (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4)

Auf den TM-Gehalt hatte die Stickstoff-Düngung einen leicht negativen Einfluss. Mit zunehmender N-Gabe nahmen die TM-Gehalte moderat um bis zu einem Prozentpunkt ab. Nach Literaturangaben kann eine übermäßige N-Düngung zu Reifeverzögerungen führen [15]. VOSS et al. (1992) [292] gehen davon aus, dass solche Verzögerungen auf eine Verlängerung der vegetativen Wachstumsphase zurückzuführen sind. Nach den vorlie-

genden Ergebnissen haben die Stickstoff- und Kalidüngung ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Bestockung, wobei insbesondere Stickstoff die Anzahl der Bestockungstriebe fördert (Tabelle 31). Daher könnte auch eine vermehrte Bildung von unreifen, jungen Seitentrieben mit hohem Wassergehalt der Grund für niedrigere TM-Gehalte sein.

Der Zuckergehalt beeinflusste die N-Düngung nicht signifikant, auch wenn tendenziell eine leichte Abnahme durch eine Erhöhung der Stickstoffgabe beobachtet wurde. Den größeren Einfluss scheint hier die Sortenwahl zu haben. Die Literaturangaben hierzu sind nicht ganz eindeutig. SAHEB et al. (1997) [234] fanden keinen Effekt der N-Düngung auf den Brix (optische Zuckergehaltsmessung im Stängelsaft) in Zuckerhirse. ALMODARES et al. (2008) [7] zeigt in seinen Studien eine Steigerung des Brix und des Saccharosegehaltes bei Erhöhung der N-Düngung bis zu 180 kg N/ha. In den Versuchen von WIEDENFELD (1984) [298] hingegen nehmen die Zuckergehalte im Stängel bei einer N-Gabe von 112 kg N/ha im Vergleich zur ungedüngten Variante ab. Die eigenen Ergebnisse lassen tendenziell eher auf eine Abnahme der Zuckergehalte bei hohen N-Gaben schließen. Ein solcher Effekt wird in der Literatur mit der notwendigen Bereitstellung von Kohlehydraten für die Synthese stickstoffhaltiger Verbindungen oder einem Verdünnungseffekt durch vermehrtes Wachstum der Pflanzen erklärt [184]. SANJEEVREDDI REDDI (2006) [237] kommt in seiner umfangreichen Literaturstudie zu dem Schluss, dass sich erhöhte N-Gaben negativ auf Qualitätsparameter von Zuckerhirse wie z. B. den Zuckergehalt auswirken können. Er weist jedoch auch auf eine erhöhte Zuckerproduktion je Flächeneinheit durch eine gesteigerte Biomasseproduktion bei höheren N-Gaben hin.

In wieweit eine mineralische Düngung ökonomisch sinnvoll ist, hängt von den aktuellen Düngemittelpreisen sowie den Nährstoffansprüchen der Folgekultur ab. Weiterhin ist die zunehmende Lagergefahr der ohnehin wenig standfesten Zuckerhirsen durch erhöhte N-Mengen bei der Düngeplanung zu beachten. Tabelle 32 zeigt jedoch auch, dass nicht beide Sorten gleichermaßen betroffen sind. Folglich kann dieser Faktor z. B. durch geeignete Sortenwahl positiv beeinflusst werden.

Tabelle 32: Kaliumgehalt und Lagerbonitur von Zuckerhirse bei unterschiedlichen N-Versorgungsstufen, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Mittelwerte, n = 4)

Sorte	N-Versorgung	Kalium % i.d. TM	Lager
Della	120	1,3 a	3 ab
	170	1,4 ab	4 b
	220	1,6 b	6 c
Sugar Drip	120	1,4 a	1 a
	170	1,4 a	1 a
	220	1,4 a	1 a

Wie Tabelle 31 zeigt, konnte hinsichtlich der K-Düngung kein signifikanter Einfluss von Kalium auf den Zuckergehalt nachgewiesen werden. Tendenziell scheint sich eine K-Gabe jedoch eher negativ auf den Zuckergehalt auszuwirken. Die leicht ertragssteigernde Wirkung schlägt sich im Zuckerertrag je Hektar dennoch positiv nieder. Die eigenen Ergebnisse stehen dabei etwas im Gegensatz zur Literatur. SUKSRI (1999) [270] geht von einem positiven Effekt von Kalium auf den Zuckergehalt bei Sorghum aus, da Kalium die Süße von Früchten und Zuckerrohr fördern kann. ALMODARES et al. (2008) [7] konnte diesen Effekt nachweisen. Dass die eigenen Ergebnisse dies nicht widerspiegeln, könnte mit dem ohnehin recht gut versorgten Boden des Versuchsstandortes zu tun haben (Gehaltstufe C = optimal, siehe Tabelle 17).

Sowohl der Protein- als auch der Kaliumgehalt wurden ebenfalls signifikant durch die N-Düngung und letztere auch durch die Kali-Gabe beeinflusst (Tabelle 32). Allerdings scheint hierbei eine Sortenabhängigkeit bzw. Wechselwirkungen vorzuliegen, denn erhöhte Kali-Gehalte konnten nur bei der Sorte Della festgestellt werden. Generell ist der Effekt jedoch gering und somit ist nicht mit einer entscheidenden Beeinflussung der nachfolgenden Verarbeitungsprozesse zu rechnen.

Eine erhöhte N-Düngung wirkt sich auch auf die N-Bilanz des Bodens aus. Der N-Vorrat des Bodens und der N-Bilanzsaldo und sind wichtige Indikatoren für die N-Flüsse im Boden, insbesondere im Hinblick auf potentielle Stickstoffaustragungen. Hohe N-Salden bedeuten eine erhöhte Gefahr der N-Auswaschung im Herbst nach der Ernte und wirken sich damit negativ auf die Umwelt, aber auch auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aus, da der zur Verfügung stehende Stickstoff von den Pflanzen nicht effizient in Biomasse umgesetzt werden konnte. Abbildung 20 zeigt die N-Salden der Sorten ‘Della’ und ‘Sugar Drip’ bei unterschiedlichen Düngestufen. Bei einer N-Versorgung von 120 kg N/ha sind die N-Salden leicht negativ. Da bei dieser Variante der N-Bedarf ausschließlich über den Bodenvorrat gedeckt wurde, ist dies nachvollziehbar. Bei 170 kg N/ha ist die N-Bilanz leicht positiv aber weitgehend ausgeglichen. Höhere N-Gaben führen zu einem Überhang von bis zu 62 kg N/ha und sprechen für eine schlechtere N-Ausnutzung des Stickstoffs. Vergleichbare Kulturen wie Mais (ortsübliche Düngung) hatten auf Dauertestflächen in Thüringen einen N-Saldo von 51 kg N/ha [275]. Die N_{min}-Untersuchungen im Herbst nach Ernte spiegeln den N-Überhang nur zum Teil wieder.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse kann der auch für Futtersorghum empfohlene N-Sollwert von etwa 150 kg Gesamt-N/ha [311] übernommen werden. Organische Dünger wie Gülle oder Gärreste werden von Futterhirse gut verwertet [311], somit ist davon auszugehen, dass auch eine organische Düngung für Zuckerhirse in Frage kommt.

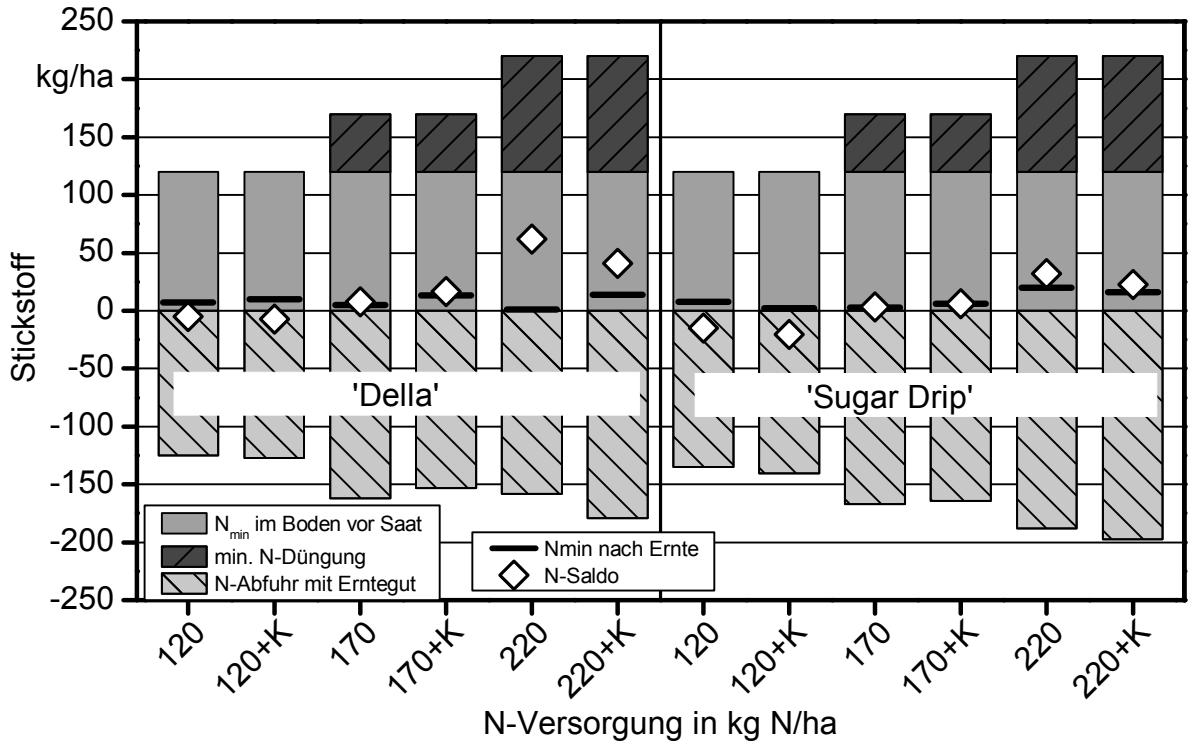


Abbildung 20: N-Bilanz (N-Saldo) von zwei Zuckerhirsesorten bei unterschiedlichen N-Versorgungsstufen, Versuchsjahr 2011 (n =1)

5.2.6 Der Einfluss der Saatstärke auf Ertrag und Qualität von Zuckerhirsen

Wie Untersuchungen mit Futterhirse gezeigt haben, beeinflussen neben der Nährstoffversorgung auch produktionstechnische Parameter wie die Saatstärke, den Ertrag und weitere Ernteparameter [226]. Aus Tabelle 33 und Tabelle 34 wird der signifikante Einfluss der Saatstärke auf den Ertrag deutlich (Reihenweite 37,5 cm: P-Wert = 0,003, Reihenweite 50 cm: P-Wert = 0,004). Mit 35 Körner/m² (Reihenweite 37,5 cm) wurde im vorliegenden Versuch der höchste Ertrag mit 206,7 dt TM/ha erzielt (Tabelle 33). Ähnliche Ergebnisse konnten von HARTMANN und FRITZ (2011) [120] und BAHRANI et al. (2004) [18] beobachtet werden. Auch hier wurde von steigenden Erträgen mit steigender Saatstärke berichtet. Weiterhin spielte die Sorte eine Rolle (Reihenweite 37,5 cm: P-Wert = 0,003). In Abbildung 21 sind die TM-Erträge der beiden Sorten bei unterschiedlicher Saatstärke dargestellt und zeigen die höhere Biomasseproduktion der Sorte 'Sugar Drip'. Bei einer Reihenweite von 50 cm ist der Sortenunterschied jedoch nicht mehr signifikant (P-Wert = 0,1). Ein Vergleich des Faktors Reihenweite ist aufgrund des Versuchsdesigns (siehe Kap. 5.1.6) auf unterschiedlichen Flächen leider nicht möglich. Auf den Parameter TM-Gehalt hat die Saatstärke keinen Einfluss.

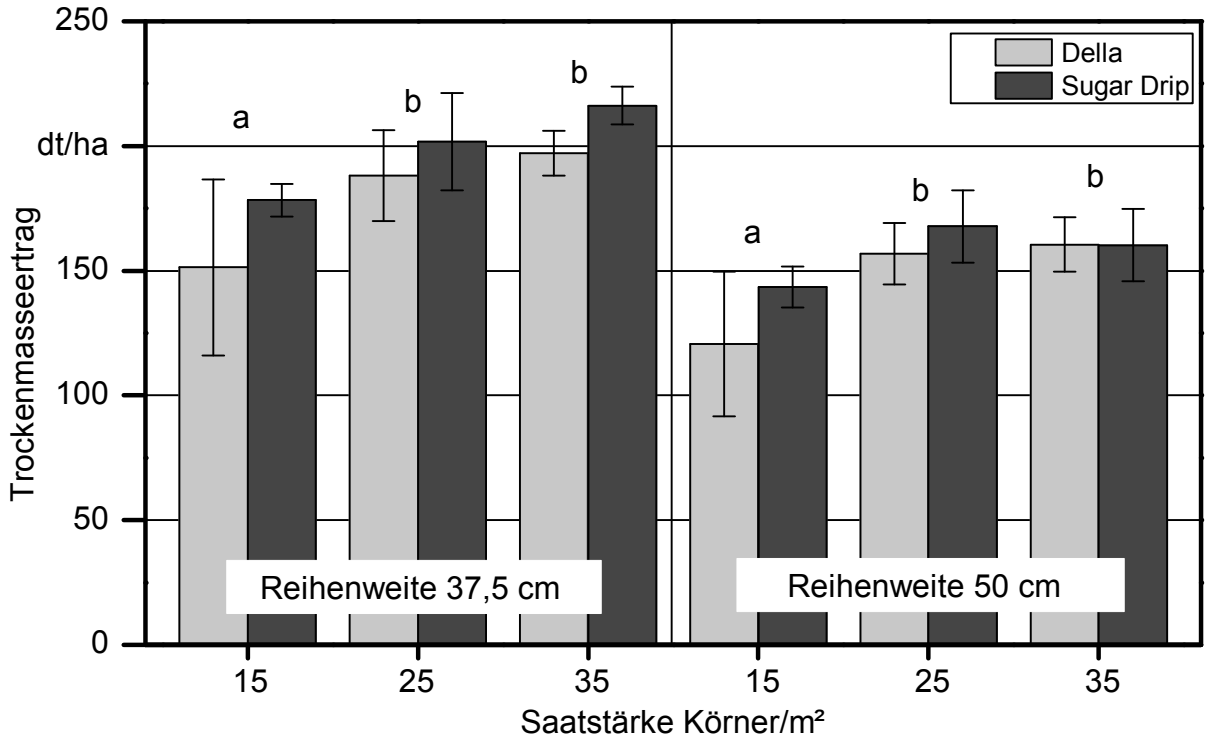


Abbildung 21: Trockenmasseertrag von Zuckerhirse bei unterschiedlichen Saatstärken (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 4)

Der Stängeldurchmesser wird signifikant von der Saatstärke beeinflusst. Je höher die Saatstärke und je geringer der Standraum für die einzelne Pflanze, desto geringere Durchmesser der Stängel wurden gemessen. Hintergrund dieser Erhebungen war die Vermutung, dass bei reduziertem Durchmesser mit einem erhöhten Lagerrisiko zu rechnen ist [309], ein Sachverhalt der in Untersuchungen aus Griechenland nachgewiesen wurde [68]. Die eigenen Ergebnisse bestätigen diese Vermutung jedoch nicht sondern zeigen vielmehr den deutlichen Sorteneinfluss auf den Parameter Lagerneigung. Auch in Versuchen mit Futterhirse konnte kein Einfluss der Saatstärke auf die Lagerneigung nachgewiesen werden [226]. Dennoch sollte bei höheren als den untersuchten Saatstärken auf windgefährdeten Standorten ein solcher Effekt nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Möglicherweise haben der deutliche Sorteneinfluss oder die klimatischen Bedingungen den Effekt der Saatstärke überlagert. Eine Aussaat mit mehr als 35 Körner/m² ist auf lagergefährdeten Standorten demnach nicht zu empfehlen.

Der Rohfasergehalt wurde bestimmt, da besonders Faserbestandteile im Zusammenhang mit einer erhöhten Resistenz gegenüber Lager stehen [29] und sich auch auf das Abpressverhalten der Zuckerhirse auswirken können. Allerdings wurde auch der Rohfasergehalt nur von der Sortenwahl nicht aber der Saatstärke beeinflusst.

Tabelle 33: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des produktionstechnischen Versuchs bei einer Reihenweite von 37,5 cm, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet

Parameter	TM-Ertrag in dt/ha	TM-Gehalt in %	Zucker in % i.d. TM*	Rohfaser in % TM	Stängeldicke in mm	Lager
Saatstärke						
15 Körner/m²	164,8 a	23,3 a	40,2 a	23,5 a	14 a	3 a
25 Körner/m²	194,9 b	23,8 a	39,5 a	23,4 a	13 b	3 a
35 Körner/m²	206,7 b	23,9 a	41,0 a	22,3 a	12 b	2 a
Sorte						
Della	178,9 a	23,8 a	37,2 a	23,9 a	14 a	4 a
Sugar Drip	198,8 b	23,5 a	43,3 b	22,3 a	13 b	1 b

** = als Glucoseäquivalent*

Tabelle 34: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des produktionstechnischen Versuchs bei einer Reihenweite von 50 cm, Versuchsjahr 2011, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet

Parameter	TM-Ertrag in dt/ha	TM-Gehalt in %	Zucker in % i.d. TM*	Rohfaser in % TM	Stängel-dicke in mm	Lager
Saatstärke						
15 Körner/m²	132,1 a	19,9 a	34,6 a	25,0 a	15 a	4 a
25 Körner/m²	162,3 b	20,5 a	37,2 b	24,7 a	14 b	5 a
35 Körner/m²	160,4 b	20,6 a	36,5 ab	24,0 a	14 b	4 a
Sorte						
Della	146,0 a	20,1 a	35,5 a	25,4 a	15 a	6 a
Sugar Drip	157,2 a	20,5 a	36,7 a	23,8 b	14 b	2 b

** = als Glucoseäquivalent*

5.2.7 Einfluss von Wasser und Temperatur auf Wachstum und Zuckerbildung der Zuckerhirse unter Gewächshausbedingungen

Ideale Wachstumsbedingungen für Zuckerhirse sind warme, tropische Temperaturen. Mit Trockenheit kann diese Kultur in der Regel gut umgehen [183]. Inwieweit sich eine Reduzierung der Faktoren Wasser und Temperatur auf das Wachstum und die Zuckerbildung von Zuckerhirse auswirken, wurde in einem Versuch mit je zwei Wasser- und Temperaturstufen unter standardisierten Bedingungen im Gewächshaus untersucht.

Erste Unterschiede zwischen den Temperaturvarianten (20/28 °C vs. 15/23 °C Nacht/Tag) zeigten sich bereits durch verzögertes Auflaufen der unter kühlen Temperaturen angezogenen Zuckerhirsepflanzen. In Abbildung 22 sind die Wachstumsunterschiede im frühen Entwicklungsstadium zu sehen.

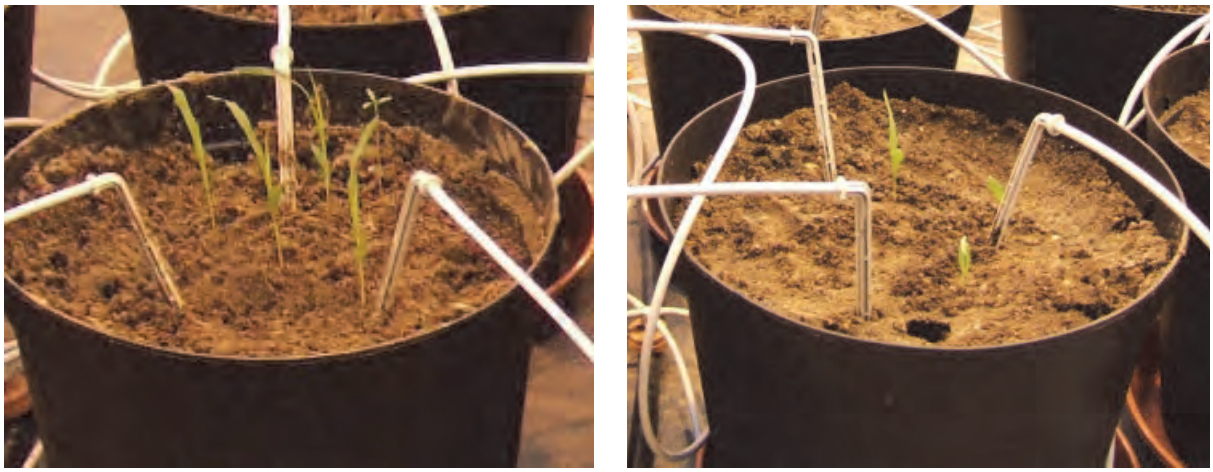


Abbildung 22: Jugendentwicklung von Zuckerhirse bei warmen (links) und kühlen (rechts) Temperaturbedingungen im Gewächshaus)

Der positive Effekt von warmen Temperaturen und Feuchtigkeit auf den Keimprozess ist aus der Literatur bekannt und nicht überraschend. ANDA und PINTER (1994) [9] empfehlen eine späte Saat von Sorghum, wenn die Temperaturen ausreichend sind (Minimum Basistemperatur 10 °C), weil sie von einem geringeren pathogenen Befallsrisiko für den Keimling und damit von einem Vorteil für das spätere Wachstum ausgehen.

Neben dem Auflaufen der Pflanzen wird auch das Wachstum durch die klimatischen Verhältnisse beeinflusst. Aus Abbildung 23 wird das unterschiedliche Längenwachstum der Temperaturvarianten deutlich. Mit einer Reduzierung der Bewässerung im Vergleich zur normal bewässerten Kontrolle wurde erst zum Schossen (nach der zweiten Messung) begonnen um gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen und Ausfälle zu vermeiden. Ab diesem Zeitpunkt begannen sich diese Varianten auseinander zu entwickeln, wobei der Effekt unter warmen Temperaturbedingungen ausgeprägter erscheint. Die Wachstumsunterschiede bedingt durch die unterschiedliche Wasserverfügbarkeit war ausgeprägter als der Temperatureffekt.

Wie aus Abbildung 24 ersichtlich scheint die reduzierte Bewässerung keinen Einfluss auf das Entwicklungsstadium (BBCH) der Pflanzen zu haben. Niedrigere Temperaturen verzögerten jedoch die Entwicklung der Pflanzen und so wurde das für eine Ernte angestrebte Stadium der Milchreife in diesen Varianten erst ca. 10 Tage später erreicht.

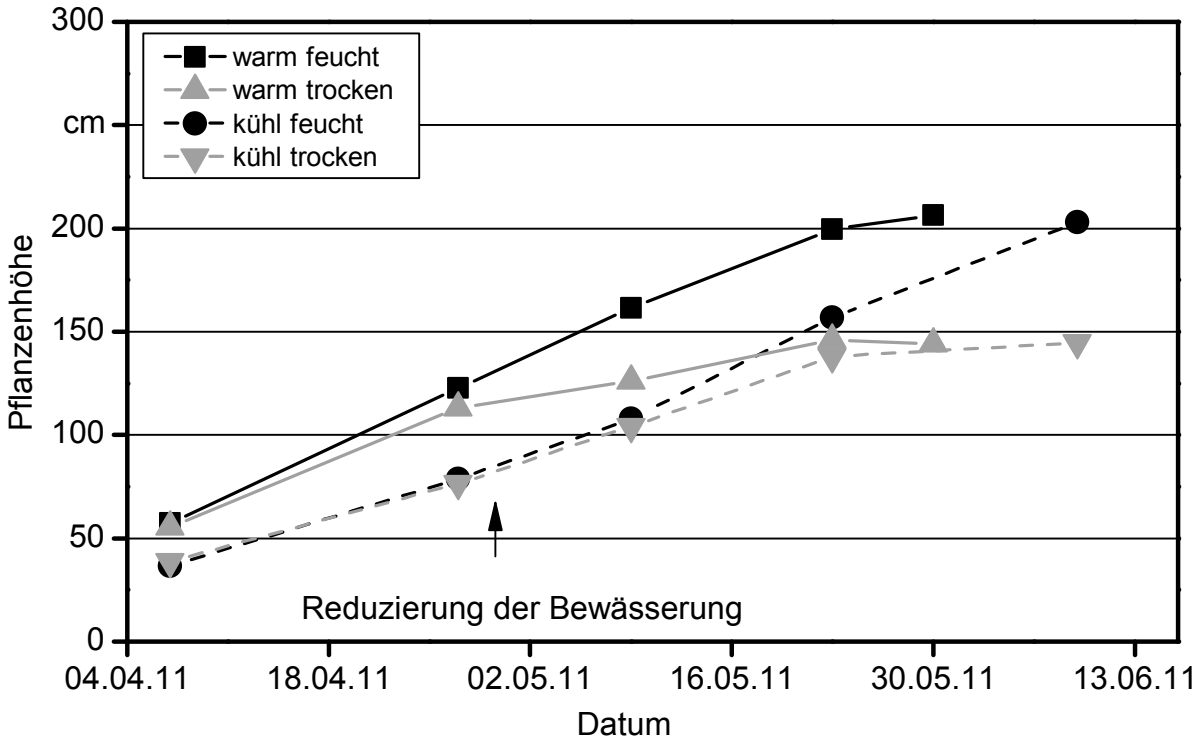


Abbildung 23: Pflanzenhöhe von Zuckerhirse bei Kombination von zwei Wasser- und Temperaturstufen im Gewächshaus, (Mittelwerte, n = 3)

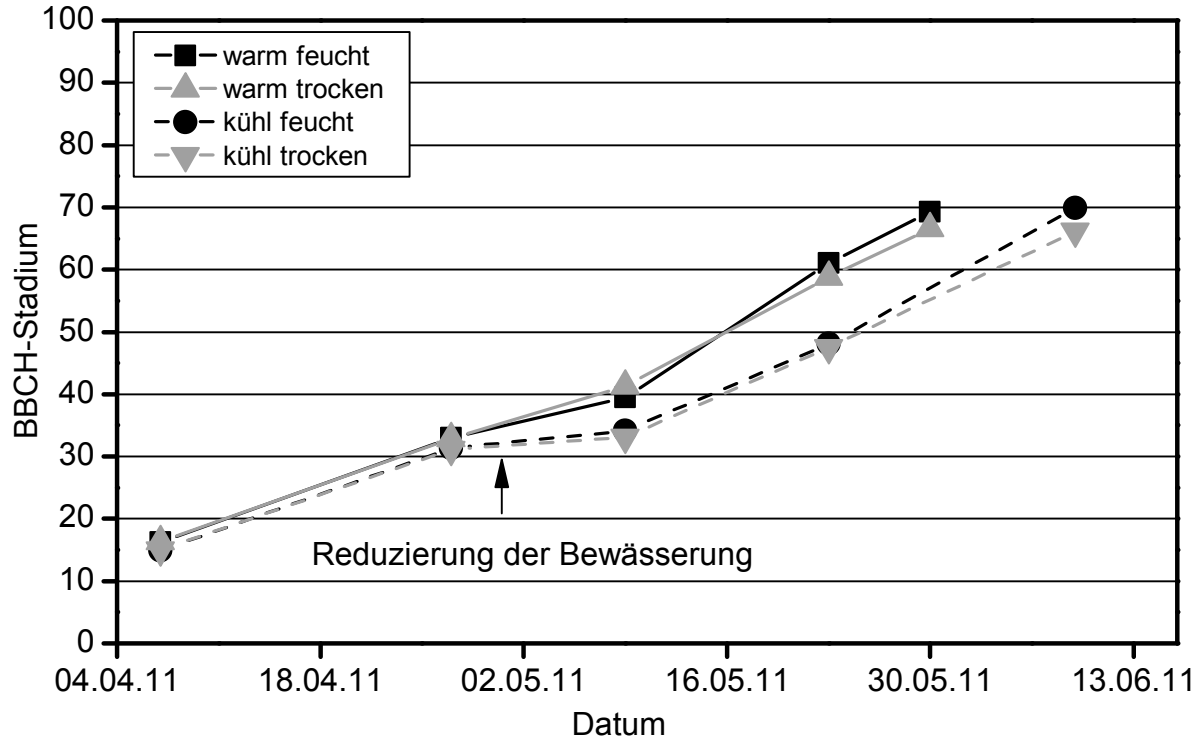


Abbildung 24: Entwicklung von Zuckerhirse bei Kombination von zwei Wasser- und Temperaturstufen im Gewächshaus, (Mittelwerte, n = 3)

Die Frage, inwieweit sich diese Entwicklungs- und Wachstumsunterschiede auch auf den Ertrag und die Zuckerbildung auswirken, wird in Tabelle 35 und Abbildung 25 beantwortet. Es wurde ein signifikanter Einfluss der Wasserversorgung auf den Ertrag deutlich (P-Wert = 0,001). Bei optimaler Bewässerung (feucht) wurden 44,1 g TM/Pflanze gebildet. Bei reduzierter Bewässerung (trocken) wurde ein Ertrag von nur 26,0 g TM/Pflanze ermittelt. Ein Ertragsabfall um fast 40 % erscheint hoch für eine Pflanze, die für ihre Trockentoleranz bekannt ist [173]. Zum Teil mag dies den Bedingungen eines Gewächshausversuches geschuldet sein. Die Vorzüglichkeit von Sorghum gegenüber Mais unter trockenen Bedingungen wird z. B. mit einer besseren Ausnutzung des Wassers aus tiefen Bodenschichten erklärt [253]. In den Töpfen im Gewächshaus war die Ausbildung eines tiefen Wurzelsystems jedoch nicht möglich und die Pflanzen reagierten mit Wachstumsdepression. Nichtsdestotrotz bestätigen Feldversuche aus Spanien und die eigenen Ergebnisse die Aussage von LEIBLE et al. (1991) [171] und ZEGADA-LIZARAZU et al. (2012) [309], dass auch Zuckerhirse für Höchsterträge eine ausreichende Wasserversorgung braucht.

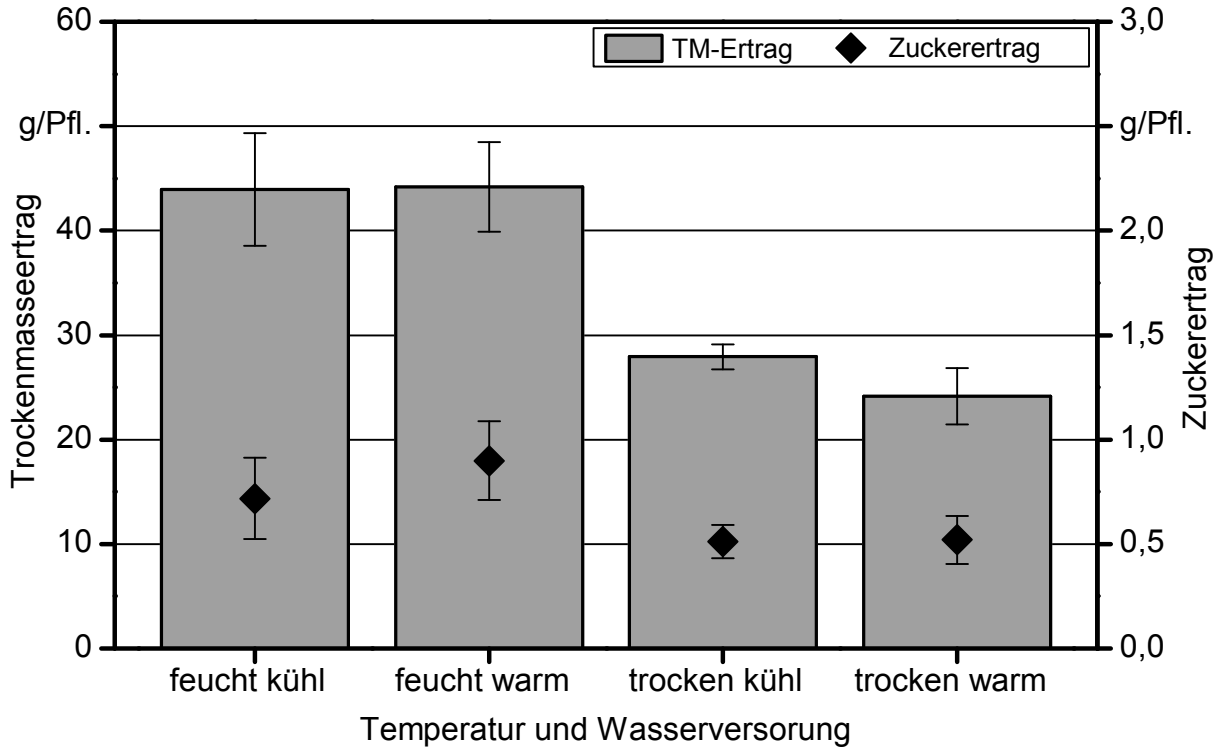


Abbildung 25: TM-Ertrag und Zuckerertrag von Zuckerhirse bei Kombination von zwei Wasser- und Temperaturstufen im Gewächshau (Mittelwerte und Standardabweichung, n = 3)

Ein Einfluss der Temperatur auf den Ertrag konnte trotz der unterschiedlichen Pflanzenhöhen nicht festgestellt (P-Wert = 0,5) werden, obwohl ein solcher Zusammenhang naheliegt und in der Literatur bestätigt wird [107]. Dies liegt vermutlich an einer längeren Vegetationszeit der kühlen Versuchsvariante, bedingt durch eine spätere Ernte. Ziel war

es, alle Varianten im gleichen BBCH-Stadium zu ernten um eine Beeinflussung des Zuckergehaltes durch das Entwicklungsstadium auszuschließen. Der Parameter Trockenmasseproduktion pro Tag (TM/Tag) korrigiert diesen Unterschied. Tabelle 35 zeigt einen leichten, aber nicht signifikanten Ertragsvorteil bei optimalen Temperaturen. Eventuell waren auch die Unterschiede im Temperaturregime zu gering, da an Tagen mit starker Sonneneinstrahlung die reduzierten Temperaturen im Gewächshaus teilweise nicht aufrecht erhalten werden konnten (Temperaturregulation nur über Heizung möglich, keine Kühlfunktion). Die Temperaturdifferenzen zwischen den Versuchsvarianten relativierten sich teilweise, so dass die Gesamtwärmesumme der Varianten keine großen Unterschiede aufwies (siehe Tabelle 22) und am Ende nur geringe Effekte festgestellt werden konnten.

Tabelle 35: Mittelwert verschiedener Ernteparameter des Gewächshausversuches zum Wasser- und Temperatureinfluss, signifikante Unterschiede sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet (Mittelwerte, n = 3)

Parameter	TM- in g/Pfl.	TM pro Tag in g/Tag	TM-Gehalt in %	Zucker in % i.d. TM*	Zuckerertrag in g/Pfl.	Pflanzenhöhe in cm
Wasser						
feucht	44,1 a	2,8 a	21,7 a	18,2 a	0,8 a	205 a
trocken	26,0 b	1,6 b	26,4 b	19,8 a	0,5 b	144 b
Temperatur						
warm	34,2 a	2,3 a	25,5 a	20,8 a	0,7 a	175 a
kühl	35,9 a	2,1 a	22,5 b	17,2 a	0,6 a	174 a

** = als Glucoseäquivalent*

TM-Gehalt und Pflanzenhöhe wurden ebenfalls signifikant von der Wasserversorgung beeinflusst (TM-Gehalt: P-Wert = 0,001, Höhe: P-Wert = 0,001). Die gut bewässerten Varianten erreichten zur Ernte im Mittel 21,7 % TM-Gehalt, unter trockenen Bedingungen hatten die Pflanzen TM-Gehalte von 26,4 % (Tabelle 35). Eine Abhängigkeit des TM-Gehaltes von der Temperatur wurde ebenfalls festgestellt, was die meist unzureichenden TM-Gehalte von Zuckerhirse im Feldanbau unter unseren kühlen und oft feuchten Bedingungen teilweise erklärt.

Bezüglich des Zuckergehaltes zeigt Tabelle 35 in den Varianten mit guter Wasserversorgung leicht niedrigere Werte. FERNANDEZ et al. (1992) [103] hingegen fanden keine Unterschiede im Zuckergehalt bei variierender Wasserversorgung. In den Untersuchungen von MASSACCI et al. (1996) [182] wird deutlich, dass Trockenstress zu erhöhten Zuckergehalten nach der Blüte führen kann, diese jedoch bei Ernte zu einem späteren Entwicklungsstadium nicht mehr nachweisbar sind. Offensichtlich spielt in diesem Zusammenhang das Vegetationsstadium eine Rolle. Über die Frage ob das vermehrte Biomasse-

wachstum der Variante mit optimaler Wasserversorgung zu einer Art Verdünnungseffekt führt kann nur spekuliert, die Frage aber an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch, dass aufgrund der besseren TM-Erträge bei optimaler Wasserversorgung höhere Zuckererträge realisiert werden können (Abbildung 25).

Hinsichtlich des Temperatureinflusses auf den Zuckergehalt stellten sich hohe Temperaturen als förderlich für die Zuckerbildung heraus, auch wenn dieser Effekt nicht signifikant war (P-Wert = 0,06). Auf den Zuckerertrag scheint nach unseren Ergebnissen jedoch die Wasserversorgung den größeren Einfluss zu haben, wobei der Zeitpunkt des Trockenstresses sicherlich eine Rolle spielt [309]. Die vorteilhaftesten Bedingungen für eine maximale Zuckerproduktion mit Zuckerhirse sind feucht-warme Klimate, da eine ausreichende Wasserversorgung und hohe Temperaturen die Zuckerbildung in den Pflanzen und die Biomassebildung fördern.

Für den Anbau von Zuckerhirse unter bayerischen Bedingungen stellt die Wasserversorgung in der Regel kein Problem dar. Die für eine maximale Produktion ausreichende Wärmesumme zu erreichen, dürfte jedoch schwierig sein. Die Bereitstellung von an kühlere Temperaturen adaptierten Sorten durch die Züchtung wäre dafür essentiell.

5.2.8 Inhaltsstoffliche Zusammensetzung von Zuckerhirse

Bei Nutzung der Zuckerhirse zur Ethanolproduktion stellt der zuckerhaltige Saft des Stängels das Haupt-Gärsubstrat für die Fermentation dar. Im Rahmen dieses Projektes wird jedoch ebenso die Möglichkeit einer Ganzpflanzenkonversion untersucht. Weiterhin wird eine energetische Nutzung der Bagasse bzw. eine kombinierte Saft- und Bagasse-Fermentation angedacht, um zum einen Prozessenergie bereitzustellen und zum anderen durch die Nutzung der Reststoffe das Verfahren effizienter zu gestalten. Dabei ist eine Auftrennung der Bagasse in Cellulose (zur weiteren alkoholischen Vergärung) und Hemicellulose (für eine Fermentation zu Biogas) das Ziel. Im Hinblick auf die genannten weiteren Nutzungspfade wurde im Sortenscreening eine Charakterisierung des Pflanzenmaterials mittels erweiterter Weender Analyse vorgenommen.

Ein deutlicher Jahreseinfluss kann bei den Rohaschegehalten, den N-freien Extrakt-Stoffen und den Rohfasergehalten, dargestellt in Tabelle 36, festgestellt werden. Besonders bei den Rohfasergehalten ist zudem ein eindeutiger Sorteneinfluss zu erkennen. Dies kann jedoch auch mit dem Entwicklungsstadium zur Ernte in Zusammenhang stehen, da bei Sorghum die Fasergehalte mit zunehmender phänologischer Reife bis zu einem gewissen Punkt abnehmen [23]. Ob sich niedrigere Rohfasergehalte auf die Ethanolproduktion bei einer Ganzpflanzen-Konversion auswirken können, ist nicht bekannt. Von BRYAN et al. (1985) [46] wurde jedoch eine negative Korrelation von Fasergehalt und Saftausbeute nachgewiesen. Somit könnten Sorten mit niedrigeren Fasergehalten die Ausbeute bei einer Ethanolgewinnung aus Zuckerhirsesaft erhöhen. Eigene Ergebnisse liegen zu diesem Sachverhalt allerdings nicht vor.

Tabelle 36: Inhaltsstoffe der Zuckerhirsen im Sortenversuch 2009 und 2011 zum jeweils letzten Erntetermin am 05.10.2009 bzw. 19.10.2011 (n = 1)

Sorte	Jahr	XA	XF	XP	XL	NfE	Hemicel-lulose*	Cellu-lose#	Lig-nin	XS
		in % i.d. TM								
2 Way	**2009**	5,7	25,4	7,7	1,07	60,1	16,3	26,9	5,5	< 0,1
Della		4,1	24,8	6,9	1,17	63,1	15,5	26,0	3,9	< 0,1
Keller		4,8	24,2	8,4	1,23	61,3	17,0	24,8	3,7	< 0,1
Morris		5,3	26,9	8,1	1,35	58,4	18,1	27,5	3,7	< 0,1
Rio		5,0	27,7	7,8	1,00	58,5	17,1	27,4	3,9	< 0,1
Rox Orange		4,6	24,8	8,5	1,15	61,0	18,2	26,1	4,4	< 0,1
Sugar Drip		4,3	22,7	7,2	0,99	64,8	20,0	23,7	3,2	< 0,1
Sweet Bee		5,6	24,6	7,4	1,00	61,4	16,0	27,1	4,8	< 0,1
Umbrella		4,6	23,9	9,6	1,36	60,6	17,2	25,5	3,4	< 0,1
Mittelwert		**4,9**	**25,0**	**7,9**	**1,1**	**61,0**	**17,3**	**26,1**	**4,1**	**< 0,1**
2 Way	**2011**	6,9	28,0	9,2	1,3	54,5	17,8	28,1	4,6	< 0,5
Black Gold		6,6	30,6	8,1	0,7	54,0	16,5	31,1	4,7	< 0,5
CSSH45		5,9	24,5	7,3	1,1	61,2	13,8	25,3	4,4	< 0,5
Dale		6,6	28,8	8,2	1,1	55,3	18,5	29,9	3,6	< 0,5
Della		6,4	25,7	8,4	1,3	58,2	17,9	23,9	5,2	< 0,5
KN Morris		6,4	31,4	9,0	1,8	51,4	21,0	30,8	3,8	< 0,5
M81E		6,0	31,2	8,0	1,3	53,5	18,4	31,6	4,4	< 0,5
Millenium BMR		6,1	27,3	6,9	1,1	58,5	18,2	28,9	2,2	< 0,5
Premium Stock		7,0	30,8	8,6	1,1	52,4	16,6	32,4	5,0	< 0,5
Rio		6,0	27,0	8,9	1,5	56,6	18,6	28,4	3,6	< 0,5
Simon		5,7	25,0	8,0	1,0	60,3	18,2	25,4	2,7	< 0,5
Sugar Drip		5,5	25,2	7,4	1,4	60,5	18,0	24,6	3,7	< 0,5
Sweet Bee		5,9	25,5	7,4	1,5	59,8	14,1	26,8	4,3	< 0,5
Theis		5,4	29,7	7,1	1,3	56,5	11,9	31,1	5,1	< 0,5
Top 76		5,9	25,9	7,3	1,0	59,8	16,2	25,2	3,7	< 0,5
Mittelwert		**6,2**	**27,8**	**8,0**	**1,2**	**56,8**	**17,0**	**28,2**	**4,1**	**< 0,5**

XA=Rohasche, XF=Rohfaser, XP=Rohprotein, XL=Rohfett, NfE=N-freie Extraktstoffe,
** berechnet aus NDF-ADF-ADL, # berechnet aus ADF-ADL*

Die Fettgehalte von Sorghum sind generell als gering einzustufen. Stärke war aufgrund der Ernte im BBCH-Stadium 51 bis 75 nicht nachweisbar, da die Stärkeeinlagerung ins Korn noch nicht richtig begonnen hatte. Stärke ist zwar generell nicht störend für die Ethanolproduktion, bedeutet aber entweder einen Verlust an Zuckern oder erfordert ei-

nen weiteren Prozessschritt zur Aufspaltung der Stärkemoleküle, um die Glucose für die Hefen und damit einer Vergärung zu Ethanol zugänglich zu machen.

Die Anteile der Strukturkomponenten Hemicellulose, Cellulose und Lignin, die eine Auswirkung auf die Ausbeute bei einer Ethanol- oder Biogasgewinnung aus Bagasse haben könnten, wurden nur geringfügig durch die Sortenwahl beeinflusst. Ein eindeutiger Trend bzw. eine Schlussfolgerung für das Verfahren der Bagassenutzung bei unterschiedlichem Sortenmaterial ist erst bei genauer Kenntnis der prozessbeeinflussenden Stoffe und Stoffmengen möglich und kann daher in diesem Rahmen nicht vorgenommen werden. Deshalb bleiben TM- und Zuckerertrag vorläufig die Hauptkriterien bei der Sortenwahl.

5.3 Fazit der Untersuchungen zum Anbau von Zuckerhirse in Bayern

Die im Rahmen der Untersuchungen zur Anbautechnik und Bestandesführung durchgeführten Feld- und Gewächshausversuche haben gezeigt, dass diese Kultur unter bayerischen Klimabedingungen ein hohes Ertragspotential hat. Allerdings besteht bei fast allen Sorten ein erhebliches Risiko von Ertragsverlusten und -ausfällen durch Lager. Unzureichende TM-Gehalte zur Ernte können ebenso Probleme bereiten. Eine Empfehlung zum Anbau kann deshalb unter den gegenwärtigen Bedingungen nicht ausgesprochen werden.

Die im Sortenscreening 2009 und 2011 geprüften Zuckerhirsesorten erreichten TM-Erträge bis 206 dt/ha. Die Zuckergehalte schwankten stark in Abhängigkeit von der Sorte. 2011 lagen die Zuckergehalte der besten Sorten bei etwa 35 bis 37 % TM. Der theoretisch mögliche Zuckerertrag, ohne Berücksichtigung von Press- oder Lagerverlusten sowie Praxisabschlägen, betrug bis zu 76,6 dt/ha (Sorte ‘Sweet Bee’). Als beste Sorten erwiesen sich ‘Sweet Bee‘, ‘CSSH45’ und ‘Top 76’. Mit anderen etablierten Kulturen, wie z. B. der Zuckerrübe, sind diese Zuckererträge nicht konkurrenzfähig. Als Vorteile gegenüber der Zuckerrübe sind jedoch die kürzere Vegetationszeit und ein geringerer Aufwand für Saat und Pflanzenschutz zu berücksichtigen. Die Erträge wurden in nur 122 bis 141 Vegetationstagen erreicht, was gegebenenfalls auch den Anbau einer energetisch nutzbaren Vorfrucht erlaubt.

Als problematisch wird ebenfalls der sehr niedrige TM-Gehalt zur Ernte (stets < 25 %) eingestuft, da dies die Ernte erschwert und die Transportkosten erhöht. Zudem wurde das Reifestadium der Blüte bis Milchreife (BBCH 65 bis 75) mit den geprüften Sorten erst Mitte Oktober erreicht. Nach den Ergebnissen der Gewächshausversuche werden in diesem BBCH-Stadium die maximalen Zuckergehalte erzielt. Aufgrund der langsamen Abreife der verfügbaren Sorten ist eine möglichst späte Ernte, jedoch vor dem ersten Frost, anzustreben, da dann die höchsten Erträge, Zuckergehalte und Trockenmassegehalte zu erwarten sind. Mit einer Abnahme der Zuckererträge bei fortgeschrittenem Reifestadium, bedingt durch die Kornbildung (Assimilatsenke), ist nach den vorliegenden Ergebnissen unter bayerischen Klimabedingungen nicht zu rechnen, da diese Reifestadien in

der Regel nicht erreicht werden. Bei zu später Ernte können Frosttage zur Zerstörung von Pflanzenzellen führen und somit den Zucker für den mikrobiellen Abbau freisetzen, was zu Verlusten im Zuckerertrag führt.

Untersuchungen der Pflanzenfraktionen Blatt und Stängel ergaben, dass eine reine Stängelernte nach Abtrennung der Blätter, wie sie mit Zuckerrohrerntetechnik praktiziert wird, für die Ethanolproduktion aus Zuckerhirse nicht zu empfehlen ist. Bei diesem Ernteverfahren müssten Verluste von bis zu 17 % des möglichen Zuckerertrages sowie von wertvollem Material für eine energetische Bagassenutzung in Kauf genommen werden. Eine Ernte der ganzen Pflanze mit praxisüblicher Häckseltechnik, wie sie für eine verlustarme Lagerung mittels Säurekonservierung erforderlich ist (vergleiche Kapitel 8.8), ermöglicht die vollständige Nutzung des Zuckerpotentials und ist für den Landwirt einfach durchführbar.

Hinsichtlich der N- und K-Düngung zeigte sich die moderat ertragssteigernde Wirkung der beiden Nährstoffe. Auf den Zuckergehalt hat die Düngung keinen signifikanten Einfluss. Höhere Zuckererträge können nur über eine Steigerung des Biomasseertrages erzielt werden. Ein Sollwert bis 150 kg N/ha (unter Anrechnung von N_{min}) sollte daher ausreichend sein, dies führt außerdem zu einer ausgeglichenen Bilanz des Bodenstickstoffs. Höhere N-Gaben können sich zwar ertragssteigernd auswirken, sortenabhängig erhöhen sie aber auch das Lagerrisiko. Die Kali-Gabe sollte sich nach der Versorgungsstufe des Bodens und dem Nährstoffentzug durch das Erntegut richten. Zuckerhirse entzieht ca. 16 bis 17 kg K je Tonne Trockenmasse.

Produktionstechnische Parameter wie die Saatstärke können den Ertrag ebenfalls beeinflussen. Generell wirkten sich höhere Saatstärken ertragssteigernd aus. Allerdings sank aufgrund des geringeren Standraumes auch die gemessene Stängeldicke der Pflanzen. Ein Zusammenhang mit der Lagerneigung des Bestandes konnte zwar nicht nachgewiesen, sollte aber auch nicht ganz ausgeschlossen werden. Zumindest auf lagergefährdeten Standorten erscheint eine Saatstärke von 25 Pflanzen/m² als ausreichend, mehr als 35 Pflanzen/m² sind generell nicht zu empfehlen. Die Untersuchungen des Zusammenhangs von Saatstärke und Zuckergehalt lieferten kein ganz einheitliches Bild. Hier lautet das Fazit, dass der Zuckergehalt und damit auch der Zuckerertrag am besten über die Wahl geeigneter Sorten zu beeinflussen sind.

Untersuchungen zum Einfluss der Wasserversorgung und der Temperatur auf Zuckerbildung und Ertrag von Zuckerhirse zeigten den großen Einfluss des Faktors Wasser für maximale Zuckererträge. Zwar ist Trockenheit für hohe Zuckergehalte in der Pflanze förderlich, der ertragliche Nachteil einer unzureichenden Wasserversorgung scheint jedoch in Bezug auf den gebildeten Zuckerertrag zu überwiegen. Warme Temperaturen führten in unserem Versuch zu höheren Zuckergehalten und beschleunigtem Wachstum. Auf den TM-Ertrag zur Ernte wirkten sie sich zwar nicht direkt aus, hatten aber eine höhere Biomassebildung pro Tag zur Folge. Dadurch können die Pflanzen früher geerntet werden bzw. erreichen bei limitierter Vegetationsperiode zur Ernte eine höhere Aufwuchsleistung. Auf den TM-Gehalt zur Ernte haben hohe Temperaturen ebenfalls einen steigernden Einfluss. Deshalb sind warme Standorte, die über ausreichende Nieder-

schlagsmengen verfügen, für den Zuckerhirseanbau in Bayern oder Deutschland am vorteilhaftesten.

Neben den bereits angesprochenen Problemen und der ausgeprägten Lagerneigung von Zuckerhirse im Allgemeinen hat sich auch die Beschaffung von Saatgut, insbesondere von an unser Klima angepassten Sorten, als sehr schwierig herausgestellt. Für vorliegende Untersuchungen wurde auf Saatgut aus den U.S.A. zurückgegriffen. Die Verfügbarkeit ist begrenzt, da Zuckerhirse dort bisher vorrangig zur Sirupherstellung in kleinem Maßstab angebaut wird. Zuckerhirsesorten werden hauptsächlich im Eigennachbau vermehrt, gezielte Züchtungsverfahren, die aufwendig und teurer wären, finden noch nicht in großem Umfang statt. Für eine zukünftige, erfolgreiche Ethanolproduktion aus Zuckerhirse in Bayern wäre die Verfügbarkeit von insbesondere standfesten, frühreifenden und kältetoleranten Zuckerhirsesorten eine wichtige Voraussetzung, da die Standortbedingungen für diese wärmeliebende Kultur nicht optimal sind.

6 Ernte von Zuckerhirse

6.1 Vorgehensweise

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Haltbarkeit frischer Zuckerhirse von der Beschaffenheit des Erntegutes und somit entscheidend von der Wahl des Ernteverfahrens abhängig ist, da durch die Form des Erntegutes (Zerkleinerungsgrad) die Abbaugeschwindigkeit des Zuckers im Erntegut maßgeblich beeinflusst wird. Deshalb sollten im Rahmen des Forschungsvorhabens Lagerungsversuche zur Untersuchung des Einflusses der Erntegutform (Ganzpflanze, Stückgut, Häckselgut) und Qualität (u. a. Zucker- und Wassergehalt) von Zuckerhirsepflanzen aus Freilandversuchen durchgeführt werden. Für die Beerntung der Zuckerhirsepflanzen auf den Versuchsparzellen werden die nachfolgenden Annahmen und Überlegungen zugrunde gelegt. Für die Versuche zur Lagerung von Zuckerhirse sollten die Erntegutformen Ganzpflanze, Stück- und Häckselgut entsprechend der Erntetechniken Mähbinder, Zuckerrohrernter und Feldhäcksler bereitgestellt werden. Das Zuckerhirsematerial der jeweiligen Sorten sollte im Versuchsjahr 2009 parzellenweise geerntet und dabei gleichzeitig der Frischmasseertrag ermittelt werden. Des Weiteren sollte für die durchzuführenden Lagerversuche das Pflanzenmaterial für alle drei Erntegutformen aus demselben Ausgangsmaterial (hier sortenrein) bereitgestellt werden können.

Die Ernte von Zuckerhirseganzpflanzen wurde, da Mähbinder und Zuckerrohrernter nicht verfügbar waren, deshalb mit einem am Heck eines Schleppers angebauten Mähbalken und einer am Mähbalken angehängten Ladeschale durchgeführt, wie in Abbildung 26 dargestellt. Anschließend erfolgte die Weiterverarbeitung der geernteten Ganzpflanzen zu Stückgut und Häckselgut.

Die abgeschnittenen Zuckerhirseganzpflanzen wurden mit Hilfe von Rundschlingen in der Ladeschale zu einem Erntebündel zusammengefasst und mit dem Frontlader eines zweiten Schleppers geborgen, ebenfalls dargestellt in Abbildung 26. Pro Versuchsparzelle wurden zwei Erntebündel erzeugt und zur Ermittlung des jeweiligen Frischmasseertrages über eine Kranwaage (Typ MCW 1500, Hersteller As-Wägetechnik GmbH, d = 0,1 kg) gewogen. Anschließend wurden die Erntebündel mit Hilfe von Bindegarn verschnürt und vom Feld abtransportiert.

Im Versuchsjahr 2010 wurde Zuckerhirse der Sorte ‘Keller‘ zum einen mit der Gerätekombination Mähbalken/Ladeschale als unzerkleinerte Ganzpflanzen bereitgestellt und zum anderen mit einem Selbstfahrer-Feldhäcksler (Arbeitsbreite 7,50 m) als Häckselgut geerntet. Zum Transport des Häckselgutes wurde ein Muldenkipper mit Hochkippeinrichtung verwendet, um angesichts geringer TM-Gehalte Verluste aus dem Häckselgut über abtropfenden Sickersaft durch die nach vorne geneigte Schüttmulde vermeiden zu können.

Abbildung 26: Beerntung von Zuckerhirseversuchsparzellen mit einem Mähbalken mit angehängter Ladeschale (links) und Bergung von Zuckerhirseganzpflanzen in Form von Erntebündeln (rechts) im Versuchsjahr 2009

Am Standort Aholfing wurden 2011 im Rahmen der Feldversuche eine "Großfläche" mit vier Zuckerhirsesorten (‘KN Morris‘, ‘Top 76‘, ‘Dale‘ und ‘Sweet Bee‘) angelegt. Von Mitte September bis Ende Oktober wurden an sechs Terminen Bonituren durchgeführt, um die Entwicklung der Trockenmassegehalte sowie des Gesamtzuckers am Ende der für Zuckerhirse zur Verfügung stehenden Vegetationszeit sortenspezifisch beschreiben zu können. Dabei wurde auch das Zuckermuster bestimmt, worüber die jeweiligen Veränderungen des Gesamtzuckers im zeitlichen Verlauf der Boniturperiode erklärt werden können.

2011 wurde Zuckerhirse der Sorte ‘Top 76‘ ausschließlich mit einem Selbstfahrer-Feldhäcksler (Arbeitsbreite 7,50 m) als Häckselgut geerntet und zum Transport ein Muldenkipper mit Hochkippeinrichtung verwendet.

6.2 Ergebnisse

Die Beerntung der Versuchsparzellen erfolgte im Versuchsjahr 2009 am 05.10.2009 und 06.10.2009. Der verwendete Mähbalken mit angehängter Ladeschale ermöglichte eine sehr zügige Ernte der Zuckerhirsepflanzen. Die Stängel wiesen einen glatten Schnitt auf und hatten keinerlei Beschädigungen infolge des Schnittvorganges. Sowohl die Bergung der abgeschnittenen Zuckerhirseganzpflanzen von der Ladeschale als auch die Wiegung zur Bestimmung des Frischmasseertrages und der sich anschließende Transport zum Betriebshof waren nicht mit mechanischen Beschädigungen der Zuckerhirsepflanzen verbunden. In der Zeit vom 07.10.2009 bis 13.10.2009 wurden die geernteten Zuckerhirseganzpflanzen für die Durchführung der Lagerversuche aufbereitet. In der Zwischenzeit wurden die gebündelten Zuckerhirseganzpflanzen auf Transportanhängern unter Dach bei jeweils gleichen Umgebungsbedingungen zwischengelagert. Der Zeitverzug zwischen Ernte und Lagerbeginn ist mit dem erforderlichen Zeitbedarf für die Aufbereitung des Pflanzenmaterials begründet. Nachdem die Zuckerhirse in dieser Zeitspanne in Form von unzerkleinerten Ganzpflanzen vorlag, ist zunächst nicht von einer wesentli-

chen, negativen Beeinflussung des qualitätsbestimmenden Parameters Zuckergehalt auszugehen.

Im Versuchsjahr 2010 wurde mit einem Selbstfahrer-Feldhäcksler vom 02.11.2010 bis 05.11.2010 Häckselgut für die Durchführung von Konservierungsversuchen mit Ameisensäure bereitgestellt. Der Häckselvorgang war an allen vier Erntetagen ohne erkennbare technische Probleme möglich. Die Behandlung des Häckselgutes mit Ameisensäure erfolgte an diesen vier Tagen jeweils unmittelbar im Anschluss an die Ernte. Das Häckselgut wurde sofort in die einzelnen Lagerbehälter eingebracht und verdichtet sowie die Behälter für den jeweiligen Start des Lagerversuchs verschlossen (vgl. Kapitel 8.2).

Zuckerhirseganzpflanzen wurden am 15.11.2010 analog dem Vorjahr mit Mähbalken und angehängter Ladeschale sehr zügig und ohne mechanische Beschädigungen geerntet. Die Entblätterung der Zuckerhirsepflanzen erfolgte bereits parallel zur Ernte und wurde am 16.11.2010 abgeschlossen. Die Erzeugung von Stückgut aus den entblätterten Stängeln sowie die Befüllung der Gitterboxen als Lagerbehälter wurden am 17.11.2010 umgesetzt und der Lagerversuch mit dem Einstellen der einzelnen Gitterboxen in die beiden Hallenlager gestartet (vgl. Kapitel 8.1).

Im Versuchsjahr 2011 wurde von Mitte September bis Ende Oktober am Standort Aholfing eine Bonitur am Material der vier Zuckerhirsesorten ‘KN Morris‘, ‘Top 76‘, ‘Dale‘ und ‘Sweet Bee‘ durchgeführt, um die Sorte mit dem höchsten Zucker- und TM-Gehalt für die Durchführung der Säurekonservierungsversuche bestimmen zu können. In Abbildung 27 sind die Ergebnisse dieser Bonitur dargestellt.

Vom ersten (13.09.2011) bis zum fünften Boniturtermin (21.10.2011) ist eine Zunahme des Gesamtzuckers festzustellen, wobei Sortenunterschiede hinsichtlich der Veränderungen der Zuckerbausteine bestehen.

Für den sechsten Termin (28.10.2011) wurde für alle vier Sorten eine Abnahme des Gesamtzuckers gegenüber der vorangegangenen Beprobung ermittelt. Diese Verringerung ist als witterungsbedingt anzusehen, nachdem am 22. und 23.10.2011 Nachttemperaturen von -5 °C und -3 °C herrschten und Zuckerhirse hinsichtlich des Zuckergehalts negativ auf Frost reagiert. Der Trockenmassegehalt stieg im Verlauf der Bonituren stetig an.

Die Sorte ‘Top 76‘ wies zum dritten Boniturtermin am 29.09.2011 mit 37,9 % i.d. TM (36,9 bis 39,1 % i.d. TM) sowohl den höchsten Gesamtzucker als auch den höchsten Trockenmassegehalt (21,1 % ± 1,9 %) auf und wurde deshalb als Material für die ab 06.10.2011 durchgeführten Versuche zur Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit unterschiedlichen Konzentrationen Ameisensäure sowie die Pressversuche ausgewählt.

Die Beerntung erfolgte mit einem Selbstfahrer-Feldhäcksler. Dabei war der Häckselvorgang wiederum an allen Erntetagen ohne erkennbare technische Probleme möglich. Unmittelbar nach der Ernte wurde das Erntematerial mit Ameisensäure behandelt und die Lagerbehälter für die Säurekonservierungsversuche befüllt.

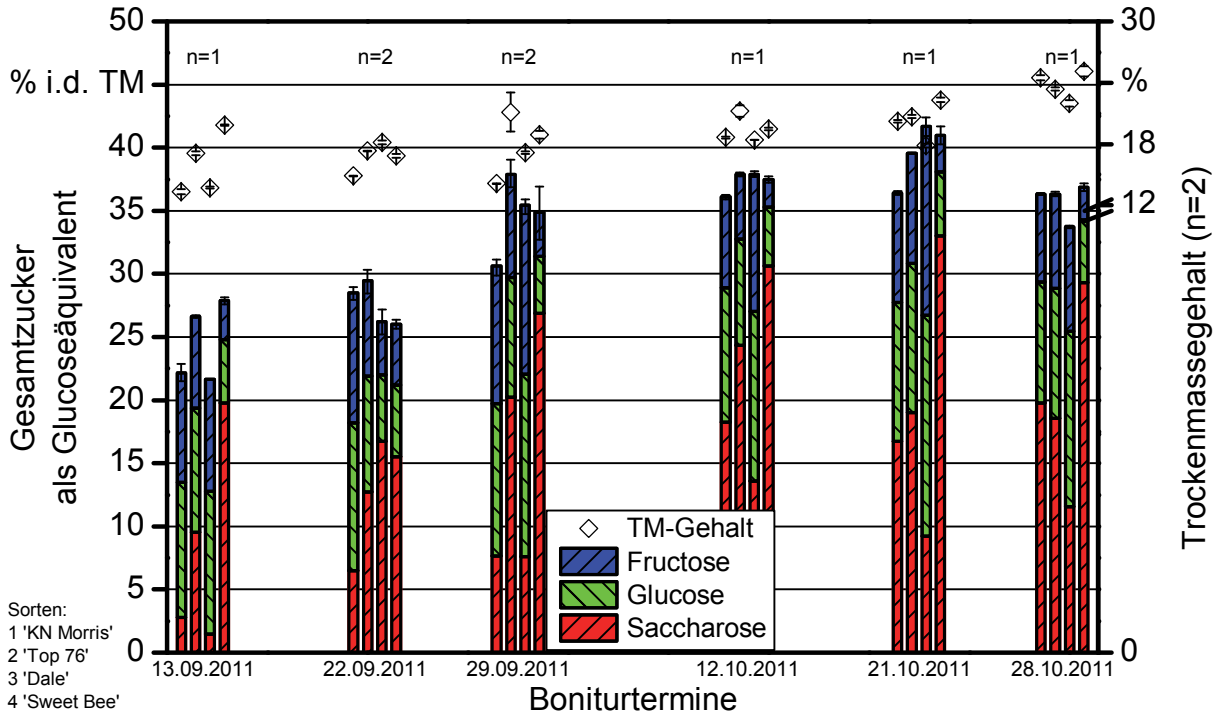


Abbildung 27: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von vier Zuckerhirsesorten am Standort Aholfing an sechs Boniturterminen im September und Oktober 2011, jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung

7 Transport von Zuckerhirse

7.1 Vorgehensweise

Am Standort Irlbach wurden am 07.10.2011 verfahrenstechnische Daten im Rahmen der Beerntung eines 11,61 ha großen Futter- bzw. Zuckerhirsebestandes eines dort ansässigen landwirtschaftlichen Betriebes (siehe dazu Kapitel 5.1.1) sowie des anschließenden Transports zur Lagerstätte dieses Betriebes erhoben. Zum Einsatz kamen ein Selbstfahrer-Häcksler (AB 7,50 m) zur Beerntung sowie vier Schleppergespanne zum Abtransport des Ernteguts (Ladevolumen je 35 m³). Erfasst wurde für jedes Gespann die erforderlichen Zeiten für den Häckselvorgang sowie für den Transport zur ca. 1,5 km (1,2 bis 1,7 km) entfernten Lagerstätte und für den Abladevorgang. Des Weiteren wurden mit Hilfe einer Überfahrtswaage (Hersteller T.E.L.L. Steuerungssysteme, Typ "Achswaage 20 t", d = 1 kg) für jedes Schleppergespann die jeweils transportierten Frischmasse ermittelt. Anhand der durchgeführten Beprobung des Häckselguts wurden für die Futterhirsesorte 'Zerberus' sowie die beiden Zuckerhirsesorten 'M81E' und '2-Way' der TM-Gehalt bestimmt und der Zuckergehalt analysiert. Entsprechend der zugehörigen beernteten Flächen und Frischmassen konnten für diesen Praxisschlag Ertragsdaten (FM und TM) berechnet werden.

7.2 Ergebnisse

Ertragsdaten für die Futterhirsesorte 'Zerberus' und die beiden Zuckerhirsesorten 'M81E' und '2-Way' sowie die bestimmten TM-Gehalte und die analysierten Zuckergehalte sind in Tabelle 37 dargestellt. Die drei Sorten unterscheiden sich in allen Parametern deutlich voneinander. Im Zuckerertrag erreichte die Futterhirse einen höheren Wert als die beiden Zuckerhirsen. Hier ist wohl die Ursache beim zu frühen Erntetermin 07.10.2011 für Zuckerhirsen zu suchen. Unter der Annahme eines Ertrags von 50 t FM/ha zum Erntetermin 25.10.2011, bei einem TM-Gehalt von 24 % und einem Zuckergehalt von 40 % i.d. TM wäre ein Zuckerertrag von 4,8 t/ha zu erwarten.

Tabelle 37: Ertragsermittlung am Standort Irlbach für Futter- und Zuckerhirse im Versuchsjahr 2011

Sorte	Fläche in ha	Ertrag in t FM/ha	TM-Gehalt in %	Ertrag in t TM/ha	Zuckergehalt in % i.d. TM
'Zerberus' (F)	10,820	50	34,95	17,5	17,2
'M81E' (Z)	0,395	56	22,49	12,5	20,0
'2-Way' (Z)	0,395	42	21,14	8,9	28,9

F Futterhirse
Z Zuckerhirse

Bei der Ernte mit einem SF-Feldhäcksler und dem Transport mit vier Schleppergespannen am Standort Irlbach wurden für die Vorgänge "Häckseln", "Transport Feld-Silo", "Anhängerentleerung" und "Transport Silo-Feld" die in Tabelle 38 aufgeführten Zeiten ermittelt. Dabei wird nicht zwischen den beiden Zuckerhirsesorten und der Futterhirse differenziert, nachdem entsprechend der ermittelten Einzelwerte keine Unterschiede beim Arbeitszeitbedarf zwischen Zuckerhirse und Futterhirse erkennbar sind.

Tabelle 38: Zeitbedarf für Ernte und Transport von Futter- und Zuckerhirse am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 (pro Gespann)

Zeitbedarf in MM:SS	Häckseln	Transport Feld-Silo	Entleerung	Transport Silo-Feld
Wiederholungen	n = 36	n = 24	n = 24	n = 24
Minimum	01:52	08:54	00:18	02:38
Maximum	03:55	15:16	00:43	05:09
Mittelwert	02:36	12:01	00:28	03:32
Median	02:50	11:43	00:27	03:19

DÖRING et al. (2010) [89] geben einen Gesamtzeitbedarf für den Transport und die Entleerung eines Gespanns mit 15,6 Minuten bei einer Entfernung von 2 km an. Die Summe der Mittelwerte entsprechend der erhobenen Daten liegt bei 16:01 MM:SS, der Median bei 15:29 MM:SS und damit in vergleichbarem Umfang.

Anhand der erhobenen Daten werden nachfolgend die Kosten für Ernte und Transport von Futter- und Zuckerhirse auf der Basis überbetrieblicher Verrechnungssätze dargestellt [179]. Annahmen wurden entsprechend Tabelle 39 zugrunde gelegt:

Tabelle 39: Für Ernte und Transport von Futter- und Zuckerhirse am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 eingesetzte Technik und hierfür unterstellte Kosten

Arbeitsgang / Technik	Kosten
Ernte mit SF-Feldhäcksler (AB 7,50 m) (einschließlich Fahrer- und Dieselkosten, Agrardieselrückvergütung berücksichtigt)	84 €/ha + 46 €/ha (Dieselkosten: 35 l/ha x 1,02 €/l) = 130 €/ha
Transport mit vier Schleppergespannen (Ladevolumen je 35 m³) Schlepper (einschließlich Fahrer- und Dieselkosten), Abschiebewagen	4 x 35 €/ha = 140 €/ha Kosten je Schleppergespann: 70 €/h Zeitbedarf je Schleppergespann: 0,5 h/ha Kosten je Schleppergespann: 35 €/ha

Tabelle 40: Erntekosten für Futter- und Zuckerhirse entsprechend der am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 erhobenen Daten

Sorte	Erntekosten	
'Zerberus' (F)	2,60 €/t FM	7,43 €/t TM
'M81E' (Z)	2,32 €/t FM	10,40 €/t TM
'2-Way' (Z)	3,10 €/t FM	14,61 €/t TM

F Futterhirse, Z Zuckerhirse

Tabelle 41: Transportkosten für Futter- und Zuckerhirse entsprechend der am Standort Irlbach im Versuchsjahr 2011 erhobenen Daten

Sorte	Transportkosten	
'Zerberus' (F)	2,80 €/t FM	8,00 €/t TM
'M81E' (Z)	2,50 €/t FM	11,20 €/t TM
'2-Way' (Z)	3,33 €/t FM	15,73 €/t TM

F Futterhirse, Z Zuckerhirse

DÖRING et al. (2010) [89] gingen bei einer Transportentfernung von 2 km davon aus, dass drei Transportgespanne mit einer Nutzlast von 7,5 t für den Biomassetransport erforderlich sind. Für Dieselkraftstoff wurde im Jahr 2010 ein Nettopreis von 0,87 €/l angesetzt. Bei einem Kraftstoffverbrauch je Schlepper von 18,5 l/h und einem Zeitbedarf für den Transport von 0,5 h/ha ergeben sich 9,25 l/ha und Schlepper. Auf dieser Basis wurden Transportkosten von 1,90 €/t FM ermittelt.

Im Rahmen der Datenerhebungen im Versuchsjahr 2011 am Standort Irlbach erfolgte der Häckselguttransport mit vier Gespannen bei einer durchschnittlichen Beladung von 7,394 t FM/Gespann. Der Bruttobezugspreis für Dieselkraftstoff wurde für das Jahr 2011 mit 1,43 €/l, bereinigt um die Agrardieselrückvergütung 0,2148 €/l, berücksichtigt, woraus sich Nettokosten von 1,02 €/l ergeben. Entsprechend vorliegender Transportkosten von 140 €/ha bei vier Gespannen und einem Frischmasseertrag von 50 t/ha ergeben sich 2,80 €/t FM. Wird wie bei DÖRING et al. (2010) [89] davon ausgegangen, dass bei einer Transportentfernung von 2 km drei Transportgespanne ausreichen, errechnen sich Kosten von 2,10 €/t FM.

Die Mehrkosten aufgrund des gestiegenen Kraftstoffpreises (0,15 €/l) belaufen sich bei drei Gespannen mit 27,75 l Dieselkraftstoff/ha auf 4,16 €/ha. Beim Vergleich der Transportkosten im vorliegenden Fall für 50 t FM/ha errechnen sich somit für das Jahr 2011 Mehrkosten von 0,08 €/t FM. Die im Rahmen der Datenerhebungen am Standort Irlbach ermittelten Transportkosten befinden sich mit dem von DÖRING et al. (2010) [89] angegebenen Wert in etwa auf demselben Niveau. Für die Kalkulation von Ernte und Transport von Zuckerhirse können also für Silomais übliche und bekannte Daten, die in der Landwirtschaft bereits erhoben wurden, herangezogen werden.

8 Lagerung und Konservierung von Zuckerhirse

Nachfolgend werden zunächst die Lagerorte der angelegten Versuchsvarianten beschrieben und anschließend die durchgeführten Maßnahmen zur Konservierung aufgezeigt. Auf die Vorgehensweise bei der Beprobung des jeweils gelagerten Zuckerhirsematerials, die durchgeführte Temperaturerfassung und die Bestimmung physikalischer Lagerparameter wird eingegangen bevor die Ergebnisse aller Lagerungs- und Konservierungsversuche vorgestellt werden.

8.1 Lagerungsvarianten

Die Lagerung des Pflanzenmaterials erfolgte im Versuchsjahr 2009 in einem Außenlager bei Außentemperatur unter einer Vliesabdeckung (atmungsaktiv, 160 g/m²), einem Hallenlager und einem Kühllager. Das Außenlager stellt die kostengünstigste Möglichkeit zur Lagerung von Zuckerhirse dar und wurde deshalb in die Untersuchungen einbezogen. Im Rahmen der Hallenlagerung sollen die Auswirkungen einer Belüftung und Kühlung der gelagerten Zuckerhirse mit Außenluft untersucht werden. Im Gegensatz zur Außenlagerung wird die Biomasse in der Lagerhalle witterungsgeschützt vorgehalten. Genutzt wurde eine Lagerhalle in Massivbauweise mit integrierter Lüftungsanlage, mittels derer das Lagergut bei Bedarf mit Außenluft über Unterflurkanäle belüftet und gekühlt werden sollte. Im Kühllager soll bei einer vorgegebenen Umgebungstemperatur von 3 °C Zuckerhirse gelagert werden. Bei niedrigen Temperaturen sind Atmungsvorgänge im Pflanzenmaterial vermindert. Die aus der Literatur zudem bekannte positive Wirkung einer Kühlung auf den Erhalt des vorhandenen Zuckers [35] sollte auf diese Weise untersucht werden. In Abbildung 28 sind die drei Lagerorte mit den einzelnen Varianten dargestellt.

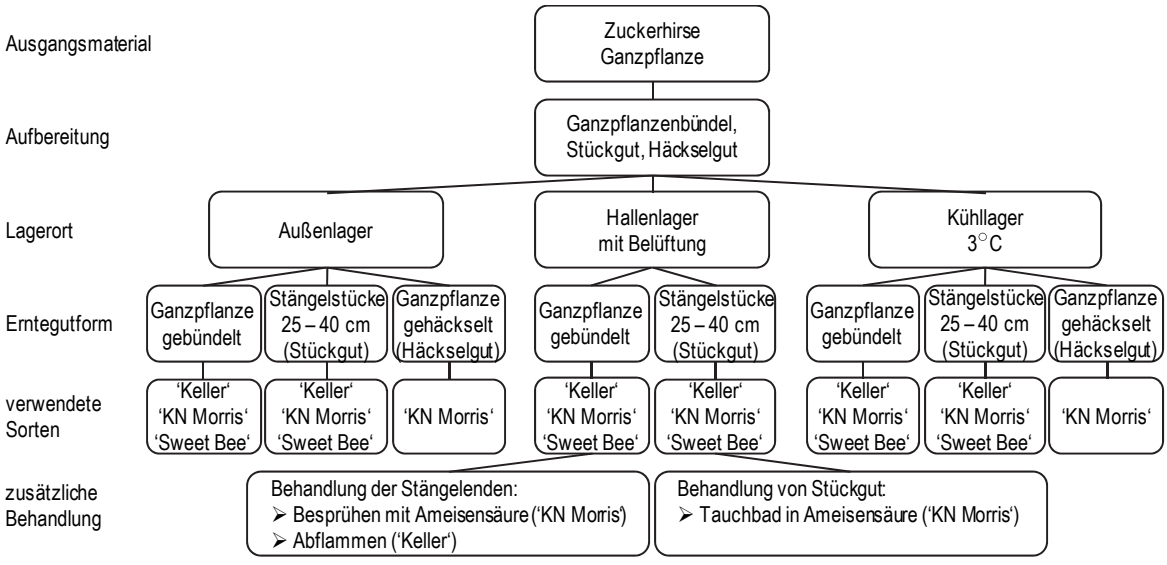


Abbildung 28: Varianten zur Lagerung von Zuckerhirse im Versuchsjahr 2009

Aufgrund der bei der Lagerung von Zuckerhirse im Außen- und Kühllager gesammelten Erfahrungen werden diese beiden Lagerorte als nicht praxisrelevant angesehen und im Folgejahr nicht mehr betrachtet.

Im Versuchsjahr 2010 wurde die Lagerung von Zuckerhirse der Sorte ‘Keller‘, aufbereitet als entblätterte Ganzpflanzen und Stückgut, in einem nicht isolierten Hallenlager (mit offener Oberlichte) ohne Belüftung und einem isolierten Hallenlager mit Belüftung durchgeführt. Das genutzte Hallenlager mit Belüftung verfügt über Unterflurkanäle zur Verteilung der eingeleiteten Außenluft im Lagergut. Abbildung 29 zeigt die Lagerorte und Varianten zur Lagerung von Zuckerhirse im Versuchsjahr 2010.

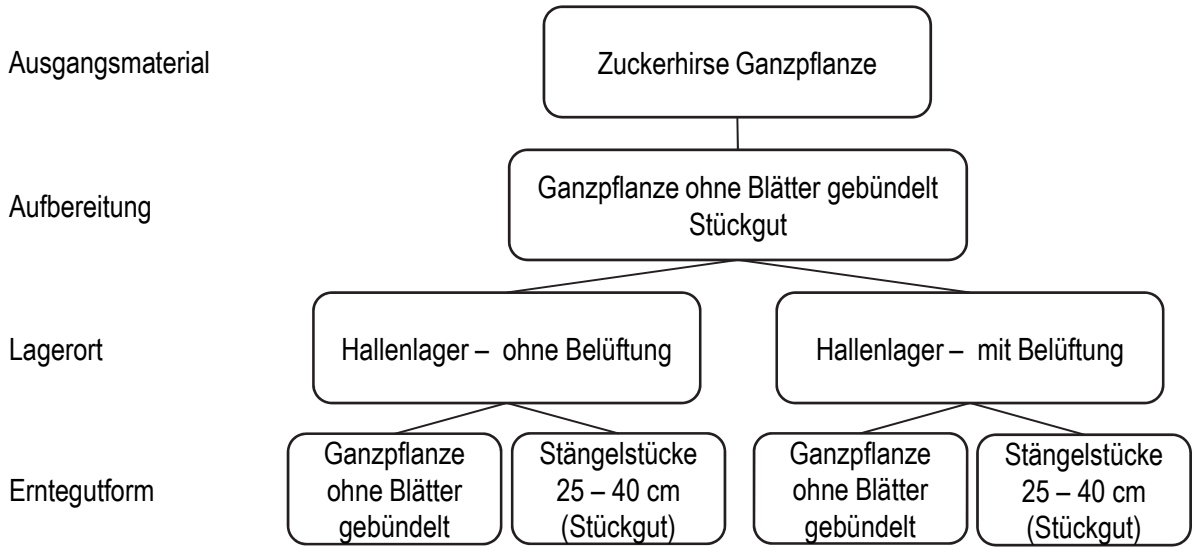


Abbildung 29: Varianten zur Lagerung von Zuckerhirse im Versuchsjahr 2010 (Sorte ‘Keller‘)

Aufbereitung des Erntematerials

Im Versuchsjahr 2009 wurden die Zuckerhirseganzpflanzen-Bündel nach der Ernte weiter aufbereitet. Ziel der Aufbereitung ist es, verschiedene Aufbereitungsformen (Ganzpflanze, Stückgut, Häckselgut), die durch die maschinelle Beerntung entstehen, zu simulieren.

Die Blätter wurden von Hand von den Stängeln entfernt. Im Versuchsjahr 2009 wurden die entblätterten Stängel mit einem Strohschneider in Stücke geschnitten und die Rispen abgetrennt. Häckselgut wurde im Versuchsjahr 2009 mit einem Laborprobenhäcksler aus Ganzpflanzen erzeugt.

Die entblätterten Stängel wurden im Versuchsjahr 2010 mit Hilfe eines Ladewagenschneidwerkes in Stücke (Länge 30 cm) geschnitten.

Erntegutformen

Das Zuckerhirsematerial wurde im Versuchsjahr 2009 in Form von gebündelten Ganzpflanzen (Bündeldurchmesser ca. 80 cm), in Form von Stückgut in Gitterboxen (Länge x Breite x Höhe: 120 cm x 80 cm x 85 cm) bzw. Klappboxen (L x B x H: 48 cm x 35 cm x 23,5 cm) und in Form von Häckselgut in geschlossenen Kunststoffboxen (L x B x H: 60 cm x 40 cm x 33 cm) gelagert.

Ein Ganzpflanzenlagerbündel umfasste für jeden der vier geplanten Beprobungstermine ein Einzelbündel, bestehend aus je 18 bis 22 mit Bindegarn geschnürten Pflanzen. Diese vier Ganzpflanzenbündel wurden mit zehn weiteren analog hergestellten Bündeln umgeben, die nur eine Pufferfunktion für das Kleinklima im Beprobungsmaterial während der Lagerdauer übernehmen sollten.

Für die Lagerung von Stückgut wurden die Gitterboxen komplett gefüllt. Die zur Kühllagerung verwendeten Klappboxen enthielten ca. 60 Stängelstücke.

Im Versuchsjahr 2010 wurde das aufbereitete Zuckerhirsematerial ausschließlich in Gitterboxen gelagert. Die entblätterten Stängel wurden dabei stehend in die Gitterboxen eingebracht. Für die Varianten mit Belüftung wurde der regulär in den Gitterboxen vorhandene Holzboden entfernt und durch einen feinmaschigen Drahtgittereinsatz ersetzt, um die Luftzufuhr zum jeweils in den Gitterboxen befindlichen Lagergut aus den Unterflurkanälen zu ermöglichen.

8.2 Konservierung

Behandlungsvarianten im Versuchsjahr 2009

Im Versuchsjahr 2009 wurde das Pflanzenmaterial zur Konservierung zusätzlich mit Ameisensäure bzw. thermisch behandelt (vgl. Abbildung 28). Die Stängelenden der gebündelten Ganzpflanzen wurden mit Ameisensäure besprüht (Sorte ‘KN Morris‘) bzw. abgeflammt (Sorte ‘Keller‘). Das Stückgut wurde per Tauchbad mit Ameisensäure behandelt (Sorte ‘KN Morris‘). Häckselgut wurde 2009 keiner konservierenden Behandlung unterzogen.

Nachfolgend ist die Vorgehensweise für die zusätzliche Behandlung von gebündelten Ganzpflanzen und Stückgut im Versuchsjahr 2009 beschrieben:

Zum Abflammen der Stängelenden im Bündel wurde unmittelbar vorher der Stängel frisch angeschnitten und dieser für ca. 30 Sekunden in einem Abstand von ca. 10 cm mit einem Bunsenbrenner abgeflammt. Auf diese Weise sollten die Zellen im Bereich des Anschnitts geschlossen werden, um ein Eindringen von Mikroorganismen zu unterbinden bzw. zu erschweren.

Vor der Behandlung mit Ameisensäure wurde wiederum der Stängel frisch angeschnitten. Mit Hilfe einer Rückenspritze wurde aus einem Abstand von ca. 10 cm eine 0,5 %ige

Ameisensäurelösung bis zur vollständigen Benetzung auf die Stängelenden im Bündel appliziert.

Das aus den geernteten Ganzpflanzen durch Entblättern und Ablängen der Stängel erzeugte Stückgut wurde in einem Tauchbad mit 0,5 %iger Ameisensäurelösung behandelt. Die Zuckerhirsestängelstücke wurden hierzu vollständig in einer mit 0,5 %iger Ameisensäurelösung gefüllten Wanne getaucht. Nach diesem Tauchbad wurden die Stängelstücke in die zur Lagerung verwendete Gitterbox bzw. Klappbox überführt.

Behandlungsvarianten im Versuchsjahr 2010

Zur Konservierung des im Zuckerhirsematerial enthaltenen Zuckers wurde im Versuchsjahr 2010 gehäckselte Zuckerhirse mit Ameisensäure versetzt und in PE-Fässern mit einem Volumen von 300 l in verdichtetem Zustand unter anaeroben Bedingungen gelagert. Die jeweiligen Versuchsvarianten sind in Abbildung 30 dargestellt.

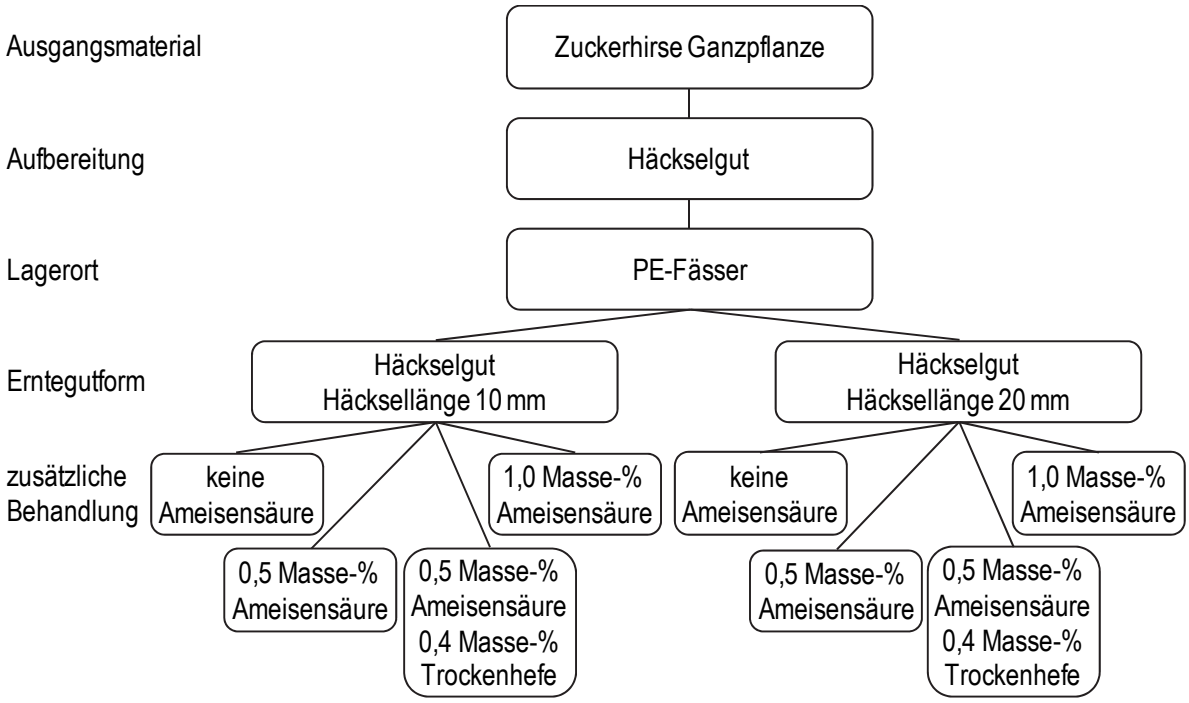


Abbildung 30: Varianten zur Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit Ameisensäure unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2010 (Sorte 'Keller')

Behandlungsvarianten im Versuchsjahr 2011

Nachdem sich die Konservierung von Zuckerhirse mit Ameisensäure als erfolgversprechend herausstellte wurde im Versuchsjahr 2011 gehäckselte Zuckerhirse der Sorte 'Top 76' bei unterschiedlichen Trockenmassegehalten mit Ameisensäure sowie gepufferter Ameisensäure versetzt und in verschiedenen Fassbehältern unter anaeroben Bedin-

gungen gelagert. Abbildung 31 gibt einen Überblick bezüglich dieser Versuchsvarianten mit unterschiedlichen Haupternteterminen (HET) und Ameisensäurekonzentrationen.

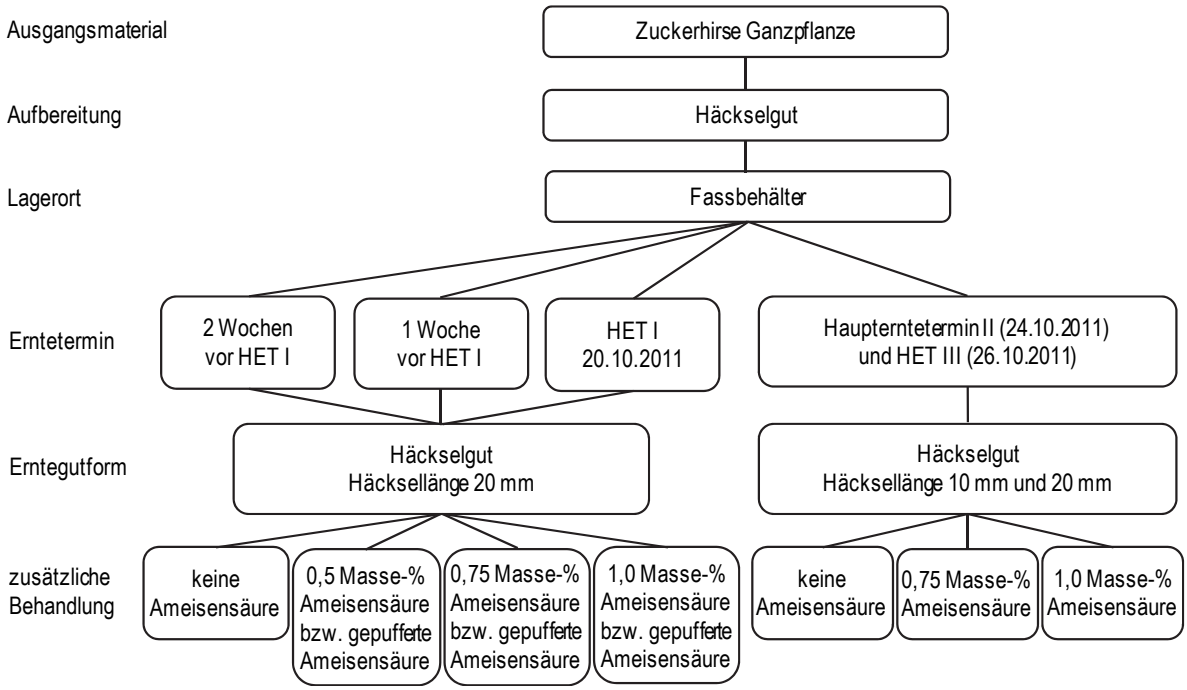


Abbildung 31: Varianten zur Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut bei unterschiedlichen Trockenmassegehalten mit Ameisensäure unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76')

Die Lagerung von (säure-) konserviertem Zuckerhirsehäckselgut erfolgte im Versuchsjahr 2011 in Kanalgrundrohrbehältern (KG-Rohre, Innendurchmesser 37,5 cm) mit einem nutzbaren Volumen von ca. 100 l, in PE-Fässern mit einem Volumen von 300 l und in Acrylglasbehältern (Innendurchmesser 15 cm) mit einem nutzbaren Volumen von ca. 15 l. Das in den KG-Rohrbehältern befindliche Material wurde ausschließlich zur Ermittlung des Konservierungserfolges und zur Bestimmung des TM-Gehaltes verwendet. Das für die Pressversuche erforderliche Häckselgut wurde in den PE-Fässern gelagert. Die Acrylglasbehälter dienten dazu, den Einfluss der Sickersaftentnahme auf den Gesamtzucker im konservierten Häckselgut zu ermitteln.

Probenahme Häckselgut

Die Entnahme der für die TM-Gehaltsbestimmung und Gefriertrocknung jeweils erforderlichen Probemengen (vgl. Kapitel 4.1) erfolgte aus dem durchmischten Zuckerhirsehäckselgut (Frischmaterial, (säure-) konserviertes Material) unmittelbar nach der Ernte sowie zur Beprobung der Lagerbehälter nach 90, 120 und 150 Tagen.

Aufbereitung des Erntematerials

Im Versuchsjahr 2010 wurde Häckselgut mit einer Häcksellänge von 10 bzw. 20 mm mit einer Ameisensäurelösung behandelt und zwar bei einer Konzentration von 0,5 bzw. 1,0 Masse-% Ameisensäure (100 %) bezogen auf das Frischmassegewicht des zu behandelnden Häckselgutes. Für eine gleichmäßige Verteilung des Konservierungsmittels Ameisensäure wurde die vorbereitete Ameisensäurelösung mit Hilfe eines Zwangsmischers, angebaut an der Dreipunkthydraulik am Heck eines Schleppers, in das zu behandelnde Häckselgut eingemischt.

Im Sinne einer anwenderfreundlichen und ungefährlichen Applikation des ätzenden Konservierungsmittels Ameisensäure wurde eine Ameisensäurelösung bestehend aus einem Gewichtsanteil Säure und vier Gewichtsanteilen Wasser verwendet. Für die Behandlung von 1 kg Häckselgut (Frischmasse) sind z. B. bei der Variante 1,0 Masse-% Ameisensäure (100 %) 11,765 g Ameisensäure (85 %) und 58,824 g Wasser erforderlich.

Das frisch vom Acker bereitgestellte Häckselgut wurde zunächst in sieben Wannen (Volumen 70 l) vorportioniert, die Frischmasse bestimmt und die jeweils erforderliche Menge an Ameisensäurelösung abgewogen. Das Häckselgut mit einer mittleren Frischmasse von 163 kg (145 bis 177 kg) wurde mit der vorbereiteten Ameisensäurelösung im verwendeten Zwangsmischer 15 Minuten vermischt und anschließend in die PE-Fässer eingefüllt. Dabei wurde das Häckselgut von einer Person durch das Eigengewicht mit den Füßen verdichtet und zwar in Schichten von ca. 10 cm, um die angestrebten anaeroben Bedingungen im Lagergut herstellen zu können. Des Weiteren wurde ein Folienschlauch ab der halben Füllhöhe an der Fassinnenwand beim Befüll- und Verdichtungsvorgang miteingebracht, der über der letzten verdichteten Häckselgutschicht überlappend eingeschlagen und mit einer Siebdruckplatte sowie einem 100 kg schweren Metallgewicht belegt wurde. Ein passgenauer Deckel über einer Moosgummidichtung am oberen Fassrand liegend bildete den Abschluss eines jeden Lagerfasses. Über eine mittig angebrachte Bohrung im Deckel und ein darin angeschlossenes mit Wasser befülltes Gärröhrchen konnten sich im Laufe der Lagerung im Fassinneren bildende Gase aus dem Fass entweichen, ohne dass auf entgegengesetztem Weg Luft von außen nach innen gelangen konnte.

Die verwendeten Fässer waren darüber hinaus mit einem mittig am Boden befindlichen Ablasshahn versehen, um den anfallenden Sickersaft aus dem Behälter entnehmen zu können.

Mit Hilfe einer Kranwaage (Typ MCW 1500, Hersteller As-Wägetechnik GmbH, d = 0,1 kg) wurden die Massen der einzelnen Fässer zum Beginn und zum Ende des Lagerversuchs bestimmt.

In Ergänzung zu den Konservierungsversuchen mit Ameisensäure wurde zusätzlich die Zugabe von Hefe erprobt. Nach dem Einmischen von 0,5 Masse-% Ameisensäure in das Zuckerhirsehäckselgut wurden 0,4 Masse-% Aktivtrockenhefe (Thermosacc® Dry) appliziert und vermischt. Im Gegensatz zu den übrigen Varianten der Konservierungsversu-

che wurde bei den Versuchsgliedern mit Hefezugabe kein Sickersaft abgelassen. Die Lagerdauer betrug 210 Tage.

Die Versuche zur Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit Hilfe von Ameisensäure wurden im Versuchsjahr 2011 mit 0,5, 0,75 und 1,0 Masse-% Ameisensäure bzw. gepufferter Ameisensäure angelegt. Die Vorgehensweise hinsichtlich Säureapplikation, Behälterbefüllung, Materialverdichtung war identisch. Die KG-Rohr- und Plexiglasbehälter waren abweichend zu den PE-Fässern konstruktionsbedingt nicht mit einem Gährröhrchen ausgestattet. Die Verwiegung sämtlicher Behälter erfolgte zum Beginn und zum Ende des Lagerversuchs mit einer Plattformwaage (Typ KD600, Hersteller Mettler-Toledo, d = 0,1 kg).

Die Versuche zur Lagerung von Häckselgut in Fassbehältern wurden in den Versuchsjahren 2010 und 2011 jeweils in einem isolierten Gebäude durchgeführt. Dabei herrschten während der gesamten Lagerdauer konstante Temperaturbedingungen.

8.3 Vorgehensweise bei der Beprobung

Im Versuchsjahr 2009 wurde nach 14 Tagen sowie vier, acht und zwölf Wochen nach Beginn der Lagerung Proben aus den Ganzpflanzen und dem Stückgut entnommen. Die Beprobung von Häckselgut im Außen- und Kühllager erfolgte ausgehend vom Lagerbeginn nach zwei, vier und sechs Tagen.

Im Versuchsjahr 2010 sollten die entblätterten Ganzpflanzen und das Stückgut vom Lagerbeginn an im ersten Monat jeweils wöchentlich beprobt werden. Je nach Verlauf des Lagerversuches sollte der Versuch nach diesen vier Terminen beendet werden oder nach weiteren vier Wochen (Beprobung 5).

Das in Lagerbehältern befindliche mit Ameisensäure behandelte Häckselgut sollte in Anlehnung an übliche Beprobungszeiträume wie z. B. zur Untersuchung von Maissilage und Grassilage nach 90, 120 und 150 Tagen beprobt werden [203]. Die Entnahme des anfallenden Sickersaftes wurde im Versuchsjahr 2010 vom Tag der Befüllung an insgesamt acht Tage lang durchgeführt (nach jeweils 24 h). Im Folgenden wurde der Sickersaft nach einer Woche, nach zwei, drei, fünf und nach neun Wochen sowie zu den Beprobungsterminen nach 90, 120 und 150 Tagen aus den Fässern abgelassen. Im Versuchsjahr 2011 wurde der Sickersaft nach 1, 4, 6, 8, 15, 22, 29, 43 und 71 Tagen nach der Ernte aus den Lagerbehältern entnommen sowie zu den Beprobungen des Häckselguts in den Lagerbehältern nach 90, 120 und 150 Tagen.

Die Sickersaftentnahme aus Lagerbehältern erfolgte über einen Ablasshahn am Behälterboden und einen siphonförmig gebogenen Silikonschlauch in einen Kunststoffeimer (V = 10 l). Die Öffnungsdauer zum jeweiligen Entnahmetermin lag bei mindestens einer Stunde bzw. bis kein Sickersaftaustritt mehr erfolgte.

Die jeweiligen Sickersaftmassen wurden mit einer Waage vom Typ Mettler-Toledo PG 12001-S (d = 0,1 g) verwogen. Die Ermittlung der Gesamtsickersaftmasse eines Lagerbehälters erfolgte rechnerisch als Summe der Einzelsickersaftmassen.

Die gewonnenen Sickersaftproben wurden im Kunststoffeimer durch Rühren homogenisiert. Mit einem Schöpfbecher erfolgte die Befüllung der verwendeten Probengefäße (PE-Zentrifugenröhrchen, V = 45 ml) in denen die Sickersaftproben bis zur Analyse in einer Gefriertruhe bei -22 °C gelagert wurden.

Die Lagerbehälter wurden bei der Beprobung vollständig entleert und das verdichtete Häckselgut aufgelockert und homogenisiert, bevor die Sinnenprüfung sowie die Probenahme zur TM-Gehaltsbestimmung und die Gefriertrocknung erfolgten.

8.4 Temperaturerfassung

Mit Hilfe von Thermoelementen Typ K (Ni-CrNi) über Temperatur-Datalogger Testo 177-T4 wurde die Temperatur von Zuckerhirse (Ganzpflanzen und Stückgut) erfasst. Die jeweilige Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchte wurden mit einem Testo 175-H2 Temperatur- und Feuchtemessgerät aufgezeichnet. Die Datenerfassung erfolgte in einem Zeitintervall von jeweils 15 Minuten. Diese Daten wurden auf einen PC zur Weiterverarbeitung in einer Tabellenkalkulations-Software übertragen.

8.5 Physikalische Lagerparameter

Die Schüttdichte von Zuckerhirse in den jeweiligen Erntegut- bzw. Aufbereitungsformen wurde bestimmt, um den zugehörigen Bedarf an Transport- und Lagerkapazitäten aufzeigen zu können.

Unzerkleinerte Ganzpflanzen wurden nach dem Erntevorgang in drei Siebdruckplattenboxen (L x B x H: 250 cm x 125 cm x 125 cm), bestehend aus einer Bodenplatte und zwei der Längsseite mit Scharnieren montierten Seitenwänden, eingebracht. Der jeweils erreichte Füllstand wurde an den beiden Seitenwänden markiert und die Masse der enthaltenen Zuckerhirsepflanzen mit einer Kranwaage (Typ MCW 1500, Hersteller As-Wägetechnik GmbH, d = 0,1 kg) bestimmt. Die Ganzpflanzen wurden aus den Siebdruckplattenboxen entnommen und entblättert. Anschließend wurden die Stängel wieder in die Siebdruckplattenboxen eingeschlichtet, der nun erreichte Füllstand an den beiden Seitenwänden markiert und die Masse der enthaltenen Stängel mit der Kranwaage bestimmt. Die Blattmasse ergibt sich als Differenz aus den beiden bestimmten Werten für unzerkleinerte Ganzpflanzen und entblätterte Stängel.

Zur Bestimmung der Schüttdichte von Stückgut (Länge 30 cm), erzeugt mit Hilfe eines Ladewagenschneidwerkes, wurden die für den Lagerversuch 2010/2011 befüllten Gitter-

boxen (L x B x H: 120 cm x 80 cm x 85 cm) gewogen und die jeweils zugehörige Füllhöhe gemessen.

Für das mit 10 bzw. 20 mm Häcksellänge geerntete Häckselgut wurde die Schüttdichte im losen, abgesetzten und verdichteten Zustand bestimmt. Das Häckselgut auf dem zum Transport verwendeten Muldenkipper wurde nach dem Befüllvorgang am Acker mit einer Messlatte bündig mit den Anhängerseitenwänden abgezogen, um auf diese Weise jeweils ein definiertes Transportvolumen für die Schüttdichtenberechnung von Häckselgut in losem Zustand zu erhalten. Die jeweilige Häckselgutmasse wurde auf einer Fuhrwerkswaage (Typ DWT 800, Hersteller Pfister, d = 10 kg) ermittelt. Im Zuge des Transportvorganges kommt es bekanntermaßen zu einem Absetzen des Häckselgutes. Das hierdurch freigewordene Volumen wurde nach dem Transport berechnet, um die Schüttdichte von Häckselgut in abgesetztem Zustand bestimmen zu können.

Die Schüttdichte von Häckselgut in verdichtetem Zustand wurde im Rahmen der drei Beprobungen des säurekonservierten Häckselgutes ermittelt. Die zur Lagerung verwendeten PE-Fässer (Durchmesser 64 cm) wurden nach der Befüllung und vor dem Öffnen mit der verwendeten Kranwaage gewogen. Anhand der jeweils vorliegenden Füllhöhe wurde für jedes Fass das Füllvolumen errechnet und die Schüttdichte von Häckselgut in verdichtetem Zustand bestimmt.

8.6 Lagerung von nicht konservierten Pflanzen

8.6.1 Äußere Qualität

Im Rahmen der durchgeführten Lagerversuche (siehe auch Abbildung 28) wurde bei keiner Lagervariante ein Befall mit tierischen Schädlingen festgestellt.

Außenlager

Die Lagerung von Zuckerhirse im Außenlager unter Umgebungsbedingungen erscheint entsprechend der Ergebnisse des Versuchsjahres 2009 weder für Ganzpflanzen, noch für Stückgut bzw. Häckselgut sinnvoll. Mit Ganzpflanzen und Stückgut könnte eine Lagerung bis zu einer Woche möglich sein, bevor Fäulnis und Schimmelbildung die äußere Qualität zunehmend verschlechtern.

Hallenlager

Im Hallenlager war die äußere Qualität der gelagerten Zuckerhirse im Versuchsjahr 2009 durch Fäulnis und Schimmelbildung beeinträchtigt. Die Lagerung von Zuckerhirse in Form von gebündelten Ganzpflanzen führte zu massiven Welkeerscheinungen bzw. Fäulnis und Schimmelbildung. Stückgut zeigte bei Hallenlagerung eine optisch geringfügig bessere Beschaffenheit als im Außenlager, jedoch war ebenfalls eine starke Schimmelbildung feststellbar. Die zusätzlich durchgeführten Behandlungen mit Ameisensäure bzw. das Abflammen brachten nicht den erhofften Effekt zur Haltbarmachung der Biomasse. Die Hallenlagerung von Zuckerhirse in Form Ganzpflanzen ist analog der Außen-

lagerung zu bewerten. Die Hallenlagerung von Stückgut könnte bis zu zwei Wochen möglich sein, bevor die Biomasse mit Schimmel zunehmend befallen wird.

Im Versuchsjahr 2010 wurde Zuckerhirse in Form von entblätterten Ganzpflanzen und Stückgut in einem belüfteten und nicht belüfteten Hallenlager gelagert. Im Hallenlager mit Belüftung war die Lüftungsanlage vom Beginn des Lagerversuches am 17.11.2010 bis zum 25.11.2010 für insgesamt 82 h in Betrieb und leitete kühle Außenluft über Unterflurkanäle durch die in Gitterboxen befindlichen entblätterten Stängel und das Stückgut. Im weiteren Verlauf war eine Belüftung mit Außenluft nicht mehr sinnvoll bzw. möglich, nachdem zwischen Lagergut und Außenluft für die beabsichtigte Kühlung der Biomasse keine ausreichend große Temperaturspreizung von mindestens 4 K vorlag bzw. die Außentemperatur sich bei Werten nahe 0 °C und niedriger bewegte. Zuckerhirse in Form von entblätterten Ganzpflanzen und Stückgut wurde für insgesamt zwei Monate gelagert. Die Beschaffenheit des gelagerten Zuckerhirsematerials zu den jeweiligen Beprobungsterminen ist in Anhang 7 bis Anhang 10 beschrieben.

Bei der Lagerung von Zuckerhirse als entblätterte Ganzpflanzen und Stückgut mit Belüftung ist gegenüber den Vergleichsvarianten ohne Belüftung bis zu einer Lagerdauer von drei Wochen eine bessere Beschaffenheit der gelagerten Biomasse feststellbar, bevor Abbau und Verderb der Biomasse auch bei dieser Lagervariante voranschreiten. Der mögliche Zeitraum für eine Lagerung von Zuckerhirse in diesen Aufbereitungsformen erscheint allerdings zu kurz, um eine notwendige mittelfristige Rohstoffbereitstellung für den Kampagnebetrieb einer Verarbeitungsanlage ermöglichen zu können.

Kühllager

Die Kühllagerung von Zuckerhirse ging bei gebündelten Ganzpflanzen, Stückgut und Häckselgut wiederum mit Verderb, Fäulnis und Schimmelbildung einher. Die beobachteten Welkeerscheinungen waren bei der Kühllagerung gebündelter Ganzpflanzen anfangs geringer, nahmen im Verlauf der Lagerung aber ebenso wie die Schimmelbildung zu. Das Stückgut wirkte anfangs mit sattgrüner Farbe besser lagerfähig, allerdings zeigten sich nach vierwöchiger Lagerung ebenfalls die Spuren der stattfindenden Abbauvorgänge. Das gelagerte Häckselgut ähnelte hinsichtlich der Beschaffenheit dem Häckselgut im Außenlager. Die Lagerdauer bei Kühllagerung beträgt maximal zwei Wochen.

8.6.2 Zuckergehalt

Außenlager

Bei der Lagerung von Zuckerhirse im Außenlager im Versuchsjahr 2009 war die Biomasse mit einer Vliesabdeckung vor Witterungseinflüssen (Niederschlägen, Temperaturänderungen) nur bedingt geschützt. Die erfassten Zuckerverluste waren sowohl bei den gebündelten Ganzpflanzen als auch beim Stückgut nach drei Monaten mit ca. 90 % bzw. 80 % inakzeptabel. Im Anhang 4 sind die jeweils analysierten Zuckergehalte von gebündelten Ganzpflanzen, Stückgut und Häckselgut im Außenlager dargestellt. Die beim Häckselgut auftretenden Zuckerverluste von 94 % innerhalb von sechs Tagen zeigen,

dass diese Erntegutform ohne weitere Konservierungsmaßnahmen für eine werterhaltende Lagerung der Biomasse unter Vermeidung von Zuckerverlusten ausscheidet. BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] sowie GRASSI et al. (1992) [117] nehmen an, dass 90 % des Ausgangszuckergehaltes die Schwelle der Wirtschaftlichkeit für eine Verwertung von Zuckerhirse zur Herstellung von Ethanol darstellen. Somit wäre die gelagerte Zuckerhirse mit einem festgestellten Zuckerverlust von 18 % bereits acht Tage nach der Ernte nicht mehr für diese Nutzung in Frage gekommen, wobei die durchgeführte Aufbereitung zu gebündelten Ganzpflanzen, Stückgut und Häckselgut keinerlei Rolle spielt.

Hallenlager

Im Hallenlager war das jeweilige Lagergut zwar vor Niederschlägen geschützt, Schwankungen der Außentemperatur bewirkten allerdings zeitverzögerte Schwankungen der Umgebungstemperatur in der Lagerhalle im Versuchsjahr 2009. Die ermittelten Zuckergehalte der verschiedenen Erntegutformen im Hallenlager sind in Anhang 5 dargestellt. Im Stückgut lagen sehr geringfügig höhere Zuckergehalte vor als in gebündelten Ganzpflanzen. Die zur beabsichtigten Konservierung des enthaltenen Zuckers durchgeführten Maßnahmen einer thermischen Behandlung sowie der Säurebehandlung zeigten nicht den erhofften Effekt, höhere Zuckergehalte im jeweiligen Lagergut vorfinden zu können.

Bei der Lagerung von entblätterten Ganzpflanzen im Versuchsjahr 2010 nahm der Gesamtzuckergehalt ausgehend vom Zeitpunkt der Ernte innerhalb von vier Wochen bei der unbelüfteten Variante um 10 % ab, bei der belüfteten Variante um 9 %. Nach weiteren vier Wochen war ein Gesamtzuckerverlust von 35 % bzw. 33 % feststellbar. Die Belüftung der entblätterten Ganzpflanzen führt zu einem geringeren Zuckerverlust. Die Abnahme des Gesamtzuckergehaltes beruht in erster Linie auf einem Verlust an Saccharose, analog den Ergebnissen im Versuchsjahr 2009. Dem aufgezeigten Zuckermuster entsprechend erfolgt eine Umwandlung von Saccharose in Glucose und Fructose. Die zu Stückgut aufbereiteten entblätterten Ganzpflanzen wurden parallel in einem Hallenlager ohne bzw. mit Belüftung gelagert. Im Rahmen der durchgeführten Beprobungen wurden bei der Variante mit Belüftung geringere Zuckerverluste festgestellt als bei der unbelüfteten Lagerung von Stückgut. Ausgehend vom Zeitpunkt der Ernte nahm der im Stückgut enthaltene Gesamtzucker innerhalb von vier Wochen bei der Variante ohne Belüftung um 46 % ab, bei der Variante mit Belüftung um 40 %. Zum letzten Beprobungstermin nach insgesamt acht Wochen Lagerdauer war der Gesamtzuckergehalt um 87 % bzw. 57 % niedriger. Der Belüftungseffekt ist anhand des geringeren Zuckerverlustes zwar erkennbar, allerdings ist der absolute Verlust bei der Lagerung von Stückgut als nicht akzeptabel zu bewerten. Bei der Lagerung von Stückgut ist die Abnahme des Gesamtzuckergehaltes zum einen zwar auch auf einen Verlust an Saccharose zurückzuführen, zum anderen nehmen aber auch Glucose und Fructose zum Ende des Lagerversuches sehr deutlich ab.

Die ermittelten Zuckerverluste bei der Lagerung von Zuckerhirse in Form von entblätterten Ganzpflanzen und Stückgut jeweils ohne bzw. mit Belüftung lassen eine Lagerung der Biomasse länger als zwei Monate als nicht sinnvoll erscheinen. Der Effekt der Belüf-

tung auf einen geringeren Zuckerverlust ist beim Stückgut stärker ausgeprägt als bei entblätterten Ganzpflanzen.

Kühllager

Die Mittelwerte der für gebündelte Ganzpflanzen, Stückgut und Häckselgut bestimmten Zuckergehalte bei Kühllagerung sind in Anhang 6 aufgelistet. Für Zuckerhirse in Form von gebündelten Ganzpflanzen und Stückgut wurden bei Kühllagerung geringere Verluste festgestellt als bei Hallen- bzw. Außenlagerung. Zwischen den beiden Aufbereitungsformen sind aber kaum Unterschiede hinsichtlich der Zuckerverluste erkennbar. Bei der Kühllagerung von Häckselgut traten ebenso wie im Außenlager massive Zuckerverluste auf.

8.6.3 Einordnung und Bewertung der Ergebnisse

Nach BLACKBURN (1984) [31], sowie EILAND und CLAYTON (1984) [99] sind unzerkleinerte Ganzpflanzen im Vergleich zu gehäckseltem Material länger ohne größere Zuckerverluste lagerbar. Im Rahmen der durchgeführten Versuche zeigte sich, dass bei unzerkleinerten Ganzpflanzen die Zuckerverluste geringer sind als bei Häckselgut. Von den vorgenannten Autoren ist nicht bekannt, welche Beschaffenheit die Ganzpflanzen für die angestellten Lagerversuche hatten. Als mögliche Einflussfaktoren auf das im Bündel vorliegende Kleinklima sind der Bündeldurchmesser und die vorhandene Blattmasse zu nennen. Entblätterte Ganzpflanzen dürften sich für eine Bündelung besser eignen, insbesondere wenn die Blattflächen zum Zeitpunkt der Einlagerung sehr feucht sind. Es ist anzunehmen, dass diese Feuchtigkeit im Zusammenspiel mit einer erfolgten Temperaturerhöhung im Bündel die Fäulnis-, Schimmelbildungs- und Zersetzungsprozesse begünstigt hat. Im Rahmen des durchgeführten Lagerversuches dürfte parallel auch der Abbau von Zucker in erhöhtem Umfang stattgefunden haben.

BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] beziffern die durchschnittliche Abnahme des Zuckergehaltes i. d. TM bezogen auf den Ausgangszuckergehalt bei Ganzpflanzen mit 0,1 bis 0,7 % pro Tag und bei Stückgut mit 0,7 bis 1,7 % pro Tag. Bei der Lagerung von entblätterten Ganzpflanzen und Stückgut im Versuchsjahr 2010 wurden nach einer Lagerdauer von 56 Tagen gegenüber dem Ausgangszuckergehalt Zuckerverluste von 0,62 bzw. 1,56 % pro Tag ermittelt. Diese Werte können sehr gut den von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] angeführten Bereichen zugeordnet werden. Bei der Lagerung mit Belüftung wurden Zuckerverluste von 0,59 bzw. 1,02 % pro Tag festgestellt.

Für BLUDAU (1994) [33] stellt der Mähbinder eine mögliche Technik zur Ernte von Zuckerhirse dar. Angesichts der Ergebnisse aus dem Lagerversuch 2009 wurde für 2010 bei der Beerntung von Zuckerhirse in Form von Ganzpflanzen eine Abtrennung der Blattmasse durchgeführt, um die beschriebene Problematik ausschließen zu können.

Entblätterte Ganzpflanzen erscheinen angesichts der erfassten Zuckerverluste und der äußeren Beschaffenheit zu den jeweiligen Beprobungsterminen vorteilhafter als Stückgut, womit an die Ergebnisse von EILAND (1982) [97] sowie BLUDAU und TUROWSKI (1992)

[35] angeknüpft werden kann. Allerdings wurde in den angeführten Untersuchungen auf unzerkleinerte Ganzpflanzen Bezug genommen und in den aktuell durchgeführten Versuchen wurde die Blattmasse vom Stängel entfernt. Im Vergleich zum Versuchsjahr 2009 wurde durch diese zusätzliche Aufbereitung die Lagerfähigkeit der Stängel entscheidend verbessert.

Die Lagerfähigkeit von Zuckerhirse in Form von entblätterten Ganzpflanzen und Stückgut wird den gewonnenen Ergebnissen zufolge durch die vorgenommene Belüftung verbessert.

Untersuchungen von BROADHEAD (1972) [41] und EILAND (1982) [97] weisen auf die Vorteile der Lagerfähigkeit von Stückgut im Vergleich zu Häckselgut hin. Die Ergebnisse von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] zeigen diesen Vorteil ebenso klar auf. Die durchgeführten Versuche zur Lagerung von Zuckerhirse bestätigen die diesbezüglich vorgenannten Erkenntnisse in der Tendenz, wenngleich die absoluten Zuckergehalte nach der durchgeführten Lagerung nicht akzeptabel sind.

EILAND (1982) [97] sowie BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] sind der Ansicht, dass ganze Zuckerhirsepflanzen gegenüber Stück- und Häckselgut die beste Lagerfähigkeit aufweisen. Aufgrund der mit nicht entblätterten Ganzpflanzen gewonnenen Erfahrungen bezüglich Fäulnis, Schimmelbildung und Abbau der Biomasse kann diese Ansicht nicht vorbehaltlos geteilt werden.

Nach BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] beträgt die durchschnittliche Abnahme des Zuckergehaltes in der Trockenmasse bezogen auf den Ausgangszuckergehalt bei Ganzpflanzen 0,1 bis 0,7 % des Zuckerertrages pro Tag und bei Stückgut 0,7 bis 1,7 % des Zuckerertrages pro Tag. Bei gehäckseltem Material werden stündliche Zuckerverluste von 0,4 bis 1,2 % angegeben. Diese Werte können mit den durchgeführten Lagerversuchen nur teilweise bestätigt werden. Bei der Lagerung von Ganzpflanzen traten jeweils deutlich höhere Zuckerverluste auf. Für Stückgut wurden anfangs ebenfalls höhere Verluste erfasst.

Die Lagerung von Zuckerhirse im Außenbereich ist nicht empfehlenswert. Die Hallenlagerung erscheint unter der Voraussetzung einer Belüftung mit kühler Außenluft für entblätterte Ganzpflanzenbündel und Stückgut am ehesten geeignet, aber nicht optimal. Eine Kühllagerung von Zuckerhirse ist angesichts der nötigen Lagerkapazitäten und der dazu erforderlichen Investitionen für die Praxis nicht relevant.

Die Lagerung von nicht entblätterten Ganzpflanzen führte im Versuchsjahr 2009 aufgrund der fehlenden Durchlüftung im Bündel und des vorhandenen Kleinklimas jeweils zu einem erheblichen Abbau und Verderb der Biomasse, weshalb eine vorherige Entfernung der Blattmasse anzuraten ist. Die Erntegutform Häckselgut ist ohne weitere Konservierungsmaßnahmen für eine werterhaltende Lagerung von Zuckerhirse nicht geeignet.

8.7 Lagerung von konservierten Pflanzen

8.7.1 Äußere Qualität

Bei der Beprobung der Lagerbehälter wurde das entnommene Material hinsichtlich Schimmel und Geruch begutachtet. Der dabei jeweils festgestellte Zustand des Häckselgutes im Versuchsjahr 2010 ist in Anhang 11 beschrieben. Das Häckselgut der unbehandelten Varianten war hinsichtlich Beschaffenheit und Geruch ähnlich Maissilage. Bei dem mit Ameisensäure behandelten Häckselgut war die vorgenommene Säurezugabe durch den sehr deutlich wahrnehmbaren Geruch der Ameisensäure eindeutig erkennbar. Dabei war der Ameisensäuregeruch bei einer Beladung mit 1,0 Masse-% intensiver. Generell wies das verdichtete Häckselgut eine sehr gute optische Beschaffenheit bei überwiegend angenehmer olfaktorischer Wahrnehmung auf.

Anhang 12 enthält Informationen zum angewandten Bewertungsschlüssel der im Versuchsjahr 2011 durchgeführten Bonitur des säurekonservierten Häckselgutes. Die Ergebnisse der erfolgten Sinnenprüfung sind in Anhang 13 bis Anhang 17 dargestellt. Bei den unbehandelten Nullproben waren jeweils anhand des wahrnehmbaren Milchsäuregeruchs die stattgefundene Milchsäuregärung, schwacher bis deutlicher Alkoholgeruch sowie kein Schimmelbefall feststellbar. Die Varianten mit Ameisensäurebehandlung waren hinsichtlich der applizierten Säuremengen am wahrnehmbaren Ameisensäuregeruch klar voneinander zu unterscheiden, d. h. mit höherer Beladung war ein intensiverer Säuregeruch wahrnehmbar. Das konservierte Häckselgut war in unterschiedlichem Ausmaß mit Schimmelnestern belegt, wobei diese überwiegend im Kontaktbereich zum KG-Rohrbehälter und der zum oberen Abschluss verwendeten Folie vorzufinden waren.

Die Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut in verdichtetem Zustand unter anaeroben Bedingungen erscheint angesichts der erzielten Beschaffenheit der Biomasse sinnvoll und zielführend für eine angestrebte mindestens mittelfristige, besser noch langfristige Rohstoffbereitstellung von Zuckerhirse.

8.7.2 Zuckergehalte im Häckselgut und Sickersaft

Zuckerhirsehäckselgut mit geringem TM-Gehalt

Das für die Lagerversuche verwendete Zuckerhirsehäckselgut wies mit einem mittleren Gesamtzuckergehalt (TM) zur Ernte von 21,8 % einen deutlich niedrigeren Wert gegenüber dem Gesamtzuckergehalt (TM) von 31,5 % bei den entblätterten Ganzpflanzen und Stückgut auf. Dies ist mit dem um 10 bis 13 Tage früheren Erntetermin sowie der im Häckselgut zusätzlich vorhandenen gering zuckerhaltigen Blattmasse zu erklären. Aufgrund des relativ geringen Trockenmasse-Gehaltes des Häckselgutes zur Ernte vom 02.11.2010 bis 05.11.2010 von 16,4 bis 18,2 %, durchschnittlich 17,6 %, war mit einer erheblichen Sickersaftbildung zu rechnen. Anhang 18 gibt einen Überblick bezüglich des insgesamt angefallenen Sickersaftes bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut unter anaeroben Bedingungen und der Zugabe von Ameisensäure.

Angesichts des hohen Masseanteils des Sickersaftes wurde dieser flüssige Teil des Lagergutes hinsichtlich Zuckergehalt, Säuregehalt und pH-Wert untersucht.

Im Folgenden werden die Veränderung des Zuckergehaltes im Häckselgut sowie der angefallene Sickersaft bei den verschiedenen Varianten über die Lagerdauer hinweg beschrieben.

Konservierung mit 0,5 Masse-% Ameisensäure

Im unbehandelten Zuckerhirsehäckselgut war nach 90 Tagen kein Zucker mehr nachweisbar. Die Zugabe von 0,5 Masse-% Ameisensäure ermöglichte eine weitgehende Konservierung des ursprünglich enthaltenen Zuckers bei einem mittleren Verlust von 17 %. Dabei ist festzustellen, dass zu den drei Beprobungen im ameisensäurebehandelten Häckselgut keine Saccharose mehr enthalten war, sondern eine Umwandlung in Glucose und Fructose stattgefunden hat. Ein Einfluss der Häcksellänge auf die Höhe des Zuckergehaltes im Lagergut ist bei der durchgeführten Zugabe von 0,5 Masse-% Ameisensäure offenbar nicht gegeben. Die Ergebnisse der Zuckeranalyse zu den jeweiligen Beprobungen sind in Abbildung 32 dargestellt.

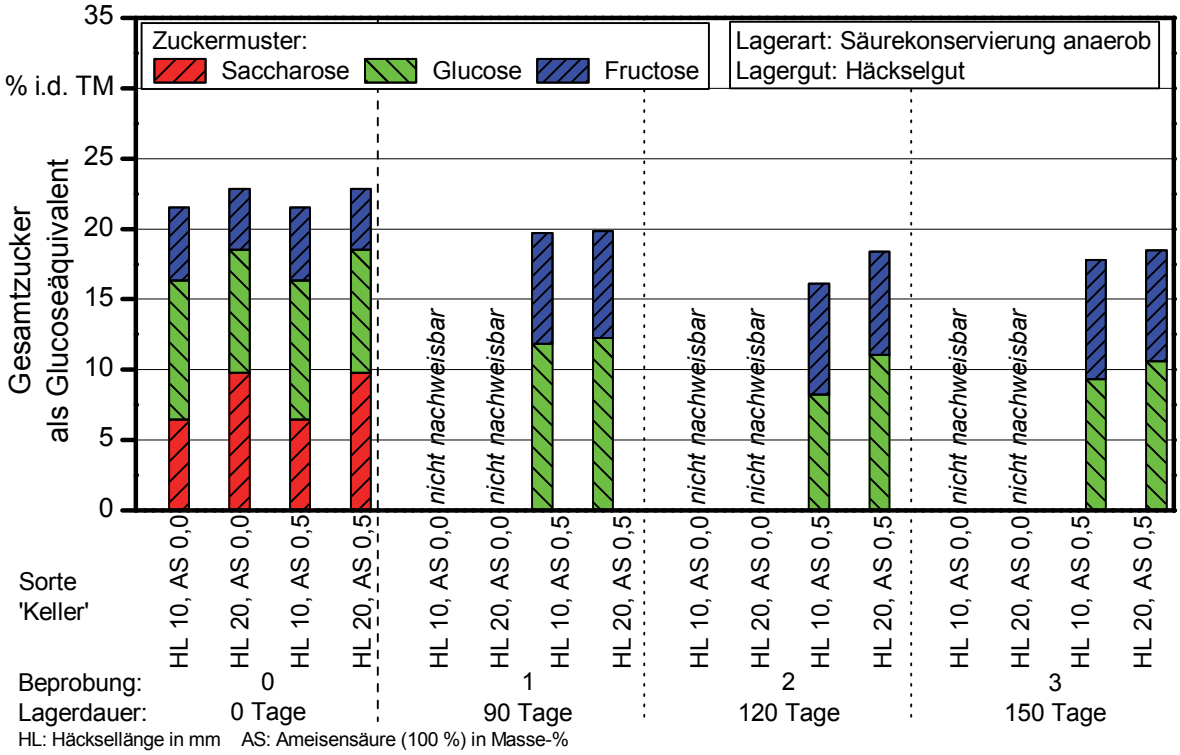


Abbildung 32: Gesamtzucker von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 0,5 Masse-% Ameisensäure)

Am jeweiligen Tag der Fässerbefüllung vom 02.11.2010 bis 05.11.2010 wurde in den frühen Abendstunden erstmals Sickersaft aus den Fässern abgelassen. Den Analysewerten entsprechend enthält der Sickersaft jeweils keine Saccharose, sondern als Zu-

ckerbausteine ausschließlich Glucose und Fructose. Nach 90, 120 und 150 Tagen war im Sickersaft der unbehandelten Varianten kein Zucker mehr nachweisbar, in den mit 0,5 Masse-% Ameisensäure behandelten Chargen wurden jeweils Glucose und Fructose auf geringerem Niveau gegenüber dem Sickersaft zu Beginn des Lagerversuches erfasst. Die zugehörigen Werte für den Zuckergehalt im Sickersaft finden sich in Abbildung 33.

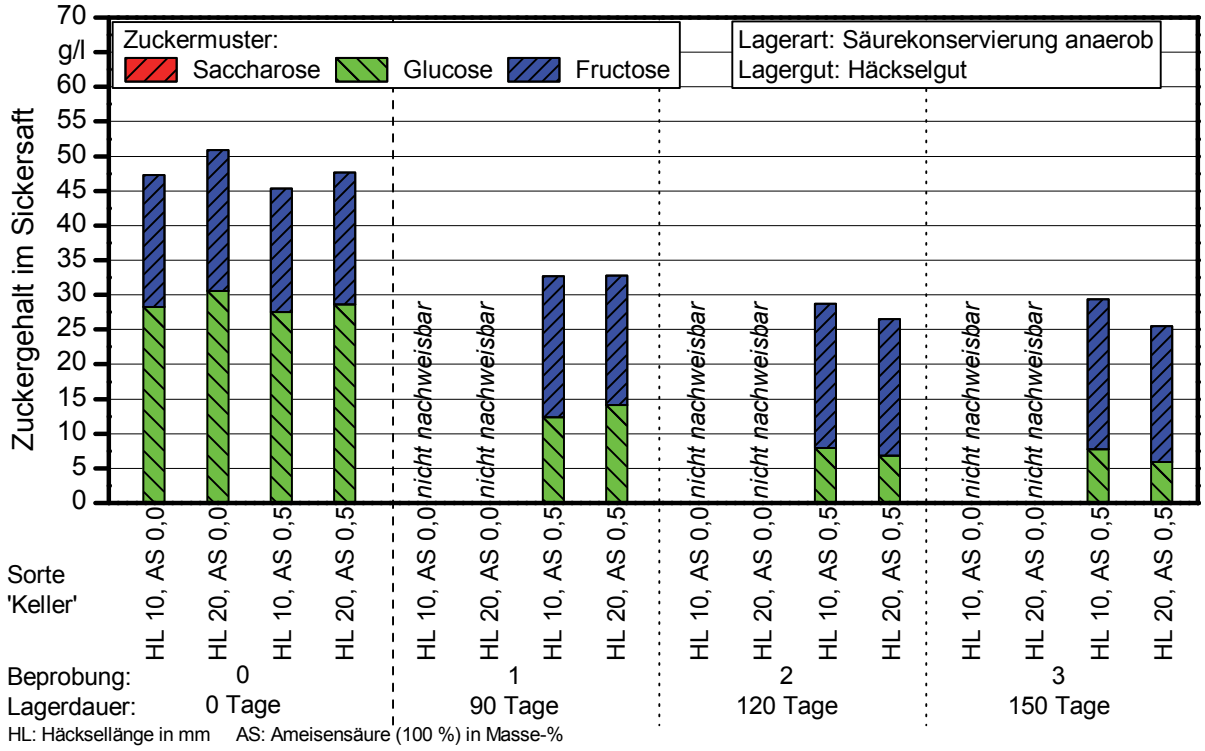


Abbildung 33: Zuckergehalt im Sickersaft von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 0,5 Masse-% Ameisensäure)

Anhand des analysierten Säuregehaltes im Sickersaft sind Rückschlüsse auf den Verlauf der Häckselgutkonservierung sowie den im Häckselgut vorhandenen Zuckergehalt möglich.

Im Sickersaft der unbehandelten Varianten war zu Beginn des Lagerversuches keine Milch-, Ameisen- bzw. Essigsäure nachweisbar. Im Sickersaft des mit 0,5 Masse-% Ameisensäure behandelten Häckselgutes konnte Ameisensäure erfasst werden, woraus auf eine gute Verteilung der eingemischten Ameisensäurelösung im Häckselgut geschlossen werden kann.

Nach 90, 120 und 150 Tagen waren im Sickersaft des Häckselgutes ohne Ameisensäurebehandlung überwiegend Milch- und Essigsäure enthalten. Dies bestätigt den festgestellten Zuckerverlust über die stattgefundene Milchsäuregärung im Rahmen derer der ursprünglich enthaltene Zucker von Milchsäurebakterien verstoffwechselt wurde. Im Sickersaft des mit Ameisensäure behandelten Häckselgutes waren nach 90, 120 und 150 Tagen weder Milchsäure noch Essigsäure nachweisbar, sondern nur Ameisensäure

auf gleichbleibend hohem Niveau. Hieraus ist auf die erfolgreiche Konservierung des im Häckselgut enthaltenen Zuckers infolge der stattgefundenen pH-Wert-Absenkung durch die Ameisensäurezugabe zu schließen.

Der Sickersaft des Häckselgutes ohne Ameisensäurebehandlung hatte am Tag der Fässerbefüllung einen mittleren pH-Wert von 6,2 bei Häcksellänge 10 mm und 5,8 bei Häcksellänge 20 mm gegenüber dem Sickersaft des mit Ameisensäure behandelten Häckselgutes von 3,5. Aufgrund der sofortigen pH-Wert-Absenkung im Häckselgut zum Lagerbeginn infolge der Ameisensäurebehandlung konnte ein ausreichend saures Milieu in der gelagerten Biomasse angelegt werden. Somit konnten Milchsäurebakterien nicht aktiv werden und es fand keine Milchsäuregärung statt. Der im Häckselgut enthaltene Zucker wurde nur zum Teil abgebaut und in Ethanol umgewandelt.

Nach 90 Tagen war im Sickersaft der unbehandelten Varianten ein mittlerer pH-Wert von 3,8 festzustellen. Diese pH-Wert-Absenkung ist auf die im Haufwerk des verdichteten Häckselgutes erfolgte Milchsäuregärung zurückzuführen, im Rahmen derer das Häckselgut konserviert wurde, allerdings mit dem Abbau des ursprünglich enthaltenen Zuckers einhergehend. Der Sickersaft der mit 0,5 Masse-% Ameisensäure behandelten Chargen hatte zu den Beprobungen nach 90, 120 und 150 Tagen einen mittleren pH-Wert von 3,6.

Konservierung mit 0,5 Masse-% Ameisensäure und Zugabe von 0,4 Masse-% Hefe

Zusätzlich zu den Konservierungsversuchen mit 0,5 Masse-% Ameisensäure wurde der Einfluss einer Zugabe von Aktivtrockenhefe untersucht, um neben der Vermeidung von unerwünschten Stoffwechselaktivitäten anderer Mikroorganismen eine Silo-Fermentation durch Hefen zu fördern. Die Silo-Fermentation könnte eine alternative Lagerungsoption darstellen, mit dem Potenzial, die für Konservierungszwecke insgesamt erforderliche Ameisensäuremenge und damit die Konservierungskosten reduzieren zu können.

Der pH-Wert war während der Versuche zur Silo-Fermentation relativ konstant und es wurden Werte zwischen 3,6 und 3,8 gemessen. In Abbildung 34 sind die entsprechenden Zucker- und Ethanolkonzentrationen im Sickersaft dargestellt. Die Konzentrationen für Zucker und Ethanol in Abhängigkeit von der Lagerzeit unterscheiden sich nur wenig im Vergleich zu den Versuchen ohne Hefezugabe, was darauf schließen lässt, dass mit dem Ausgangsmaterial natürliche ethanolbildende Organismen mit in die Versuche eingetragen wurden. Wie bei den Versuchen ohne Hefezugabe lagen die Konzentrationen für Milchsäure unterhalb der Bestimmungsgrenze. Die Ethanolbildung verläuft relativ langsam und war selbst nach 210 Tagen noch nicht abgeschlossen. Positive Einflüsse auf die Silo-Fermentation durch eine Hefezugabe konnten jedoch nicht festgestellt werden.

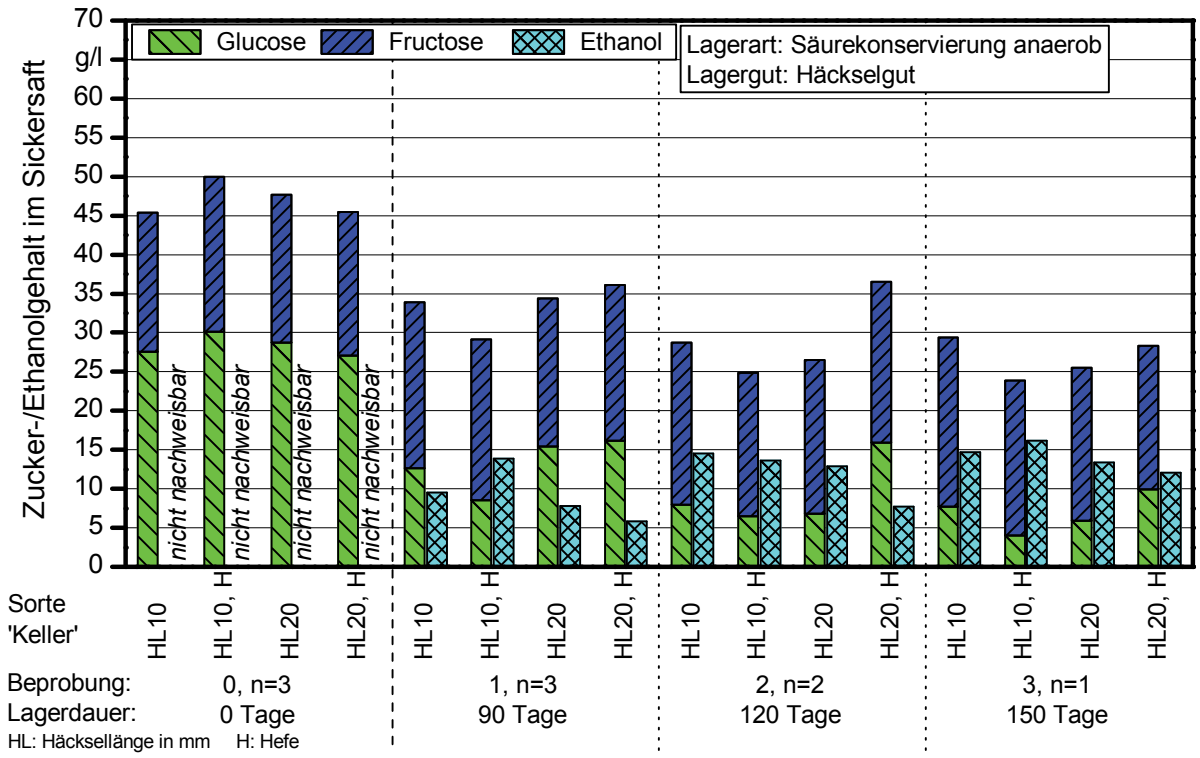


Abbildung 34: Zucker- und Ethanolgehalt im Sickersaft von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut mit zusätzlicher Hefebeigabe im Versuchsjahr 2010 (Variante 0,5 Masse-% Ameisensäure und 0,4 Masse-% Hefe)

Konservierung mit 1,0 Masse-% Ameisensäure

Mit Hilfe von 1,0 Masse-% Ameisensäure war eine Begrenzung des Zuckerverlustes auf einen mittleren Wert von ca. 10 % möglich. Analog der Variante mit 0,5 Masse-% Ameisensäure wurde die im Häckselgut enthaltene Saccharose abgebaut bzw. in Glucose und Fructose umgewandelt. Den Analysewerten zufolge liegt wiederum kein Einfluss der Häcksellänge auf die erfassten Zuckerverluste vor. Die zugehörigen Analyseergebnisse finden sich in Abbildung 35.

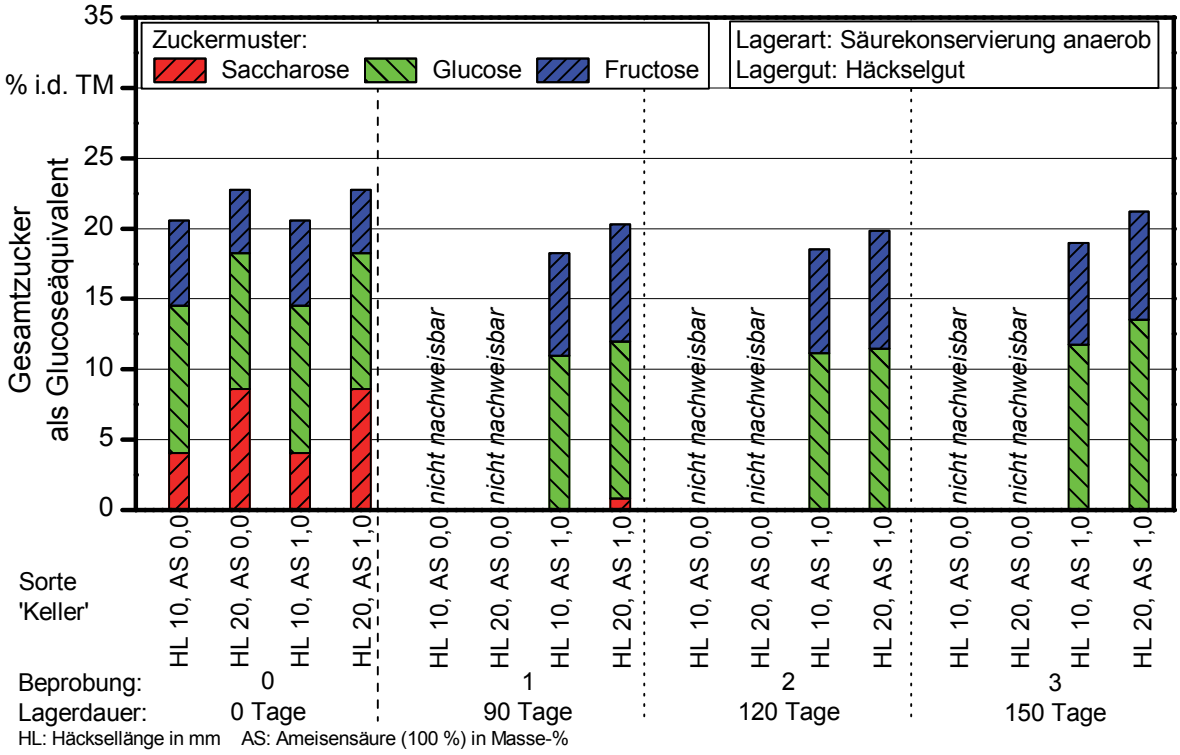


Abbildung 35: Gesamtzucker von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 1,0 Masse-% Ameisensäure)

Der Sickersaft der unbehandelten Häckselgutchargen enthielt nur am jeweiligen Tag der Fässerbefüllung Zucker in Form von Glucose und Fructose, nach 90, 120 und 150 Tagen war kein Zucker mehr nachweisbar. Die Zugabe von 1,0 Masse-% Ameisensäure führt im Vergleich zur Variante mit der halben Ameisensäuremenge zu höheren Zuckergehalten im anfallenden Sickersaft. Die Analysewerte für den Zuckergehalt im Sickersaft sind in Abbildung 36 dargestellt.

Der Ameisensäuregehalt im Sickersaft von mit 1,0 Masse-% Ameisensäure behandeltem Häckselgut lag um durchschnittlich 80 % höher als bei der Zugabe der halben Menge an Ameisensäure.

Bei der Variante mit 1,0 Masse-% Ameisensäure lag der mittlere pH-Wert des Sickersaftes zu Beginn mit 3,2 niedriger als bei der halben Ameisensäuremenge mit 3,5. Nach 90, 120 und 150 Tagen lag der mittlere pH-Wert bei der höheren Ameisensäurezugabe beständig bei 3,3 und damit niedriger gegenüber der Ameisensäurevergleichsvariante von 0,5 Masse-% Ameisensäure mit 3,6. Die doppelte Ameisensäuremenge führte also von Beginn des Versuches an zu einem höher sauren Milieu im verdichteten Häckselgut, was für eine Blockierung der Milchsäurebakterientätigkeit und damit für geringere Zuckerverluste als vorteilhaft zu erachten ist.

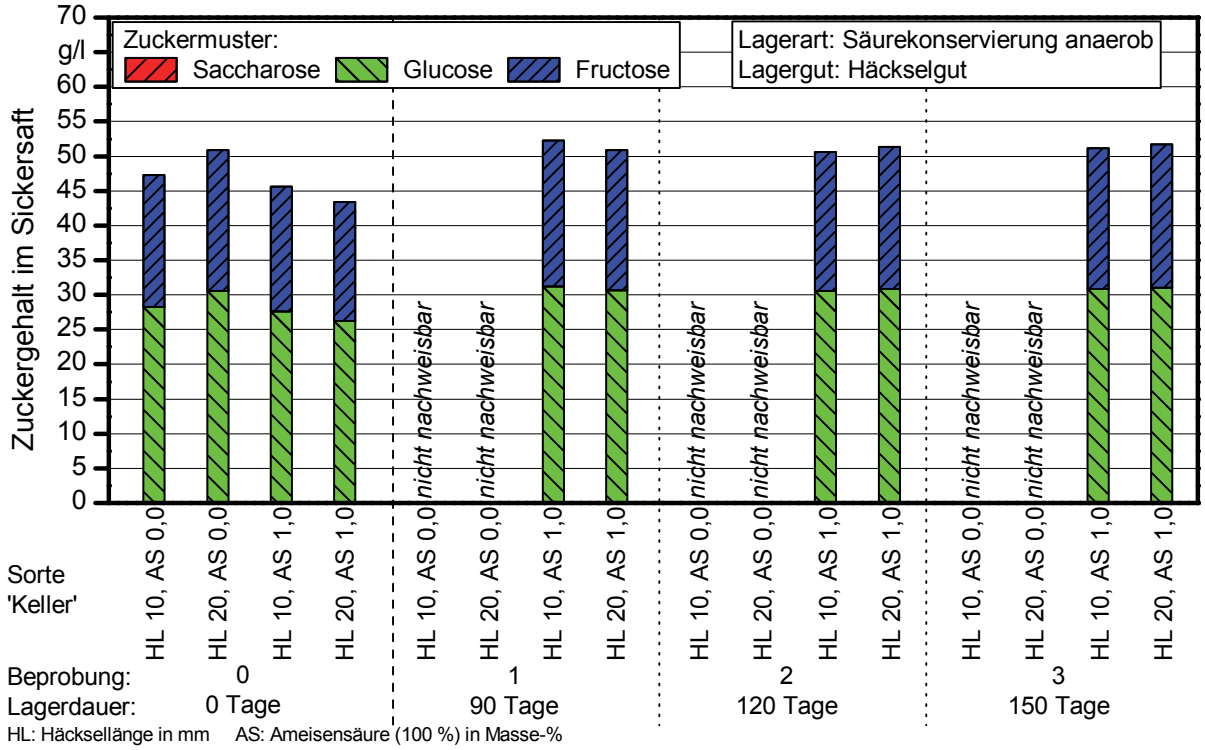


Abbildung 36: Zuckergehalt im Sickersaft von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2010 (Variante 1,0 Masse-% Ameisensäure)

Bedeutung des im Sickersaft enthaltenen Zuckers

Bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut ist bei vergleichsweise geringen Trockenmassegehalten im Erntegut mit einem erheblichen Anteil an Sickersaft zu rechnen. Im Versuchsjahr 2010 wurde beim mit Ameisensäure behandelten Häckselgut ein mittlerer Sickersaftanfall bezogen auf das Frischmasseausgangsgewicht von 20,7 % ermittelt. Diese flüssige Fraktion ist den im Labor durchgeführten Versuchen zur Ethanolherstellung entsprechend als Substrat nutzbar und erhöht somit die insgesamt erzielbare Menge an Ethanol. Bezogen auf den ursprünglichen Zuckergehalt des konservierten Häckselgutes kann der Zuckerverlust unter Einbeziehung des im Sickersaft enthaltenen Zuckers bei der Zugabe von 0,5 Masse-% Ameisensäure um durchschnittlich 18 % gesenkt werden. Die Schwankungsbreite der möglichen Minderung des Zuckerverlustes mit Hilfe des Sickersaftzuckers liegt zwischen 11 und 25 %. Entsprechend der Versuchsergebnisse kann bei der Zugabe von 1,0 Masse-% Ameisensäure der Zuckerverlust unter Einbeziehung des im Sickersaft enthaltenen Zuckers um durchschnittlich 21 % gesenkt werden. In diesem Fall liegt die Schwankungsbreite der möglichen Minderung des Zuckerverlustes mit Hilfe des Sickersaftzuckers zwischen 15 und 29 %. Aus diesem Grund muss der im Rahmen der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut anfallende Sickersaft in geeigneter Weise erfasst und werterhaltend für eine spätere Verarbeitung gelagert werden.

Zuckerhirsehäckselgut mit höherem TM-Gehalt

In den unbehandelten Nullproben des Versuchsjahres 2011 war nach der jeweiligen Lagerdauer erwartungsgemäß kein Zucker mehr im Zuckerhirsehäckselgut enthalten, nachdem der zu Beginn vorhandene Zucker durch Milchsäurebakterien vollständig abgebaut wurde. Angesichts einer errechneten Wiederholgrenze r = 2,6 % i. d. TM für den Gesamtzuckergehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut sind zwischen der Behandlung mit 0,75 und 1,0 Masse-% Ameisensäure bzw. gepufferter Ameisensäure keine signifikanten Unterschiede beim erzielten Konservierungserfolg des ursprünglich enthaltenen Zuckers feststellbar. Für Zuckerhirse vom ersten Erntetermin am 06.10.2011 lag der mittlere Zuckerverlust bei 15 % für diese Versuchsvarianten (vgl. Tabelle 42). Die Zugabe von 0,5 Masse-% Ameisensäure führte bei diesem Erntetermin zu einem mittleren Zuckerverlust von 48 %, mit gepufferter Ameisensäure von 72 %. Die Zuckergehalte im konservierten Material unterscheiden sich nicht innerhalb der drei Beprobungszeiträume 90, 120 und 150 Tage. Vom ersten bis zum letzten Erntetermin ist eine Zunahme des Trockenmassegehalts der Zuckerhirse von 20,76 % bis 24,75 % zu verzeichnen. Abbildung 37 bis Abbildung 41 zeigen die Ergebnisse dieser Versuchsreihen im Jahr 2011. Für den Gesamtzuckergehalt von frischem Material wurde r mit 1,4 % i. d. TM errechnet. Für den TM-Gehalt von frischem Material wurde für jeden Termin die Wiederholgrenze r errechnet und dargestellt. Für säurekonserviertes Material ist der TM-Gehalt als Mittelwert dargestellt, ergänzt um unteren und oberen Wert der Doppelbestimmung.

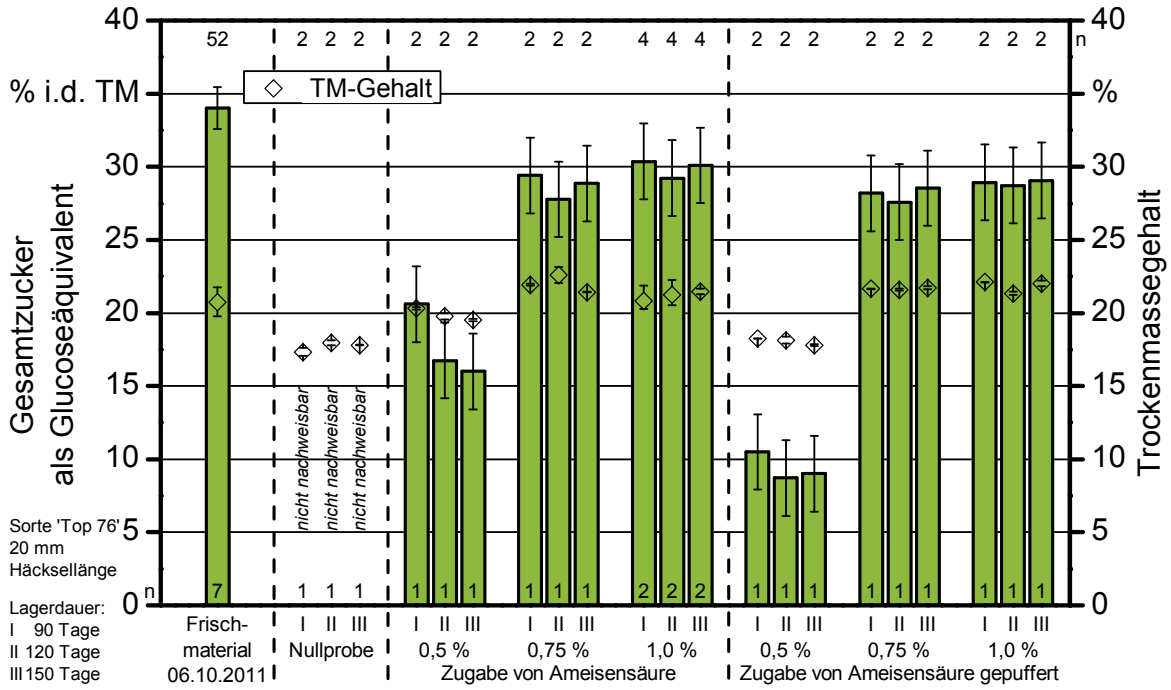


Abbildung 37: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin 06.10.2011, Häckssellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung

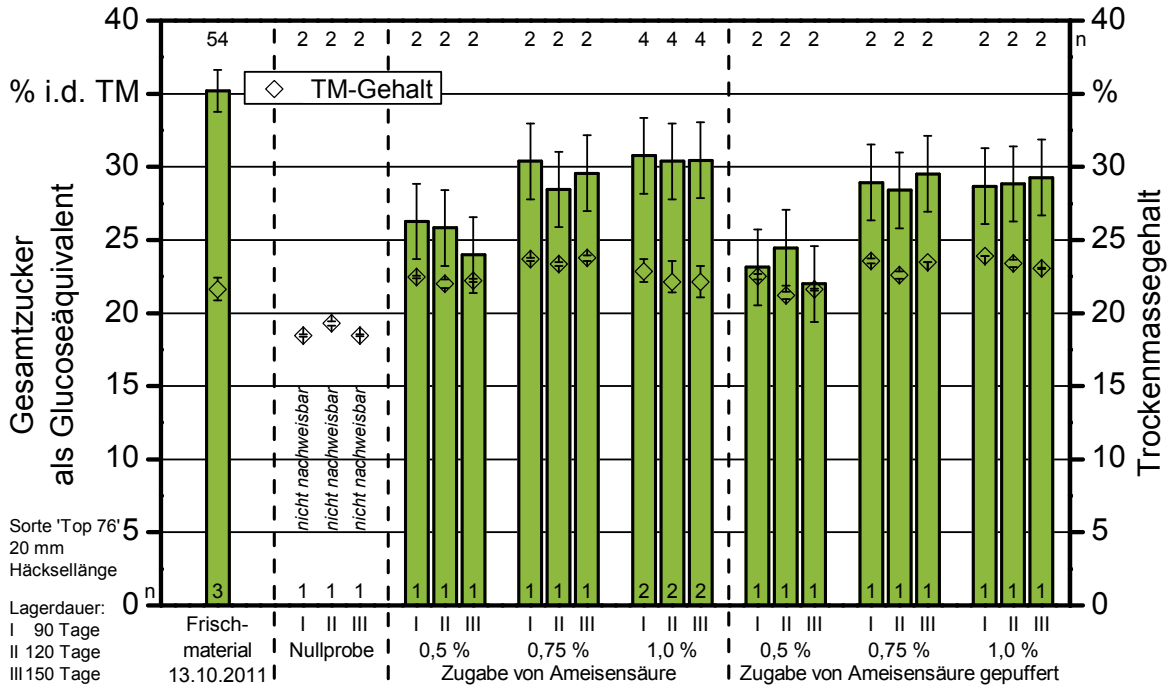


Abbildung 38: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin 13.10.2011, Häcksellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung

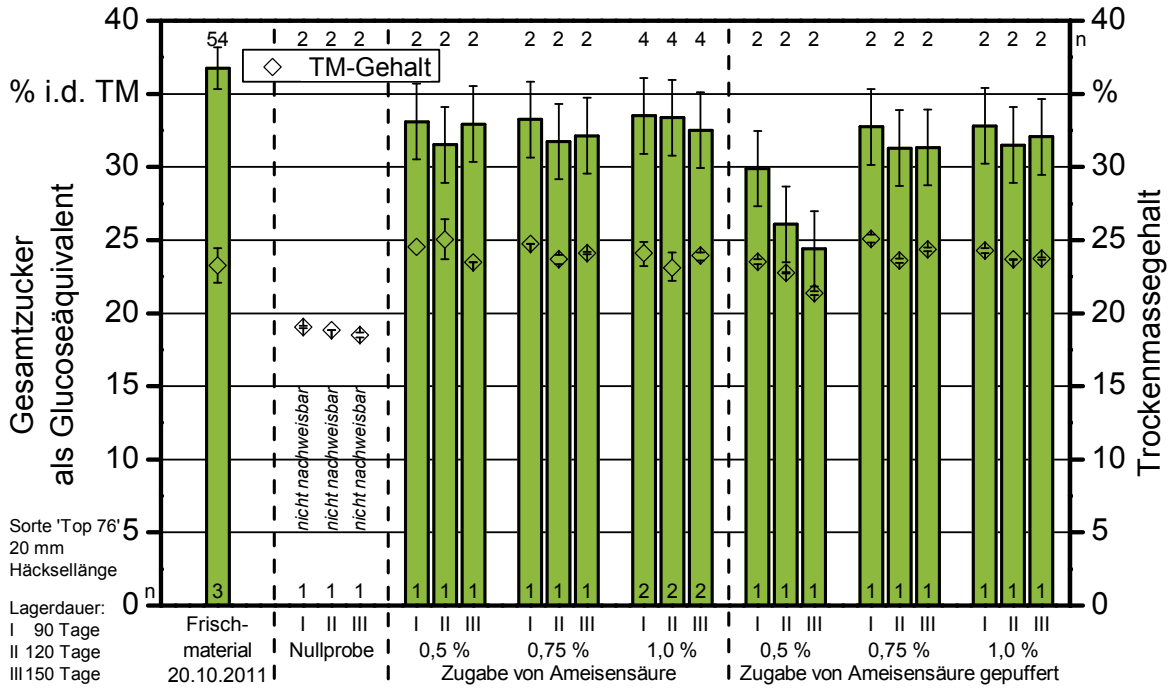


Abbildung 39: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin 20.10.2011, Häcksellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung

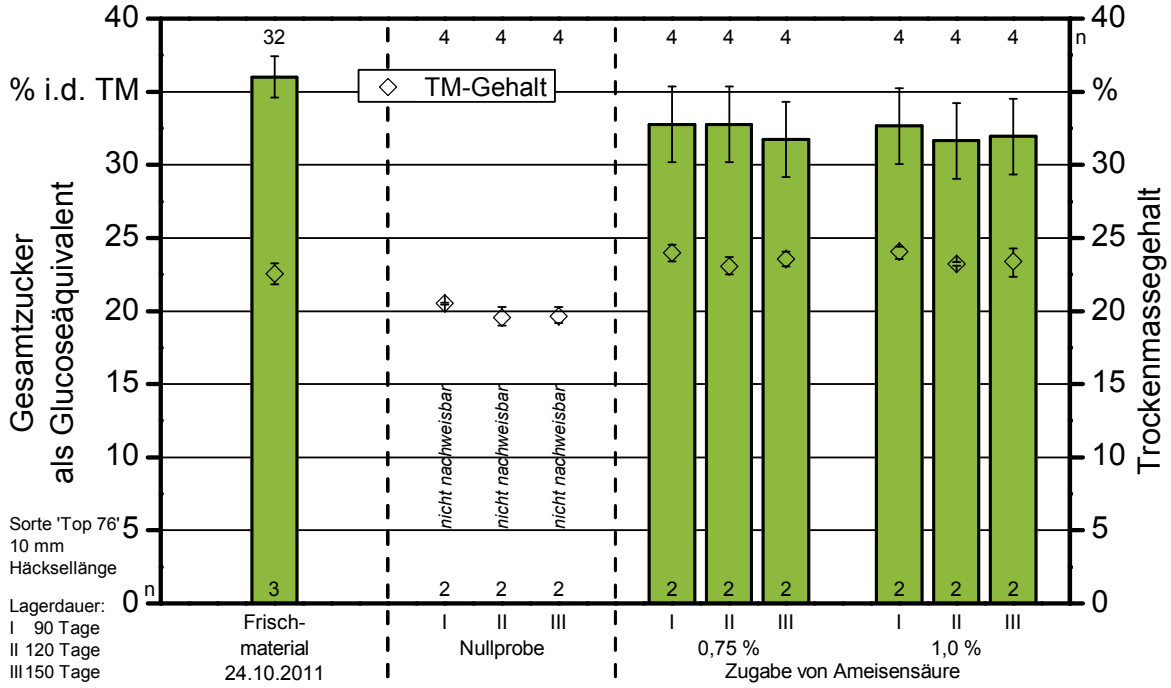


Abbildung 40: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin 24.10.2011, Häcksellänge 10 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung

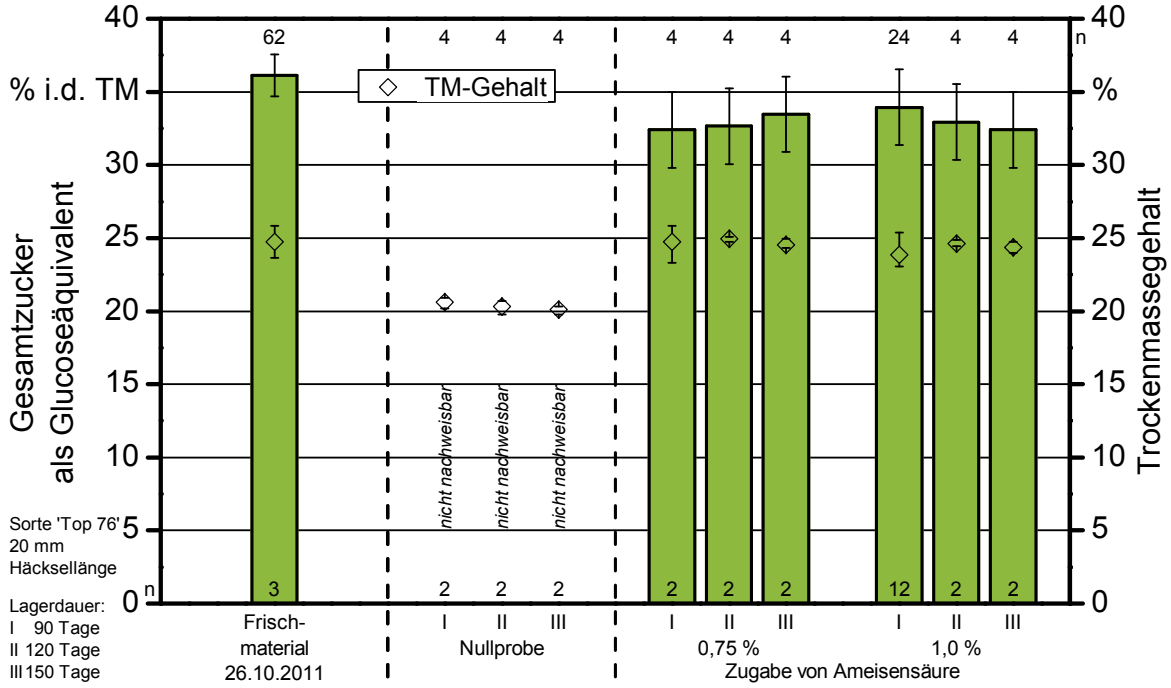


Abbildung 41: Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin 26.10.2011, Häcksellänge 20 mm), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung

Bei der Betrachtung von Abbildung 40 und Abbildung 41 ist zu erkennen, dass die Variation der Häcksellänge keinen Einfluss auf den erzielten Konservierungserfolg hat.

Tabelle 42: Mittlerer Zuckerverlust und Trockenmassegehalte von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76')

Erntetermin	Häcksellänge	Trockenmassegehalt (Frischmasse) in %	Mittlerer Zuckerverlust in %					
			Zugabe von Ameisensäure in Masse-%			Zugabe von Ameisensäure gepuffert in Masse-%		
			0,5	0,75	1,0	0,5	0,75	1,0
06.10.	20 mm	20,76 ± 1,0	48	16	12	72	17	15
13.10.	20 mm	21,63 ± 0,8	28	16	13	34	18	18
20.10.	20 mm	23,25 ± 1,2	12	12	10	27	14	13
24.10.	10 mm	22,55 ± 0,7		10	11			
26.10.	20 mm	24,75 ± 1,1		9	8			

Die angestrebte Konservierung des Zuckerhirsehäckselgutes ist durch eine Behandlung mit Ameisensäure bzw. gepufferter Ameisensäure in Konzentrationen von 0,75 und 1,0 Masse-% möglich. Die erforderliche Säuremindestkonzentration bewegt sich den Versuchsergebnissen folgend um den Wert von 0,75 Masse-%. Durch eine Optimierung der tatsächlich notwendigen Säuremenge können die Konservierungskosten gesenkt werden. Hierfür müssen entsprechende Versuchsreihen durchgeführt werden, um für einen Praxiseinsatz die tatsächliche Mindestmenge bestimmen zu können.

Einfluss der Sickersaftentnahme auf den Gesamtzucker von säurekonservierter Zuckerhirse

Die bereits dargestellten Ergebnisse wurden durch eine speziell angelegte Versuchsreihe bestätigt, mittels derer Rückschlüsse auf die Sickersaftentstehung und den Einfluss der Sickersaftentnahme auf den Gesamtzucker von säurekonservierter Zuckerhirse gewonnen werden sollten. Die Analyseergebnisse für den Gesamtzucker von Zuckerhirsehäckselgut behandelt mit 1,0 Masse-% Ameisensäure und gelagert in Acrylglasbehältern sind in Abbildung 42 dargestellt. Bei der Variante A wurde der Sickersaft zu allen zwölf Entnahmeterminen abgelassen (vgl. Kapitel 8.3, Seite 147), bei der Variante B nur unmittelbar vor der Behälterentleerung nach einer Lagerdauer von 150 Tagen, um einen möglichen Einfluss der Sickersaftentnahme auf den Gesamtzucker von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut zu überprüfen. Angesichts einer errechneten Wiederholgrenze von r = 2,6 % für mit Ameisensäure konserviertes Zuckerhirsematerial, ist beim Vergleich der Varianten mit bzw. ohne Sickersaftentnahme kein signifikanter Einfluss auf den Zuckergehalt erkennbar. Bezüglich der Sickersaftentstehung wurde zwischen den

Varianten A und B entsprechend des jeweiligen optischen Zustands kein Unterschied festgestellt.

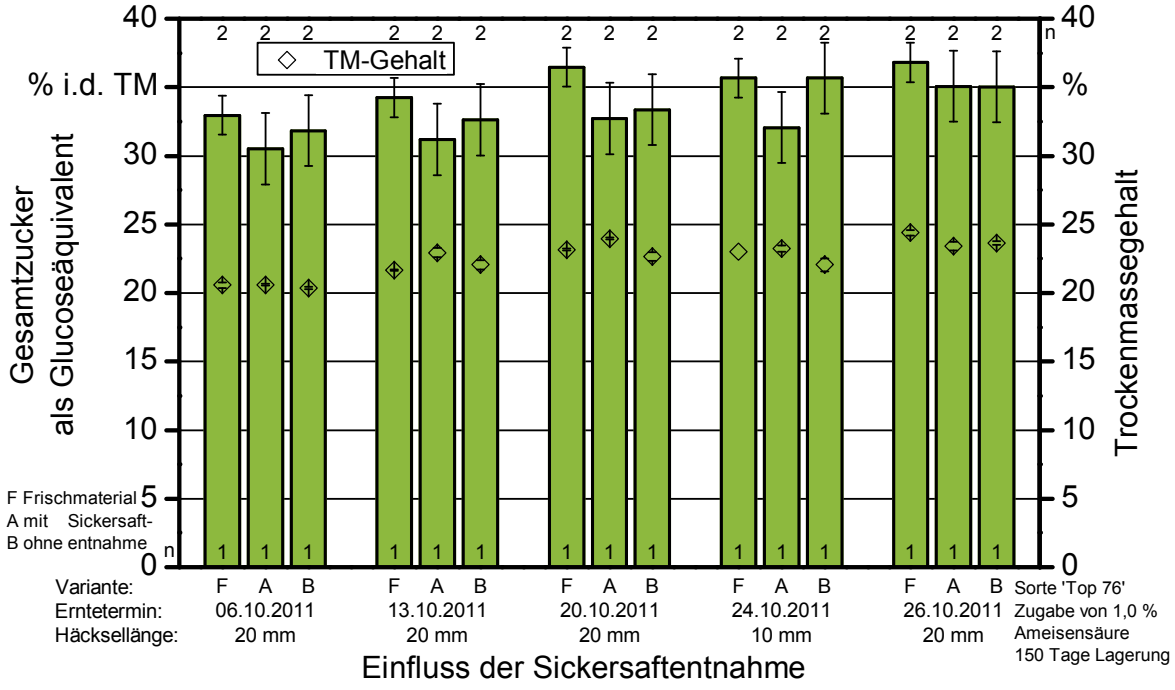


Abbildung 42: Einfluss der Sickersaftentnahme auf Gesamtzucker und Trockenmassegehalt von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Vergleich zum Frischmaterial im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76'), jeweils dargestellt als Mittelwert der durchgeführten Doppelbestimmung

Zusammenhänge zwischen TM-Gehalt, Zuckergehalt und Sickersaftanteil

Bei der Beurteilung des erzielten Konservierungserfolgs sind zwischen der Behandlung mit 0,75 und 1,0 Masse-% Ameisensäure bzw. gepufferter Ameisensäure keine belastbaren Unterschiede feststellbar (vgl. Tabelle 42). Die Zugabe von 0,5 Masse-% Ameisensäure bzw. gepufferter Ameisensäure reicht nicht aus, um den ursprünglich vorhandenen Zucker erfolgreich konservieren zu können. Bei einem TM-Gehalt des Häckselgutes von 23,25 % ± 1,2 % zum dritten Erntetermin am 20.10.2011 ist zwischen den drei Behandlungsvarianten mit Ameisensäure kein Unterschied erkennbar (siehe Abbildung 39).

Basierend auf den Daten der erfassten Sickersaftmengen, von TM-Gehalt und Zuckergehalt im Ausgangsmaterial sowie dem TM-Gehalt im säurekonservierten Material wurde versucht, mit Hilfe der Software Origin anhand geeigneter statistischer Auswertungen Zusammenhänge zwischen diesen Parametern zu beschreiben.

Folgende Tendenzen wurden hierbei ermittelt:

1.: Der Sickersaftanteil steigt bei abnehmendem TM-Gehalt und bei steigendem Zuckergehalt im Ausgangsmaterial und umgekehrt. Durchgeführt wurde eine multiple lineare Regressionsanalyse (Zusammenhang TM-Gehalt und Zuckergehalt im Ausgangsmaterial auf Sickersaftanteil). Den größeren Einfluss hat hierbei der TM-Gehalt (Faktor -1,69672) gegenüber dem Zuckergehalt (Faktor -0,1581). Für die vorliegenden Daten wurde mit $R^2 = 0,57602$ ein relativ niedriges korrigiertes Bestimmtheitsmaß R^2 errechnet, d. h. 57 % der Variation der herangezogenen Grundgesamtheit bzw. Stichprobenanzahl (ohne Nullproben, ohne Varianten mit gepufferter Ameisensäure) beruht auf den beiden Faktoren TM-Gehalt und Zuckergehalt, der Rest auf weiteren (unspezifischen) Einflussfaktoren und Messfehlern.

2.: Je höher der Zuckergehalt im Ausgangsmaterial (Faktor 0,58464) und je höher der TM-Gehalt im Ausgangsmaterial (Faktor 0,60351), umso höher ist der TM-Gehalt im säurekonservierten Material. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß liegt bei $R^2 = 0,68013$. Durchgeführt wurde hierzu wiederum eine multiple lineare Regressionsanalyse (Zusammenhang TM-Gehalt und Zuckergehalt im Ausgangsmaterial auf TM-Gehalt im säurekonservierten Material).

3.: Mit steigendem TM-Gehalt im Ausgangsmaterial um 1 % steigt der Zuckergehalt im Ausgangsmaterial um 0,8 %. Durchgeführt wurde eine lineare Regressionsanalyse (Zusammenhang TM-Gehalt und Zuckergehalt im Ausgangsmaterial). Das korrigierte Bestimmtheitsmaß liegt bei $R^2 = 0,56945$.

Für das gelagerte Zuckerhirsehäckselgut und den jeweils entnommenen Sickersaft wurden umfangreiche Analysen zur Qualität des Sickersafts zu den jeweiligen Beprobungen durchgeführt. In Tabelle 43 sind für die Nullproben und Behandlungsvarianten mit Ameisensäure die jeweils aufgetretenen Zuckerverluste als Mittelwerte dargestellt, wobei das mit dem Sickersaft verbundene Verlustpotential eigens ausgewiesen ist. Der Sickersaft der Nullproben war nur zum ersten Termin der Sickersaftentnahme zuckerhaltig. Bei der Behandlung mit 0,75 Masse-% Ameisensäure liegt der Anteil des im Sickersaft enthaltenen Zuckers am ursprünglich vorhandenen Zuckergehalt mit durchschnittlich 26,6 % am höchsten und der Zuckerverlust über das konservierte Häckselgut mit 29,1 % am niedrigsten, woraus sich unter Berücksichtigung des im Sickersaft enthaltenen Zuckers ein minimaler Gesamtverlust von 2,5 % errechnet. Die im Versuchsjahr 2011 parallel durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Sickersaftentnahme auf den Gesamtzuckergehalt des konservierten Häckselguts weisen bei ausschließlicher Entnahme des Sickersaftes am Ende des Versuchs einen Gesamtverlust an Zucker von 2,5 % aus (Behandlung mit 1,0 Masse-% Ameisensäure). Ein möglicher Verzicht auf einen kontrollierten bzw. unkontrolliert kontinuierlichen Sickersaftabfluss aus dem gelagerten, säurekonservierten Zuckerhirsehäckselgut bei zugleich geringerem Zuckerverlust von 2,5 % gegenüber 7,0 % ist für die Praxis als enormer arbeitswirtschaftlicher Vorteil anzusehen.

Tabelle 43: Auswirkung einer Verwertung des zuckerhaltigen Sickersaftes auf den festgestellten Zuckerverlust bei der Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit Ameisensäure

Ameisensäure	n	SE	AM TM-Gehalt in %	AM Gesamtzucker in %	Sickersaftanteil in %	KM TM-Gehalt in %	KM Gesamtzucker in %	ZASS in %	ZVoS in %	ZVmS in %
ohne	3	ja	20,91	33,98	15	17,69	0,00	2,3	100,0	97,7
0,5 Masse-%	3	ja	20,64	34,77	20	19,87	17,78	20,1	61,6	41,5
0,75 Masse-%	3	ja	20,61	34,11	22	21,99	28,69	26,6	29,1	2,5
1,0 Masse-%	3	ja	20,79	34,60	20	21,50	29,27	23,9	30,8	7,0
1,0 Masse-%	5	nein	22,56	35,23	9	22,16	33,70	12,3	14,8	2,5

SE: Sickersaftentnahme / AM: Ausgangsmaterial / KM: Konserviertes Material
TM-Gehalt per 80°C Vakuum / Gesamtzucker als Glucoseäquivalent
Sickersaftanteil am Frischmassegewicht von Zuckerhirsehäckselgut der Sorte 'Top 76', Erntetermin 06.10.2011, Häcksellänge 20 mm; Variante 1,0 Masse-% AS ohne Sickersaftentnahme: Mittelwert aller Erntetermine
ZASS: Anteil des Zuckergehalts im Sickersaft am Gesamtzuckergehalt des Ausgangsmaterials
ZVoS: Zuckerverlust im konservierten Material ohne Berücksichtigung des Sickersafts
ZVmS: Zuckerverlust im konservierten Material mit Berücksichtigung des Sickersafts

Tabelle 44: pH-Wert (Mittelwerte) des Sickersaftes von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut im Versuchsjahr 2011, Sorte 'Top 76', Erntetermin 06.10.2011, Häcksellänge 20 mm in Abhängigkeit von der Lagerdauer

	Lagerdauer				
pH-Wert Sickersaft	Tag 1	Tag 90	Tag 120	Tag 150	Mittelwert
Anzahl Proben n	3 / 6*	1	1	1	33 / 9*
ohne Ameisensäure (AS)	4,28	3,65	3,66	3,72	3,80
0,5 Masse-% AS	3,51	3,60	3,57	3,68	3,63
0,75 Masse-% AS	3,28	3,35	3,35	3,42	3,37
1,0 Masse-% AS	3,13*	3,28	3,23	3,29	3,21
0,5 Masse-% AS gepuffert	3,74	3,79	3,77	3,87	3,77*
0,75 Masse-% AS gepuffert	3,51	3,57	3,62	3,61	3,56*
1,0 Masse-% AS gepuffert	3,42	3,48	3,53	3,56	3,47*

Ameisensäure in ansteigender Konzentration führt zu einem niedrigeren pH-Wert im entnommenen Sickersaft und damit zu einem stärker sauren Milieu im Zuckerhirsehäckselgut. Daraus ist prinzipiell auf eine bessere Konservierungsrate und damit geringere Zuckerverluste zu schließen. Bei der Verwendung von gepufferter Ameisensäure liegen jeweils höhere pH-Werte vor. In Tabelle 44 sind die ermittelten pH-Werte im Sickersaft von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut exemplarisch für das am 06.10.2011

geerntete und eingelagerte Material zu Beginn und zu den Beprobungsterminen nach 90, 120 und 150 Tagen dargestellt.

Zusammenfassung der Teilergebnisse

Die Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut im verdichteten Zustand unter anaeroben Bedingungen unter Verwendung von Ameisensäure zur sofortigen pH-Wert-Absenkung in der Biomasse erscheint angesichts der erzielten Ergebnisse als ein vielversprechender Ansatz zur Konservierung des enthaltenen Zuckers. Der nach 150 Tagen vorliegende lagerstabile Zustand des mit Ameisensäure konservierten Häckselgutes lässt darauf schließen, dass unter Beibehaltung der anaeroben Umgebungsbedingungen die gelagerte Biomasse unbegrenzt lagerfähig ist und damit für eine saisonunabhängige, ganzjährige bzw. überjährige Verarbeitung zur Ethanolherstellung bereitgestellt werden kann. Dabei ist neben dem Zuckerhirsehäckselgut auch der anfallende Sickersaft als Substrat für die Ethanolherstellung nutzbar und muss im Sinne einer angestrebten Minimierung der Zuckerverluste in die Überlegungen miteinbezogen werden.

Einordnung und Bewertung der Ergebnisse

Die Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit Hilfe von 0,5 Masse-% Ameisensäure führte zu einem mittleren Zuckerverlust von 17,1 %. Beim Einsatz von Ameisensäure in einer Konzentration von 1,0 Masse-% wurde ein mittlerer Zuckerverlust von 9,9 % ermittelt. Unter Einbeziehung des anfallenden Sickersaftes als Rohstoff zur Ethanolproduktion können die angeführten Zuckerverlustwerte um durchschnittlich 18 bzw. 21 % gesenkt werden. Im Vergleich zur Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut nach SCHMIDT et al. (1997) [243] sind bei den im Versuchsjahr 2010 durchgeführten Konservierungsversuchen mit Ameisensäure Zuckerverluste festgestellt worden. Das von SCHMIDT et al. (1997) [243] konservierte Häckselgut war mit einem TM-Gehalt von 25 % deutlich trockener, als das bei den im Jahr 2010 durchgeführten Versuchen verwendete Material mit einem TM-Gehalt von 16,4 bis 18,2 %. Hinsichtlich eines anfallenden Sickersaftes wurden von SCHMIDT et al. (1997) [243] keine Angaben gemacht. Des Weiteren wurden diese Untersuchungen im 1 l-Maßstab durchgeführt. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse erscheint aus den vorgenannten Gründen nicht möglich.

8.7.3 Anforderungen an die bauliche Gestaltung von Lagerstätten

Für die Lagerung von säurekonserviertem Zuckerhirsehäckselgut bietet sich die für Silomais bekannte Bauweise des Flachsilos (Fahrsilo) an. Die Bodenplatte von Flach- bzw. Fahrsilos besteht meist aus Beton oder Asphalt, die Seitenwände sind aus Beton, Holz, Metall oder Kunststoff gefertigt [264]. Prinzipiell beträgt die Silolänge ein Vielfaches der Silobreite. Die schmäleren Stirnseiten einer solchen Siloanlage sind entweder beide offen und dienen als Zufahrtsmöglichkeit bei Befüllung und Entleerung oder eine Seite ist geschlossen, wenn nur eine Zufahrtsmöglichkeit benötigt wird. Bei Anlage und Betrieb von Silos müssen schädliche Bodenveränderungen, nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit sowie Verunreinigungen oberirdischer Gewässer ausgeschlossen werden. Bei der Errichtung von Silos und Auffangbehältern für anfallenden

Sickersaft ist zu oberirdischen Gewässern ein Mindestabstand von 20 m einzuhalten. Befindet sich der Silostandort weniger als 60 m entfernt von Gewässern 1. und 2. Ordnung bzw. bestimmten Gewässern 3. Ordnung existiert eine Genehmigungspflicht für den Bau. Zu Hausbrunnen muss ein Abstand von mindestens 50 m eingehalten werden. In Überschwemmungsgebieten sowie im Fassungsbereich und in der engeren Schutzzone von Wasserschutzgebieten ist die Errichtung von Siloanlagen nicht zulässig. Darüber hinaus sind weitere rechtliche Anforderungen zu berücksichtigen [264]. Silos, Sickersaftauffangbehälter und Rohrleitungen müssen wasserdicht und gegen das im Häckselgut bzw. Sickersaft vorliegende Säurespektrum beständig sein. Für eine wiederkehrend durchzuführende Dichtheitsprüfung dieser baulichen Anlagen und Rohrleitungen sind durch Konstruktion und Ausführung die Voraussetzungen dafür zu schaffen.

SPIEKERS und ATTENBERGER (2009) [264] führen auch detaillierte Informationen bezüglich des Anforderungsprofils zur Lagerung von Sickersaft auf. Entsprechende Auffangbehälter bestehen in der Regel aus monolithischen Stahlbetonbehältern (C35/45) mit Schutzanstrich. Aus Betonringen zusammengesetzte Behälter mit Mörtelfuge sind für Sickersäfte nicht zulässig, jedoch können geeignete Betonbauteile (nach DIN 4034 T.1 aus C35/45) mit speziellen Dichtmitteln (Elastomere nach DIN 4060), mit speziellem Schutzanstrich und Leckageerkennung genutzt werden. Spezielle Kunststoffbehälter mit einem Beständigkeitsnachweis, z. B. zum abflusslosen Sammeln von Abwasser sind zulässig.

Lagerung ohne Sickersaftentnahme

Ein Verzicht auf die Entnahme von Sickersaft während der Lagerung von Zuckerhirse würde den Arbeitsaufwand deutlich verringern, allerdings wären dann auch höhere Anforderungen an die baulichen Voraussetzungen der genutzten Lagerstätten zu stellen. Herkömmliche Fahrsiloanlagen müssten auch auf den Stirnseiten dicht geschlossen werden können, um ein Abfließen des vorhandenen Sickersaftes sicher unterbinden zu können. Hierzu stellt der Einbau einer PE-Folie die einfachste Möglichkeit zum Abschließen der Stirnseiten von Fahrsiloanlagen dar. Die als Siloabdeckung bekannten PE-Folien (Folienstärke > 200 µm) können zu Beginn bzw. am Ende des Befüllvorgangs eines Fahrsilos ca. 1 bis 2 m bodenbedeckend eingebracht und an den Stirnseiten nach oben auf den Silostapel hochgezogen sowie an den jeweiligen Ecken eingeschlagen und mit Sandsäcken beschwert werden. Während der Lagerung darf dieser Folienabschluss der Fahrsiloanlage nicht beschädigt werden, um einen Sickersaftabfluss bzw. einen Luftzutritt zum Lagergut sicher ausschließen zu können. Sofern dies in der Praxis nicht umsetzbar ist, müsste der Sickersaft bspw. in angrenzende geschlossene Lagerbehälter eingeleitet werden, wobei über einen Zulauf mit integriertem Siphon ein Luftzutritt unterbunden werden muss und der Sickersaftabfluss durch eine unter dem Silostapel positionierte Drainageleitung erfolgen muss, damit der Sickersaft ohne Kontakt zur Außenluft in den geschlossenen Lagerbehälter gelangen kann. Der Sickersaft der anzustrebenden Behandlungsvarianten von 0,75 bis 1,0 Masse-% Ameisensäurelösung weist mittlere pH-Werte von 3,4 bis 3,2 auf, der Sickersaft der unbehandelten Nullproben von 3,8. Bei der Lagerung von Maissilage sind für den anfallenden Sickersaft pH-Werte von etwa 4 bis 5 bekannt [264]. Aufgrund des sehr sauren Charakters des anfallenden Sickersafts erscheint die Verwendung von beschichteten Betonbehältern (Schutzanstrich) bzw. korro-

sionsbeständigen PE-Behältern empfehlenswert. Für Rohrleitungen sind die Materialanforderungen analog zu betrachten. Der üblicherweise bituminöse Schutzanstrich auf Bodenplatte und Seitenwänden muss regelmäßig auf Beschädigungen überprüft und im Bedarfsfall nach vorangegangener Reinigung erneuert werden.

8.7.4 Physikalische Lagerparameter

Am Erntegut aus dem Versuchsjahr 2010 wurde die Schüttdichte von Zuckerhirse in verschiedenen Erntegut- und Aufbereitungsformen zum Beginn und zum Ende der jeweiligen Lagerversuche ermittelt. Die Ergebnisse der durchgeführten Schüttdichtebestimmungen sind zusammengefasst in Tabelle 45 aufgelistet.

Tabelle 45: Schüttdichte von Zuckerhirse in verschiedenen Erntegut- und Aufbereitungsformen im Versuchsjahr 2010

	Lagerbeginn		Lagerende	
Erntegutform	TM in %	ρ_{Sch} in kg/m³	TM in %	ρ_{Sch} in kg/m³
Ganzpflanzen				
unzerkleinert	20,4	154	---	---
entblättert	14,1	465	---	---
Stückgut				
30 cm unbelüftet	14,1	265	15,7	233
30 cm belüftet	14,1	268	18,3	212
Häckselgut				
10 mm lose	17,8	420	---	---
10 mm abgesetzt	17,8	463	---	---
10 mm verdichtet	17,5	932	18,0	756
10 mm verdichtet, AS[1] 0,5[2]	18,1	936	20,1	761
10 mm verdichtet, AS[1] 1,0[2]	17,5	987	20,0	780
20 mm lose	17,3	407	---	---
20 mm abgesetzt	17,3	462	---	---
20 mm verdichtet	18,2	899	17,2	729
20 mm verdichtet, AS[1] 0,5[2]	16,4	1006	19,8	766
20 mm verdichtet, AS[1] 1,0[2]	18,2	929	19,8	743

[1] *Ameisensäure (100 %)*
[2] *Beladung mit Ameisensäure (100 %) in Masse-%*

Der Raumbedarf von Ganzpflanzen in unzerkleinerter und entblätterter Form unterscheidet sich aufgrund der abgetrennten Blattmasse entsprechend der festgestellten Schüttdichten von 154 und 465 kg/m³ um den Faktor 3 sehr deutlich (TM-Gehalt 20,4 % und 14,0 %).

Bei Stückgut ist der Effekt der vorgenommenen Belüftung infolge der damit eingetretenen TM-Gehaltserhöhung an den ermittelten Schüttdichten erkennbar. Der Wert von 268 kg/m³ zum Lagerbeginn ist auf 212 kg/m³ gesunken, während der TM-Gehalt von 14,0 % auf 18,3 % anstieg.

Für Häckselgut wurden im losen Zustand Schüttdichten von 420 kg/m³ bei Häcksellänge 10 mm (TM-Gehalt 17,8 %) und 407 kg/m³ bei Häcksellänge 20 mm (TM-Gehalt 17,3 %) bestimmt. Durch die Verdichtung ergaben sich Schüttdichten von 932 und 899 kg/m³ (TM-Gehalt 17,5 % und 18,2 %), womit jeweils eine Verringerung des Raumbedarfs um den Faktor 2,2 vorliegt. Aus den PE-Fässern wurde im Laufe der Lagerung mehrmals Sickersaft entnommen und damit die jeweils vorhandene Masse reduziert. Zum Lagerende wurden bei den Häcksellängen 10 und 20 mm Schüttdichten von 756 und 729 kg/m³ erfasst (TM-Gehalt 18,0 % und 17,2 %). Im Vergleich zum Lagerbeginn liegt somit eine Reduktion der Schüttdichte von jeweils 18,9 % vor.

Einordnung und Bewertung der Ergebnisse

Hinsichtlich der Schüttdichten für Ganzpflanzen in unzerkleinerter und entblätterter Form liegen keine Vergleichsangaben aus der Literatur vor. Nachdem der Raumbedarf durch die Entblätterung auf ein Drittel reduziert werden kann, ist dies für Transport, Umschlag und Lagerung sehr bedeutend.

BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] nennen für die Schüttdichte von Stückgut bei einer Länge von 30 cm einen Wertebereich von 144 bis 155 kg/m³ bei einem TM-Gehalt von 23 bis 21 %, von MONROE und SUMNER (1983) [187] ist ein Wert von 218 kg/m³ angegeben, allerdings ohne Angabe des zugehörigen TM-Gehaltes. Die im Rahmen der durchgeführten Versuche ermittelten Werte von 212 bis 268 kg/m³ bei einem TM-Gehalt von 18,3 bis 14,1 % liegen um den Einfluss des TM-Gehaltes korrigiert somit absolut betrachtet um 1,6 bis 7,7 % höher als die von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] genannten Schüttdichten.

Die bestimmten Schüttdichten für Häckselgut in losem Zustand weichen gegenüber den von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] gefundenen Werten nach Bereinigung des TM-Gehalteinflusses um -3,3 % (Häcksellänge 10 mm) und +11,5 % (Häcksellänge 20 mm) ab, im abgesetzten Zustand liegt die Abweichung bei -18,1 % (Häcksellänge 10 mm) und -6,3 % (Häcksellänge 20 mm). Der TM-Gehalt lag bei 17,8 % bzw. 17,3 %. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Werte von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] im losen Zustand in einem Bereich von 38 bis 43 % und im abgesetzten Zustand in einem Bereich von 34 bis 40 % enorm schwanken und sich auf Häckselgut mit TM-Gehalten von 22 bis 30 % beziehen. Es erscheint somit schwierig einen direkten Vergleich der Ergebnisse anzustellen bzw. einen verlässlichen Wert für die Schüttdichte von Häckselgut bei stark voneinander abweichenden TM-Gehalten anzugeben.

8.8 Fazit

Die Lagerung von Zuckerhirse in Form von entblätterten Ganzpflanzen und Stückgut ist weder mit als auch ohne Belüftung des Lagergutes empfehlenswert. Dagegen kann Zuckerhirsehäckselgut durch Konservierung mit Ameisensäure unter anaeroben Bedingungen im verdichteten Zustand bei tolerierbaren Zuckerverlusten erfolgreich gelagert werden. Der von BLUDAU und TUROWSKI (1992) [35] angeführte maximal akzeptable Verlust von 10 % des Ausgangszuckergehaltes wurde beim Einsatz von 1,0 Masse-% Ameisensäure im Versuchsjahr 2010 und mit 0,75 bzw. 1,0 Masse-% Ameisensäure im Versuchsjahr 2011 nicht überschritten. Sofern die anaeroben Umgebungsbedingungen gewährleistet werden können, ist theoretisch davon auszugehen, dass die Biomasse unbegrenzt lagerfähig ist und damit für eine saisonunabhängige bzw. ganzjährige Verarbeitung bereitgestellt werden kann. Der bei der Säurekonservierung anfallende Sickersaft ist als Substrat für die Ethanolherstellung nutzbar und deshalb in die Überlegungen zur Zuckerhirsenutzung miteinzubeziehen, um die auftretenden Zuckerverluste minimieren zu können. Der entscheidende Vorteil dieses Konservierungsverfahrens ist darin zu sehen, dass die Erntetechnik Feldhäcksler und die gesamte für Silomais bereits existierende Transport-, Lagerungs- und Umschlagtechnik für Zuckerhirse zur Verfügung stehen. Des Weiteren können für Silomais vorhandene Ernte- und Transportkapazitäten mit Zuckerhirse aufgrund des späteren Erntezeitpunktes besser ausgelastet werden.

Die Applikation von Ameisensäurelösung zum Zuckerhirsehäckselgut kann entweder bereits beim Erntevorgang im SF-Feldhäcksler bzw. unmittelbar bei der Befüllung der Siloanlage erfolgen. Im Sinne einer angestrebten, möglichst gleichmäßigen Verteilung der Ameisensäurelösung im Zuckerhirsehäckselgut erscheint die Zudosierung im SF-Feldhäcksler für die Praxis vorteilhafter, nachdem während des Häckselvorgangs beispielsweise am Auswurfrohr des SF-Feldhäcksler kontinuierlich Säure in den Erntegutstrom appliziert werden kann. Die Säurezugabe am Standort der Siloanlage erfordert Maschinen bzw. Anlagen für eine Einmischung ins Häckselgut und steht dem in der Praxis bekannten zügigen Abkippen bzw. Abschieben der Biomasse entgegen.

Aufgrund der korrosiven Wirkung von Ameisensäure sind Beschichtungen an den Kontaktflächen der eingesetzten Maschinen und Geräte erforderlich. Am SF-Feldhäcksler sollte die Ausführung des Endstücks am Auswurfrohr in Kunststoff bzw. mit einer Kunststoffbeschichtung (PE) genügen. Die für den Transport des mit Ameisensäurelösung behandelten Häckselguts eingesetzten Fahrzeuge benötigen an den Kontaktflächen, d. h. im Bereich von Ladefläche und Seitenwänden eine beständige Beschichtung zum Korrosionsschutz.

9 Zuckersaftgewinnung

9.1 Vorgehensweise

Bisherige Untersuchungen (siehe hierzu Kapitel 3.7.4) deuten darauf hin, dass sich Schneckenpressen gut zur Abtrennung des Zuckersaftes aus Zuckerhirse eignen und dabei hohe Abpressgrade und Zuckerextraktionsraten erreicht werden können. Zudem werden Schneckenpressen auch zur dezentralen Herstellung von Pflanzenölen verwendet und viele dieser Anlagen befinden sich in der Hand von Landwirten, so dass Erfahrungen im Umgang mit dieser Technik bereits in der Praxis vorhanden sind. Aufgrund dessen wurden die Untersuchungen zur Zuckersaftgewinnung an Schneckenpressen durchgeführt.

Im Bereich der Pflanzenölgewinnung werden vor allem Lochseiher- und Seiherstab-Schneckenpressen eingesetzt und von den Pressenherstellern angeboten. Hierbei dominiert die Bauart der Lochseiher-Schneckenpresse bei geringen Verarbeitungskapazitäten von bis zu etwa 50 kg/h (Angabe bezieht sich auf die Verarbeitung von Rapssaat), während ab einer Verarbeitungskapazität von 100 kg/h fast ausschließlich Seiherstab-Schneckenpressen angeboten werden [219]. Für die Verarbeitung von größeren Mengen Zuckerhirse ist somit für die Praxis voraussichtlich die Seiherstab-Schneckenpresse relevant. Um erste Erfahrungen zu sammeln und da zunächst nur kleine Mengen an Zuckerhirsehäckselgut zur Verfügung standen, wurden erste Versuche zur Saftgewinnung im Labormaßstab an einer Lochseiher-Schneckenpresse durchgeführt.

Eine schematische Darstellung des Prozesses der Zuckersaftgewinnung aus Zuckerhirse mit Schneckenpressen zeigt Abbildung 43. Die zu verarbeitende Eingangsgröße in den Verarbeitungsprozess ist das Zuckerhirse Ausgangsmaterial, welches durch Sorte, Zucker- und Trockenmassegehalt charakterisiert wird. Vor dem eigentlichen Pressvorgang erfährt das Material eine Vorbehandlung. Dies ist mindestens eine Zerkleinerung, um dem Material eine für die Zufuhr und Dosierung zur Schneckenpresse geeignete Beschaffenheit zu geben. Hierbei können vorher auch bestimmte Pflanzenfraktionen, wie zum Beispiel Blätter und Rispen, abgetrennt werden. Ebenfalls zur Vorbehandlung zählt die zuckererhaltende Lagerung des Materials zum Beispiel durch Konservierung mit Ameisensäure, wenn es nicht direkt nach der Ernte verarbeitet wird. Beim Pressvorgang können neben den beiden verwendeten Bauarten von Schneckenpressen jeweils die Betriebs- bzw. Einstellgrößen Drehzahl, Schneckengeometrie und bei der Lochseiherpresse der Pressdüsendurchmesser variiert werden, um Einfluss auf den Prozess und die daraus erhaltenen Produkte nehmen zu können. Als Produkte gehen aus dem Prozess Zuckersaft und Bagasse (Pressrückstand) hervor sowie aufgrund der entstehenden Wärme entweichender Wasserdampf. Zur Bewertung der Produkte sind als Zielgrößen der Zuckergehalt und die Trockenmasse des Zuckersaftes und die daraus zu bestimmende Saftreinheit sowie der Trockenmassegehalt der Bagasse zu erfassen. Zur Bewertung des Prozesses sind weiterhin die Massenströme von Ausgangsmaterial und Produkten zu ermitteln, um die Kenngrößen Abpressgrad und Zuckerextraktion bestimmen zu können. Darüber hinaus soll auch der Energiebedarf zur Materialverarbeitung erfasst werden. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass Abweichungen zwischen im Labor- und

Technikumsmaßstab ermittelten Werten zum Energiebedarf im Vergleich zu größeren Praxisanlagen zu erwarten sind.

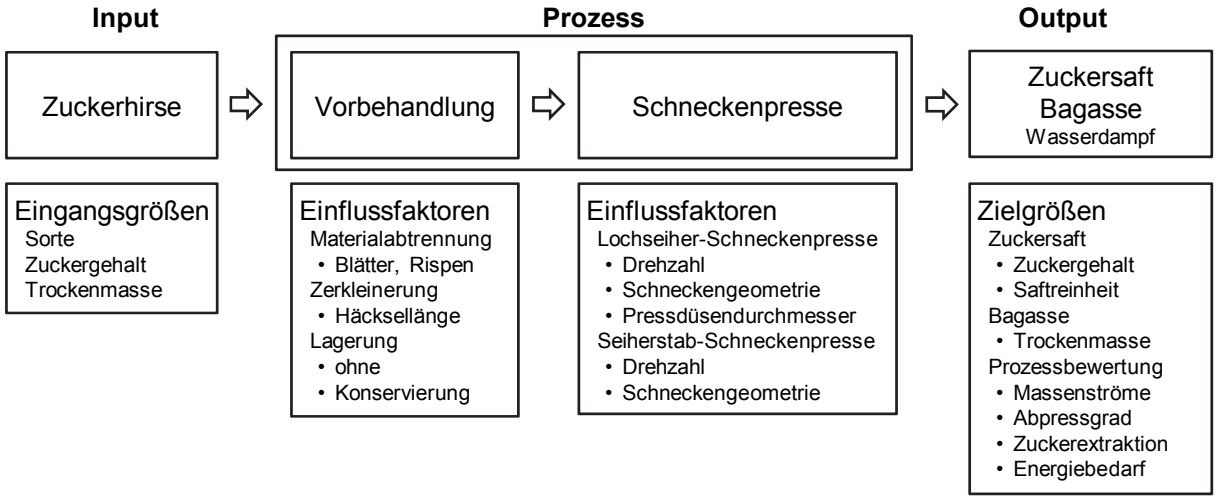


Abbildung 43: Systemmodell mit Eingangsgrößen, Einflussfaktoren und Zielgrößen der Zuckersaftgewinnung aus Zuckerhirse mit Schneckenpressen

Ziel der Untersuchung ist, bestimmte Parameter im Bereich der Eingangs- und Einflussgrößen zu variieren, um deren Auswirkungen auf die Produkt- und Prozessqualität bewerten zu können. Dadurch sollen für den Prozess notwendige Anforderungen an das Ausgangsmaterial sowie optimale Anlageneinstellungen bzw. Betriebsbedingungen ermittelt werden, welche eine effiziente Verarbeitung ermöglichen.

9.1.1 Saftgewinnung mit einer Lochseiher-Schneckenpresse

Für die Saftgewinnung wurde eine doppelte Lochseiher-Schneckenpresse vom Typ KOMET DD85G der Firma IBG Monforts Oekotec GmbH & Co ausgewählt, die mit zwei parallelen Presseinheiten ausgestattet ist. Die Presse wird üblicherweise zur Gewinnung von Pflanzenölen eingesetzt und kann unter Verwendung beider Presseinheiten einen Stundendurchsatz von 20 bis 50 kg/h erreichen, je nach Art und Schüttgewicht des Pressgutes [127]. Für die Pressversuche wurde nur eine der beiden Einheiten betrieben, so dass sich die theoretische Verarbeitungskapazität halbiert. Den Aufbau der verwendeten Schneckenpresse zeigt Abbildung 44.

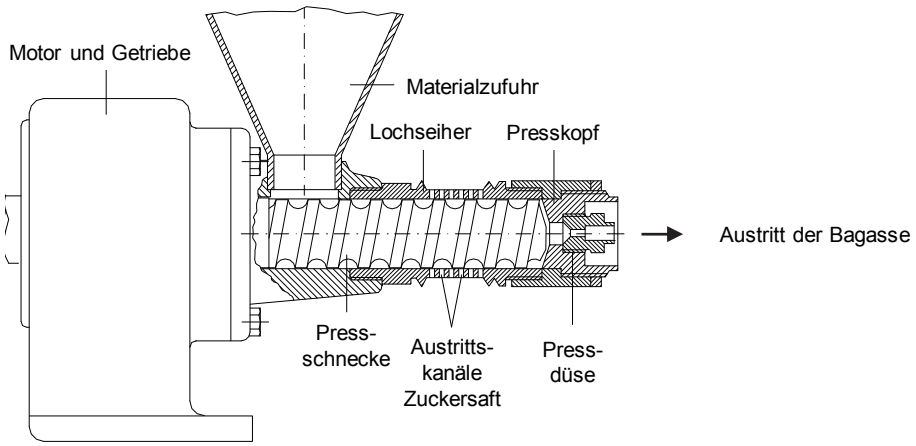


Abbildung 44: Aufbau der verwendeten Lochseiher-Schneckenpresse

Wesentliche Faktoren zur Beeinflussung des Abpressdrucks, der Durchsatzgeschwindigkeit und letztlich des Abpressgrades dieser Lochseiher-Schneckenpresse sind folgende Parameter:

- Durchmesser der Pressdüse
- Geometrie der Schnecke (Windungen und Steigung)
- Drehzahl der Schnecke
- Temperatur des Presskopfes

Ziel der Untersuchungen an der Lochseiher-Schneckenpresse war die Ermittlung des Einflusses verschiedener Einstellungen bei Verarbeitung von zwei unterschiedlichen Zuckerhirsesorten auf die Zielgrößen Abpressgrad, Zuckerextraktion, Saftreinheit und Trockenmassegehalt der Bagasse.

Die Zuckerhirsesorten sollten sich insbesondere hinsichtlich ihres Gehalts an Trockenmasse und Zucker unterscheiden, um die Auswirkungen auf den Abpressgrad und die Zuckerextraktion bewerten zu können. Daneben sollte durch Variation des Pressdüsendurchmessers geprüft werden, welchen Einfluss ein dadurch geänderter Pressdruck auf die Zielgrößen ausübt. Durch Variation von Drehzahl und Geometrie der Pressschnecke sollte ermittelt werden, in welcher Weise sich ein dadurch veränderter Materialdurchsatz auswirkt. Abbildung 45 gibt einen Überblick zum Versuchsplan.

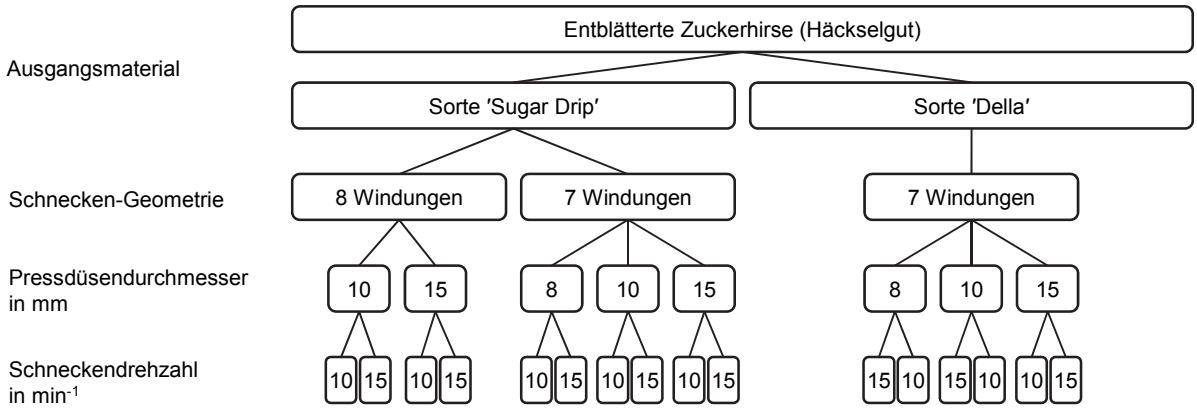


Abbildung 45: Versuchsplan für die Untersuchungen zur Verarbeitung von Zuckerhirse in einer Lochseiher-Schneckenpresse

Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Datenerfassung wurde mit der Presse für einen Zeitraum von 20 Minuten das zu untersuchende Ausgangsmaterial verarbeitet, um konstante Bedingungen der Presse zu erreichen. Im Anschluss erfolgte in drei Wiederholungen für einen Zeitraum von jeweils 10 Minuten die Erfassung der Massenströme der Produkte und der Betriebsbedingungen der Presse. Die Produkte Bagasse und Zuckersaft wurden in zwei Behältnissen aufgefangen und deren Masse vor und nach dem Versuchszeitraum mittels einer Waage (Mettler-Toledo, Typ PG12001-S (Ablesegenauigkeit 0,1 g)) erfasst. Die Masse des Ausgangsmaterials wurde durch die Summe der Produkte errechnet, hierbei bleiben Wasserdampfverluste unberücksichtigt. An der Presse erfolgte die Messung der Temperatur an der Pressdüse durch ein Ni-CrNi-Thermoelement und die Messung der Leistungsaufnahme mit einem Drehstrom-Netzanalysator (Carlo Gavazzi, Typ WM22-DIN).

Die Beschickung der Presse mit dem Ausgangsmaterial erfolgte manuell, da es aufgrund der kleinen Zufuhröffnung verstärkt zur Brückenbildung im Einzugsbereich der Schnecke kam und dadurch kein kontinuierlicher Materialfluss gewährleistet werden konnte.

Die Bestimmung der Trockenmasse des Ausgangsmaterials und der Bagasse erfolgte im Trockenschrank bei 105°C. Eine Beschreibung der Bestimmung der Zuckergehalte des Ausgangsmaterials und der Zuckersäfte ist in Kapitel 4 aufgeführt, bei der Bagasse erfolgte keine Zuckerbestimmung. Das Zuckerhirse Ausgangsmaterial wurde vor der Analyse des Zuckergehaltes im Trockenschrank bei 60 °C getrocknet und im Anschluss mittels einer Laborschneidemühle (Retsch; Typ SM2000) und einer Ultra-Zentrifugalmühle (Retsch; Typ ZM100) auf etwa 0,25 mm zerkleinert. Beim Zuckersaft wurde neben dem Zuckergehalt auch die Dichte des Saftes (ungefiltert) untersucht.

Die Berechnung des Abpressgrades, der Zuckerextraktion und der Saftreinheit erfolgte wie in Kapitel 3.7 beschrieben.

Eine statistische Datenauswertung wurde unter Verwendung der Software Origin 8.6 Pro vorgenommen. Die dabei verwendeten Methoden waren Varianzanalysen (ANOVA), Mittelwertvergleiche nach Tukey und multiple lineare Regressionsanalysen.

9.1.2 Saftgewinnung mit einer Seiherstab-Schneckenpresse

Die Versuche zur Saftgewinnung erfolgten mit einer Seiherstab-Schneckenpresse vom Typ AP08 der Maschinenfabrik Reinartz GmbH & Co. KG. Die Verarbeitungskapazität der Presse für Ölsaaten liegt im Bereich von 30 bis 40 kg/h [180] und damit in etwa doppelt so hoch wie die der verwendeten Presseinheit der Lochseiher-Schneckenpresse.

Der Aufbau zur Durchführung der Versuche ist in Abbildung 46 schematisch dargestellt. Die Massenströme der Produkte Zuckersaft und Bagasse wurden mittels kontinuierlicher Wägung (Bagasse: PESA; Typ WT BR 210/B3 (Ablesegenauigkeit 1 g); PESA; Typ BR100 B2.2 (Ablesegenauigkeit 1 g) und Mettler-Toledo; Typ KB60.2 (Ablesegenauigkeit 1 g)) ermittelt. Daneben wurden in vier Bereichen des Seiherkorbes zwischen den Seiherstäben und beim Austritt der Bagasse die Temperaturen mittels Ni-CrNi-Thermoelementen und die Leistungsaufnahme der Ölpresse durch einen Drehstrom-Netzanalysator (Carlo Gavazzi, Typ WM22-DIN) erfasst. Alle Messdaten wurden mittels eines Datenerfassungssystems auf Basis von LabView mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die Berechnung der Massenströme von Bagasse und Saft erfolgte anhand der zunehmenden Behältergewichte mittels einer einfachen linearen Regressionsanalyse.

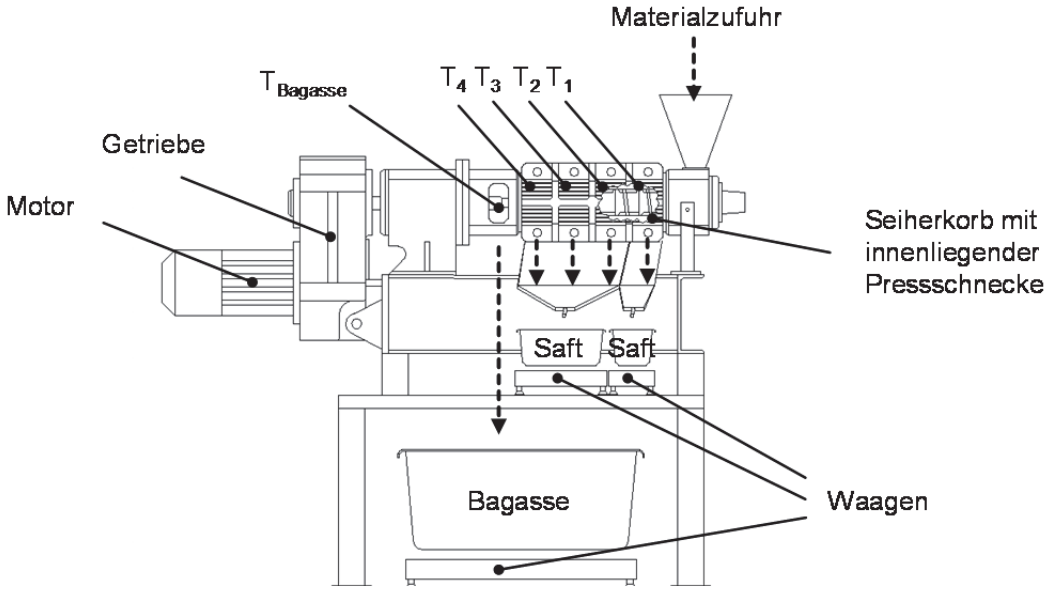


Abbildung 46: Schematischer Versuchsaufbau der Seiherstab-Schneckenpresse

Die Zudosierung des Ausgangsmaterials in den Einzugsbereich der Schneckenpresse erfolgte in ersten Versuchen mit Hilfe eines Behälters mit Gelenkarmaustragssystem. Die Masse des Dosierungssystems, samt Inhalt des Ausgangsmaterials, wurde mittels einer Waage (Mettler-Toledo; Typ KD600 (Ablesegenauigkeit 5 g)) erfasst. Die Berechnung des Massenstroms des Ausgangsmaterials erfolgte wie bei den Produkten Bagasse und Saft durch eine einfache lineare Regressionsanalyse. Da sich das Dosierungssystem in den ersten Versuchen nicht bewährte und keinen kontinuierlichen Materialfluss über längere Versuchszeiten ermöglichte, wurde ein zweites System entwickelt. Hierbei kam eine Austragsschnecke zur Verwendung, an deren Gehäuse ein Behälter zur Aufnahme des Ausgangsmaterials angebracht und die Masse des gesamten Systems mittels einer Kranwaage (HBM; Typ RSCA (Ablesegenauigkeit 0,1 g)) erfasst wurde. Auch hier erfolgte die Bestimmung des Massenstroms mittels Regressionsanalyse aus der abnehmenden Masse des Systems.

Im Rahmen von umfangreichen Vorversuchen wurden in Zusammenarbeit mit dem Pressenhersteller Anpassungsmaßnahmen getroffen, um mit der Ölpresse das Zuckerhirsematerial verarbeiten zu können. Die Maßnahmen beschränkten sich primär auf Änderungen der Geometrie der Pressschnecke. Ausgehend von einer Schneckengeometrie zur Verarbeitung von Raps, mit der eine kontinuierliche Verarbeitung nicht möglich war, wurden verschiedene Konfigurationen entwickelt, mit der die Durchführung der Versuche realisierbar war. Die Pressschnecke mit einer häufig für die Verarbeitung im Rahmen der Versuche verwendeten Bestückung zeigt Abbildung 47.

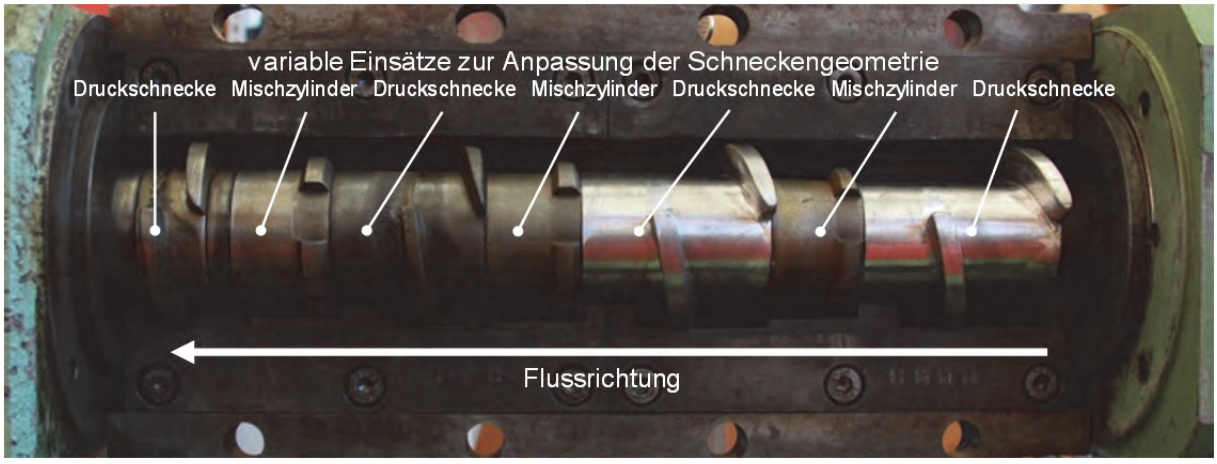


Abbildung 47: Pressschnecke der verwendeten Seiherstabpresse mit variablen Einsätzen zur Anpassung der Schneckengeometrie an das Pressgut

Während der ersten Versuche kam es zum Teil zu einem Rückstau des Zuckersaftes in den Einzugsbereich der Schnecke. Grund hierfür war eine Verjüngung des Querschnitts vom Materialeinzug und der Einzugsschnecke hin zum Seiherkorb. Hier wurde die Zuckerhirse bereits entsaftet und durch einen fehlenden Austritt kam es zum Rückstau. Die Verjüngung erfolgte durch einen ringförmigen Konus. Um dieses Problem zu lösen, wur-

de in mehreren Schritten der Ringkonus durch einen Scheibenseiher ersetzt, um einen zusätzlichen Ausfluss des Saftes zu ermöglichen. Hierbei war bereits eine Verbesserung zu erkennen, jedoch konnte das Problem des Saftrückstaus nicht vollständig behoben werden. Aufgrund dessen wurden im Rahmen einer Neukonstruktion des Materialeinzugs auch in diesem Bereich Seiherstäbe eingebaut und zusätzliche Bohrungen zur Ermöglichung des Saftaustrittes aus der Presse angebracht. Trotz weiterer Verbesserung kam es bei Vorversuchen mit konserviertem Zuckerhirsematerial vereinzelt wiederum zum Zuckersaftrückstau. Deshalb wurde der Ringkonus aus der Presse entfernt und eine kleinere Einzugsschnecke angefertigt, so dass bis zum Seiherkorb ein gleichbleibender Durchmesser des Schneckengehäuses vorhanden war. Mit dieser Konfiguration konnte jedes Ausgangsmaterial weitgehend zuverlässig verarbeitet werden.

Neben dem Saftrückstau kam es bei der Presse im Bereich des Materialeinzuges in unregelmäßigen Abständen zu einer Brückenbildung, die manuell aufgelöst werden musste. Bei der Neukonstruktion des Materialeinzugs wurde zwar bereits der Querschnitt des Einfallschachtes vergrößert, begünstigt durch die Klebrigkeit der gehäckselten Zuckerhirse, konnte das Problem der Brückenbildung im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht gelöst werden.

Versuchsvarianten

In einem ersten Schritt sollte der Einfluss verschiedener Varianten der Schneckengeometrie und des Bagasseauswurfs auf die Zielgrößen untersucht werden. Im Bereich der Schneckengeometrie können die Mischzylinder durch glatte Ringelemente ersetzt werden oder durch gegenläufige Mischschnecken. Da mit den gegenläufigen Mischschnecken bei Vorversuchen ein kontinuierlicher Betrieb kaum möglich war, erfolgten die Untersuchungen nur durch Variation von Mischzylinder und glatten Ringelementen (ohne Mischzylinder). Beim Bagasseauswurf bestand die Möglichkeit den Ringspalt (Spaltgröße 7 mm) durch eine Pelletierscheibe (mit Lochdurchmesser 6 mm) zu ersetzen. Um Einflüsse des Ausgangsmaterials zu minimieren, wurde konservierte Zuckerhirse verwendet und in einem Zeitraum von sechs Wochen verarbeitet. Die Drehzahl der Schneckenpresse betrug bei allen Versuchen 20 min^{-1}. Eine Übersicht zu den Versuchen gibt Abbildung 48.

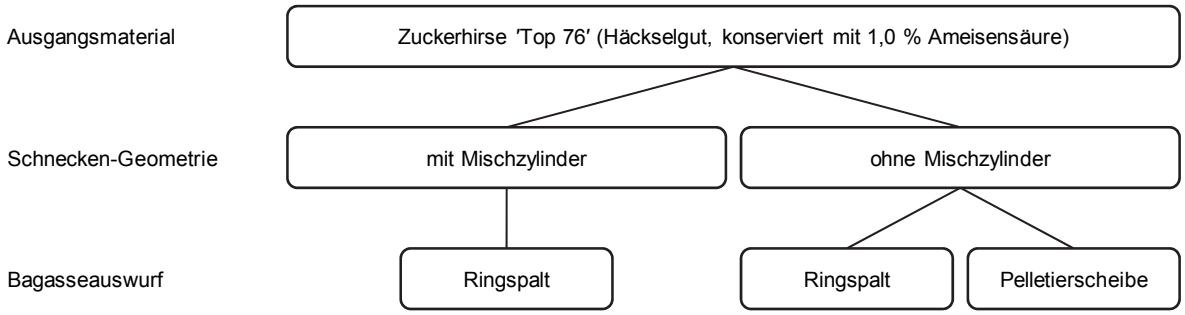


Abbildung 48: Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Schecken-Geometrien und Varianten des Bagasseauswurfs einer Seiherstab-Schneckenpresse

Weiteres Ziel der Untersuchung war es, den Einfluss von frischem Ausgangsmaterial mit unterschiedlichem Erntetermin und damit variierendem Trockenmasse- und Zuckergehalt auf den Verarbeitungsprozess und die Produkte zu untersuchen. Hierzu wurde an fünf Ernteterminen im Zeitraum von 20 Tagen Material mit einem selbstfahrenden Feldhäcksler geerntet und umgehend verarbeitet. Die Häcksellänge betrug dabei im Regelfall 20 mm, in einer Variante 10 mm. Dadurch sollte auch der Einfluss einer wechselnden Häcksellänge untersucht werden. Daneben erfolgte zu zwei Ernteterminen vor der Zerkleinerung eine Abtrennung von Blättern und Rispen. Da eine Verarbeitung am gleichen Tag des jeweiligen Erntetermins nicht möglich war, erfolgte die Beerntung, Materialabtrennung, Zerkleinerung und Pressung immer am Folgetag des eigentlichen Erntetermins. Zur Zerkleinerung kam ein Laborhäcksler zum Einsatz, der keine fest einstellbare Häcksellänge besitzt (durchschnittliche Häcksellänge etwa 10 bis 20 mm). Abbildung 49 gibt einen Überblick zu den Versuchsvarianten.

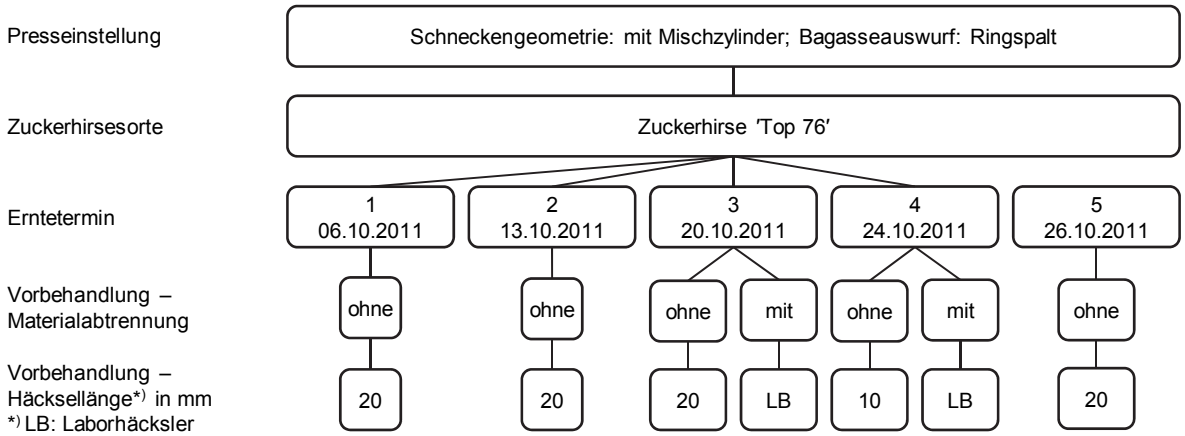


Abbildung 49: Versuchsplan zur Ermittlung des Einflusses einer vorherigen Materialabtrennung auf die Verarbeitung von Zuckerhirse in einer Seiherstab-Schneckenpresse

Da sich bereits im Rahmen der Konservierungsversuche (vgl. Kapitel 8) abzeichnete, dass die Konservierung der Zuckerhirse mit Ameisensäure eine vielversprechende Möglichkeit darstellt, um die Kampagnenzeit zur Verarbeitung zu verlängern, war es Ziel des letzten Teilschrittes, Erfahrungen mit der Verarbeitung von konservierter Zuckerhirse zu sammeln. Dabei kam konserviertes Ausgangsmaterial zum Einsatz, welches zu unterschiedlichen Terminen geerntet und mit 1,00 % Ameisensäure konserviert wurde. Hierdurch sollte geprüft werden, ob sich unterschiedliche Trockenmasse und Zuckergehalte bei der Lagerung mit Ameisensäure auf die Verarbeitung und die Produktqualitäten auswirken. Zudem wurde in zwei Varianten die Ameisensäurekonzentration bei der Lagerung variiert, um festzustellen, ob sich dies auf das Ausgangsmaterial und den Verarbeitungsprozess auswirkt. Hierzu wurde Zuckerhirse-Ausgangsmaterial mit zwei verschiedenen Häcksellängen verwendet (siehe Abbildung 50).

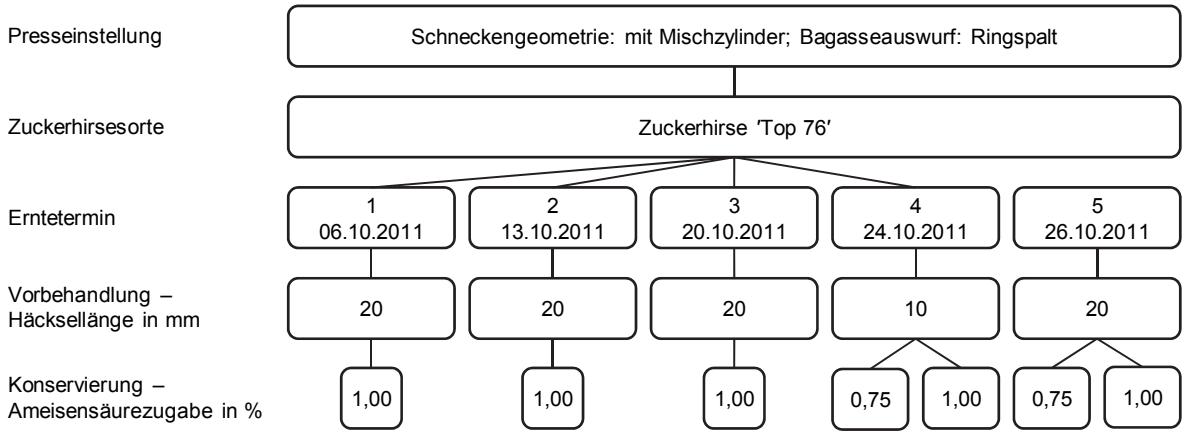


Abbildung 50: Versuchsplan zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Erntezeitpunkte, Vorbehandlungen und Konservierungsarten von Zuckerhirse auf die Verarbeitung in einer Seiherstab-Schneckenpresse

Versuchsdurchführung

Ein Versuchslauf, bei dem die ein- und ausgehenden Massenströme, Temperaturen und die Leistungsaufnahme aufgenommen wurden, umfasste 40 Minuten. Vorher wurde die Presse für eine Dauer von etwa 1 h mit dem Ausgangsmaterial betrieben, um konstante Temperaturen und Betriebsbedingungen zu erreichen. Kurz vor Beginn der Datenaufzeichnung wurden die Saft- und Bagassebehälter getauscht und nach dem Ende des Versuchszeitraums mit dem gewonnenen Material entfernt. Der Saftbehälter wurde geschlossen und der Inhalt durch Schütteln homogenisiert, bevor eine Probe zur Analyse der Safteigenschaften gezogen (Analysenumfang wie bei den Versuchen mit der Lochseiherpresse) bzw. der Zuckersaft für die weiteren Verfahrensschritte zur Ethanolgewinnung abgefüllt wurde. Auch von der Bagasse wurden pro Versuchslauf zwei Proben zur Bestimmung der Trockenmasse entnommen. Die Trockenmasse wurde durch Trocknung bei 80 °C im Vakuumtrockenschrank ermittelt, diese Trocknungsmethode wurde auch zur Bestimmung der Trockenmasse des Ausgangsmaterials verwendet. Daneben wur-

den Proben zur Analyse des Zuckergehaltes gezogen. Die Aufbereitung erfolgte mittels Gefriertrocknung und Zerkleinerung in einer Laborschneidemühle (Retsch; Typ SM2000) und einer Ultra-Zentrifugalmühle (Retsch; Typ ZM100). Die Analyse des Zuckergehalts erfolgte wie beim Ausgangsmaterial mittels der Hausmethode zur extraktiven Zuckerbestimmung (siehe Kapitel 4.2).

Abweichend zur Vorgehensweise bei der Lochseiher-Schneckenpresse, wurde der Massenstrom des Ausgangsmaterials direkt gemessen und musste nicht durch Addition der Produkte berechnet werden. Die Berechnung der abgetrennten Masse erfolgte durch Subtraktion des Massenstroms der feuchten Bagasse ($\dot{m}_{B,f}$) vom Massenstrom des feuchten Ausgangsmaterials ($\dot{m}_{A,f}$), dadurch zählt entweichender Wasserdampf mit zum abgepressten Produkt und wird bei der Bestimmung des Abpressgrades nicht vernachlässigt.

Der Abpressgrad wurde wie folgt berechnet:

$$APG = \frac{\dot{m}_{A,f} - \dot{m}_{B,f}}{\dot{m}_{A,f}} \qquad 9\text{-}1$$

Die Zuckerextraktion wurde auf Basis der Zuckergehalte in den Produkten Zuckersaft ($\dot{m}_{Z,S}$) und Bagasse ($\dot{m}_{Z,B}$) wie folgt berechnet:

$$ZE = \frac{\dot{m}_{Z,S}}{\dot{m}_{Z,S} + \dot{m}_{Z,B}} \qquad 9\text{-}2$$

Die Bestimmung der Saftreinheit erfolgte nach Gleichung 3-4.

9.2 Ergebnisse Lochseiher-Schneckenpresse

Ausgangsmaterial der Versuche war Zuckerhirse der Sorten 'Sugar Drip' und 'Della'. Die Zuckerhirse 'Sugar Drip' stammte aus Gewächshausversuchen und wurde ohne Blätter und Rispen bei + 6 °C für 24 bis 30 Tage vor der Verarbeitung zwischengelagert. Die Zuckerhirse der Sorte 'Della' konnte aus Feldanbauversuchen zur Verfügung gestellt werden. Auch hier wurden Blätter und Rispen entfernt, um eine Materialart bereitzustellen, welche der aus einem Zuckerrohrernter gleich kommt. Die Zuckerhirse der Sorte 'Della' wurde innerhalb von zwei Tagen verarbeitet, aufgrund dessen erfolgte keine gekühlte Lagerung. Unmittelbar vor Versuchsbeginn wurde das Material mit einem Scheibenradprobenhäcksler zerkleinert.

Der TM-Gehalt der zerkleinerten Zuckerhirse der Sorte 'Sugar Drip' betrug 24 % und der Sorte 'Della' 21 %. Da sich im Rahmen der Untersuchung die Trocknungsmethode für das Ausgangsmaterial zur Vorbereitung auf die Zuckeranalyse als ungeeignet erwies, wurden die Ergebnisse der Zuckeranalysen verworfen. Eine Angabe dieser Werte erfolgt daher nicht.

In Abbildung 51 ist der sich ergebende Materialdurchsatz der Lochseiherpresse für unterschiedliche Düsendurchmesser und Drehzahlen bei Verwendung der Schneckengeometrie mit sieben Windungen dargestellt. Erwartungsgemäß ergibt sich zumeist mit der niedrigeren Drehzahl ein geringerer Durchsatz. Die Variation des Pressdüsendurchmessers wirkte sich bei den beiden Drehzahlen unterschiedlich auf den Durchsatz aus, bei einer Drehzahl von 15 min^{-1} waren für die Düsendurchmesser von 8 und 15 mm keine Differenzen hinsichtlich des Durchsatzes feststellbar. Bei der Schneckendrehzahl von 10 min^{-1} war mit dem größeren Düsendurchmesser von 15 mm ein etwas höherer Materialdurchsatz festzustellen als mit einem Düsendurchmesser von 10 mm. Mit der 8 mm Pressdüse war keine Verarbeitung des Materials möglich, hier kam es zu Verstopfungen mit der Folge, dass kein Material mehr eingezogen wurde.

Eine Varianzanalyse (ANOVA) mit Tukey Mittelwertvergleich über die gesamte Stichprobengröße ergab keine signifikanten Unterschiede des Durchsatzes bei Verarbeitung der Sorte 'Della' und 'Sugar Drip'.

Bei Verwendung der Schneckengeometrie mit acht Windungen war ein geringerer Durchsatz von 0,9 bis 1,3 kg/h zu erreichen. Aufgrund der größeren Anzahl an Windungen ergibt sich eine kleinere Einzugsfläche für das Material, so dass sich in der Folge auch der Durchsatz verringert. Ein systematischer Einfluss des variierenden Pressdüsendurchmessers und der Drehzahl war nicht festzustellen.

Eine Verkleinerung des Lochdurchmessers der Pressdüse und eine damit einhergehende Druckerhöhung in der Presse, führten bei einer Schneckendrehzahl von 15 min^{-1} zu einer Erhöhung des Abpressgrades um etwa 5 %, siehe Abbildung 52. Bei einer Schneckendrehzahl von 10 min^{-1} war dies mit dem Material 'Sugar Drip' ebenfalls festzustellen, bei Verwendung von 'Della' waren keine Unterschiede des Abpressgrades bei verschiedenen Pressdüsen zu ermitteln. Die Versuche mit der 8 mm Pressdüse konnten nicht durchgeführt werden, da am Presskopf Temperaturen von über 100 °C auftraten und ein kontinuierlicher Betrieb der Presse nicht möglich war.

Der Abpressgrad des Materials 'Sugar Drip' mit dem höheren TM-Gehalt lag bei gleicher Presseneinstellung immer unter dem des feuchteren Materials 'Della'. Auch TUROWSKI (1991) [278] stellte bei höherem TM-Gehalt des Ausgangsmaterials niedrigere Abpressgrade fest.

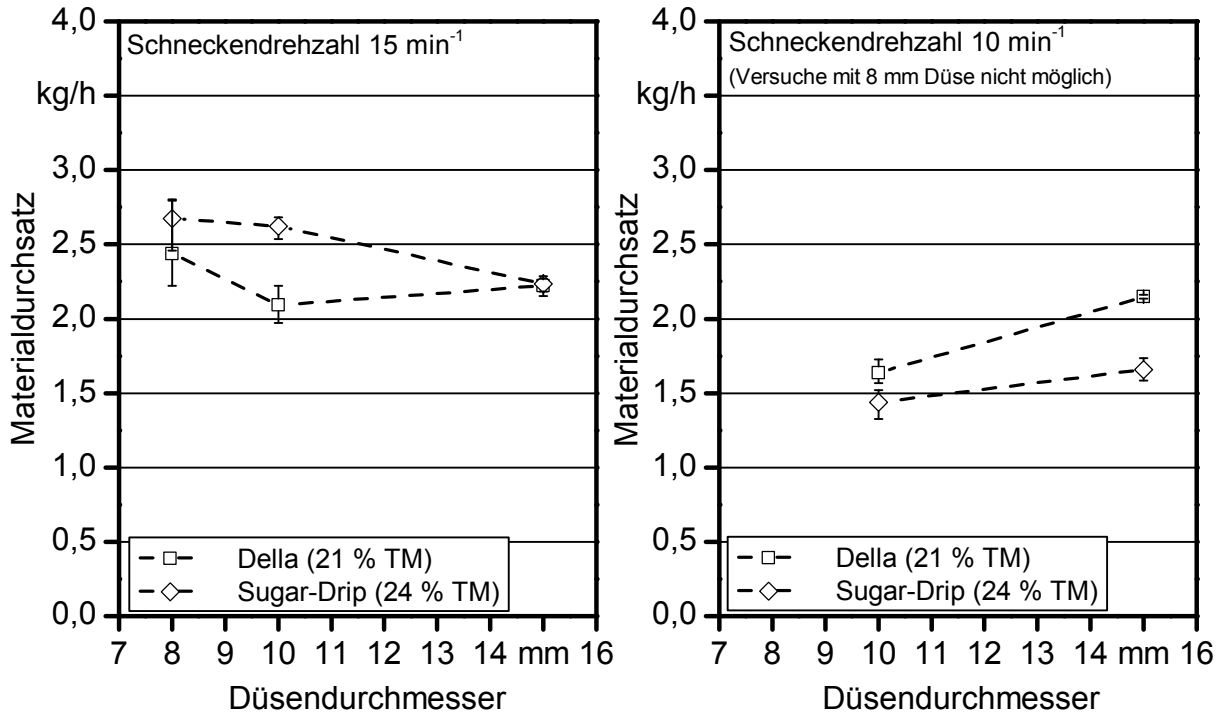


Abbildung 51: Materialdurchsatz (Mittelwerte und Spannweiten) der Lochseiher-Schneckenpresse mit unterschiedlichen Düsendurchmessern und Drehzahlen bei Verarbeitung von zwei entblätterten Zuckerhirsesorten (Schneckengeometrie: 7 Windungen) (n=3)

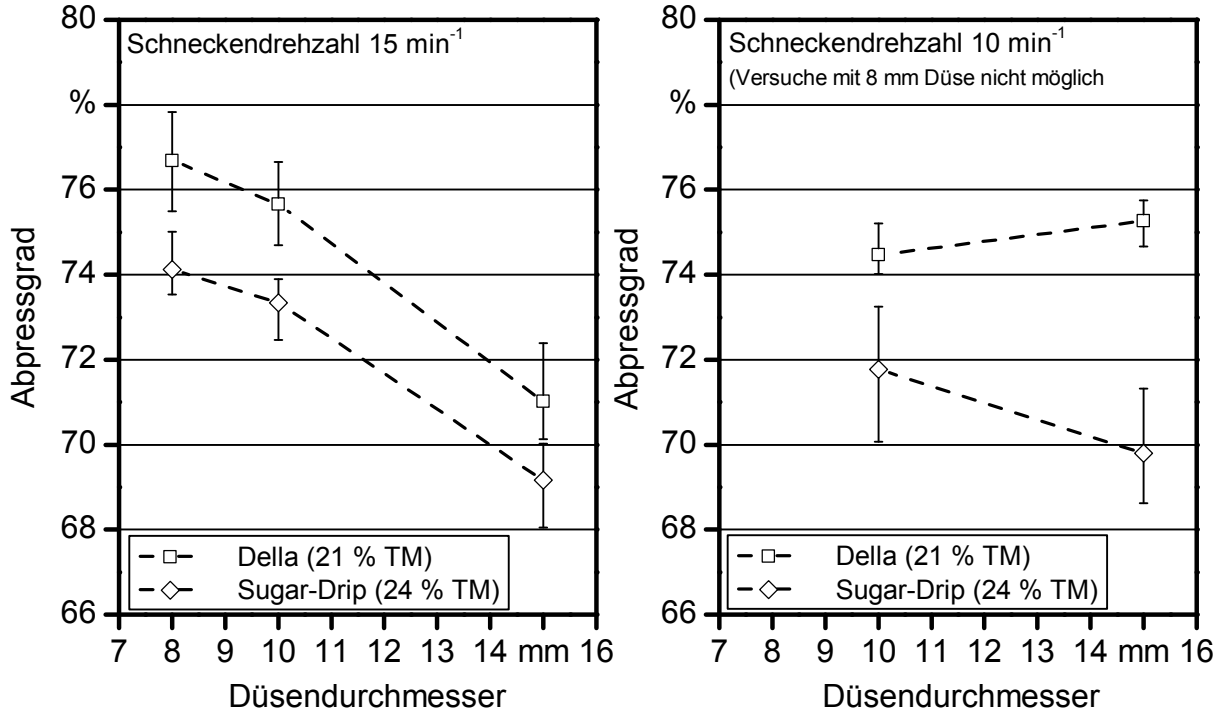


Abbildung 52: Abpressgrad (Mittelwerte und Spannweiten) einer Lochseiher-Schneckenpresse mit unterschiedlichen Düsendurchmessern und Drehzahlen bei Verarbeitung von zwei verschiedenen entblätterten Zuckerhirsesorten (n=3)

Eine Übersicht zu wichtigen Kenngrößen zur Beurteilung der Qualität des aus den Versuchen gewonnen Zuckersaftes gibt Tabelle 46. Für die Zuckersäfte aus der Sorte 'Della', welche zur Ernte einen Trockenmassegehalt von 21 % aufwies, wurden Zuckergehalte von 111 ± 3 g/l ermittelt. Die Zuckersäfte aus dem Material der Sorte 'Sugar Drip' (Trockenmassegehalt von 24 % zur Ernte) wiesen Zuckergehalte im Bereich von 160 ± 10 g/l auf. Dieser im Vergleich zur Sorte 'Della' größere Schwankungsbereich wird durch einen hohen Einzelwert von 170 g/l verursacht. Unter Vernachlässigung dieses Wertes ergeben sich für alle anderen Zuckersäfte dieser Sorte Gehalte von 154 ± 4 g/l. Der Zuckergehalt des Saftes ist somit weitgehend unabhängig von den verwendeten Presseinstellungen und primär abhängig vom Trockenmassegehalt des Ausgangsmaterials und damit von der Ausreifung zur Ernte. Die aus dem Zuckergehalt und der Trockenmasse des Zuckersaftes berechnete Saftreinheit bewegt sich um 78 ± 4 %, Einflüsse von Zuckerhirsesorte oder Presseinstellungen sind nicht festzustellen. Im Vergleich zur Untersuchung von TUROWSKI (1991) [278] an einer Lochseiher-Schneckenpresse wurden um etwa 10 % geringere Saftreinheiten ermittelt. Neben der Verwendung eines anderen Pressentyps, erfolgte die Bestimmung der Trockenmasse des Saftes durch Trocknung bei 105 °C. Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgte eine schonendere Trocknung bei 80 °C im Vakuumtrockenschrank. Da der Trockenmassegehalt direkt in die Berechnung der Saftreinheit einfließt, kann dieses unterschiedliche Vorgehen möglicherweise ebenfalls für die beobachteten Unterschiede verantwortlich sein.

Tabelle 46: Zuckergehalt (Glucoseäquivalent), Dichte, Trockenmasse und Saftreinheit der aus den Versuchen gewonnenen Zuckersäfte

	Presseinstellung		Eigenschaften Zuckersaft			
Sorte	Durchmesser Pressdüse in mm	Schnecken-drehzahl in min^{-1}	Zucker-gehalt in g/l	Dichte ρ (20 °C) in kg/l	TM-Gehalt in %	Saft-reinheit in %
Sugar Drip	8	15	158	1,066	19,8	74,7
Sugar Drip	10	15	150	1,105	18,4	73,8
Sugar Drip	15	15	154	1,066	17,6	82,4
Sugar Drip	10	10	154	1,064	18,1	80,2
Sugar Drip	15	10	170	1,071	20,1	79,4
Della	8	15	121	1,051	15,0	76,6
Della	10	15	114	1,051	14,3	76,1
Della	15	15	108	1,048	13,7	75,2
Della	10	10	124	1,067	14,5	80,3
Della	15	10	109	1,048	13,9	74,5

In Abbildung 53 ist der Trockenmassegehalt der Bagasse in Abhängigkeit vom Abpressgrad dargestellt. Mit steigendem Abpressgrad sind höhere Trockenmassegehalte der Bagasse festzustellen.

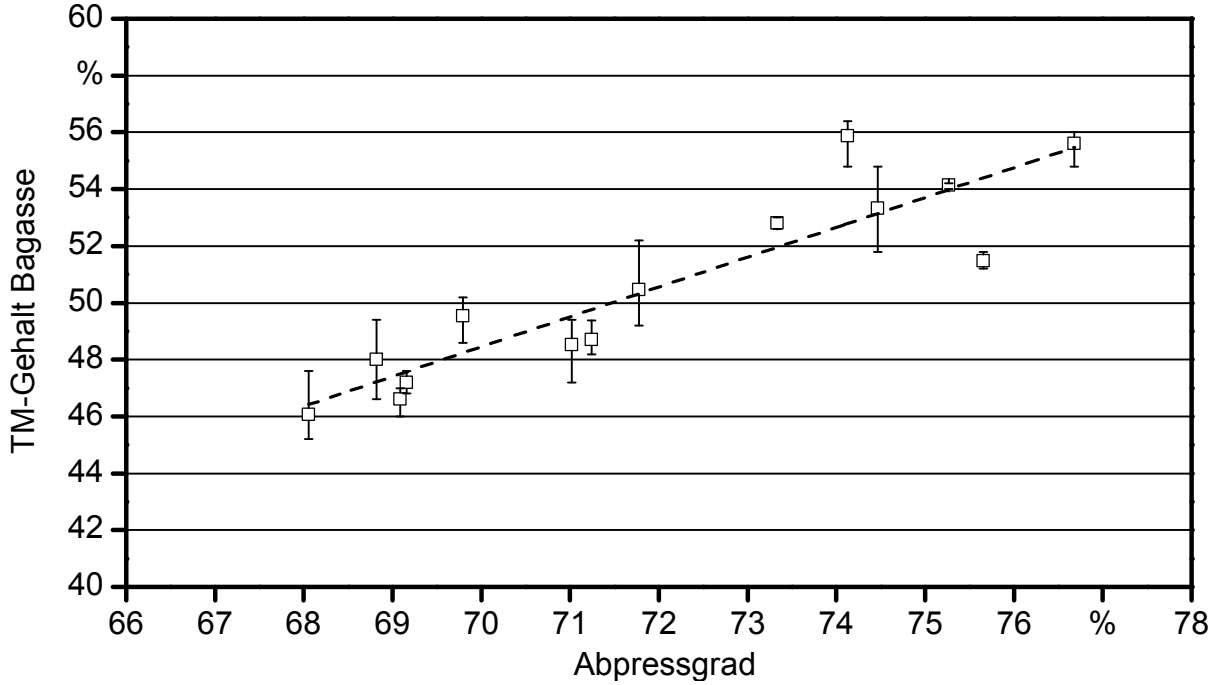


Abbildung 53: TM-Gehalt (Mittelwerte und Spannweiten) der Bagasse in Abhängigkeit vom Abpressgrad bei Verarbeitung von zwei entblätterten Zuckerhirsesorten und verschiedenen Einstellungen einer Lochseiher-Schneckenpresse (n=3)

Aufgrund der nicht verwertbaren Analysen zum Zuckergehalt, kann auch der Zuckerextraktionsgrad nicht berechnet werden. Nach TUROWSKI (1991) [278] kann der Grad der Zuckerextraktion ZE (in %) mit folgender empirisch ermittelten Gleichung anhand des Abpressgrades APG (in %) ermittelt werden:

$$ZE = -0{,}62 + 1{,}13 \cdot APG \qquad 9\text{-}3$$

Anhand der Beziehung lassen sich für die verwendete Lochseiher-Schneckenpresse Zuckerextraktionsgrade von 75 bis 85 % abschätzen.

Der spezifische Energiebedarf zur Verarbeitung von Zuckerhirse lag für die Schneckengeometrie mit sieben Windungen im Bereich von 0,22 bis 0,29 kWh/kg und für die Schneckengeometrie mit acht Windungen bei 0,35 bis 0,43 kWh/kg. Ein systematischer und statistisch signifikanter Einfluss von Schneckendrehzahl und Pressdüsendurchmesser konnte nicht festgestellt werden.

9.3 Ergebnisse Seiherstab-Schneckenpresse

9.3.1 Einfluss verschiedener Presseinstellungen

Ausgangsmaterial für die Untersuchungen war konservierte Zuckerhirse der Sorte 'Top 76' die innerhalb eines Zeitraums von zwei Monaten verarbeitet wurde. Das Material wies im Mittel eine TM-Gehalt von 23,9 % und einen Zuckergehalt (Glucoseäquivalent) von 33,7 % i.d. TM auf (siehe Anhang 2).

In Abbildung 54 sind die erzielten Abpressgrade, die TM-Gehalte der Bagasse, die Zuckerextraktionsraten und die Saftreinheit der Zuckersäfte für die drei verschiedenen Presseinstellungen dargestellt. Die Variation der Schneckengeometrie durch Einsetzen von Mischringen bei gleicher Art des Bagasseaustritts (Ringspalt), hatte keinen signifikanten Einfluss auf diese vier Zielgrößen.

Der Einsatz der Pelletierscheibe führte jedoch zu einer Erhöhung des Abpressgrades von 81,4 % auf 83,4 %. Der TM-Gehalt der Bagasse erhöhte sich von 74 % auf 83 %. Die Zuckerextraktion und die Saftreinheit wurden jedoch nicht durch den Einsatz der Pelletierscheibe beeinflusst. Bei der erreichten Verarbeitungskapazität (im Mittel 17 kg/h) und dem spezifischen Energiebedarf (im Mittel 0,082 kWh/kg) waren keine signifikanten Unterschiede (ANOVA und Tukey Mittelwertvergleich) festzustellen. Grund hierfür sind die Streuungen zwischen den einzelnen Wiederholungen. Dies ist auch auf die während den Versuchen zum Teil immer wieder auftretende Brückenbildung im Materialeinzug zurückzuführen, die manuell aufgelöst werden musste.

Die Temperaturen am Seiherkorb unterschieden sich ebenfalls nicht zwischen den beiden Schneckengeometrien, die Pelletierscheibe führte jedoch in den ersten beiden Bereichen des Seiherkorbs zu um 8 bis 15 K höheren Temperaturen, wie aus Abbildung 55 hervorgeht. In den zwei letzten Abschnitten des Seiherkorbs sind keine Temperaturunterschiede festzustellen. In Materialflussrichtung stieg die Temperatur von Seiherkorbabschnitt 1 bis 3 an, während im letzten Seiherkorbabschnitt zwischen den Seiherstäben ein ähnliches Temperaturniveau herrschte wie in Abschnitt 3. In den letzten beiden Abschnitten war auch verstärkt der Austritt von Wasserdampf zu beobachten. Es ist daher davon auszugehen, dass im Inneren der Presse Temperaturen über dem Siedepunkt von Wasser vorherrschen.

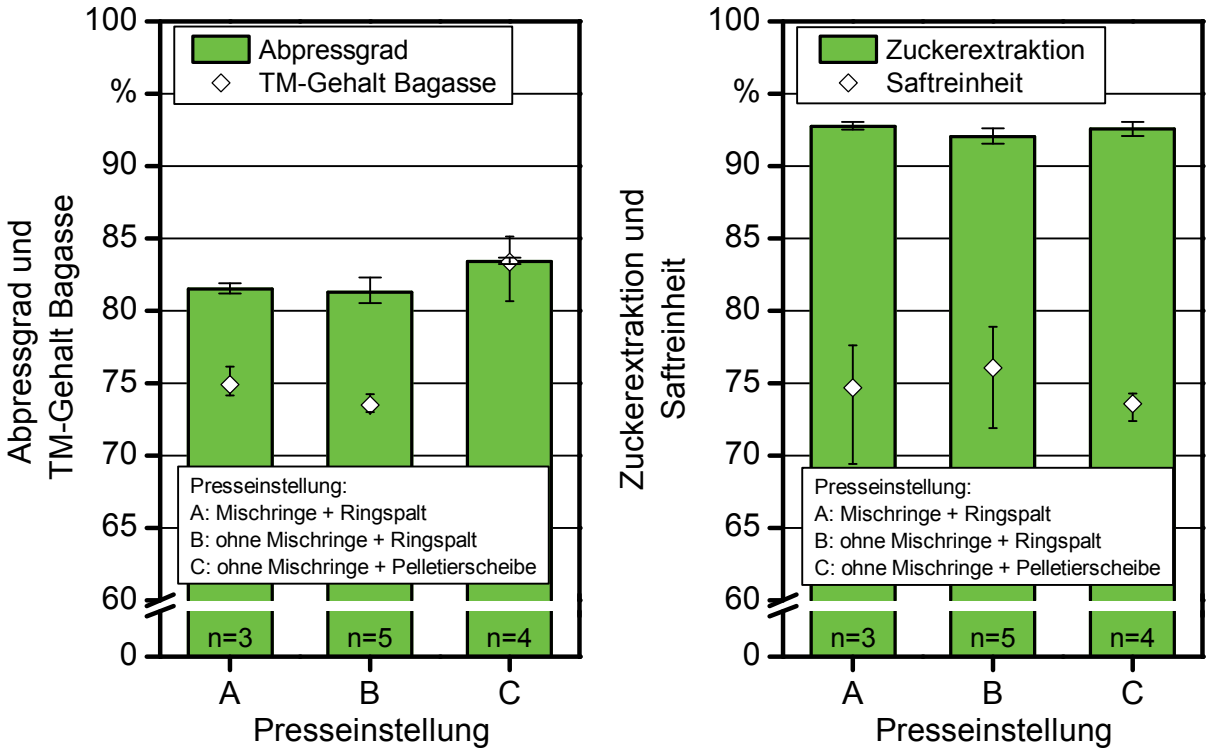


Abbildung 54: Mittelwerte und Spannweiten von Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei verschiedenen Presseinstellungen der Seiherstab-Schneckenpresse

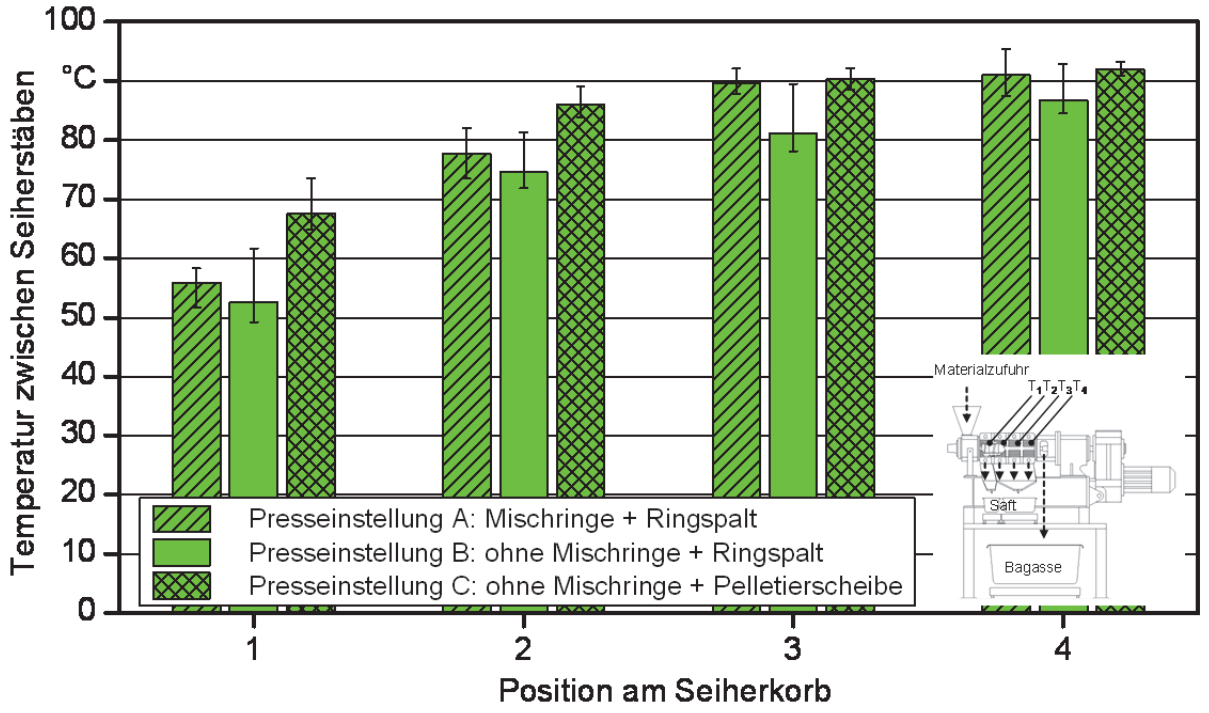


Abbildung 55: Mittelwerte und Spannweiten der Temperaturen zwischen den Seiherstäben an verschiedenen Positionen des Seiherkorbs einer Schneckenpresse bei unterschiedlichen Presseinstellungen

Die Wasserdampfverluste betrugen bei den beiden Varianten mit Ringspalt 7,1 Masse-% und beim Einsatz der Pelletierscheibe 9,8 Masse-%. Das höhere Temperaturniveau durch Verwendung der Pelletierscheibe führt somit zu höheren Wasserdampfverlusten. Die Unterschiede bei den Wasserdampfverlusten erklären auch den leicht höheren Abpressgrad der Variante mit Pelletierscheibe bei gleicher Zuckerextraktion. Auch die Temperatur der Bagasse lag beim Austritt der Presse bei verwendeter Pelletierscheibe um ca. 10 K über der Temperatur bei Verwendung des Ringspaltes (im Mittel 74 °C). Trotz des insgesamt höheren Temperaturniveaus beim Einsatz der Pelletierscheibe, sind keine negativen Auswirkungen auf Zuckerextraktion und Saftreinheit festzustellen. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei allen Varianten über 90 % der Gesamtmasse des Zuckersaftes aus dem ersten Abschnitt des Seiherkorbs austraten und Veränderungen am Bagasseauswurf an dieser Stelle keinen Einfluss zeigten.

9.3.2 Einfluss des Frischmaterials

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Erntetermine und unterschiedlicher Häcksellänge diente Zuckerhirse der Sorte 'Top 76'. In Tabelle 47 sind die TM-Gehalte und der Zuckergehalt des verwendeten Ausgangsmaterials für die verschiedenen Erntetermine aufgeführt.

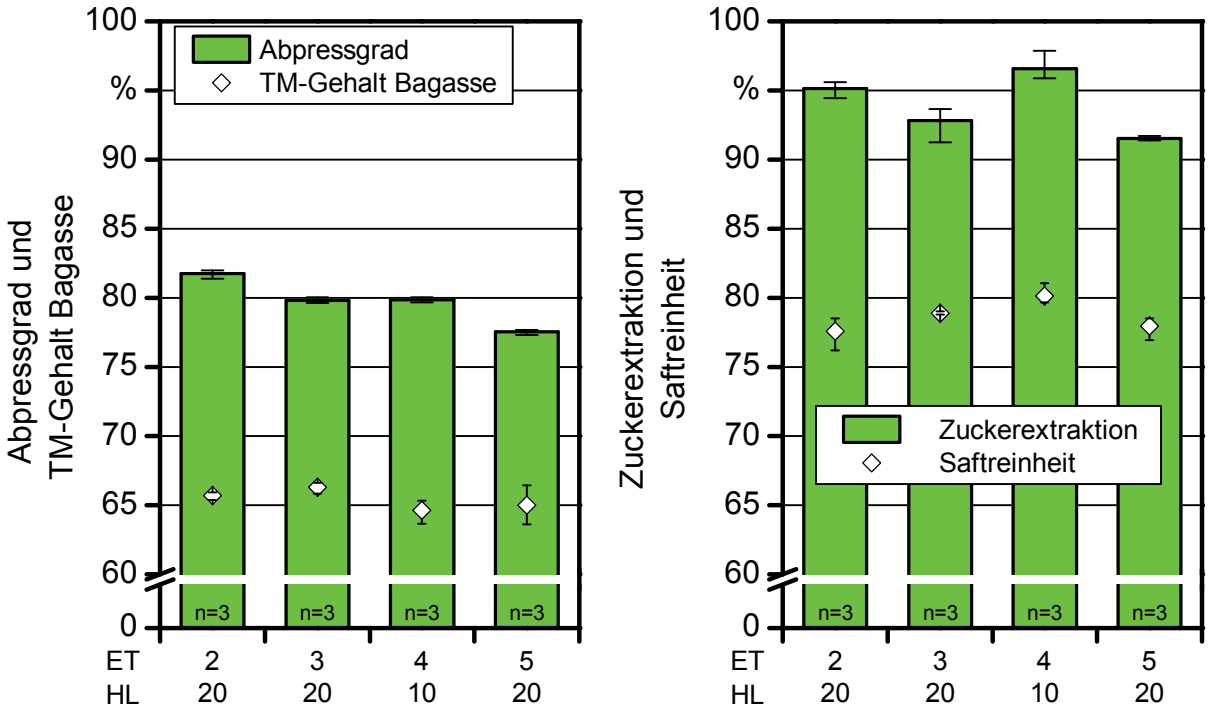
Tabelle 47: Mittelwerte und Standardabweichungen von Trockenmasse und Zuckergehalt der verwendeten Zuckerhirse zu den verschiedenen Erntetermi-nen

Erntetermin*	Datum	Häcksellänge in mm	TM-Gehalt in %	Zuckergehalt (Glucoseäquivalent) in % i.d. TM
2	13.10.2012	20	21,6 ± 0,2 (n=3)	35,2 ± 0,5 (n=3)
3	20.10.2012	20	23,4 ± 0,5 (n=3)	36,8 ± 1,0 (n=3)
4	24.10.2012	10	22,6 ± 0,1 (n=2)	36,0 ± 0,2 (n=3)
5	26.10.2012	20	24,9 ± 0,4 (n=3)	36,1 ± 0,9 (n=3)

** bei Erntetermin 1 konnte die Zuckerhirse nicht abgepresst werden*

Abbildung 56 zeigt den erzielten Abpressgrad, den TM-Gehalt der Bagasse, die Zuckerextraktion und die Saftreinheit für die verschiedenen Varianten. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen mit der Lochseiherpresse und den Ergebnissen von TUROWSKI (1991) [278], wurde auch hier eine Abnahme des Abpressgrades mit späterem Erntetermin und damit zunehmendem TM-Gehalt festgestellt. Mit dem feuchteren Ausgangsmaterial wurden Abpressgrade von etwa 82 % und mit dem Material des letzten Erntetermins 78 % erzielt. Ein signifikanter Einfluss auf den TM-Gehalt der Bagasse ist nicht festzustellen. Der Grad der Zuckerextraktion betrug im Mittel 94 %. Die Saftreinheit lag im Mittel bei 79 % und unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Varianten kaum. Auch die

kürzere Häcksellänge des Ausgangsmaterials zeigte kaum einen Einfluss auf die Zielgrößen. Die Wasserdampfverluste betrugen zwischen 2,0 und 4,8 %.



ET: Erntetermin; HL: Häcksellänge

Abbildung 56: Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei Verarbeitung von Zuckerhirse der Sorte 'Top 76' mit unterschiedlichem Erntetermin und Häcksellänge in einer Seiherstab-Schneckenpresse (Mittelwerte und Spannweiten)

Um den Einfluss des TM-Gehalts des Ausgangsmaterials auf die Verarbeitung besser einschätzen zu können, werden im folgenden Ergebnisse aus den Voruntersuchungen mit einbezogen, bei denen gleiche Presseinstellungen verwendet wurden. Informationen zu den Eigenschaften des Ausgangsmaterials sind in Anhang 3 aufgeführt. Neben dem aus der Literatur bekannten Abpressgrad als Bewertungsgröße wird eine neue Größe mit eingeführt, um die Abtrennungseffizienz (AE) der Presse besser einschätzen zu können. Die Abtrennungseffizienz wird definiert als das Verhältnis des erreichten Abpressgrades (APG) zum maximal theoretisch möglichen Abpressgrad (APG_{max}):

$$AE = \frac{APG}{APG_{max}} \qquad 9\text{-}4$$

Der maximal mögliche Abpressgrad wird erreicht, wenn der gesamte Zuckersaft, definiert als die Summe der Masse des Wassers und der Masse des Zuckers in der Trockenmasse des Ausgangsmaterials, abgetrennt wird.

Der maximal mögliche Abpressgrad wird wie folgt, aus der Masse des trockenen ($m_{A,t}$) und feuchten ($m_{A,f}$) Ausgangsmaterials und der Zuckermasse (m_Z) berechnet:

$$APG_{max} = 1 - \left(\frac{m_{A,t}}{m_{A,f}} \cdot \left(1 - \frac{m_Z}{m_{A,t}} \right) \right) \qquad 9\text{-}5$$

In Abbildung 57 sind der Abpressgrad, die Abtrenneffizienz und die Zuckerextraktionsrate in Abhängigkeit vom TM-Gehalt des Ausgangsmaterials dargestellt. Eine lineare Regressionsanalyse ergibt eine signifikante Abhängigkeit des Abpressgrades vom TM-Gehalt. Die Abtrenneffizienz und die Zuckerextraktionsrate werden jedoch nicht signifikant beeinflusst und zeigen sich somit unabhängig vom Zuckerhirse-Ausgangsmaterial. Hinsichtlich der absoluten Höhe bewegt sich die Abtrenneffizienz mit 92 bis 95 % im Bereich der Zuckerextraktionsraten. Diese beiden Größen erscheinen somit gleichwertig geeignet, um die Qualität der Anlagentechnik bezüglich Ihrer Effizienz zu bewerten. Der Abpressgrad, welcher in bisherigen Arbeiten zur Bewertung der Pressung von Zuckerhirse herangezogen wurde, erscheint aufgrund seiner Abhängigkeit vom TM-Gehalt des Ausgangsmaterials für eine Bewertung der Anlagentechnik nicht geeignet.

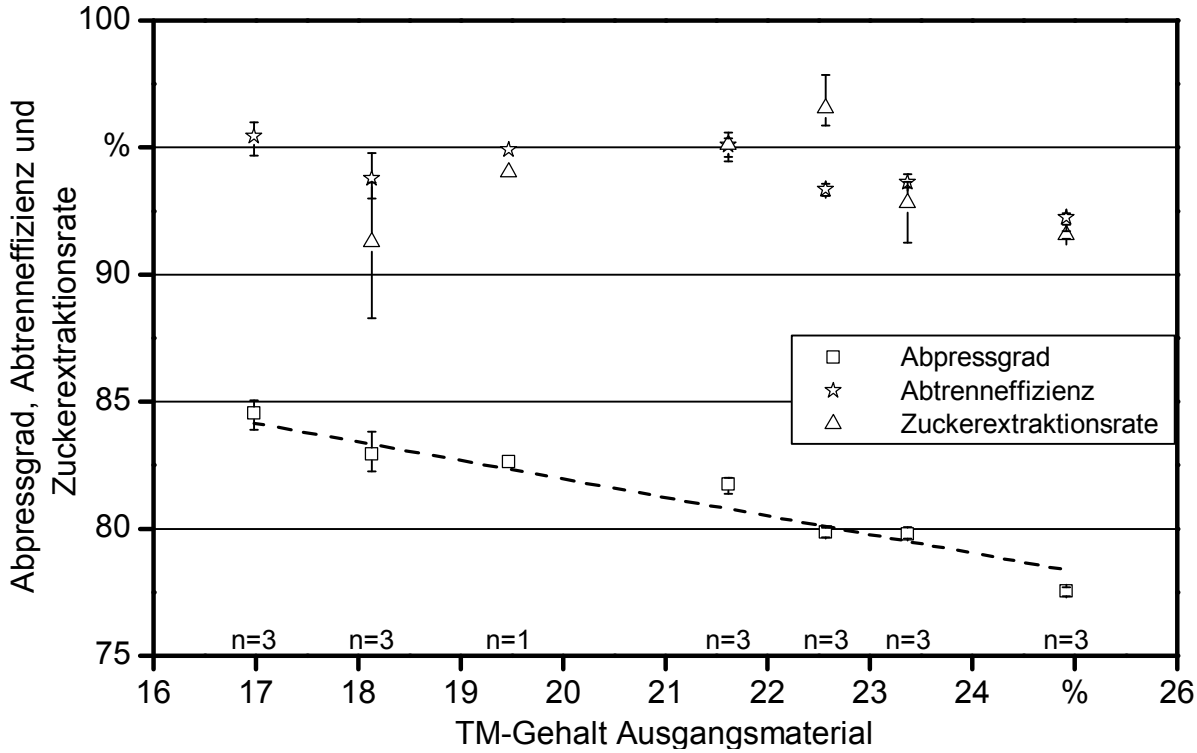


Abbildung 57: Mittelwerte und Spannweiten des Abpressgrades, der Abtrenneffizienz und der Zuckerextraktionsrate in Abhängigkeit vom TM-Gehalt des Ausgangsmaterials bei vergleichbaren Presseneinstellungen der Seiherstab-Schneckenpresse

Zur Klärung des Einflusses einer vorherigen Abtrennung von Blättern und Rispen auf die Zielgrößen wurde an einzelnen Tagen Material manuell entblättert, im Anschluss zerkleinert und verarbeitet. Aufgrund der vorherigen Entblätterung wurde die Zerkleinerung mit einem Laborhäcksler vorgenommen. Um einschätzen zu können, welche Unterschiede sich hierdurch in der physikalischen Beschaffenheit zum anders aufbereiteten Material ergeben, wurden Siebanalysen durchgeführt. Abbildung 58 zeigt den kumulativen Partikelanteil von drei unterschiedlich aufbereiteten Ausgangsmaterialen. Die Variation der Häcksellänge am selbstfahrenden Häcksler von 20 auf 10 mm zeigte keine Auswirkungen auf die kumulative Partikelanzahl. Die Entblätterung in Verbindung mit der Zerkleinerung im Laborhäcksler führte ebenfalls nicht in größerem Maße zu einer Änderung der Partikelgrößen. Für die Versuche kann somit von einer in etwa gleichen Partikelgrößenverteilung ausgegangen werden.

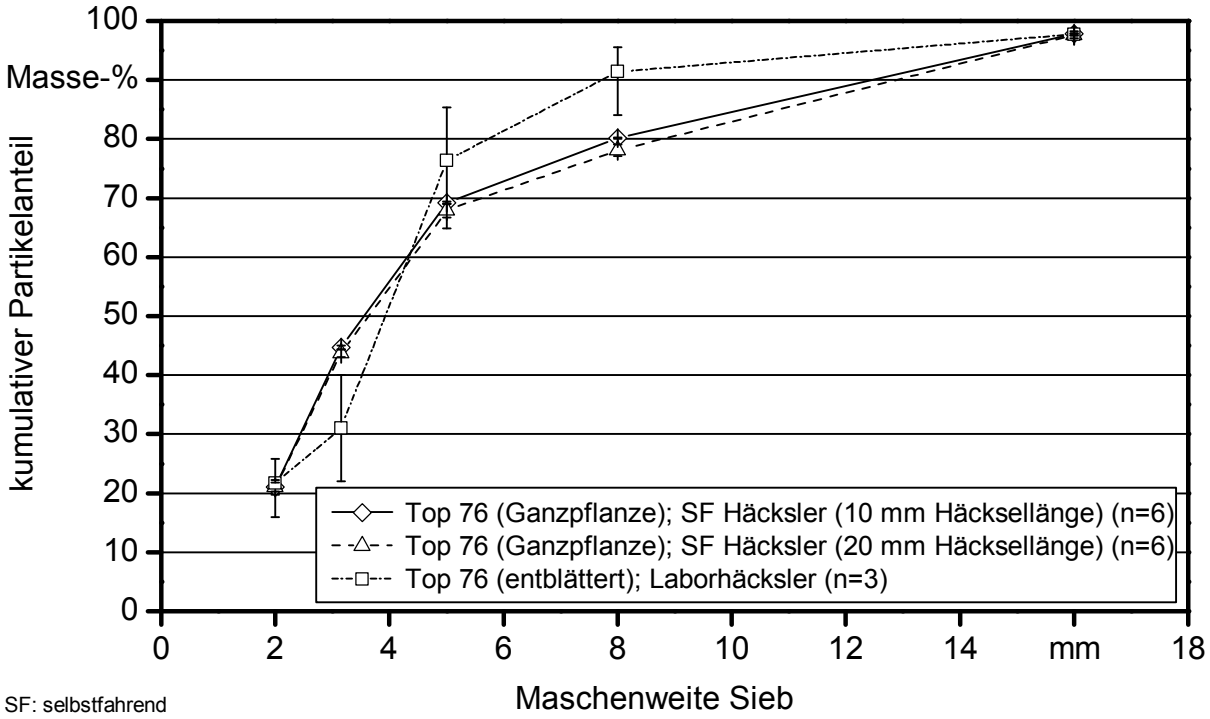


Abbildung 58: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) des gehäckselten Ausgangsmaterials für die Pressversuche zur Untersuchung des Einflusses von vorhergehender Materialabtrennung (Mittelwert und Spannweite)

Den Einfluss einer vorherigen Abtrennung von Blättern und Rispen auf die Zielgrößen Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit zeigt Abbildung 59. Durch die vorherige Materialabtrennung konnten leicht höhere Abpressgrade erzielt werden, bei in etwa vergleichbarem TM-Gehalt des Ausgangsmaterials. Der TM-Gehalt der Bagasse schwankte in einem Bereich von 65 bis 68 %, ein Einfluss der Materialabtrennung ist nicht festzustellen. Auch bei der Zuckerextraktion, die sich zwischen 91 und 92 % bewegte, ist kein Einfluss zu erkennen. Positiv wirkte sich die vorherige Materialab-

trennung auf die Höhe des Zuckergehaltes im Saft aus, der sich von etwa 110 g/l auf 150 g/l (Glucoseäquivalent) erhöhte. Aufgrund dessen wurde auch eine bessere Saftreinheit erzielt, die um etwa 5 bis 10 % über den Varianten ohne Materialabtrennung liegt. Der spezifische Energiebedarf lag im Mittel bei 0,092 kWh/kg, die Mittelwerte der einzelnen untersuchten Varianten unterscheiden sich nicht signifikant.

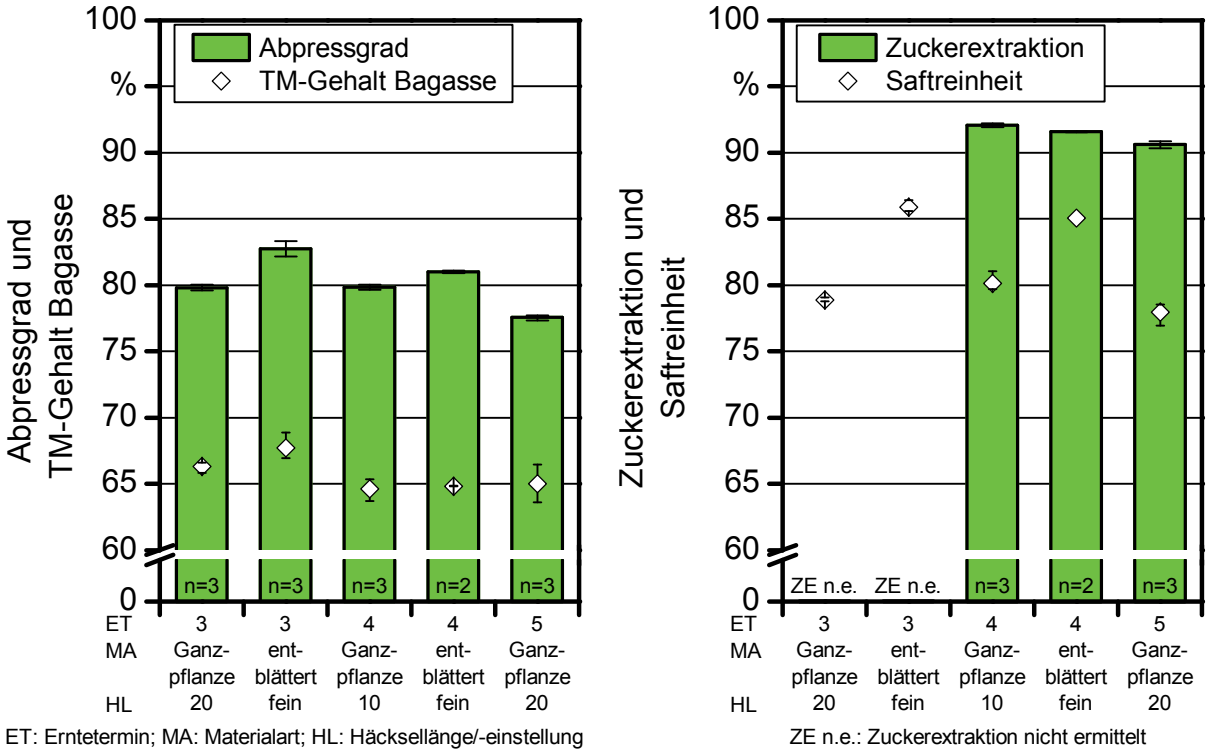


Abbildung 59: Mittelwerte und Spannweiten von Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei verschiedenen Arten an Ausgangsmaterial der Seiherstab-Schneckenpresse (aufsteigend sortiert nach Erntetermin)

Abbildung 60 zeigt den kumulativen Partikelanteil der Bagasse. Durch den Pressvorgang wurde auch das Material weiter zerkleinert. Wurden im Ausgangsmaterial 55 bis 70 % der Masse durch ein Sieb mit einem Lochdurchmesser von 3,15 mm zurückgehalten, so waren es bei der Bagasse nur noch etwa 20 %. Die Partikelgrößenverteilung der Bagasse aus mit unterschiedlichen Längen gehäckseltem Ausgangsmaterial unterscheidet sich kaum, während die Bagasse aus dem entblätterten Material tendenziell einen geringfügig höheren Feinanteil im Bereich von 0,5 bis 1,5 mm aufweist.

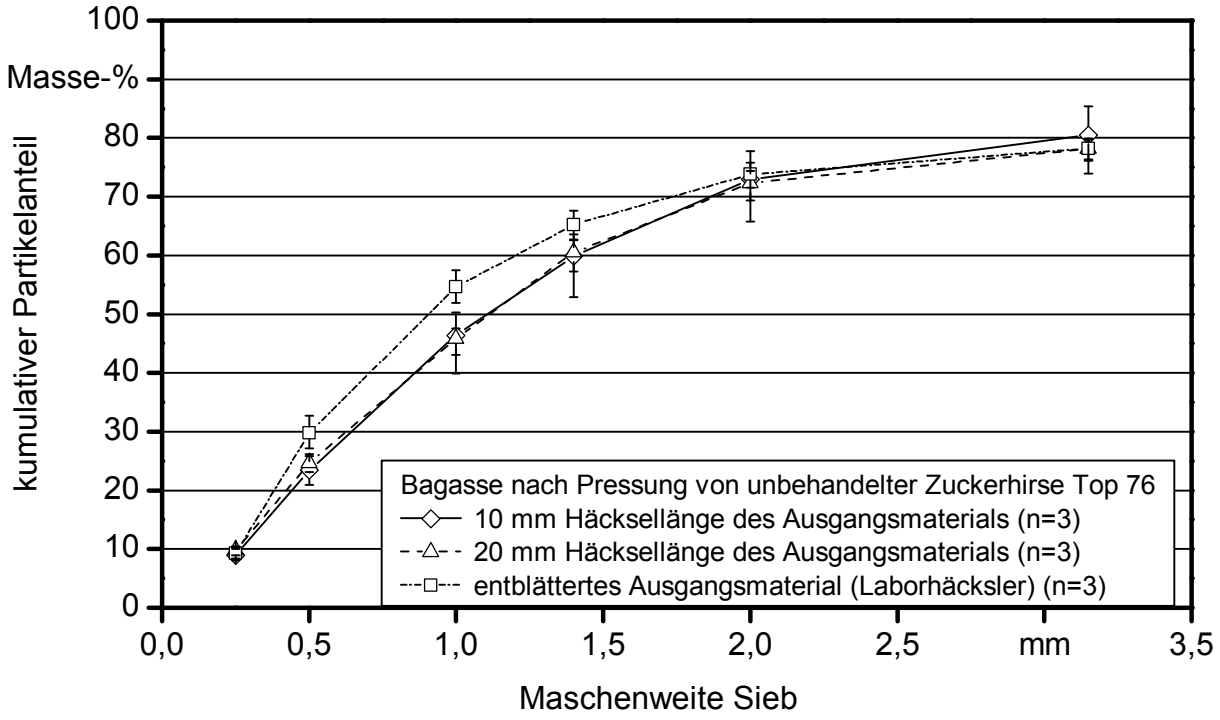


Abbildung 60: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) der Bagasse aus Frischmaterial mit unterschiedlichen Häcksellängen (Mittelwerte und Spannweiten)

9.3.3 Einfluss der Konservierung

Ausgangsmaterial der Versuche ist gehäckselte und mit Ameisensäure konservierte Zuckerhirse (Ganzpflanze) der Sorte 'Top 76'. Weder die Ameisensäurekonzentration von 0,75 und 1,00 Masse-%, noch die unterschiedliche Lagerungsdauer von mindestens 91 bis maximal 155 Tagen zeigten einen Einfluss auf den Zuckergehalt im Ausgangsmaterial. Die Konservierung des Materials war somit erfolgreich. Unterschiede im Zuckergehalt sind auf die unterschiedlichen Erntetermine zurückzuführen.

In Abbildung 61 sind der TM-Gehalt und der Zuckergehalt der für die Pressversuche zur Verfügung stehenden konservierten Zuckerhirse dargestellt.

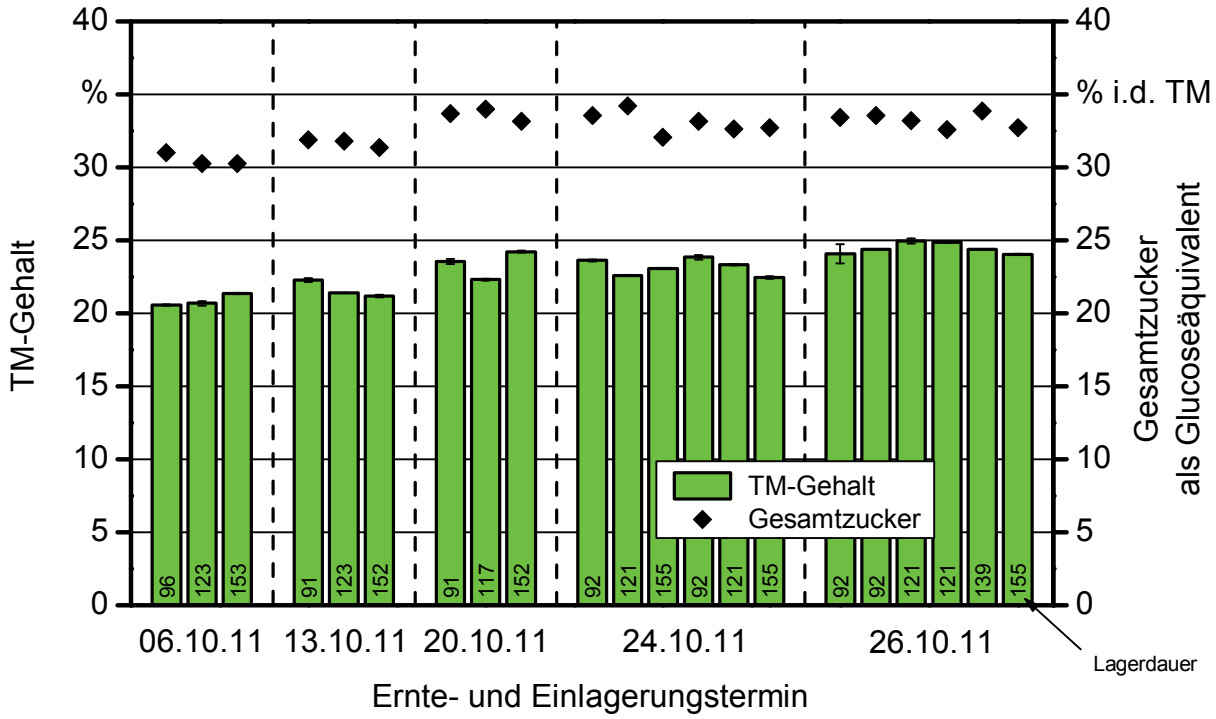


Abbildung 61: TM-Gehalt (Mittelwert und Spannweite) und Gesamtzucker (als Glucoseäquivalent) des konservierten Ausgangsmaterials für die Pressversuche (TM: n=2; Gesamtzucker n=1)

Um zu prüfen, ob sich die Konservierung mit Ameisensäure auf die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials auswirkt, wurden für ausgewählte Varianten Siebanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 62 dargestellt sind. Zwar sind zwischen den einzelnen Proben Unterschiede festzustellen, eine Tendenz, dass es mit zunehmender Lagerdauer in Verbindung mit Ameisensäure zu einer Veränderung der Beschaffenheit des Materials kommt, ist nicht ersichtlich.

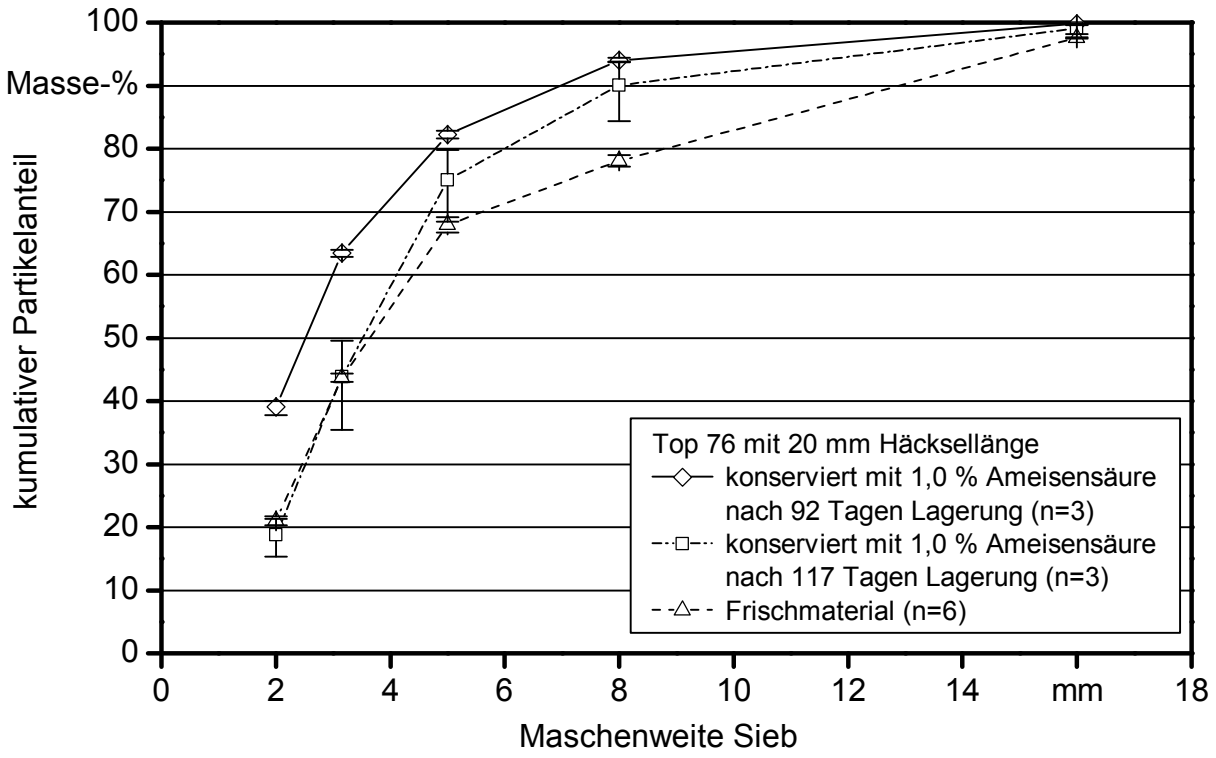
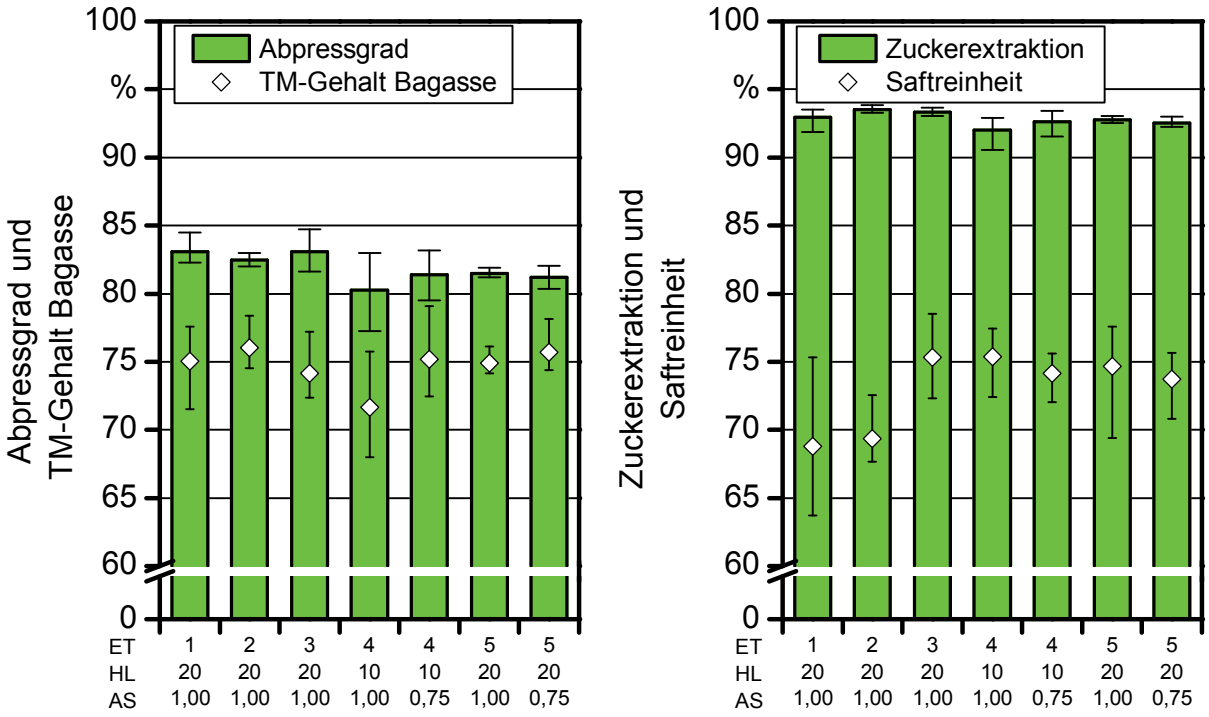


Abbildung 62: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) des konservierten Ausgangsmaterials nach Lagerung für die Pressversuche im Vergleich zum Frischmaterial (Mittelwerte und Spannweiten)

Der Abpressgrad, der TM-Gehalt der Bagasse, die Zuckerextraktion sowie die Saftreinheit der Versuche mit konservierter Zuckerhirse sind in Abbildung 63 dargestellt. Eine statistische Auswertung (ANOVA und Tukey Mittelwertvergleich) ergibt für keine der dargestellten Zielgrößen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Der Abpressgrad betrug im Mittel 82 % und ist geringfügig höher als bei der direkten Verarbeitung des Frischmaterials (im Mittel 80 %), die Abtrenneffizienz lag mit 97 % ebenfalls mit dem konservierten Material etwas höher als beim Frischmaterial.

Der TM-Gehalt der Bagasse des konservierten Materials (75 %) war deutlich höher als der des direkt verarbeiteten Materials (65 %). Auch die beobachteten Temperaturen an der Presse und damit die Wasserdampfverluste waren bei der Verarbeitung konservierten Materials höher. Bei der Rate der Zuckerextraktion sind keine Unterschiede bei der Verarbeitung von konserviertem und frischem Material festzustellen. Die Zuckerkonzentrationen im Saft mit etwa 110 g/l (Erntetermin 5), sowie die Saftreinheit bewegten sich auf demselben Niveau wie bei der Verarbeitung von Frischmaterial.

Der kumulative Partikelanteil der Bagasse aus konserviertem und frischem Material ist in Abbildung 64 dargestellt. Die Bagasse des frischen und des konservierten Materials mit 92 Tagen Lagerzeit unterscheiden sich kaum, während bei der Bagasse nach 117 Tagen Lagerzeit über 40 % der Partikel das 3,15 mm Sieb nicht passieren konnten. Die in diesem Sieb aufgefangenen Partikel setzten sich aus mehreren kleinen Partikeln zusammen, welche sich zusammenlagerten und durch das Sieben nicht getrennt wurden.



ET: Erntetermin; HL: Häcksellänge; AS: Ameisensäurekonzentration in %

Abbildung 63: Mittelwerte und Spannweiten von Abpressgrad, TM-Gehalt der Bagasse, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei verschiedenen Arten von konserviertem Ausgangsmaterial bei Verarbeitung in einer Seiherstab-Schneckenpresse (n=3)

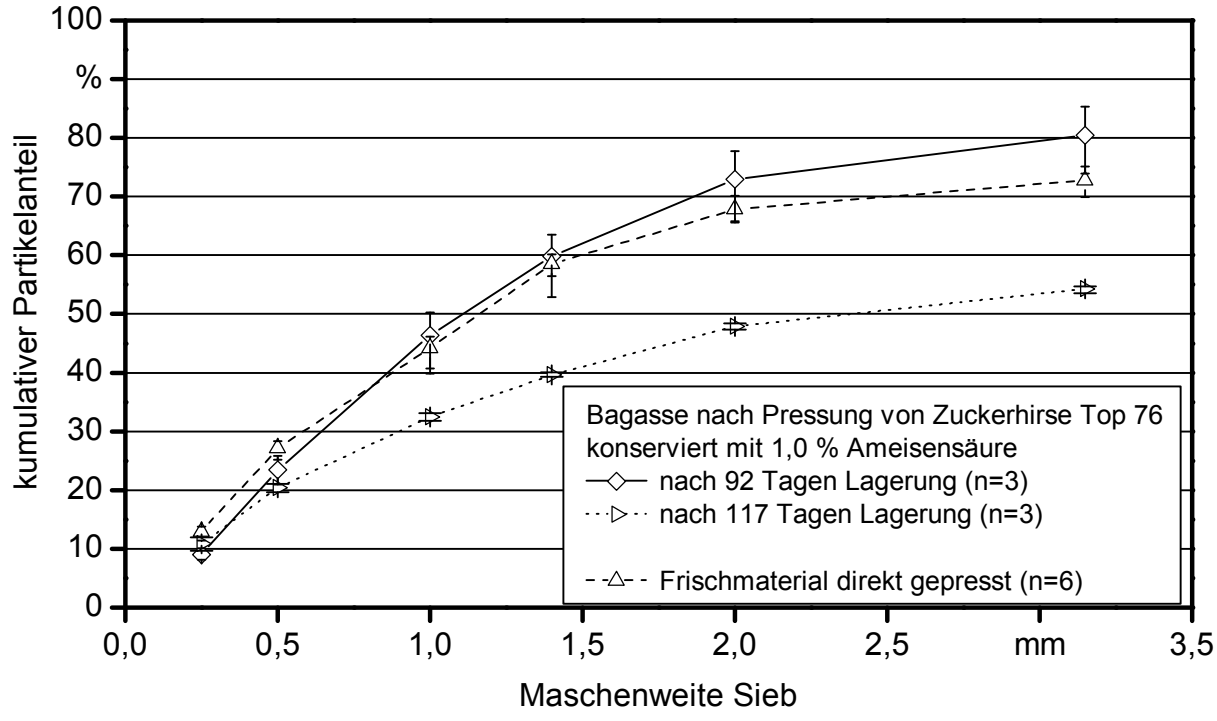


Abbildung 64: Partikelgrößenverteilung (nach Entwurf DIN EN 15149-1) der Bagasse aus konserviertem Ausgangsmaterial im Vergleich zu Bagasse aus dem Frischmaterial (Mittelwerte und Spannweiten)

Die Agglomeration von Partikeln war zum Teil auch bei anderen Bagassen aus konserviertem Material festzustellen, welche eine kürzere Lagerdauer aufwiesen. Ob sich dieses Verhalten durch zunehmende Lagerdauer verstärkt, kann anhand der gewonnen Daten nicht abgeleitet werden. Hierzu wären weitergehende Untersuchungen erforderlich.

Bei der Verarbeitung des mit Ameisensäure konservierten Materials war an einzelnen Bauteilen der Seiherstab-Schneckenpresse ein verstärkter Verschleiß zu beobachten, wie Abbildung 65 zeigt. Auffällig dabei war, dass ein erhöhter Materialabtrag nur bei einzelnen Bauteilen, insbesondere im Bereich der Abstreifer, festzustellen war, während an nachfolgenden Bauteilen (z. B. Mischringe) kein übermäßiger Verschleiß ersichtlich war. Alle Bauteile der Schnecke waren jedoch gehärtet. Gründe für diese Unterschiede konnten im Rahmen der Untersuchung nicht gefunden werden.

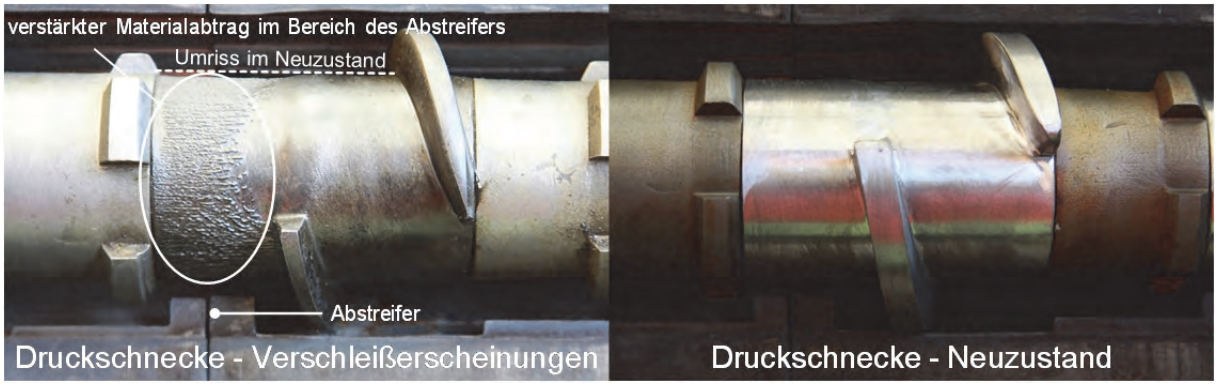


Abbildung 65: Verschleißerscheinungen an einer Druckschnecke der Seiherstab-Schneckenpresse nach Verarbeitung von ca. 2.000 kg säurekonservierter Zuckerhirse

9.4 Fazit

Von den beiden verwendeten Schneckenpressentypen konnten mit der größeren Seiherstab-Schneckenpresse die besseren Ergebnisse hinsichtlich Abpressgrad, Zuckerextraktion und Saftreinheit bei gleichem (entblätterten) Ausgangsmaterial und einmaligem Abpressvorgang erzielt werden. Bei beiden Pressentypen war in Übereinstimmung mit bekannten Ergebnissen aus der Literatur ein sinkender Abpressgrad mit steigendem TM-Gehalt des Ausgangsmaterials festzustellen.

Um die Effizienz der Materialabtrennung unabhängig vom TM-Gehalt des Ausgangsmaterials bewerten zu können, wurde eine neue Kenngröße, die Abtrenneffizienz, eingeführt. Die Abtrenneffizienz zeigte sich unabhängig vom Ausgangsmaterial und lag bei der Seiherstab-Schneckenpresse im Bereich von 92 bis 97 % und damit auch im Bereich der erreichten Zuckerextraktionsraten.

Durch Änderungen an den Presseinstellungen konnte bei der Lochseiherpresse der Abpressgrad beeinflusst werden, bei der Seiherstab-Schneckenpresse führten Variationen

im Bereich der Schneckengeometrie und des Bagasseauswurfs zu keinen wesentlichen Veränderungen von Betriebs- und Zielgrößen.

Bei der Verarbeitung von gehäckseltem Ganzpflanzenmaterial im Vergleich zu Zuckerhirse mit vorheriger Abtrennung von Blättern und Rispen änderte sich zwar der Abpressgrad geringfügig, ein Einfluss auf die Abtrenneffizienz oder die Zuckerextraktion konnte nicht festgestellt werden. Nur beim Presssaft waren durch die Materialabtrennung höhere Zuckerkonzentrationen feststellbar, welche in der Folge eine Erhöhung der Saftreinheit bewirkten. Ob dies jedoch den erhöhten Grad der Vorbehandlung rechtfertigt, bleibt zu klären.

Bei der Verarbeitung von konserviertem Zuckerhirsehäckselgut zeigte sich ein ähnliches Verhalten wie bei direkter Verarbeitung des Frischmaterials. Hinsichtlich der Zuckerextraktion waren kaum Unterschiede festzustellen, jedoch ergab sich beim Betrieb der Presse ein etwas höheres Temperaturniveau und damit ein geringfügig höherer Abpressgrad und auch eine geringfügig höhere Abtrenneffizienz, da mehr Wasser verdampft und abgetrennt wurde. Änderungen der Ameisensäurekonzentrationen bei der Lagerung oder unterschiedliche Häcksellängen wirkten sich nicht auf den Verarbeitungsprozess oder die Qualität der Produkte aus. Eine ganzjährige Verarbeitung von konserviertem Material ist daher möglich.

Problematisch bei der Verarbeitung des Zuckerhirsematerials waren die anhaltende Brückenbildung im Einzugsbereich sowie ein teilweiser Rückfluss des Zuckersaftes in den Einzugsbereich. Wenngleich mit der verwendeten Seiherstab-Schneckenpresse sehr gute Zuckerextraktionsraten erzielt werden konnten, ist diese Ausführung für die kontinuierliche Zuckersaftgewinnung aus Zuckerhirse noch nicht geeignet. Hierzu sind weitere Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Zudem zeigte sich bei der Verarbeitung von säurekonserviertem Material ein erhöhter Verschleiß, so dass neben den konstruktiven Anpassungsmaßnahmen auch im Bereich der Beständigkeit der Materialien Änderungen notwendig erscheinen.

10 Konversion zu Ethanol

Im folgenden Kapitel werden die Versuche zur Konversion von Zuckerhirse zu Ethanol vorgestellt und die erhaltenen Ergebnisse diskutiert.

10.1 Vorgehensweise

Im ersten Schritt wurden verschiedene Hefepräparate hinsichtlich ihrer Eignung als Gärorganismus für die Fermentation von Zuckerhirse untersucht. Anschließend konnten unterschiedliche Ausgangsmaterialien von Zuckerhirse (gehäckselte Pflanze, Zuckerhirsepresssaft, Zuckerhirsebagasse) auf ihre Eignung als Gärsubstrat geprüft werden. Des Weiteren erfolgten Untersuchungen zur Aufbereitung der entstandenen Fermentationsmaischen, um über thermische Verfahren Ethanol zu Kraftstoffzwecken bereitstellen zu können.

10.1.1 Hefepräparate

Im Rahmen dieses Projektes wurden, um einen praxisnahen Ansatz bei der Fermentation von Zuckerhirse zu Ethanol zu verfolgen, ausschließlich *Saccharomyces*-Hefen eingesetzt. Für die Verwendung von Hefen für die Zuckerhirsefermentation wurden acht verschiedene Hefepräparate auf ihre Eignung als Ethanolproduzent untersucht. Die Auswahl ergab sich dabei aus einer Literatur- und Herstellerrecherche. Das Ergebnis ist in Tabelle 48 zusammengefasst. Bei diesen Hefen handelt es sich um frei käufliche Präparate, die gentechnisch nicht verändert wurden.

Alle Hefekulturen wurden bis zu ihrer Verwendung vakuumverpackt bei 4 °C gelagert. Für die Aktivtrockenhefe Thermosacc® Dry wurde zudem die Gesamthefezellzahl mittels Thoma-Zählkammer und Methylenblau-Anfärbung bestimmt [20] [266]. Das Hefepräparat besaß eine Gesamthefezellzahl von 3,7 x 10^{10} pro Gramm Aktivtrockenhefe mit 83 % Lebendzellen.

Wenn die Hefen nicht direkt zum Fermentationsansatz gegeben wurden, wurden vor ihrer Verwendung als Inokulum jeweils 1 g Hefepräparat in 10 ml 0,9 % NaCl-Lösung für 20 bis 30 min bei Raumtemperatur rehydriert. Vor der Hefezugabe, mit einer definierten Hefezahl, erfolgte das Einstellen des Fermentationsmediums auf Kultivierungstemperatur.

Tabelle 48: Übersicht zu den untersuchten kommerziell erhältlichen Hefepräparaten – Angaben gemäß Hersteller

Handelsname (Abkürzung)	Hersteller	pH-Bereich	„Killer-Hefe“[3]	Temp.-bereich	Dosierempfehlung in g/l
NT 50	Anchor Yeast Ltd.	k. A.	ja	≤ 28 °C	0,3[1]
NT 116	Anchor Yeast Ltd.	k. A.	ja	≤ 28 °C	0,3[1]
N 96	Anchor Yeast Ltd.	k. A.	ja	≤ 28 °C	0,2 - 0,3[1]
VIN 13	Anchor Yeast Ltd.	k. A.	ja	≤ 16 °C	0,2[1]
DY 802	Anchor Yeast Ltd.	k. A.	ja	≤ 35 °C	0,5 - 1,0[2]
Thermosacc® Dry	Lallemand Ltd.	3,5 - 6,0	nein	≤ 38 °C	0,12 - 0,18[2]
SuperStart™	Lallemand Ltd.	3,5 - 6,0	nein	≤ 34 °C	0,1 - 0,25[2]
Ethanol Red®	Fermentis	k. A.	k. A.	≤ 40 °C	0,25 - 0,5[2]

[1] Empfehlung als Weinhefe; [2] Empfehlung zur Bioethanolherstellung; [3] "Killer-Hefe": Hefen, welche durch Freisetzen eines bestimmtes Toxins eine Kontamination verringern; k. A.: Keine Angabe

Voruntersuchungen zu den Hefepräparaten erfolgten mit der Zielsetzung, Hefen bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit auf eine möglichst hohe Ethanolkonversion einordnen zu können. Hierzu wurden die in der Tabelle 48 aufgeführten Hefen mit Konzentrationen von 2 g/l eingesetzt, um eine schnelle Ethanolkonversion zu gewährleisten. Die Vorauswahluntersuchungen wurden im Kleinmaßstab mit 100 ml Modellmedium bei 35 °C in verschlossenen Glasflaschen mit CO_2-Ablass durchgeführt. Die Temperierung erfolgte in einem Präzisionswasserbad (Model 1086, GFL Gesellschaft für Labortechnik, Burgwedel) für 48 Stunden. Nach Eingrenzung geeigneter Hefepräparate wurden die ausgewählten Hefen mit den höchsten Ethanolausbeuten intensiver bezüglich ihrer Temperaturtoleranz bei unterschiedlichen Temperaturen (25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C und 45 °C) untersucht.

Als Modellmedium wurde verdünnter Zuckerhirsesirup (durch Eindickung gewonnen, Trockensubstanzgehalt ca. 75 %) der Firma Muddy Pond Mill (Montery, USA) verwendet. Nach Herstellerangaben enthielten 1 kg des Sirups die in Tabelle 49 zusammengestellten Nährstoffe.

Tabelle 49: Inhaltsstoffe des als Modellsubstrat verwendeten Zuckerhirsesirups gemäß Herstellerangaben bezogen auf 1 kg Sirup

Nährstoff	Gehalt in g/kg
Calcium	1,50
Eisen	0,04
Kalium	10,00
Magnesium	1,00
Natrium	0,08
Phosphor	0,55
Zink	0,04

Weiterhin enthielt 1 kg Modelsubstrat ca. 15 g Protein, 750 g Kohlenhydrate wovon 400 g reduzierende Zucker darstellen und 0,16 g Nitrat. Zur Kultivierung der Hefen wurde ein Gesamtzuckergehalt von ca. 200 g/l durch verdünnen des Sirups mit vollentsalztem Wasser hergestellt. Dieses Fermentationsmedium wurde anschließend für eine Stunde bei 80 °C pasteurisiert.

10.1.2 Fermentation der gehäckselten Pflanze

Eine Feststoff-Fermentation direkt im Anschluss an die Ernte kann als eine alternative Lagerungsoption (Silofermentation) angesehen werden. In den Fermentationsversuchen zur gehäckselten Pflanze sollte zum einen die Machbarkeit untersucht und zum anderen Optimierungspotenziale aufgezeigt werden. Neben dem Einfluss des pH-Werts wurden auch die Prozesssteuerungsparameter wie Temperatur und Animpfzelldichte untersucht. Das Feldmaterial weist in der Regel bereits eine natürliche Flora von Mikroorganismen auf. So wies das für die Versuche verwendete Rohmaterial vor Fermentationsbeginn eine Keimzahl von 4,1 x 10^8 Keime/ml (3,5 - 4,6 x 10^8 Keime/ml, n=5) in der Flüssigphase auf. Um ein vorheriges Pasteurisieren der Häcksel zu vermeiden, wurde Ameisensäure zur Unterdrückung mikrobiellen Fremdwachstums eingesetzt. Zusätzlich wurde der Einfluss der Ameisensäure im Hinblick auf die Hefefermentation genauer untersucht. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, zu bestimmen, ab welcher Ameisensäurekonzentration, neben Fremdorganismen, auch die Hefen Inhibierungseinflüssen unterliegen. Hierfür wurden verschiedene Mengen an Ameisensäure zu Fermentationsbeginn hinzugegeben. Zudem wurde, aus Gründen einer gefahrloseren Handhabbarkeit in der Praxis, der Einfluss einer gepufferten Ameisensäurevariante untersucht. Die gepufferte Ameisensäure wurde unter Zuhilfenahme von Natronlauge (32 Masse-%) auf einen pH-Wert von 3,82 eingestellt, welcher nahe dem pKs-Wert von Ameisensäure (3,75, 25 °C) lag [109]. In Tabelle 50 sind die Versuchsvarianten dargestellt.

Tabelle 50: Versuchsplan zur Feststoff-Fermentation in Standkolben mit gehäckselter Zuckerhirse (Sorte 'Sucro Sorgo', Stängelfraktion)

Versuchsreihe	Hefezellkonzentration zu Versuchsbeginn in Anzahl Lebendzellen/ml Flüssigkeit	Fermentationstemperatur in °C	Ameisensäure konzentriert/ gepuffert in g/l
1	1×10^7, 5×10^7, 5×10^8, 1×10^9	30	0
2	1×10^8	25; 30; 35	0
3	1×10^8	25	2,5
4	1×10^8	30	1,0; 2,5; 5,0; 10,0
5	1×10^8	35	2,5

Neben der Feststoff-Fermentation wurde die Perkolat-Fermentation von gehäckselter Zuckerhirse untersucht. Um das Sorptionsvermögen der Hirseschnitzel zu übersteigen und ein Perkolat zu erhalten, wurden die Ansätze mit Wasser auf insgesamt 200 ml Gesamtflüssigkeit aufgefüllt, was einem Häcksel (Frischmasse) zu Wasserverhältnis von ca. 1:1,2 entsprach. Die Hefekonzentration wurde zu Versuchsbeginn auf 1×10^8 Lebendzellen/ml Flüssigkeit eingestellt. Die Fermentation erfolgte bei 30 °C und einer Kolben-Rotationsgeschwindigkeit von 3 min^{-1}. Die Zugabe an Ameisensäure erfolgte in konzentrierter und gepufferter Form im Konzentrationsbereich zwischen 0 und 10,0 g/l. Die Versuche erfolgten jeweils im Dreifachansatz.

Neben den Versuchen mit einem Fermentationszyklus im Batch-Ansatz, wurde auch eine Versuchsreihe zur wiederholten Fermentation mit Perkolat durchgeführt, wobei für den ersten Fermentationszyklus Ameisensäure in gepufferter Form zugeben wurde, sodass eine Konzentration von 2,5 g/l an Ameisensäure vorlag. Nach 24 Stunden erfolgte eine Abtrennung der Häcksel vom Perkolat mit Hilfe einer Stempelpresse. Für die nächste Versuchsreihe wurden wieder frische Häcksel eingewogen und mittels Perkolat, anstelle des Wassers, auf 200 ml aufgefüllt. Nach einer Fermentationszeit von weiteren 24 Stunden wurde das Perkolat nochmals von den Versuchsansätzen abgetrennt und für einen weiteren Zyklus verwendet.

Abbildung 66: Versuchsanordnung zum Gärversuch von gehäckselter Zuckerhirse mit Rollenmischer

Die Versuchsansätze, sowohl für die Feststoff- wie auch die Perkolat-Fermentationen erfolgten in 500 ml Weithals-Erlenmayerkolben mit jeweils 100 g feuchtem Häckselgut. Als Ausgangsmaterial für die Fermentationsversuche diente entblättertes Material der Sorte ‘Sucro Sorgo‘ (Erntetermin 12.10.2010), welches einen TM-Gehalt von im Mittel 23,1 % (23,1 - 23,2 %, n=3) und einen Zuckergehalt von 361,2 mg/g TM (356,7 - 368,5 mg / gTM, n=3) aufwies. Das Material wurde mit einem Scheibenradhäcksler (kleinste Häcksellänge) vorzerkleinert und anschließend auf einer Plan-Siebmaschine mit einem Lochsieb mit Durchmessern von 5 mm fraktioniert. Für die Fermentationsversuche wurde die Siebfraktion < 5 mm verwendet. Als Hefe wurde Aktivtrockenhefe Thermosacc® Dry eingesetzt. Zu Fermentationsbeginn wurden die Kolben mit wassergesättigten CO_2 (Volumenstrom > 0,5 Liter/min) zwei Minuten durchspült und mit einem Stopfen, inklusive Gärrohraufsatz, luftdicht verschlossen. Die Fermentationsversuche erfolgten in einer Umluft temperierbaren Inkubationshaube (Inkuserve M, bsb11 Biotech Service blu). Die Feststoff-Fermentationsversuche wurden in stehenden Kolben durchgeführt, während die Perkolationsfermentationsversuche liegend in einem Winkel von ca. 18° auf einen Rollenmischer (SRT9D, Stuart®) positioniert wurden, wodurch eine Umspülung der Partikel mit Flüssigkeit sichergestellt wurde (siehe Abbildung 66).

10.1.3 Fermentation von Zuckerhirsepresssaft

10.1.3.1 Nährstoffzusammensetzung

Eine umfassende Untersuchung der Nährstoffzusammensetzung von Zuckerhirsepresssäften wurde mittels FAAS (Kapitel 10.2.1) durchgeführt. Die Presssäfte wurden auf den Gehalt an für Hefen wichtigen Nährstoffen (Ca, Fe, K, Mg, Zn, Phosphat, Sulfat und Stickstoff) untersucht. Hierdurch konnte festgestellt werden, ob die in dem Zuckerhirsepresssaft vorhandenen Nährstoffe in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen oder ob eventuell, um eine möglichst hohe Ethanolausbeute zu erreichen, zusätzliche Nährstoffe zugeführt werden müssen. Für die Versuche wurden verschiedene Zuckerhirsepresssäfte der gehäckselten Ganzpflanze aus den Erntejahren 2010 und 2011 (insgesamt fünf verschiedene Sorten) untersucht und verglichen. Zusätzlich wurde aus dem Erntejahr 2011 die Stängelfraktion der entblätterten und von der Rispe abgetrennten Ganzpflanze untersucht.

10.1.3.2 Auswahl geeigneter Fermentationsverfahren und Reaktionsbedingungen

Um den Einfluss der Fermentationsstrategie von Zuckerhirsepresssaft auf die Ethanolausbeute zu betrachten, wurden verschiedene Fermentationsverfahren (Batch kontrolliert, Batch repetitiv unkontrolliert, In-Field (im Außenlager und Labor)) angewendet. Zudem wurde der Einfluss bei Benutzung recycelter Hefe (Melle-Boinot-Prozess) untersucht (Kapitel 3.8.2.3.1). Die Versuche wurden in Ansatzgrößen von 0,1 bis 10 l bei 35 °C, Labortemperatur oder Außentemperatur, sowie gerührt (200 min^{-1}) oder aber als Standkultur durchgeführt. Als Hefe wurde Thermosacc® Dry mit Konzentrationen zwischen 0,3 und 4 g/l hinzugegeben. Eine Zusammenfassung der durchgeführten Experimente ist in Tabelle 51 geben.

Tabelle 51: Untersuchte Fermentationsverfahren und Reaktionsbedingungen mit Zuckerhirsepresssäften (teilweise mit Zucker angereichert)

Verfahren	Reaktionsbedingungen				
	Temperatur in °C	Animpfzelldichte in Lebendzellen/ml	Rührdrehzahl in min^{-1}	Anfangszucker in g/l	Ansatzgröße in l
Batch,	35 °C	~3 x 10^8	200	139 ± 1	0,1
temperaturkontrolliert	35 °C	~1 x 10^7	200	179 ± 7	0,1
Batch, repetitiv, unkontrolliert	20 °C (Labor)	~1 x 10^7	-	Beginn: 179 1. Feed: 118 2. Feed: 62 3. Feed: 48	0,5[1] 1,0 1,5 2,0
Batch, In-Field, unkontrolliert	20 °C (Labor)	~1 x 10^7	-	55	10
	Außentemp.	~1 x 10^7	-	56	10
Batch, mit Heferecycling, temperaturkontrolliert (Melle-Boinot-Prozess)	35 °C	Beginn: 1 x 10^7	200	200 ± 21	1
	35 °C	1. Recycling: 2-3 x 10^8	200	169 ± 11	1
	35 °C	2. Recycling: 4-5 x 10^8	200	166 ± 2	1

[1] *Ansatz mit drei Feeds je 0,5 l*

10.1.3.3 Haltbarkeit von vergorenem Zuckerhirsepresssaft

Um die Lagerfähigkeit des vergorenen Saftes zu prüfen, wurden die In-Field-Ansätze aus Tabelle 51 (Außenlager und Labor) für 160 Tage an den jeweiligen Standorten im Dreifach-Ansatz unverändert gelagert.

10.1.3.4 Aufbereitung und Fermentation mit ameisensäurekonservierten Presssäften

Dem Abbau des in der Zuckerhirse vorhandenen Zuckers während einer Lagerung wurde entgegengewirkt, indem die Ganzpflanze mit Ameisensäure konserviert wurde (siehe Kapitel 8.2). Der Einfluss der eingesetzten Ameisensäure auf die Fermentation wurde vorab überprüft.

Inhibierungseinfluss von Ameisensäure im Vergleich zu Schwefelsäure

Um Rückschlüsse auf den Inhibierungseinfluss der Ameisensäure auf die Hefen zu ziehen und gleichzeitig den Einfluss des pH-Werts beurteilen zu können, wurden in einer

ersten Versuchsreihe Presssäfte der gehäckselten Ganzpflanze der Zuckerhirse 'Della' (Ernte- und Pressdatum: 28.10.2010) mit unterschiedlichen Ameisensäurekonzentrationen (1-15 g/l) versetzt.

Zudem wurden zum Vergleich Presssäfte ('Top 76', Ernte- und Pressdatum: 20.10.2011) fermentiert, welche mit unterschiedlichen Schwefelsäurekonzentrationen (vier Ansätze, pH-Bereich zwischen 2 bis 3,5) versetzt wurden. Schwefelsäure wird beim Melle-Boinot-Prozess zur Reinigung der recycelten Hefen eingesetzt. Dabei wird der pH-Wert in der aufbereiteten Hefe bis auf einen pH-Wert von 2,2 herabgesetzt ohne dass eine toxische Wirkung auf die Hefen auftritt [308]. Daher sind toxische Effekte der Schwefelsäure auszuschließen.

Weiterhin wurden Fermentationen mit unterschiedlichen Mengen an Ameisensäure versetzten Presssäften (5 und 10 g/l Ameisensäure) durchgeführt, bei denen verschiedene Mengen an Calciumcarbonat zugegeben wurden, um den pH-Wert anzuheben und so den Konservierungsschritt mit anschließender Neutralisation zu simulieren.

Die Versuche erfolgten bei einer Ansatzgröße von 0,1 l in Serumflaschen bei 200 min^{-1}, 35 °C mit 0,3 g ADY/l über 48 Stunden.

pH-Wert-Anhebung der Presssäfte aus mit ameisensäurekonservierten Häckseln

Zusätzlich wurden Versuchsreihen mit den Press- und Sickersäften (Ernte 2011, Sorte 'Top 76') durchgeführt, welche bereits für die Lagerung der Ganzpflanze mit verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen (1 %; 0,75 %) konserviert wurden. Für die Einstellung der Ameisensäurekonzentration wurden zum einen Säfte verwendet, die mit einem Gehalt von 0,75 % (pH=3,3-3,6) konserviert wurden, als auch Presssäfte mit hohen Konzentrationen von 1 % (pH=3,4), die teilweise mit nicht konserviertem Saft (pH=5,9) im Verhältnis von 3:1 gemischt wurden. Ebenfalls wurden auf gleiche Weise Versuche mit 1 % iger Ameisensäure konservierten Säften (pH=3,4) ohne Verdünnung durchgeführt. Für die Versuche wurden die konservierten Säfte mit unterschiedlichen Basen ($CaCO_3$; $Ca(OH)_2$) auf pH-Werte von 5 bis 6 gebracht und mit 0,3 g/l der Hefe Thermosacc® bei 35 °C in verschiedenen Maßstäben (0,1-10 l) fermentiert. Die Durchführung erfolgte abhängig vom Reaktionsvolumen in einer Inkubationshaube oder im Fermenter bei 200 min^{-1} für 48 Stunden. Die genaue Versuchsgestaltung ist in Tabelle 52 gegeben.

Tabelle 52: Versuchsgestaltung zur Fermentation konservierter Presssäfte bei 35 °C mit 0,3 g ADY/l Thermosacc® Dry

Presssaft	pH-Wert der Säfte	Konservierung mit Ameisen-säure in %	Eingestellte pH Werte (verwendete Base)	Rührer
Referenz				
Ernte: 26.10.11 Pressung: 26.10.11	5,9	0	-	Magnetrührer
0,1 l Serumflaschen				
Ernte: 26.10.11 Pressung: 26.01.12; gemischt mit Saft vom 26.10.11 im Verhältnis von 3:1	5,8-5,9 3,3-3,4	0,75	5 ($CaCO_3$), 6 ($CaCO_3$)	Magnetrührer
Sickersaft aus Konservierung Ernte: 26.10.11	3,3	0,75	5 ($CaCO_3$)	Magnetrührer
Ernte: 26.10.11 Pressung: 26.01.12	3,4	1,00	6 ($CaCO_3$)	Magnetrührer
10 l Fermenter				
Ernte: 24.10.11 Pressung: 27.03.12 und Ernte: 26.10.11 Pressung: 29.03.12	3,4-3,6	0,75	6 ($Ca(OH)_2$)	6-Blatt-Scheibenrührer
Ernte: 24.10.11 Pressung: 14.02.12	3,4	1,00	6 ($Ca(OH)_2$)	6-Blatt-Scheibenrührer

10.1.4 Fermentation von Bagasse

10.1.4.1 Verfahrenskonzept

Um den in Kapitel 3.8.2.4.3 diskutierten hohen Feststoffgehalt in der enzymatischen Hydrolyse und Fermentation für Zuckerhirsebagasse zu umgehen und trotzdem ökonomisch sinnvolle Ethanolkonzentrationen zu erzielen, wurde ein individuelles Verfahrenskonzept entwickelt [224]. Das Verfahrenskonzept ist als Blockfließbild in Abbildung 67 dargestellt.

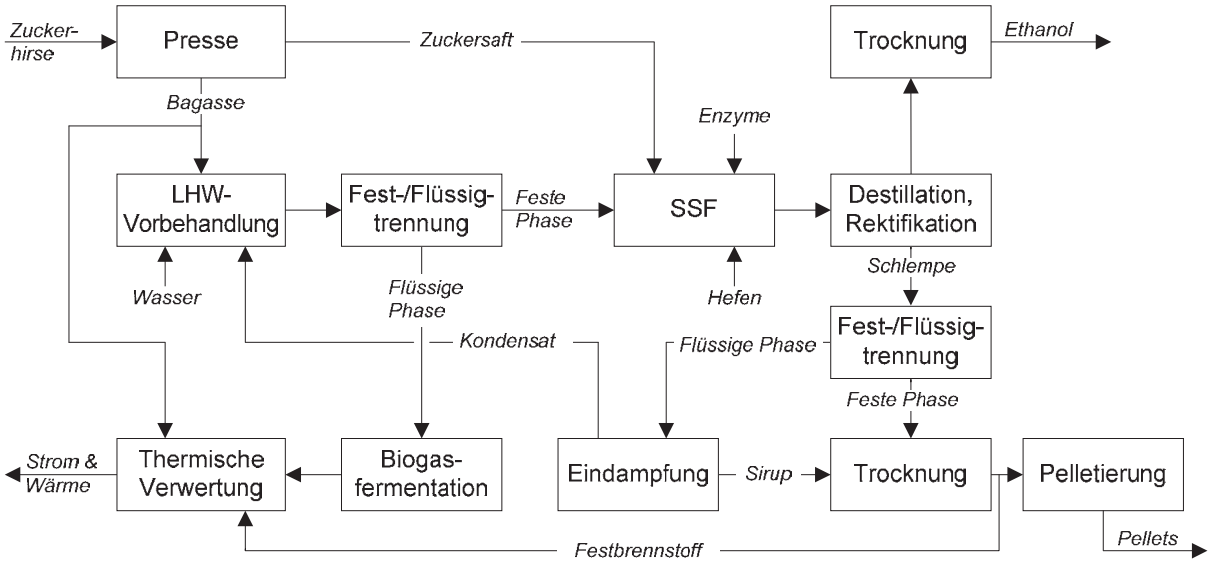


Abbildung 67: Blockfließbild zur simultanen Verzuckerung und Fermentation (SSF) von Zuckerhirsebagasse unter Zugabe von Zuckerhirsepresssaft (in Anlehnung an ROHOWSKY et al. 2012 [224])

Im ersten Prozessschritt erfolgt die Pressung von Zuckerhirse. Ein Teil der Bagasse kann dazu genutzt werden, die Anlage mit Prozesswärme zu versorgen. Der Bagasseüberschuss wird mit einer LHW-Vorbehandlung (Liquid Hot Water, LHW) in eine cellulosereiche Feststoff- und eine hemicellulosehaltige Flüssigfraktion aufgeschlossen. Für einen großtechnischen Einsatz könnte hierbei beispielsweise das vom ATZ Entwicklungszentrum (Sulzbach-Rosenberg) patentierte Thermo-Druck-Hydrolyse-Verfahren (ATZ-TDH®-Verfahren) zum Einsatz kommen [105]. Nach dem Aufschlussprozess erfolgt eine Phasentrennung, die notwendig ist, um zum einen eine hohe Biomassekonzentration für die Fermentation bereitstellen zu können und zum anderen einen Großteil der nicht zu Ethanolzwecken verwertbaren Xylosezucker der Hemicellulose in der flüssigen Phase zurückzugewinnen. Die Fest-/Flüssigtrennung kann über Zentrifugentechnik oder Abpressen geschehen. Für die Entwässerung unter Zuhilfenahme einer Dekanterzentrifuge (Hersteller: Centrysis™) konnten im Pilotmaßstab für hydrothermal vorbehandelte Materialien Feststoffkonzentrationen von 26 % TM erzielt werden [189]. Bei Verwendung von pneumatischen Pressen kann dieser Wert noch weiter angehoben werden und es können Werte bis zu 55 % TM erreicht werden [141].

Die in der flüssigen Fraktion enthaltenen Zucker werden als Biogassubstrat genutzt. Niedrige Substratkonzentrationen haben hierbei im Vergleich zur alkoholischen Gärung keine Auswirkung auf die Produktreinheit, da hier die Gärungsprodukte wie Methan und CO_2 in der Gasphase anfallen und nicht wie bei der alkoholischen Gärung in der Flüssigphase vorliegen und im Anschluss aufwändig abgetrennt werden müssen. Das Biogas kann in einem konventionellen Blockheizkraftwerk zur Gewinnung von Strom und Wärme eingesetzt werden, wobei die Wärme direkt im Prozess genutzt werden kann und somit sich das Potenzial an Überschussbagasse zur stofflichen Nutzung erhöht.

Um die Rührfähigkeit im Fermenter für die alkoholische Gärung und einen besseren Stoffaustausch für die Hefen und Enzyme zu gewährleisten, wird im Anschluss an die Fraktionierung die feststoffreiche Phase wieder verdünnt, wobei dies vorzugsweise mit Zuckersaft anstelle von Wasser geschieht. Durch die Zumischung von Zuckersaft können höhere Endethanolkonzentrationen in der Maische erreicht werden, wodurch sich der Energiebedarf im Destillationsschritt verringern lässt. Zudem könnten Apparatekosten eingespart werden. Neben dem Zuckersaft werden zu Fermentationsbeginn Enzyme und Hefen zugesetzt.

Das in der fermentierten Maische enthaltene Ethanol wird in einem nächsten Schritt über gewöhnliche Destillation von der feststoffhaltigen Flüssigphase abgetrennt. Der in der Schlempe verbleibende Feststoff besteht hauptsächlich aus Lignin, Hefen sowie geringeren Mengen an nicht-fermentierbarem Zucker sowie Mineralien. Die Schlempe kann nach einer mechanischen Phasentrennung über thermische Verfahren zu einem Festbrennstoff weiter aufbereitet werden, welcher entweder prozessintern oder in Form eines handelsfähigen Produkts, z. B. als Pellets, vermarktet werden kann [301]. Das Verfahren erlaubt somit eine äußerst flexible Prozessführung.

Zusammenfassend lassen sich folgende Merkmale des Verfahrenskonzepts zur simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse unter Beisein von Presssaft ableiten:

- Es kann die ganze Pflanze zu stofflichen als auch energetischen Zwecken genutzt werden.
- Der Einsatz fossiler Energieträger zur Prozesswärmebereitstellung kann entfallen.
- Es lassen sich voraussichtlich wirtschaftlich vertretbare Ethanolkonzentrationen erzielen.
- Die Verwendung gentechnisch modifizierter Mikroorganismen wird vermieden und es können handelsübliche Hefepräparate eingesetzt werden.
- Durch schnelles Hefewachstum bereits zu Beginn der SSF ist eine stabile Prozessführung möglich.
- Die Zugabe von Nährstoffen kann reduziert werden bzw. eventuell ganz entfallen.
- Es besteht die Möglichkeit, das Verfahren in bestehende Anlagensysteme zur integrieren.

10.1.4.2 Hydrothermale Vorbehandlung

Die hydrothermale Vorbehandlung der Zuckerhirsebagasse erfolgte in einem 2 l-Reaktionsautoklaven (Modell 4534, Parr Instruments) mit Ankerrührer und Abstreifvorrichtungen. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung und homogene Durchmischung wurde mittels Rühren bei 80 min^{-1} erreicht. Die Wärmezufuhr erfolgte über zwei Heizbänder mit jeweils 1.500 W, wobei die Temperaturregelung über einen Innentemperaturfühler erfolgte. Die Aufheizrate des Reaktors lag bei ca. 9 K/min, die Kühlrate bei ca. 15 K/min. Für die Versuche wurde Zuckerhirsebagasse mit einem Feststoffgehalt von 5 Masse-% eingesetzt.

Um die Einflüsse des Lösungsverhaltens von Hemicellulose und der Anreicherung von Cellulose in der Feststoffphase in Abhängigkeit der Behandlungshärte beurteilen zu können, wurden Bagassen der Zuckerhirsesorte ‘Umbrella‘ (Ernte- und Pressdatum: 18.10.2010) bei verschiedenen Temperatur-/ Zeitkombinationen vorbehandelt. Zur präzisen Berechnung des "Severity-Faktors" R_0 wurde zusätzlich das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Reaktors berücksichtigt. Mit Gleichung 3-9 (Kapitel 3.8.2.4.1) ergibt sich folgender Term:

$$R_0 = \int_{t_{T_{Ref}}}^{t_{T_{max}}} \exp\left(\frac{T(t) - T_{Ref}}{\omega}\right) dt + t_{T_{max}} \cdot \exp\left(\frac{T_{max} - T_{Ref}}{\omega}\right) + \int_{t_{T_{max}}}^{t_{T_{Ref}}} \exp\left(\frac{T(t) - T_{Ref}}{\omega}\right) dt \qquad 10\text{-}1$$

T_{Ref} stellt dabei die Referenztemperatur dar, unterhalb derer die hydrothermalen Reaktionsmechanismen vernachlässigt werden können. Als T_{Ref} wurde ein Literaturwert von 100 °C verwendet [204].

Die Untersuchungen erfolgten für drei unterschiedliche Severity-Faktoren (log R_0=3,5, 3,75 und 4) bei jeweils drei verschiedenen Temperaturen in einem Bereich zwischen 170 und 200 °C. In Tabelle 53 sind die einzelnen Versuche mit zugehörigen Temperaturen und Haltezeiten dargestellt. Die theoretische Haltezeit stellt dabei die Zeit dar, welche eingestellt werden müsste, wenn die Aufheiz- und Abkühlrate vernachlässigbar gering wäre. Die tatsächlichen Werte für die Haltezeit und den Severity-Faktor wurden im Anschluss an die Versuchsdurchführung anhand der erhaltenen Temperaturprofile errechnet.

Tabelle 53: Versuchsplan zur hydrothermalen Vorbehandlung von Zuckerhirsebagasse (Sorte ‘Umbrella‘, Ernte und Presstermin: 18.10.2010) für verschiedene Temperatur-/ Zeitkombinationen und einem Feststoffgehalt von 5 Masse-%.

Severity-Faktorlog R_0 (geplant)	Zieltemperatur T_{max} in °C	Theoretische Haltezeit in min	Tatsächliche Haltezeit bei Zieltemperatur in min	Tatsächlicher Severity-Faktor log R_0
3,5	170	27,5	24,7	3,52
	180	14,0	9,5	3,53
	190	7,1	4,3	3,52
3,75	170	48,6	46,1	3,76
	180	24,8	20,4	3,77
	190	12,6	9,8	3,75
4	180	44,1	39,7	4,02
	190	22,4	19,6	4,02
	200	11,4	6,5	4,09

Für die Umsetzung von den in Bagasse enthaltenen Sacchariden in Ethanol bzw. Biogas wurden insgesamt vier verschiedene Ausgangsmaterialien untersucht. Für die Zuckerhirsesorte ‘Top 76‘ wurden die Bagassen aus der gehäckselten Ganzpflanze (Ernte und Pressdatum: 26.10.2011), der entblätterten Variante (Ernte und Pressdatum: 25.10.2011) und aus der Konservierung mit 0,75 % Ameisensäure nach 150 Tagen Lagerung (Ernte: 26.10.2011, Pressung: 29.03.2012) verwendet. Zusätzlich wurde die Bagasse aus der gehäckselten Ganzpflanze der Zuckerhirsesorte ‘Umbrella‘ (Ernte- und Pressdatum: 18.10.2010) mit in die Untersuchungen aufgenommen. Die Bagassen wurden jeweils mit einer Behandlungshärte von log R_0=4,0 bei einer Zieltemperatur von 190 °C vorbehandelt.

10.1.4.3 Simultane Verzuckerung und Fermentation

Erste Versuchsreihe

In einer ersten Versuchsreihe sollte die Machbarkeit des in Kapitel (3.8.2.4.3) beschriebenen Verfahrens zur Nutzung von hydrothermal vorbehandelter Bagasse zu Ethanol untersucht werden. Ziel der Experimente war es, den SSF-Prozess derart zu gestalten, dass sich während der Fermentation ökonomisch vertretbare Ethanolkonzentrationen ergeben. Um den Einfluss der hydrothermalen Vorbehandlung auf die Ethanolkonzentration darzustellen, wurde unbehandelte Bagasse sowie hydrothermal vorbehandelte Bagasse mit einer Behandlungshärte von 3,75 und 4 (Zieltemperatur: 190 °C) der Zuckerhirsesorte ‘Umbrella‘ (Ernte- und Pressdatum: 18.10.2010) unter jeweils gleichen Bedingungen mit 5 % WIS (Water Insoluble Solids, WIS) fermentiert. Der wasserunlösliche Feststoffgehalt (WIS) wurde dabei wie folgt definiert:

$$WIS \text{ in } \% = \frac{\text{TM des mit Wasser gewaschenen Materials}}{\text{TM des mit Wasser gewaschenen Materials} + \text{Flüssigkeitsmasse}} \cdot 100 \quad \text{10-2}$$

Für die Dichte der Flüssigkeit wurde ein Wert von 1.000 g/l festgelegt.

Das aufgeschlossene Material wurde im Anschluss an die hydrothermale Vorbehandlung mit einer Schraubenpresse (Molecki-Edelstahltechnik) auf einen TM-Gehalt ≥ 26 % entwässert. Für die Versuche wurde der TM-Gehalt des hydrothermal aufgeschlossenen Ausgangsmaterials auf einen einheitlichen Wert von 26 %, durch Zugabe von Flüssigkeit der flüssigen Phase des Aufschlussproduktes, eingestellt.

Die Zugabe von frei fermentierbaren Zuckern erfolgte zum einen mit einer Glucoselösung als Referenzfall und zum anderen mit Zuckerhirsepresssaft. Die Zuckerkonzentration für die Ansätze mit 7,5 % WIS wurde dabei so gewählt, dass bezogen auf das insgesamt vorhandene Flüssigkeitsvolumen, ein Wert von 74 g/l als Glucoseäquivalent vorlag. Diese Konzentration würde sich ergeben, wenn mit Wasser gewaschene Bagasse und auf einen Trockenmassegehalt von 26 % entwässerte Bagasse, mit einem Saft der Zuckerkonzentration von 100 g/l auf einen wasserunlöslichen Feststoffgehalt von 7,5 % verdünnt werden würde. Der verwendete Zuckerhirsepresssaft wies eine Zuckerkonzent-

ration (als Glucoseäquivalent) von 55,2 g/l auf, welcher sich damit unterhalb des in der Literatur angegeben unteren Normalwerts von 100 g/l befand [8]. Um die Versuche besser mit Literaturwerten vergleichen zu können, wurde der Presssaft mit Glucose entsprechend angepasst.

Für die Fermentation wurden, bis auf die Ansätze mit Zuckerhirsepresssaft, zusätzlich Nährstoffe hinzugegeben, sodass, bezogen auf die Flüssigphase, 1 g/l Hefeextrakt, 0,5 g/l Na_2HPO_4 und 0,025 g/l $MgSO_4$ x 7 H_2O vorlagen [283]. Um eine maximale Reaktionsgeschwindigkeit der enzymatischen Hydrolyse zu gewährleisten, wurde ein pH-Wert von ~4,8 angestrebt, der mit Hilfe eines Citratpuffers mit einer Konzentration von 50 mmol/l bezogen auf die Flüssigphase eingestellt wurde [92].

Für die enzymatische Hydrolyse wurden Enzympräparate der Firma Novozymes A/S (Dänemark) verwendet. Zum Einsatz kam ein Mix der beiden Präparate Celluclast 1.5 L und Novozym 188. Celluclast 1.5 L ist dabei ein Präparat, welches in wissenschaftlichen Untersuchungen häufig für den Abbau von Cellulose in Glucose, Cellobiose Anwendung findet [245]. Das Präparat Novozym 188 besitzt eine hohe Aktivität um Cellobiose in Glucose umzusetzen und wird deshalb häufig in Ergänzung zu Celluclast 1.5 L eingesetzt, um Produktinhibierungseinflüsse durch Cellobiose zu vermeiden [291]. Die Enzymzugabe erfolgte in der Weise, dass bezogen auf die Cellulaseaktivität, Werte von 20 FPU/g (Filter paper unit, FPU) Cellulose und für β-Glucosidase, Werte von 20 IU/g (International Unit, IU) Cellulose vorlagen.

Für die Machbarkeitsversuche wurde gemäß Literatur [174] eine vergleichsweise hohe Menge an Aktivtrockenhefe von 2 g/l, bezogen auf das Flüssigkeitsvolumen, eingesetzt. Als Hefe wurde die Aktivtrockenhefe Thermosacc® Dry verwendet. Zu Versuchsbeginn wurde der Headspace der Serumflaschen mit wassergesättigten CO_2 gespült, um vorhanden Luftsauerstoff zu verdrängen. Um den Einfluss der enzymatischen Hydrolyse beurteilen zu können, wurden Parallelansätze mit der gleichen Zusammensetzung aber ohne Enzymzugabe durchgeführt.

Für die Fermentationsversuche wurden Serumflaschen mit einem Nennvolumen von 150 ml verwendet, in welchen 2,5 g WIS (entsprechend 5 % WIS im Ansatz) oder 3,75 g WIS (entsprechend 7,5 % WIS im Ansatz) vorgelegt wurden. Die Versuchsdurchführung erfolgte in einem temperierbaren Präzisionsschüttelwasserbad bei 37 °C mit einer Schüttelfrequenz von 100 min^{-1} (Model 1086, GFL Gesellschaft für Labortechnik, Burgwedel).

Tabelle 54: Versuchsplan zur simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse für verschiedene Vorbehandlungshärten und Feststoffkonzentrationen (Sorte 'Umbrella', Ernte- und Pressdatum: 18.10.2012), n=3

Versuchs-nummer	Severity log R_0 (Zieltemperatur: 190 °C)	Anfänglicher WIS-Gehalt der Fermentation in %	Zusätzliche Zugabe von frei fermentierbaren Zuckern	Anfänglicher Zuckergehalt bezogen auf die Flüssigphase in g/l
1	-	5	-	-
2	3,75	5	-	-
3	4,02	5	-	-
4	4,02	7,5	-	-
5	4,02	7,5	Glucose	74
6	4,02	7,5	Presssaft	74

Zweite Versuchsreihe

Der Fokus der zweiten Versuchsreihe lag auf der Untersuchung unterschiedlicher Bagassesorten und den dazugehörigen Presssäften. Die Versuche wurden für die Zuckerhirsesorte 'Top 76' aus der gehäckselte Ganzpflanze (Ernte und Pressdatum: 26.10.2011), der entblätterten Variante (Ernte und Pressdatum: 25.10.2011) sowie aus der Konservierung mit 0,75 % Ameisensäure nach 150 Tagen Lagerung (Ernte: 26.10.2011, Pressung: 29.03.2012) durchgeführt. Als Referenz zu den vorherigen Versuchen wurde auch die gehäckselte Ganzpflanze der Zuckerhirsesorte 'Umbrella' (Ernte- und Pressdatum: 18.10.2010) mit untersucht.

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog der 1. Versuchsreihe mit nachfolgend dargestellten Unterschieden. Die feststoffhaltigen Rückstände aus der hydrothermalen Vorbehandlung wurden einheitlich auf einen Wert von 26 % WIS durch Zugabe von Flüssigkeit der flüssigen Phase des Aufschlussproduktes eingestellt. Die Ansätze wurden mit 8 % WIS (4 g WIS) durchgeführt. Die Presssäfte wurden vor ihrer Verwendung bei 4.400 min^{-1} (5.350 x g) für eine Stunde zentrifugiert, um vorhandene feststoffhaltige Rückstände, die zu einer Verfälschung der Analyseergebnisse führen könnten, abzuscheiden. Für die Versuchsreihen wurde für die Aktivtrockenhefe Thermosacc® Dry ein praxisnaher Wert von 0,3 g/l, bezogen auf die im Ansatz vorhandene Flüssigkeit, eingesetzt. Eine Übersicht des Versuchsplans der Versuchsreihe 2 ist in Tabelle 55 gegeben.

Tabelle 55: Versuchsplan zur simultanen Verzuckerung und Fermentation von verschiedenen Zuckerhirsebagassen, n=3

Bagasse	Versuchs-nummer	Zugabe von Presssaft	Anfänglicher Zuckergehalt bezogen auf die Flüssigphase im Ansatz in g/l	Nährstoffzugabe
'Umbrella' Frischmaterial, Ganzpflanze	1	-	-	ja
	2	ja	40,7	nein
'Top 76' Frischmaterial, Ganzpflanze	3	-	-	ja
	4	ja	87,0	nein
'Top 76' säurekonserviert, Ganzpflanze	5	-	-	ja
	6	ja	81,5	nein
'Top 76' Frischmaterial, entblättert	7	-	-	ja
	8	ja	115,7	nein

Als Nährstoffe wurden, bezogen auf die Flüssigkeit im Ansatz, 1 g/l $(NH_4)_2SO_4$, 2 g/l KH_2PO_4, 1 g/l $MgSO_4$ $7{\cdot}H_2O$, 3 g/l Hefeextrakt und 3,5 g/l Pepton hinzugegeben [152] [67]. Die Enzymzugabe wurde so eingestellt, dass bezogen auf die Cellulaseaktivität Werte von 15 FPU/g Cellulose und bezogen auf die ß-Glucosidaseaktivität ein IU:FPU-Verhältnis von zwei vorlag.

10.1.4.4 Biogaspotenzial der Flüssigfraktion aus der hydrothermalen Vorbehandlung

Das Biogaspotenzial flüssiger Fraktionen aus der hydrothermalen Bagasse-Vorbehandlung (log R_0=4,0, 190 °C) wurde für die Zuckerhirsesorten ‘Top 76‘ (Ernte und Pressdatum: 26.10.2011) und ‘Umbrella‘ (Ernte- und Pressdatum: 18.10.2010) aus der gehäckselten Ganzpflanze untersucht. Für die Zuckerhirsebagasse der Sorte ‘Top 76‘ erfolgte zusätzlich die Biogaspotenzialbestimmung aus der Konservierung mit 0,75 Masse-% Ameisensaure nach 150 Tagen Lagerung (Ernte: 26.10.2011, Pressung: 29.03.2012) sowie der entblätterten Variante (Ernte und Pressdatum: 25.10.2011).

Das für die Biogasuntersuchungen eingesetzte Material der flüssigen Fraktionen aus den Aufschlüssen wurde bezüglich seines Gehalts an Zuckern und Abbaunebenprodukten analysiert. Für die Untersuchungen zum Biogaspotenzial wurde das ATZ Entwicklungszentrum beauftragt. Hier wurden auch die Analysewerte für den organischen Trocken-

massegehalt (oTM) sowie den löslichen chemischen Sauerstoffbedarf ($CSB_{lös.}$) bestimmt [16]. Die Analyseergebnisse sind in Tabelle 56 dargestellt.

Tabelle 56: Wertbestimmende Inhaltstoffe und Inhibitorkonzentrationen für flüssige Fraktionen hydrothermal vorbehandelter Bagassen, n=3. Standardabweichung der Konzentrationsangaben ≤ 0,1 g/l

TM-Gehalt, oTM-Gehalt, $CSB_{lös.}$, pH-Wert, Inhaltsstoffe	Bagasse 'Umbrella' Frischmaterial, Ganzpflanze	Bagasse 'Top 76' Frischmaterial, Ganzpflanze	Bagasse 'Top 76' säurekonserviert, Ganzpflanze	Bagasse 'Top 76' Frischmaterial, entblättert
TM-Gehalt (%)	1,9 ± 0,1	1,7 ± 0,0	1,6 ± 0,0	1,9 ± 0,0
oTM-Gehalt (%)	1,6 ± 0,0	1,5 ± 0,1	1,3 ± 0,0	1,6 ± 0,0
$CSB_{lös.}$ (g/l)	20,1 ± 0,6	22,2 ± 0,6	21,9 ± 0,4	20,4 ± 1,6
pH-Wert (-)	4,0 ± 0,1	3,8 ± 0,0	3,5 ± 0,0	3,6 ± 0,0
Zucker				
Glucose, frei (g/l)	0,9	0,9	1,0	1,4
Glucose, gebunden (g/l)	1,1	0,5	0,2	1,6
Fructose, frei (g/l)	0,5	0,5	0,5	0,7
Hemicellulosezucker, frei (g/l)	2,5	2,3	3,3	3,1
Hemicellulosezucker, geb. (g/l)	6,6	5,7	4,4	6,2
Gesamtzucker (g/l)	11,4	9,9	9,5	13,0
Inhibitoren				
Ameisensäure (g/l)	0,4	0,4	0,7	0,5
Essigsäure (g/l)	1,5	1,5	1,5	1,4
HMF (g/l)	0,2	0,2	0,3	0,4
Furfural (g/l)	0,7	0,7	1,2	0,7
Summe Inhibitoren (g/l)	2,8	2,8	3,7	2,9

Dem Labor wurden zu jeder Flüssigfraktion jeweils drei Proben aus unabhängig durchgeführten Aufschlussversuchen zur Verfügung gestellt. Der Analyseumfang beinhaltete die Bestimmung des Biogaspotenzials in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4360 [285]. Die Versuche zur Biogaspotenzialbestimmung erfolgten im Batch-Ansatz in 250 ml-Gefäßen bei einer konstanten Temperatur von 39 °C [16]. Als Inokulum diente ausgefaulter kommunaler Klärschlamm. Das Massen-Mischungsverhältnis von Inokulum zur Probe betrug 1:15. Der verwendete Klärschlamm wies einen pH-Wert von 7,4 auf hatte einen oTM-Gehalt von 1,33 % sowie eine $CSB_{lös.}$-Konzentration von 0,81 g/l.

10.1.5 Kenngrößen zur Bewertung der Fermentation

Prozessbestimmende Parameter der alkoholischen Gärung sind zum einen die maximale volumetrische Produktivität, welche die Rate der Ethanolbildung pro Zeiteinheit in g l^{-1} h^{-1} angibt und zum anderen die Ausbeute (Konversion zu Ethanol), die ein Maß für die Effizienz der Versuche darstellt sowie die Umsetzung des Substrates (Zucker) zum Produkt (Ethanol) beschreibt. Zudem ist es wichtig, eine hohe Ethanolkonzentration zu erhalten, da sie einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf der Destillation besitzt.

Bei der Ermittlung der maximalen volumetrischen Produktivität wurden mindestens drei aufeinanderfolgende Werte durch lineare Regression ($R^2 > 0,95$) an der Stelle des steilsten Anstiegs der gemessenen Ethanolkonzentrationen gegenüber der Zeit herangezogen. Der Wert für die maximale Produktivität wurde aus dem Quotienten der Ethanolkonzentrationsdifferenz und dem betrachteten Zeitintervall gemäß folgender Formel berechnet:

$$\text{Maximale Produktivität in g l}^{-1}\,\text{h}^{-1} = \frac{\Delta c_{\text{Ethanolkonzentrationen im Zeitintervall}}}{\Delta t} \qquad 10\text{-}3$$

Bei der Berechnung der Konversion wurde vereinfachend angenommen, dass im Gärsaft alle Zucker als Monosaccharide vorliegen. Deshalb wurde die theoretische Ausbeute von 0,511 g Ethanol / g Glucose bzw. Fructose zugrunde gelegt. Die tatsächliche Ausbeute in den Versuchen berechnet sich aus dem Quotienten der Ethanolkonzentrationsdifferenz zum Zeitpunkt nach Fermentationsende (t_{Ende}) und Fermentationsbeginn (t_0) zur Anfangszuckerkonzentration (als Glucoseäquivalent). Die Berechnung der Konversion erfolgte gemäß folgender Gleichung [162]:

$$\text{Konversion zu Ethanol in \%} = \frac{c_{\text{Ethanol},t_{\text{Ende}}} - c_{\text{Ethanol},t_0}}{c_{\text{Zucker},t_0} \cdot 0,511} \cdot 100 \qquad 10\text{-}4$$

Die maßgebende Größe zur Einschätzung der Qualität des Gesamtverfahrens der SSF ist die Ausbeute an Ethanol, basierend auf der anfangs vorhandenen Masse an Cellulose. Die Ausbeute (Enzymatic convertibility of cellulose, EEC) wird dabei in g Ethanol / g Cellulose und in % des theoretischen Maximums angegeben [283] [178]:

$$\text{ECC in \%} = \frac{c_{\text{Ethanol},t_{\text{Ende}}} \cdot V_{\text{Flüssigkeit}}}{m_{\text{Cellulose},t_0} \cdot 0,511 \cdot 1,111} \cdot 100 \qquad 10\text{-}5$$

Der Wert wurde mit dem Hydrolysefaktor für Cellulose zu Glucose (1,111 g/g) sowie dem theoretischen Ertragskoeffizienten von Glucose zu Ethanol (0,511 g/g) korrigiert.

10.1.6 Thermische Aufbereitung der Fermentationsmaischen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Untersuchungen zur Destillation und Absolutierung vergorener Zuckersäfte durchgeführt. Die Ergebnisse sollten darüber Aufschluss geben, inwiefern unerwünschte Gärungsnebenprodukte bei der verfahrenstechnischen Auslegung der thermischen Aufbereitung mit berücksichtigt werden müssten.

Als Ausgangsmaterial für die thermische Aufbereitung wurden insgesamt vier verschiedene zu Ethanol vergorene Presssäfte eingesetzt. Die für die Ethanol-Abtriebsversuche verwendeten Fermentationsansätze sind in Tabelle 57 zusammengefasst.

Tabelle 57: Fermentationsansätze zur Bereitstellung des Ausgangsmaterials für die Ethanol-Abtriebsversuche

Versuchsnummer:	1	2	3	4
Fermentervolumen in l	30	2	10	10
Anzahl der Wiederholungen	1	3	1	3
Temperatur in °C	35	35	~ 20	35
Aktivtrockenhefe in g/l	2	2	2	0,3
Anfangszuckergehalt in g/l	132,5	95,4	109,3	115,7
Ethanolendkonzentration in g/l	58,3	42,3	46,6	50,7
Ausbeute g Ethanol / g Zucker	0,44	0,44	0,43	0,44

Die Presssäfte eins bis drei wurden aus der Stängelfraktion verschiedener Sorten gewonnen. Das Material stammte dabei aus dem Bündellagerversuch aus dem Jahre 2009, welches am 05.10.2009 eingelagert und im Zeitraum vom 16. bis 18.12.2009 für Pressversuche entnommen wurde. Da die Lagerung mit hohen Abbauverlusten verbunden war (siehe Kapitel 8.8) musste davon ausgegangen werden, dass dieses Material stark mit Mikroorganismen durchsetzt war und für eine Zuckersaftextraktion eher ungeeignet erscheint. Die pH-Werte der Presssäfte lagen vor Fermentationsbeginn jedoch in einem normalen Bereich zwischen 5,8 und 5,9. Um Kontaminationseffekte der Hefefermentation durch Fremdorganismen zu vermindern, wurden die Versuche mit erhöhten Trockenhefeanfangskonzentrationen (Hefe Superstart™) von 2 g/l durchgeführt. Es ließen sich durch die angewendeten Fermentationsbedingungen, reproduzierbare Fermentationsverläufe mit zufriedenstellenden Ethanolausbeuten erzielen. Versuche im 30-Liter-Fermenter (Versuchsnr. 1) wurden dazu verwendet, um genügend Ausgangsmaterial für drei Abtriebsversuche zur Verfügung zu haben, um damit die Reproduzierbarkeit der diskontinuierlich durchgeführten Extraktivrektifikation besser beurteilen zu können. Im Vergleich zur kontrollierten Fermentation sollte auch ein Fermentationsansatz untersucht werden, der in Anlehnung an die „In-Field-Fermentation“ unter temperaturunkontrollierten Bedingungen durchgeführt wurde. Bezüglich des Fermentationsverhaltens konnte im Vergleich zur prozesskontrollierten Verfahrensweise kein bedeutsamer Unterschied festgestellt werden. Die vierte Versuchsreihe wurde mit Presssaft aus der gehäckselten Ganzpflanze der Ameisensäurekonservierung (0,75 Masse- %) nach 90 Tagen Lagerung durchgeführt. Der Saft wurde unter Zugabe von $Ca(OH)_2$ auf einen pH-Wert von sechs angehoben. Für die Fermentation wurde eine Trockenhefeanfangskonzentrationen (Hefe Thermosacc Dry®) von 0,3 g/l verwendet.

Der durch die Fermentation entstandene Alkohol wurde im ersten Schritt von der vergorenen Maische auf destillativem Wege abgetrennt. Dazu wurden die jeweiligen Maischen in einer Destillationsapparatur mit 5 l Vorlagevolumen der Firma Carl GmbH zweifach destilliert. Im Anschluss daran erfolgte die Rektifikation und Absolutierung. Diese wurden in einer satzweise betriebenen Rektifikationslaboranlage LM-2/S der Firma ILUDEST mit einem max. Vorlagevolumen von 1,3 l durchgeführt. Für die Entwässerung des aus den Fermentationsversuchen gewonnen Ethanols, kam Ethylenglykol gemäß den Arbeiten von DÜSSEL (1996) [94] als Schleppmittel zum Einsatz. Hierfür wurde das Ethylenglykol im oberen Bereich der Kolonne mit einem konstanten Volumenstrom von 1,5 l/h mit Hilfe einer Schlauchpumpe in die Kolonne eingespeist. Die Heizleistung im Sumpf der Kolonne betrug 800 W. Am Kolonnenkopf wurde ein Rücklaufverhältnis von fünf eingestellt. In Tabelle 58 sind die Kenndaten der Anlage zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 58: Kenndaten zur Labor-Rektifikationsanlage ILUDEST® LM-2/S

Parameter	Größe
Füllhöhe für Füllkörper in cm	130
Füllkörper, Maschendrahtringe in mm	3x3
Innendurchmesser in mm	30
max. Anzahl der Trennschichten [195]	54
min. Trennstufenhöhe in mm [195]	25
Druckverlust in mbar [195]	10,4
max. Heizleistung in W	800
eff. Kondensatorfläche in m^2	0,1

Im ersten Prozessabschnitt wurde die Kolonne als Absorber betrieben, in der mit dem hygroskopischen Waschmittel Ethylenglykol das Wasser aus den in der Kolonne austeigenden Dämpfen abgetrennt wurde. Im Vorlagekolben nimmt dadurch die Konzentration an schwersiedendem Ethylenglykol entsprechend der Einspeisung kontinuierlich zu. Nachdem das Ethanol vollständig aus dem Vorlagekolben ausgetrieben war, konnte im zweiten Prozessschritt das Wasser abgetrennt werden, sodass nur Ethylenglykol als Flüssigkeit in der Vorlage zurückblieb.

10.2 Analytik

10.2.1 Parameter im Zuckerhirsepresssaft

Elementbestimmung mit Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (FAAS)

Die im Zuckerhirsepresssaft befindlichen Elemente wurden mit einem Flammen-Atomabsorptionsspektrometer ZEEnit 700 (Analytik-Jena) bestimmt. Für die Bestimmung wurden Zuckerhirsesaftproben mit unterschiedlichen Probenvolumina (100 µl für Ca, Mg, K; 5 ml für Na, Fe, Zn und mindestens 5 ml für Cu) mit 2,5 ml Cäsiumchlorid-Lanthanpuffer versetzt. Das Probenvolumen wurde mit 0,1 % HCl auf 50 ml aufgefüllt.

Für die Messung mittels FAAS wurde als Lichtquelle eine Hohlkathodenlampe (HKL) eingesetzt, deren Licht durch Änderung des Spalts in für die Elemente charakteristische Wellenlängen aufgespalten wurde. Des Weiteren wurde standardmäßig mit einer Peakglättung von 20/25, einer Absorptionszeit von 3 Sekunden und einer Verzögerung von 5 Sekunden gearbeitet. Die Flamme wurde mit Hilfe des Brenngasgemisches C_2H_2/Luft (Brennertyp 50 mm) erzeugt, wobei die Proben mit einer Zerstäuberrate von 5 ml/min atomisiert wurden. Die Elemente wurden dann mit Hilfe eines Photomultiplier (PMT) detektiert.

Die weiteren elementspezifischen Parametereinstellungen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 59: Elementspezifische Parametereinstellungen der FAAS

	Spektrometer				Flamme		
Element	Wellenlänge in nm	Spalt in nm	PMT-Spannung in V	Lampenstrom in mA	D_2HKL-Strom in mA	Brenngasfluss in l/h	Brenngashöhe in mm
Na	589,0	0,8	233	3	-	60	7
Ca	422,7	1,2	241	4	29,3	190	6
K	766,5	0,8	289	4	-	65	8
Mg	285,2	0,8	289	2	-	50	7
Fe	248,3	0,2	363	5	-	80	10
Cu	324,8	0,5	297	4	-	60	7
Zn	213,9	0,5	330	4	18,5	40	7

Bestimmung des fermentierbaren Stickstoffgehalts

Der Gesamtstickstoff einer Lösung kann z. B. mittels der Kjeldahl-Methode bestimmt werden. Jedoch spiegelt nur der freie Aminostickstoff (Free Amino Nitrogen, FAN) den Stickstoff wider, der von Hefen verwendet werden kann. Verwendbarer, freier Stickstoff

beinhaltet freie alpha-Aminosäuren, Ammonium und kleinere Peptide. Der FAN-Wert wurde mit einem auf Formaldehyd basierendem Essay in Anlehnung an die Methode von ZOECKLEIN et al. (1995) [316] über Titration bestimmt, wobei die Anzahl freier Aminogruppen ermittelt wird [1].

Für die Analyse wurden die Proben zentrifugiert (49.000 x g für 30 min bei 4 °C) und der klare Überstand verwendet. Eine Fällung von Sulfiten mittels Bariumchlorid vor der Titration erfolgte nicht, da diese im Zuckerhirsepresssaft nicht zu erwarten sind [91].

Ammoniumstickstoff-, Phosphat- und Sulfatbestimmung

Die Bestimmung von Ammoniumstickstoff erfolgte photometrisch unter Anwendung eines Test-Kits der Firma Merck (Merck-Testnummer: 1.14752.0001). Das Prinzip der Methode basiert auf der Freisetzung von Ammoniak aus Ammoniumstickstoff in stark alkalischer Lösung. Die Bestimmung erfolgt mit einem Chlorierungsmittel durch welches Monochloramin entsteht. Dieses bildet mit zugegebenem Thymol ein blaues Indophenol-Derivat, das photometrisch bestimmt wird. Vor der Analytik wurden die Proben bei 49.000 x g für 30 min bei 4 °C zentrifugiert und für die Analytik eine Probe aus dem Überstand entnommen.

Das Verfahren entspricht den gängigen Verfahren der EPA 350.1, APHA 4500-NH3 D, ISO 7150/1 und DIN 38406 E5 (Deutsches Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung).

Die Bestimmung von Phosphat erfolgte photometrisch unter Anwendung eines Test-Kits der Firma Merck (Testnummer: 1.14842.0001). Das Prinzip der Methode basiert auf einer chemischen Reaktion der Phosphationen in einem schwefelsauren Milieu mit Ammoniumvanadat und Ammoniumheptamolybdat, bei dem orangegelbes Molybdatovanadatophosphorsäure gebildet wird. Das Verfahren entspricht den gängigen Verfahren der APHA 4500-P C. Vor der Analytik wurden die Proben bei 49.000 x g für 30 min bei 4 °C zentrifugiert.

Die Bestimmung von Sulfat erfolgte photometrisch unter Anwendung eines Test-Kits der Firma Merck (Testnummer: 1.14791.0001). Das Prinzip der Methode basiert auf einer Reaktion der Sulfationen mit Bariumiodat unter Freisetzung von Iodat-Ionen, welche mit Tannin zu einer braunroten Verbindung weiterreagieren. Vor der Analytik wurden die Proben bei 49.000 x g für 30 min bei 4 °C zentrifugiert.

10.2.2 Zusammensetzung von Bagasse

Zuckerhirsebagasse setzt sich aus Gerüstzuckern (Cellulose, Hemicellulose), Lignin, Proteinen, Mineralstoffe (Asche) sowie Extraktstoffen zusammen. Die Extraktstoffe werden mit Hilfe eines Extraktionsmittels aus dem Material herausgelöst. Die Hauptbestandteile stellen dabei sowohl die Zucker Saccharose, Glucose, Fructose als auch Fette und Wachse dar. Neben löslichen Zuckern und Fetten werden bei der Extraktion mit Wasser auch teilweise anorganische und stickstoffhaltige Bestandteile extrahiert [256]. In Abbil-

dung 68 ist der Zusammenhang für die Analytik des Pflanzenmaterials schematisch dargestellt.

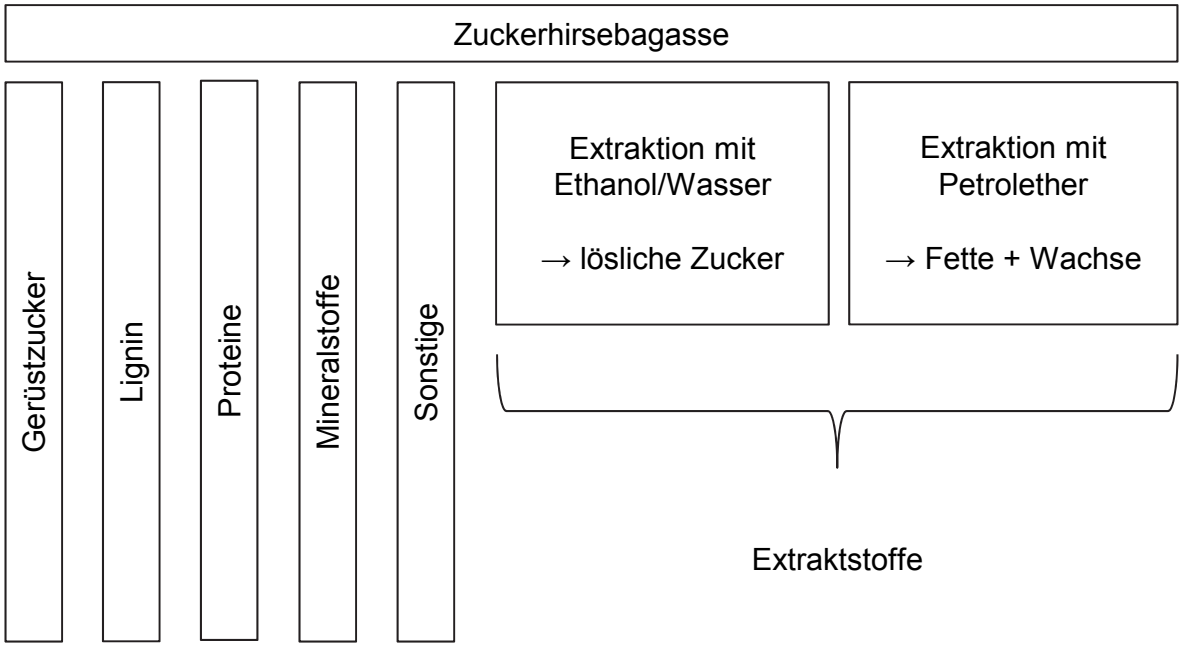


Abbildung 68: Zusammensetzung von Bagasse

Bestimmung des Fettgehalts

Die Analyse des Fettgehaltes wurde mit dem Verfahren nach Soxhlet gemäß VDLUFA bestimmt [286]. In Extraktionshülsen wurden jeweils 5 g getrocknetes und zerkleinertes Probenmaterial eingewogen und mit 350 ml Petrolether für sechs Stunden extrahiert. Das enthaltene Fett wurde in einem Extraktionskolben aufgefangen. Anschließend erfolgte die Entfernung des Lösungsmittels über eine Destillationsbrücke und eine Trocknung des Kolbens im Konvektionsofen bei 100 °C bis zur Massekonstanz. Über das Gewicht der Extraktionskolben vor und nach der Extraktion und der Einwaage konnte der Fettgehalt wie folgt berechnet werden:

$$\text{Fettgehalt in \% i. d. TM} = \frac{\text{Kolben nach Extraktion (g)} - \text{Leergewicht Kolben (g)}}{\text{TM in der Einwaage (g)}} \cdot 100 \qquad 10\text{-}6$$

Bestimmung des Aschegehalts

Die Bestimmung des Aschegehalts erfolgte in Keramiktiegeln mit einem maximalen Füllvolumen von 24 ml. Es wurde jeweils 1 g getrocknetes und zerkleinertes Probenmaterial eingewogen. Zum Veraschen wurde ein Programm mit Rampenfunktion nach NREL verwendet und bei 575 °C für einen Zeitraum von 3 h konstant gehalten. Nach Abkühlen

der Tiegel auf ca. 80 °C wurden diese im Glas-Trockenexsikkator abgekühlt und gewogen [258].

Bestimmung des Proteingehalts

Der Proteingehalt fester Proben erfolgte nach dem Kjeldahl-Verfahren in Anlehnung an die DIN EN ISO 5983-2 [82]. Als Ausgangsmaterial wurde jeweils 1 g vorgetrocknetes Probenmaterial verwendet. Für Flüssigproben wurde die Ausgangsmenge so gewählt, dass sich in der Aufschlussprobe insgesamt 1 g TM befanden. Im Anschluss an die Probeneinwaage folgte die Zugabe von zwei Katalysatortabletten nach Wieninger und 20 ml 98 Masse-% H_2SO_4. Die Proben wurden anschließend in der Aufschlussapparatur solange erhitzt, bis die Lösung klar vorlag. Anschließend erfolgte das Überdestillieren von Ammoniak in eine Borsäurelösung. Zur Quantifizierung des Ammoniaks wurde die Borsäurelösung mit 0,1 mol/l Salzsäure (V_{HCl}) zurücktitriert und der Stickstoffgehalt mit folgender Formel berechnet:

$$\text{Stickstoffgehalt in \% i. d. TM} = \frac{1{,}4007 \cdot \left(V_{HCl}\,(\text{ml}) - V_{HCl\,Blindwert}\,(\text{ml})\right) \cdot c_{HCl}\,(\text{mol/l})}{\text{TM in der Einwaage}\,(\text{g})} \qquad 10\text{-}7$$

Für die Umrechnung des Stickstoffes in Protein wurde ein Standardumrechnungsfaktor von 6,25 verwendet [82].

Bestimmung von Gerüstzuckern und Lignin

Die Bestimmung der Gerüstzucker erfolgte gemäß NREL-Protokoll [259]. Das Prinzip der Methode basiert auf den Ansatz, die Gerüstzucker durch Säurehydrolyse in Monomerform zu überführen und über dessen Konzentrationen in Lösung den Gehalt an Gerüstzucker in Polymerform zurückzurechnen. Für die Analytik wurden jeweils 0,3 g entfettetes und von wasserlöslichen Extraktstoffen befreites Material eingesetzt und mit 3 ml 72 Masse-% H_2SO_4 versetzt und eine Stunde bei 30 °C im Wasserbad behandelt. Anschließend erfolgte eine Verdünnung der Säure auf 4 % durch Zudosieren von 84 ml vollentsalztem Wassers. Die Proben wurden dann bei 121 °C eine Stunde in einem Sterilisationsautoklaven erhitzt und nach deren Abkühlung mit Bariumcarbonat neutralisiert. Nach dem Zentrifugieren erfolgte die Filtration des Überstandes mit Spritzenfiltern (PVDF 0,2 µm) und die Messung der Zuckerkonzentrationen im HPLC-System.

Die Konzentrationsbestimmung von Glucose, Xylose, Galaktose und Arabinose erfolgte mit einer Monosaccharid-Säule (Supelcogel^{TM} Pb, 300 x 7,8 mm ID, Laufmittel: Vollentsalztes Wasser, Fluss: 0,5 ml/min, Ofentemperatur: 60 °C, Injektionsvolumen: 25 µl) in Kombination mit einem RI-Detektor (RID-10) in einem HPLC-System der Firma Shimadzu (Kyoto, Japan).

Die Gerüstzuckerkonzentrationen bezogen auf das eingewogene Material wurden nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Gerüstzucker in \% i. d. TM} = \frac{\text{Zucker}\,(\text{g/l}) \cdot \frac{87}{1000} \cdot \text{Polymerfaktor} \cdot \text{Korrekturfaktor}}{\text{TM in der Einwaage}\,(\text{g})} \cdot 100 \qquad 10\text{-}8$$

Der Polymerfaktor wurde für C_5-Zucker mit 0,880 und für C_6-Zucker mit 0,900 angenommen [259]. Um auf die Zusammensetzung des Rohmaterials zurückrechnen zu können, muss der Kennwert für den Extraktionsrückstandes (Korrekturfaktor) bekannt sein.

Zur Ermittlung des Extraktionsrückstands wurden zunächst alle löslichen Bestandteile des entfetteten Materials durch mehrmalige Extraktion mit vollentsalztem Wasser entfernt. Der feste Rückstand wurde anschließend in Glasfiltertiegel (Porosität 4) überführt und nicht gebundenes Wasser durch eine Vakuumfiltration entfernt. Es folgte eine Trocknung des Produktes bei 80 °C in einem Konvektionsofen und anschließend im Vakuumtrockenschrank. Für den Rückstand aus der Wasserextraktion bezogen auf das entfette Material gilt folgender Zusammenhang:

$$\text{Rückstand nach Wasserextraktion in \% i. d. TM} = \frac{\text{Probe wasserextrahiert und getrocknet (g)}}{\text{TM in Einwaage (g)}} \cdot 100 \qquad \text{10-9}$$

Um den gesamten Extraktionsrückstand bezogen auf das Analyseausgangsmaterial berechnen zu können, muss der extrahierte Fettgehalt mitberücksichtigt werden. Es gilt:

$$\text{Extraktionsrückstand in \% i. d. TM} = \left(1 - \frac{\text{Fettgehalt (\% TM)}}{100}\right) \times \text{Rückstand Wasserextraktion (\% i. d. TM)} \qquad \text{10-10}$$

Für den Korrekturfaktor ergibt sich damit:

$$\text{Korrekturfaktor} = 1 - \frac{\text{Extraktionsrückstand (\% i. d. TM)}}{100} \qquad \text{10-11}$$

Um den Zuckerabbau während der thermischen Behandlung im Autoklaven berücksichtigen zu können, wurden parallel Zuckerstandards mitgeführt. Aus der Konzentration dieser Standards vor und nach der Hydrolyse wurde ein Faktor berechnet, der zur Korrektur der resultierenden Gerüstzuckerkonzentrationen diente.

Zur Bestimmung des Gehalts an säureunlöslichem Lignin (Klason Lignin), wurde der Rückstand aus der Hydrolyse in Keramik-Filtertiegel (Porosität P 2) überführt und mit vollentsalztem Wasser gewaschen. Die Filtertiegel wurden gemäß NREL bei 105 °C getrocknet und anschließend bei 575 °C verascht [257]. Die Berechnung des Lignins in % i.d. TM erfolgte gemäß:

$$\text{Lignin in \% i. d. TM} = \left(\frac{\text{TM Filtration srückstand (g)}}{\text{TM Einwaage (g)}} - \frac{\text{Asche (g)}}{\text{TM Einwaage (g)}}\right) \cdot 100 \qquad \text{10-12}$$

10.2.3 Bestimmung der Enzymaktivität

Die Bestimmung der Cellulase-Enzymaktivität erfolgte in Anlehnung an der von der IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) im Jahre 1987 veröffentlichen Methode [111]. Die Aktivität des Enzympräparats wird mit Filter Paper Units (FPU), be-

zogen auf die eingesetzte Enzymmenge, angegeben. Es wurden verschiedene Produktchargen des Enzympräparats Celluclast 1,5 L eingesetzt und es wurden, in Abhängigkeit der Charge, Aktivitäten zwischen 65 und 70 FPU pro g Enzymlösung gemessen.

Für die Messung der ß-Glucosidase-Aktivität wurde die Methode nach WOOD und BHAT (1988) [302] angewendet. Die Aktivität wird in IU (International Units) angeben. Eine IU entspricht der Enzymmenge, die unter den angegebenen Bedingungen 1 µmol 4-Nitrophenol pro Minute freisetzen. Für Celluclast 1,5 L wurden Werte, je nach Charge, zwischen 26 und 40 IU pro g Enzymlösung gemessen. Für Novozym 188 lagen die Aktivitäten zwischen 414 und 435 IU pro g Enzymlösung.

10.2.4 Bioethanol-Kraftstoffanalytik gemäß DIN EN 15376

Die Trocknungsprodukte wurde gemäß DIN EN 15376 [84] [85] zur Verwendung von Ethanol als Blendkomponente in Ottokraftstoff untersucht. Neben einem minimalen Mindestgehalt von 98,7 Masse-% an Ethanol und höheren gesättigten Alkoholen, darf der Anteil an höheren gesättigten (C3 bis C5) Mono-Alkoholen höchstens 2,0 Masse-% betragen. Methanol darf dabei einen Grenzwert von 1,0 Masse-% nicht überschreiten [85]. Darüber hinaus gibt es Grenzwerte für anorganisches Chlor, Kupfer, Phosphor, Schwefel, den Gesamtsäuregehalt sowie nichtflüchtige Anteile.

Die Untersuchungen des getrockneten Bioethanols aus Rektifikation und Absolutierung wurden an ein für diese Analytik zertifiziertes Labor vergeben (ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH, Neusäss). Für die Analytik wurde jeweils ein Probenvolumen von 115 ml der Mittellauffraktion bereitgestellt.

10.3 Ergebnisse

10.3.1 Untersuchte Hefepräparate

Um eine möglichst hohe Konversion von Zuckerhirse zu Ethanol zu erreichen, wurden die in Kapitel 10.1.1 vorgestellten Hefen im Hinblick auf ihre Zuckerkonversionsleistung untersucht. Die Versuche wurden bei 35 °C auf Modellsubstrat (verdünnter Zuckerhirsesirup) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Hälfte der acht untersuchten Hefen Ethanolausbeuten von ca. 0,45 g Ethanol pro g Zucker erzielten. Diese Hefen wurden für eine weitere Prüfung bei unterschiedlichen Temperaturen von 25 bis 45 °C kultiviert. In Anlehnung an Literaturangaben [119] wurden für eine schnelle Fermentation 2 g/l Aktivtrockenhefe eingesetzt. Die Ergebnisse der Fermentation in Abhängigkeit der Temperatur nach 48 Stunden sind in Abbildung 69 dargestellt.

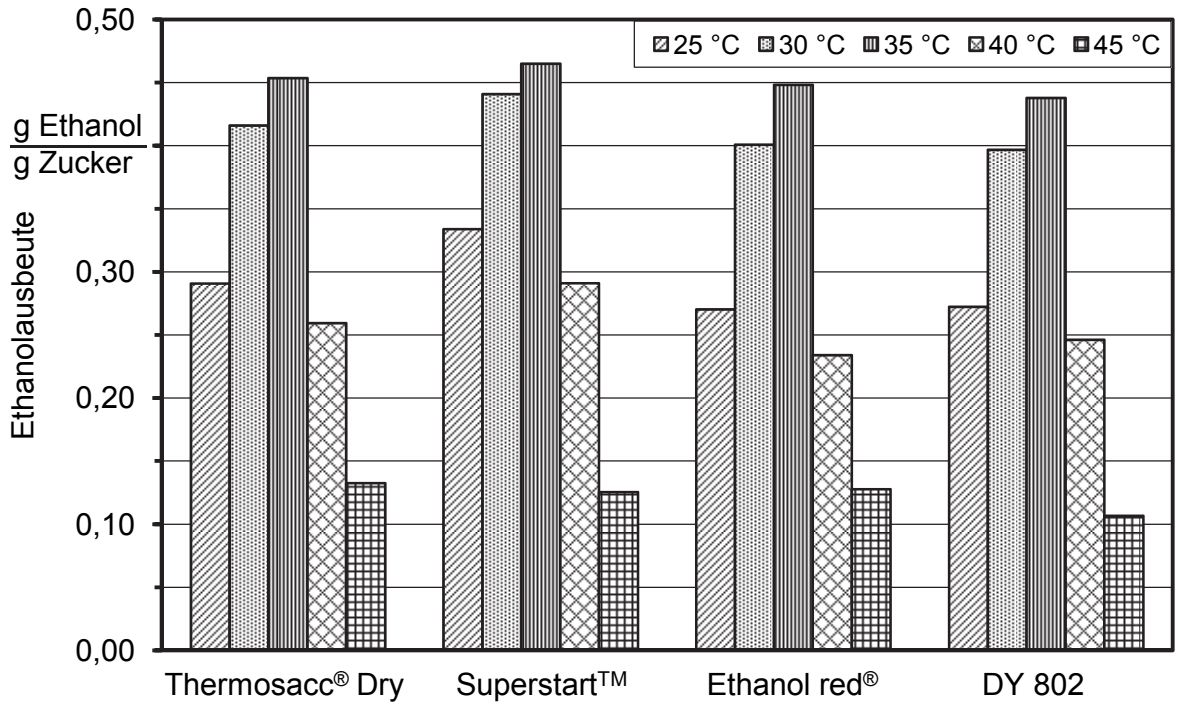


Abbildung 69: Zuckerkonversion nach 48 Stunden auf Modellsubstrat unter Verwendung von vier Hefepräparaten mit jeweils 2 g/l ADY in einem Temperaturbereich von 25 bis 45 °C (n=2, max. Abweichung vom Mittelwert ± 0,03 g Ethanol / g Zucker)

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass eine Kultivierung bei allen vier dargestellten Präparaten bei Temperaturen von 25 °C bis zu 45 °C prinzipiell möglich ist. Aufgrund der allgemein sehr geringen Konversion des Zuckers zu Ethanol bei 45 °C könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass die Hefen bei dieser Temperatur im Biomassewachstum gehemmt werden oder es sogar zu einem Absterben der Zellen kam. Bei allen eingesetzten Präparaten waren, unabhängig von den untersuchten Temperaturen, die höchsten Ethanolbildungsraten nach den ersten 24 Stunden zu verzeichnen. Bei 45 °C und 35 °C sanken bei allen Stämmen am zweiten Tag der Kultivierung die Produktbildungsraten stark ab. Auffällig war zudem, dass alle verwendeten Hefen die maximale Umsetzungsleistung bei einer Temperatur von 35 °C hatten und bei einer weiteren Temperaturerhöhung auf 45 °C die Produktivität auf ca. die Hälfte sank. Es zeigte sich, dass die Hefepräparate Thermosacc® Dry und Superstart™ die besten Ergebnisse hinsichtlich der Produktivität und der Ethanolausbeute aufwiesen. Mit beiden Präparaten wurden ähnliche Produktbildungsraten (über 2 g l^{-1} h^{-1}), wie in der Literatur für Batch-fermentationen beschrieben [142], erzielt. Deshalb wurden diese beiden Hefepräparate für weitere Untersuchungen verwendet.

10.3.2 Fermentation der gehäckselten Pflanze

10.3.2.1 Feststoff-Fermentation

Die Feststoff-Fermentation wurde im Hinblick auf die Animpfzellmenge, dem Einfluss von Ameisensäure sowie der Temperatur untersucht. In Abbildung 70 sind die Ethanolkonzentrationsverläufe für unterschiedliche Anfangshefestartkonzentrationen des Hefepräparats Thermosacc® Dry dargestellt.

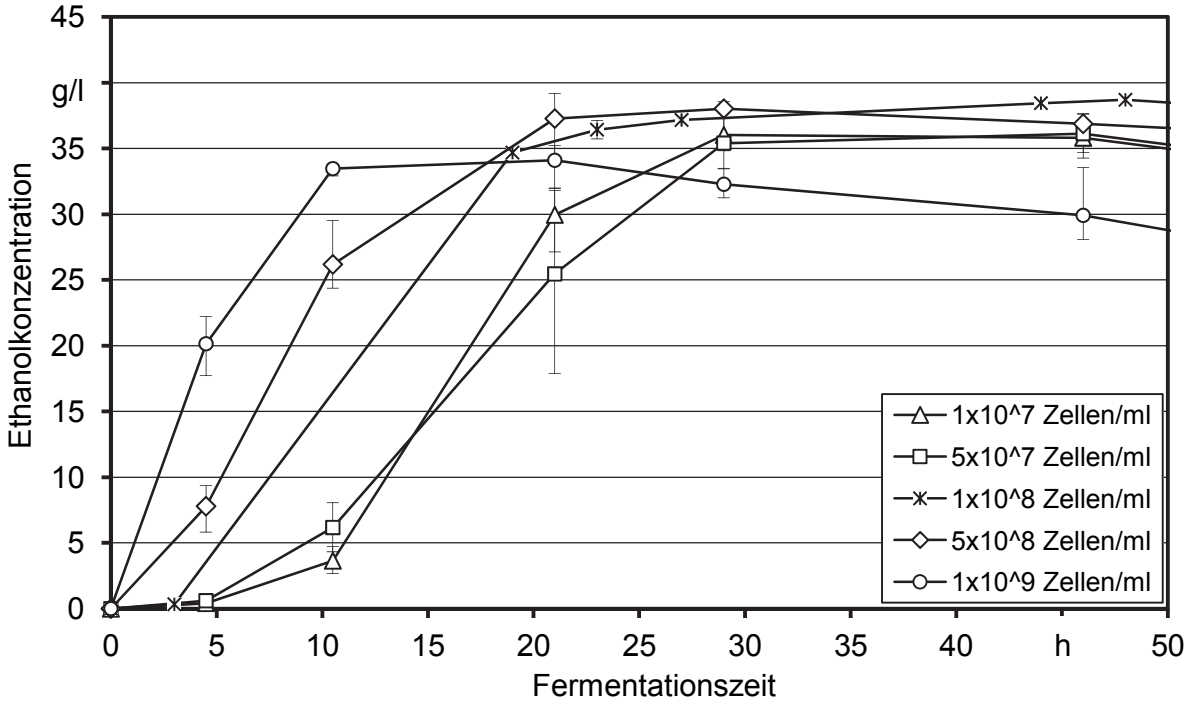


Abbildung 70: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit verschiedenen Hefestartkonzentrationen in Standkolben, n=3

Aus den Verläufen wird ersichtlich, dass durch höhere Animpfzellmengen, die Fermentation schneller gestartet und zudem die Fermentation früher abgeschlossen werden kann. Bei einer Animpfzelldichte von 1 x 10^9 Zellen/ml wurde das Ethanol-Maximum nach ca. 10 Stunden erreicht, wobei hier nur eine Ethanolkonzentration von 34 g/l vorlag. Mit 5 x 10^8 Zellen/ml wurde das Maximum erst nach ca. 20 Stunden erreicht, wobei hier höhere Ethanolkonzentrationen von 38 g/l erzielt werden konnten. Die höchste Ausbeute von 0,37 g Ethanol bezogen auf den Gesamtzucker als Glucose konnten mit 1 x 10^8 Zellen/ml erreicht werden (Abbildung 71), was einer Effizienz von 73 %, bezogen auf die theoretische Ausbeute, entspricht. In Abbildung 71 sind die maximal erzielten Ethanolausbeuten dieser Versuchsreihe dargestellt. Die Ausbeuten der verschiedenen Ansätze nach 48 Stunden sind, bis auf den Ansatz mit 1 x 10^9 Zellen, annähernd gleich bzw. befinden sich innerhalb des Fehlerbereichs. Bei sehr hohen Animpfzellmengen

konnte zwar die Ethanolproduktivität gesteigert werden, jedoch war die Ethanolausbeute geringer.

Eine Ursache für die bei den Ansätzen vergleichsweise gering vorliegenden Ethanolausbeuten (< 0,4 g/g) kann auf die starke Keimbelastung des Ausgangsmaterials zurückgeführt werden, was sich auch in der Bildung von Milchsäure bemerkbar machte. Die Ergebnisse für die Ethanolausbeute können aufgrund der Kontaminationsanfälligkeit des Ausgangsmaterials als nicht zufriedenstellend gewertet werden.

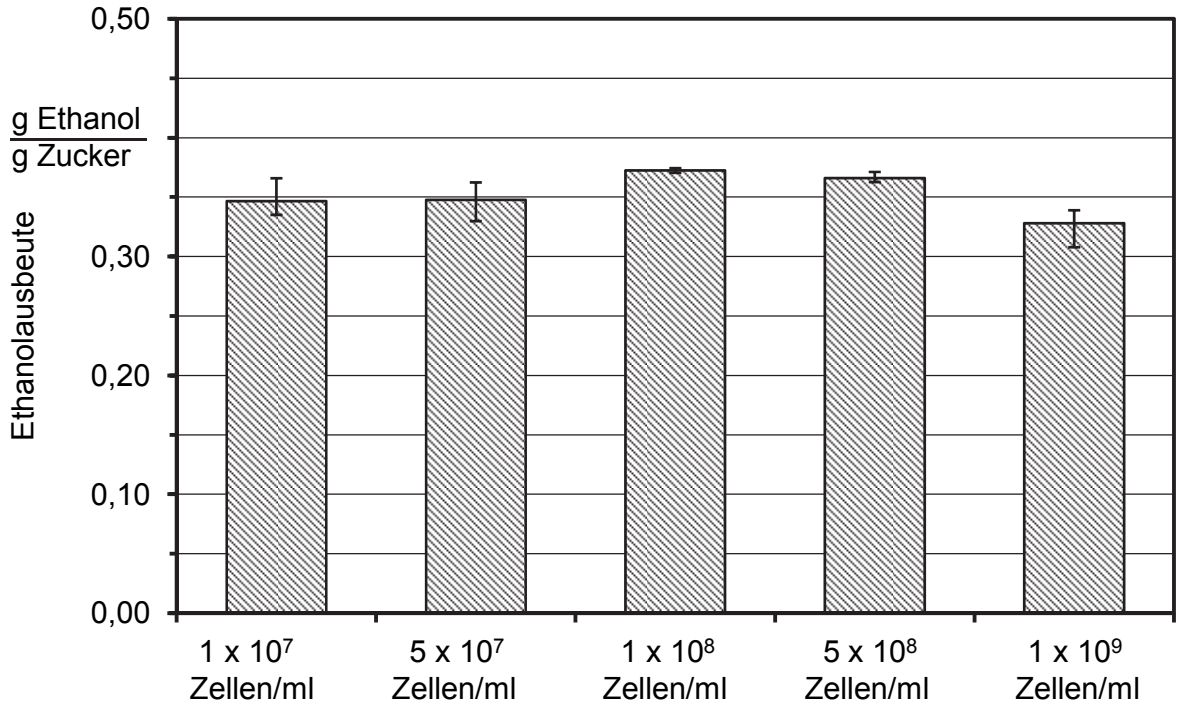


Abbildung 71: Maximale Ethanolausbeuten in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Hefeimpfmenge bei 30 °C in Standkolben, n=3

In Abbildung 72 sind die zeitlichen Verläufe der Ethanolkonzentration für gehäckselte Zuckerhirse, welche mit verschieden hohen Konzentrationen an Ameisensäure versetzt wurden, dargestellt. Die Art der zugegebenen Ameisensäure – konzentriert oder gepuffert – beeinflusste die pH-Werte in den jeweiligen Flüssigphasen deutlich (siehe Abbildung 73). Die Zugabe von konzentrierter Ameisensäure und Ameisensäure in gepufferter Form führten zu einer pH-Wert-Absenkung der Versuchsansätze und teilweise zu einer verlängerten Fermentationszeit bis zum Erreichen der maximalen Ethanolkonzentration. Für Konzentrationen ≥ 5 g/l an konzentrierter Ameisensäure konnte innerhalb des betrachteten Zeitintervalls keine Ethanolbildung festgestellt werden. Im Vergleich mit nicht ameisensäurevorbehandelten Proben, wurden höhere Ethanolausbeuten erreicht, wenn Ameisensäure mit bis zu 5 g/l in gepufferter Form zugegeben wurde (siehe Abbildung 74). Die maximal erzielbare Ethanolausbeute lag bei ca. 0,40 g pro Gramm Gesamtzu-

cker als Glucoseäquivalent, wobei sich die Ausbeuten der mit Ameisensäure versetzten Ansätze innerhalb derer Bandbreiten bewegten. Die tendenziell höhere Ethanolausbeute, im Vergleich zu den säureunbehandelten Proben, kann mit einer Reduzierung der mikrobiologischen Aktivität der Fremdorganismen in Zusammenhang gebracht werden, was sich auch in einer deutlich verringerten Bildung an Milchsäure bemerkbar machte (Daten nicht gezeigt).

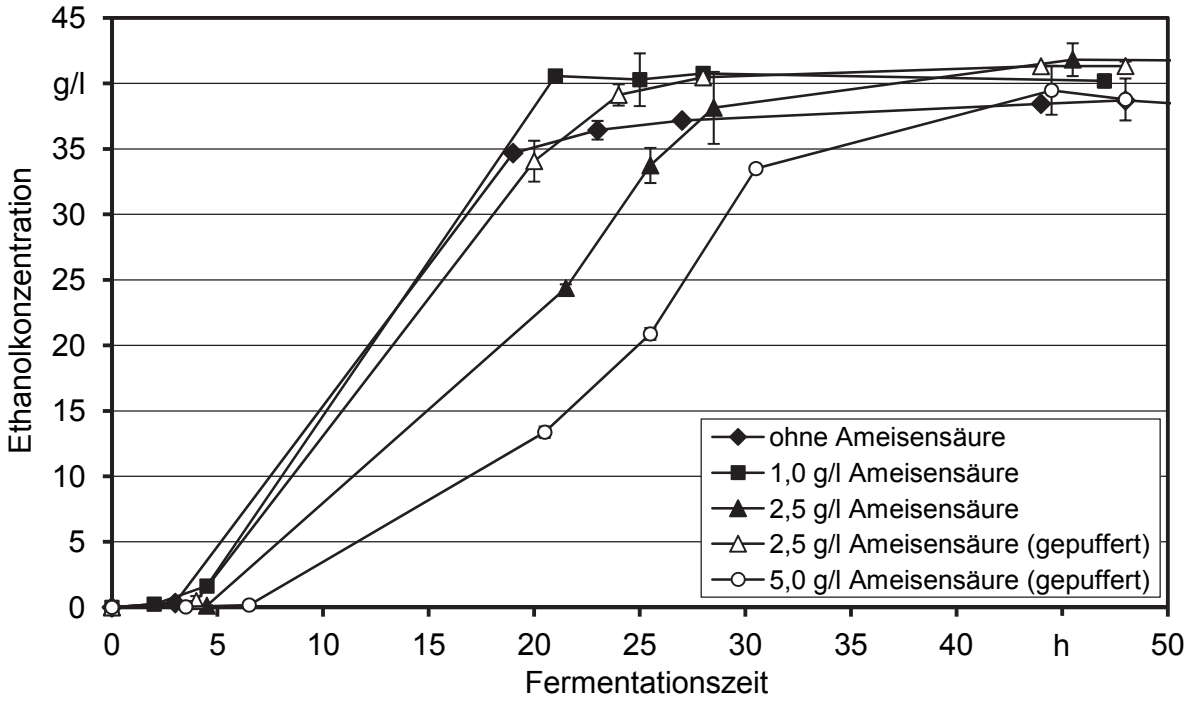


Abbildung 72: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen bei verschiedenen Ameisensäure- und Ameisensäurepufferkonzentrationen in Standkolben, n=2

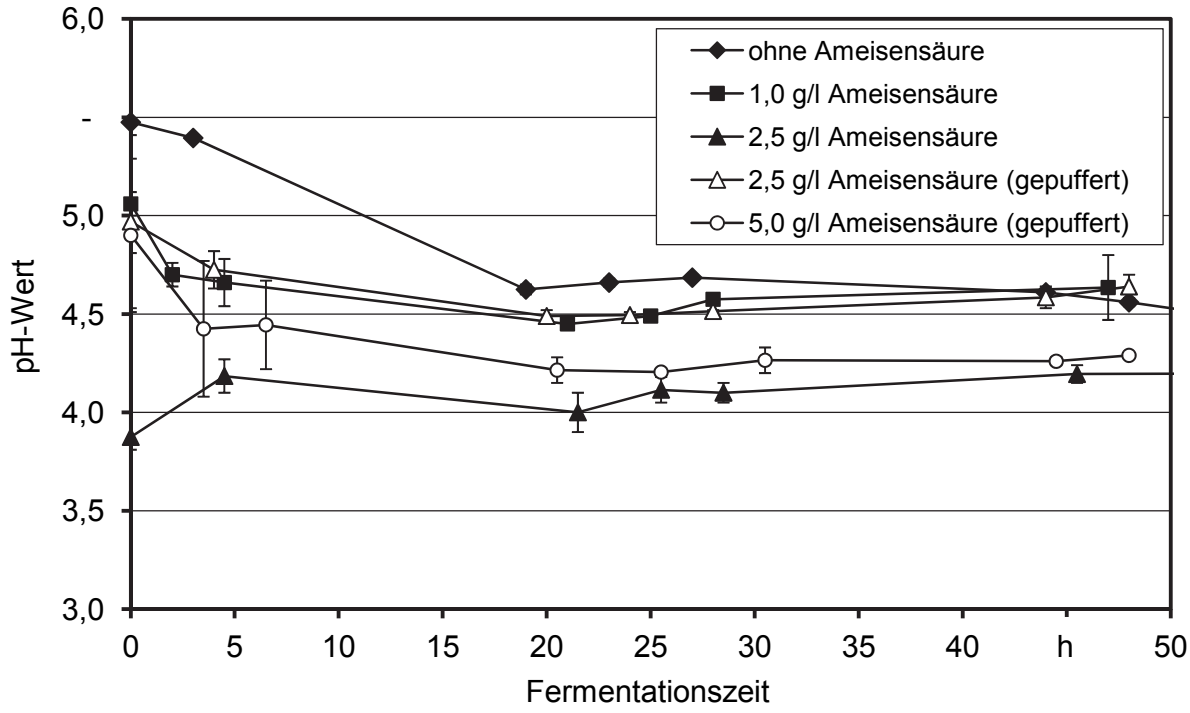


Abbildung 73: pH-Wert der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen bei verschiedenen Ameisensäure- und Ameisensäurepufferkonzentrationen in Standkolben, n=2

Während der Fermentationen verhielten sich die pH-Werte für die Versuche mit 1 g/l Ameisensäure und 2,5 g/l Ameisensäure in gepufferter Form ähnlich, wobei die maximal erzielte Ethanolkonzentration bei den Versuchen mit 2,5 g/l erst später erreicht wurde. Bei den Versuchen mit 2,5 g/l konzentrierter Ameisensäure und 5 g/l Ameisensäure in gepufferter Form waren die pH-Werte der gepufferten Variante höher als die der Variante mit konzentrierter Säure; trotzdem erfolgte die Fermentation insgesamt deutlich langsamer. Die Fermentation der Zuckerhirse mit Hilfe der Hefe war folglich nicht nur vom pH-Wert abhängig, sondern zusätzlich auch von der Konzentration an Ameisensäure. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich eine Zugabe von Ameisensäure förderlich auf die Ethanolausbeute auswirken kann, jedoch ein zu niedriger pH-Wert die Produktbildung verlangsamt. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei Fermentationen gemacht, bei denen Ameisensäure zu Zuckerhirsepresssaft in verschiedenen Konzentrationen zugegeben wurde (siehe Kapitel 10.3.3.4).

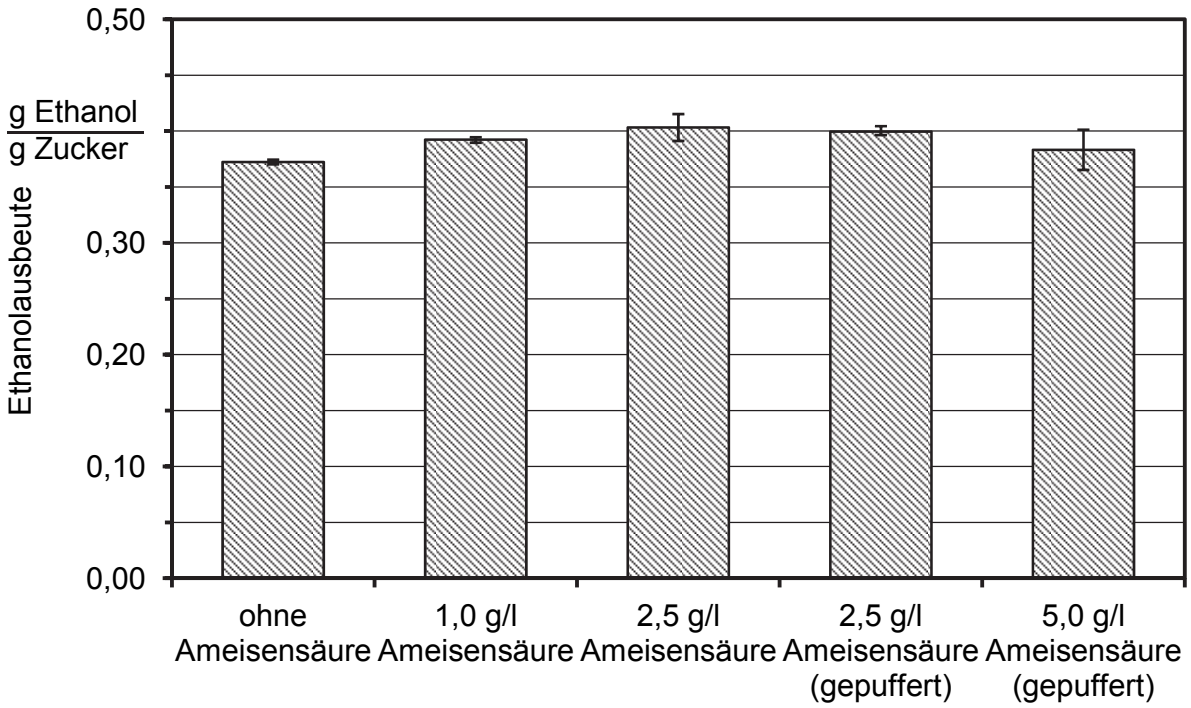


Abbildung 74: Maximale Ethanolausbeuten in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Zugabe von konzentrierter Ameisensäure und Ameisensäurepuffer bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen, n=2

In Abbildung 75 sind die Verläufe der Ethanolkonzentrationen in Abhängigkeit von der Temperatur (25 und 35 °C) sowie der Zugabe von 2,5 g/l konzentrierter Ameisensäure und Ameisensäure in gepufferter Form dargestellt. Die Fermentationstemperatur hatte einen erheblichen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Gärung. Niedrige Temperaturen waren durch eine lange Lag-Phase von ca. neun Stunden geprägt. Bei den Versuchen mit konzentrierter Ameisensäure dauerte es in der Regel am längsten, bis das Ethanolmaximum erreicht wurde. Die gepufferte Ameisensäurevariante nahm eine Zwischenposition ein.

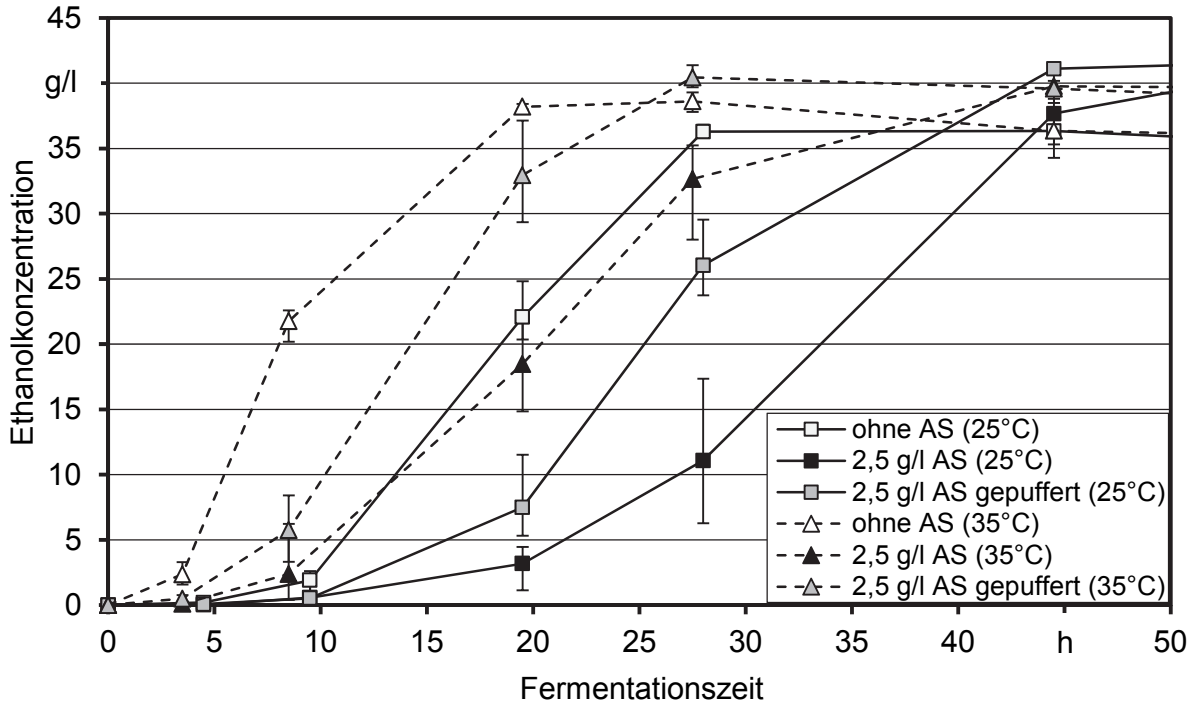


Abbildung 75: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 25 °C und 35 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l bei 0 und 2,5 g/l Ameisensäure in Standkolben, n=3

10.3.2.2 Perkolat-Fermentation

In Abbildung 76 sind analog zu der Feststoff-Fermentation die Verläufe der Ethanolkonzentration für die Perkolat-Fermentation bei unterschiedlichen Ameisensäurekonzentrationen dargestellt. Aufgrund der Verdünnung mit Wasser sind die erzielten Ethanolkonzentrationen deutlich niedriger. Die höchsten Ethanolkonzentrationen konnten mit 2,5 g/l gepufferter Ameisensäure erzielt werden. Im Vergleich zur Feststoff-Fermentation im Standkolben konnten deutlich höhere Ethanolausbeuten von über 90 % gefunden werden (siehe Abbildung 78). Der Grund hierfür könnte ein besserer Extraktionsgrad der zur Verfügung stehenden Zucker sein. Auffällig im Vergleich zum Feststoff-Fermentationsverfahren ist, dass sich bei der Perkolat-Fermentation mit 2,5 g/l konzentrierter Ameisensäure und 5 g/l Ameisensäure in der gepufferten Form pH-Werte < 4 einstellten (siehe Abbildung 77) und es innerhalb des dargestellten Zeitraums von 50 h zu keiner nennenswerten Ethanolbildung kam. Dies kann damit erklärt werden, dass durch die zusätzliche Wasserzugabe bei der Perkolat-Fermentation, die puffernde Wirkung der in Zuckerhirse enthaltenen Salze, weniger stark zum Tragen kommt.

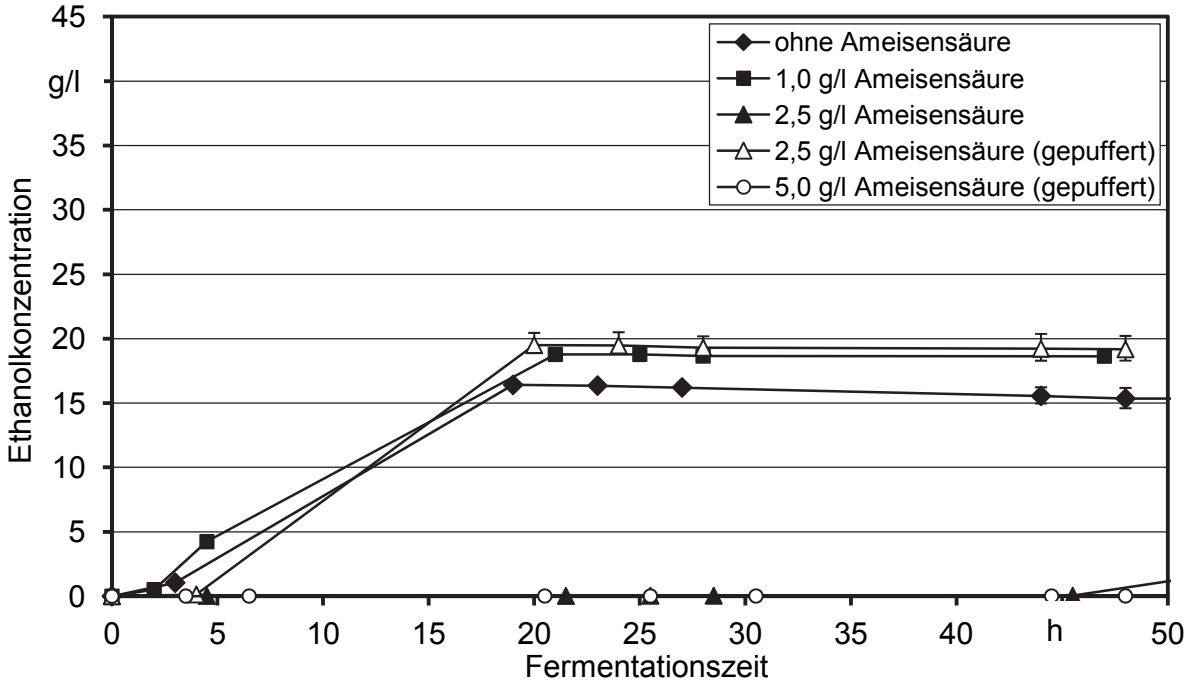


Abbildung 76: Ethanolkonzentration in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l bei verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen in rotierenden Kolben, n=3

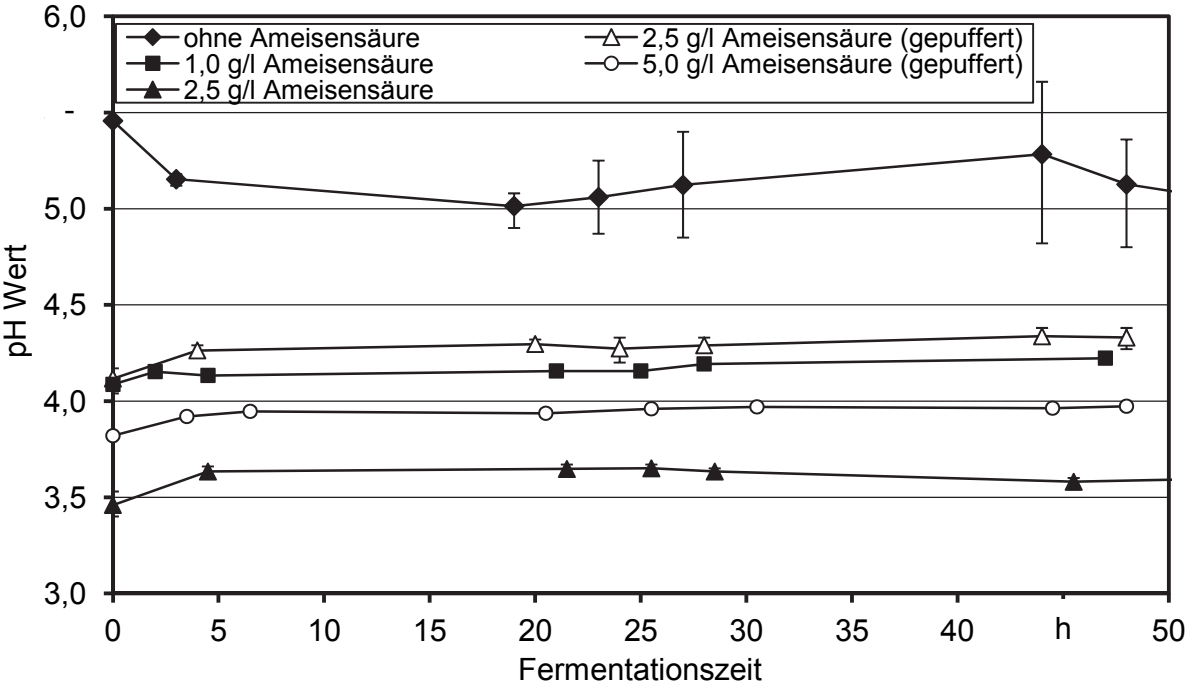


Abbildung 77: pH-Wert in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l bei verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen in rotierenden Kolben, n=3

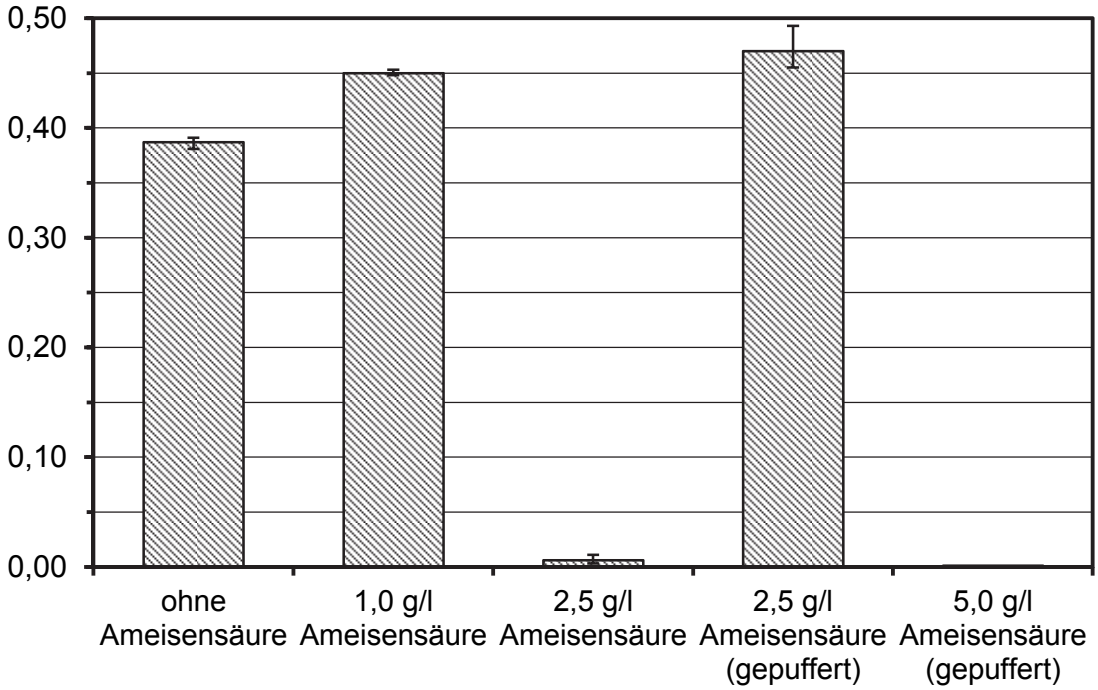


Abbildung 78: Maximale Ethanolausbeuten in der Maische aus gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Konzentration von konzentrierter Ameisensäure und gepufferter Ameisensäurebei bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l in rotierenden Kolben, n=3

Wiederholte Perkolat-Fermentation

In Abbildung 79 ist der Ethanol- und pH-Wertverlauf für die wiederholte Fermentation mit Perkolat dargestellt. Nach drei Zyklen konnte eine Ethanolkonzentration von ca. 35 g/l erzielt werden. Die maximalen Ethanolausbeuten jeder Stufe waren unterschiedlich (siehe Abbildung 80) und zeigen eine fallende Tendenz mit steigender Anzahl an Stufen. Nach jeder Stufe wurde die Hefezellkonzentration gemessen und es konnte hieraus auf die ursprüngliche Hefemenge zu Beginn jedes Zyklus zurückgerechnet werden. Mit steigender Stufenzahl standen für die Fermentation der Zucker auch mehr Hefezellen zur Verfügung (siehe Abbildung 80). Die geringere Ethanolausbeute könnte damit zusammenhängen, dass mit einer höheren Anzahl an Hefen auch der Kohlenstoffbedarf (Glucose) für die Zellbildung steigt. Zudem könnte durch das steigende Alter der Zellen die Vitalität der Hefen abgenommen haben. Eine Milchsäurebildung war während der dreistufigen Perkolat-Fermentation kaum vorhanden, so dass Ethanoleinbußen aufgrund von Fremdorganismen unwahrscheinlich sind.

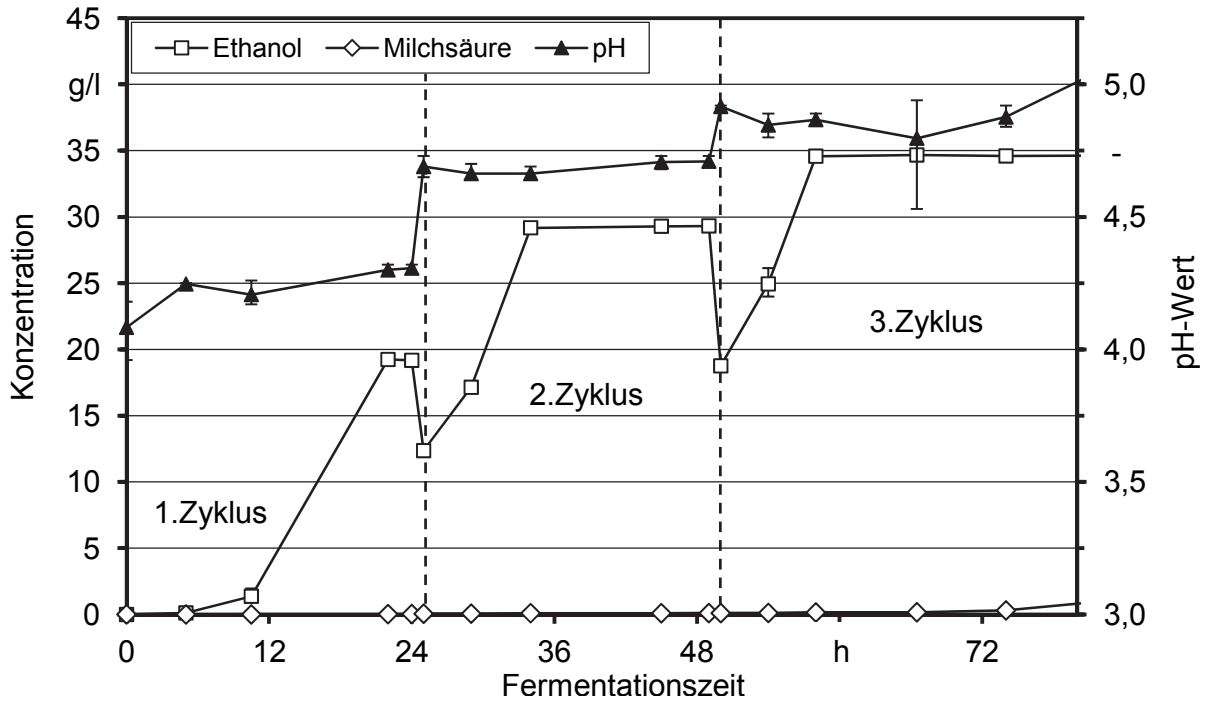


Abbildung 79: Ethanolkonzentration in der Maische von gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' in Abhängigkeit der Fermentationszeit bei 30 °C mit 1 x 10^8 Hefezellen/l und einer anfänglichen der wiederholten Perkolat-Fermentation Ameisensäurekonzentration (gepuffert) von 2,5 g/l in rotierenden Kolben, n=3

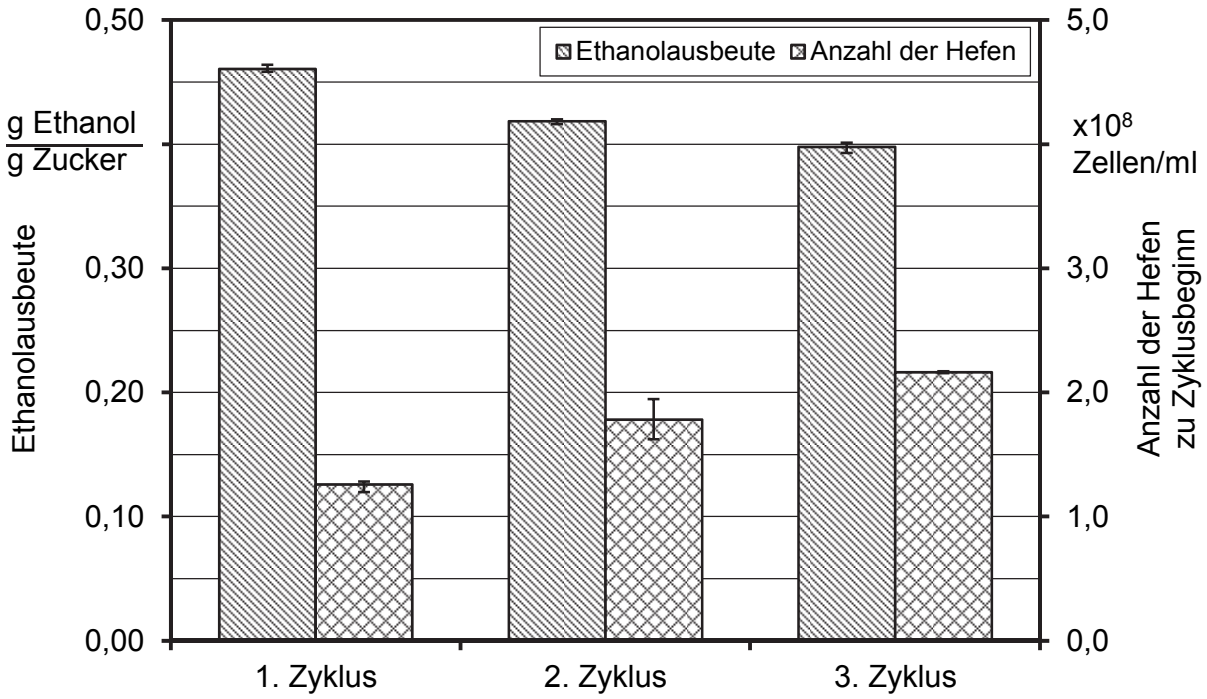


Abbildung 80: Maximale Ethanolausbeuten und Anzahl der Hefezellen je Zyklus bei der wiederholten Fermentation von gehäckselter Zuckerhirse der Sorte 'Sucro Sorgo' bei 30 °C mit 1x10^8 Hefezellen/l und einer anfänglichen Ameisensäurekonzentration (gepuffert) von 2,5 g/l in rotierenden Kolben, n=3

10.3.2.3 Fazit

Aus gehäckselter Zuckerhirse ließ sich sowohl durch die Feststoff-Fermentation als auch durch die Perkolat-Fermentation Ethanol erzeugen.

Eine Feststoff-Fermentation der gehäckselten Zuckerhirsepflanze war grundsätzlich möglich und es konnten mit einer vorgelegten Hefekonzentration von 1×10^8 Zellen/ml 0,37 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent erzielt werden. Eine Veränderung der Animpfzelldichte der Hefe führte nach 48 Stunden zu keiner merklichen Änderung der Ausbeute, außer bei sehr hoher Hefekonzentration von 1×10^9 Zellen/ml, bei der die Ausbeute am geringsten war. Die Versuche haben ebenfalls gezeigt, dass sich eine Zugabe von Ameisensäure bis zu einer gewissen Konzentration positiv auf die Ethanolausbeute auswirkt. Mit 2,5 g/l Ameisensäure (pH≈4,2) konnte die Ausbeute auf 0,40 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent gesteigert werden. Die Zugabe von Ameisensäure kann sich mit steigender Konzentration nachteilig auf die Gärgeschwindigkeit auswirken und sogar zu einem völligen Erliegen der Fermentation führen. Durch die Herabsetzung des pH-Werts wird der optimale pH-Wert von 5,0 bis 5,2 für die Hefefermentation unterschritten [131]. Durch die Verwendung einer gepufferten Ameisensäure und der damit verbundenen pH-Wertanhebung konnte die Gärgeschwindigkeit wieder erhöht werden. Bei Nutzung der Feststoff-Fermentation als Lagervariante kann durch die Zugabe von Ameisensäure der Einfluss der natürlichen Keimbelastung verringert werden, sodass höhere Ethanolkonzentrationen erzielbar sind. Bei den nicht mit Ameisensäure behandelten Zuckerhirsehäckseln zeigte sich hingegen eine deutliche Bildung von Milchsäure während der Fermentation. Die Feststoff-Fermentation von gehäckselter Zuckerhirse kann als eine alternative Lagerungsoption zur Totalkonservierung von Ameisensäure angesehen werden, wobei die technische Umsetzung im industriellen Maßstab noch bewiesen werden müsste.

Im Vergleich zur Feststoff-Fermentation waren mit der Perkolat-Fermentation höhere Ethanolausbeuten erzielbar. Eine Zugabe von Ameisensäure wirkte sich auch hier positiv aus und es konnte die Ethanolausbeute von 0,39 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent auf 0,46 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent mit Zugabe von Ameisensäure gesteigert werden. Die Ameisensäurekonzentration hatte im Vergleich zur Feststoff-Fermentation bereits bei geringeren Konzentrationen einen inhibierenden Effekt auf die Hefegärung, da der pH-Wert niedriger war. So konnten bei einer Zugabe von 2,5 g/l Ameisensäure (pH≈3,6) innerhalb von 48 h nur noch sehr geringe Ausbeuten erzielt werden. Mit der Perkolat-Fermentation ließen sich im Vergleich zur Feststoff-Fermentation generell nur geringere Ethanolkonzentrationen aufgrund der Verdünnung erzielen. Die Machbarkeit einer wiederholten Perkolat-Fermentation konnte zwar gezeigt werden, es wurde aber eine Verringerung der Ethanolausbeute mit zunehmender Anzahl an Zyklen festgestellt. Dass die Perkolat-Fermentation in dezentralen Anlagen als Alternative zur Saftfermentation Anwendung findet, erscheint aus den genannten Schwierigkeiten sowie der technischen Umsetzung, die bisher nicht erprobt wurde, als unwahrscheinlich.

10.3.3 Fermentation von Zuckerhirsepresssaft

Für die Fermentation von Zuckerhirsepresssaft wurden zum einen verschiedene Fermentationsverfahren für die Ethanolherstellung und zum anderen die Lagerfähigkeit von vergorenem Presssaft untersucht. Zusätzlich lag der Fokus auf der Fermentierbarkeit von sauren Presssäften, welche aus Häckseln gepresst wurden, die mit 0,75 und 1,0 Masse-% Ameisensäure konserviert wurden. Um einschätzen zu können, ob ausreichend Nährstoffe für eine Fermentation mit Hefen vorhanden sind oder ob eventuell ein Nährstoffmangel vorliegt und deshalb Stoffe zusätzlich zugeführt werden müssten, wurde eine Bestimmung der Nährstoffe im Zuckerhirsepresssaft durchgeführt.

10.3.3.1 Nährstoffzusammensetzung von Zuckerhirsepresssäften

Für die Nährstoffbestimmungen wurden Presssäfte vier verschiedener Zuckerhirsesorten aus dem Jahre 2010 mittels AAS und Testkits auf ihre Nährstoffgehalte untersucht und verglichen (Tabelle 60). Dabei fiel auf, dass der Saft der Sorte ‘Keller‘ (Ernte- und Pressdatum: 03.11.2010 und 04.11.2010) fast die doppelte Konzentration an Kalium, Magnesium und Stickstoff im Vergleich zu den Sorten ‘Umbrella‘ (Ernte- und Pressdatum: 18.10.2010), ‘Sugar Drip‘ (Ernte- und Pressdatum: 26.10.2011, 28.10.2010) und ‘Della‘ (Ernte- und Pressdatum: 26.10.2010, 29.10.2010) aufwies. Auch von anderen Nährstoffen wies die Sorte ‘Keller‘ häufig die höchsten Konzentrationen auf. Nur bei Phosphor und Calcium lagen die Nährstoffgehalte leicht niedriger als bei der Sorte ‘Sugar Drip‘. Zudem war der Phosphorgehalt von 'Sugar Drip' mit ca. 205 mg/l mit Abstand am höchsten. Im Gegensatz dazu hatte die Sorte ‘Umbrella‘ mit 139 mg/l die niedrigste Konzentration an Magnesium.

Weiterhin wurden die Nährstoffgehalte der Zuckerhirsesäfte in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums der Pflanzen in einem Zeitraum von 13 Tagen untersucht. Für die Versuche kam zum einen der Saft der Stängelfraktion und zum anderen der Saft der Ganzpflanze zum Einsatz. Als Pflanzenmaterial wurde die Zuckerhirse ‘Top 76‘ untersucht (Tabelle 61). Auffällig ist, dass der Calciumanteil, unabhängig vom Pflanzenmaterial, innerhalb von zwei Wochen sank. Auch die Eisen- und Kaliumkonzentration nahmen mit der Zeit leicht ab. Im Gegensatz dazu wurde für Schwefel und Phosphor ein Konzentrationsanstieg in der Ganzpflanze und für die Stängelfraktion eine Konzentrationsminderung des Schwefels gefunden. Für FAN (Free Amino Nitrogen) findet man unabhängig vom Ausgangsmaterial innerhalb der untersuchten zwei Wochen eine Erhöhung der Konzentration um fast 30 %. Zink ist ebenfalls in sehr geringen Konzentrationen (< 2 mg/l) in beiden Ausgangsmaterialien zu finden und ändert sich innerhalb von zwei Wochen nur geringfügig.

Tabelle 60: Nährstoffe (Mittelwerte und Standardabweichung) in Presssäften von vier Zuckerhirsesorten aus dem Erntejahr 2010, n=3

Nährstoffe	Konzentration im Zuckerhirsepresssaft in mg/l			
	'Umbrella'	'Sugar Drip'	'Della'	'Keller'
Calcium	641 ± 12	633 ± 25	611 ± 12	621 ± 6
Eisen	6 ± 1	8 ± 1	11 ± 2	11 ± 0
Kalium	2.600 ± 282	2.847 ± 238	2.600 ± 283	4.814 ± 13
Magnesium	139 ± 2	207 ± 18	255 ± 4	405 ± 21
Zink	0 ± 0	1 ± 0	1 ± 0	2 ± 0
Phosphor[1]	91 ± 19	205 ± 55	91 ± 19	159 ± 34
Schwefel[2]	100 ± 2	104 ± 6	118 ± 3	134 ± 5
Stickstoff[3]	34 ± 2	30 ± 4	18 ± 1	64 ± 21

[1] gemessen als PO_4^{3-}
[2] gemessen als SO_4^{2-}
[3] gemessen als NH_4^+

Tabelle 61: Nährstoffe (Mittelwerte und Standardabweichung) im Zuckerhirsepresssaft zu unterschiedlichen Wachstumsstadien/Ernteterminen in der Ganzpflanze- und in der Stängelfraktion der Sorte 'Top 76'

	Konzentration im Zuckerhirsepresssaft in mg/l					
	Ausgangsmaterial: Ganzpflanze Erntedatum			Ausgangsmaterial: Stängelfraktion Erntedatum		
Nährstoff	13.10.11 n=4	20.10.11 n=4	26.10.11 n=4	12.10.11 n=1	21.10.11 n=3	25.10.11 n=1
Calcium	804 ± 75	768 ± 58	700 ± 26	681	481 ± 37	464
Eisen	47 ± 7	42 ± 18	17 ± 2	67	62 ± 13	40
Kalium	2268 ± 222	2251 ± 9	2142 ± 108	2785	2237 ± 223	2361
Magnesium	370 ± 31	370 ± 44	371 ± 15	313	242 ± 14	231
Zink	2 ± 1	2 ± 1	3 ± 0	2	4 ± 1	3
FAN[1]	307 ± 11	347 ± 20	399 ± 25	253	273 ± 13	334
Phosphor[2]	266 ± 34	262 ± 8	282 ± 11	175	178 ± 47	186
Schwefel[3]	109 ± 5	119 ± 8	124 ± 6	139	125 ± 12	114

[1] FAN, Free Amino Nitrogen
[2]: gemessen als PO_4^{3-}
[3]: gemessen als SO_4^{2-}

Beim Vergleich der enthaltenen mineralischen Nährstoffkonzentrationen der vier Presssäfte aus verschiedenen Zuckerhirsearten aus dem Erntejahr 2010 mit den in der Literatur empfohlenen Nährstoffangaben aus Kapitel 3.8.1.2 ist erkennbar, dass in den unter-

suchten Presssäften die Konzentrationen aller untersuchter Elemente oberhalb der empfohlenen Nährstoffkonzentration für Hefen lagen. Für Phosphor und Schwefel stimmen die erhaltenen Konzentrationen mit den in der Literatur untersuchten Presssäften überein.

Für die Presssäfte aus der Stängelfraktion konnte im Vergleich zu den Presssäften aus der Ganzpflanze eine um 20 % höhere Konzentration an Calcium, Magnesium und FAN gefunden werden. Für Phosphor ist die Konzentration sogar um 50 % erhöht. Andererseits ist in der Stängelfraktion mehr Kalium und Eisen vorhanden. Darüber hinaus lässt sich schließen, dass bestimmte Stoffe eher im Stängel angereichert werden (Kalium, Schwefel) und andere wiederum in den Blättern (Calcium, Magnesium). Die in Tabelle 60 und Tabelle 61 gezeigten Nährstoffgehalte der verschiedenen Zuckerhirsepresssäfte verdeutlichen, dass jeder Zuckerhirsepresssaft ausreichend Mineralien enthielt, die für Hefen essentiell sind.

Die Presssäfte der Ganzpflanze aus dem Jahr 2011 zeigten im Vergleich zu 2010 eine höhere Calcium-, Eisen-, Magnesium-, Phosphor-, Schwefel- und Zinkkonzentration. Einzig die Nährstoffkonzentration an Kalium war leicht erniedrigt.

Beobachtungen bei Fermentationen unterschiedlicher Presssäfte, bei denen ca. 90 % der vorhandenen Zucker in Ethanol umgewandelt werden konnten und ein Restzuckergehalt < 5 g/l erreicht wurde, bestätigen, dass eine Limitierung von Nährstoffen im Zuckerhirsepresssaft während der Fermentationen nicht vorlag.

Nährstoffbedarf der Hefen bei unterschiedlichen Anfangszuckerkonzentrationen

Die Obergrenze der in Zuckerhirsepresssaft erzielbaren Zuckerkonzentration beträgt ca. 170 g/l (Glucoseäquivalent) [8]. Da durch hohe Zuckerkonzentrationen die Ethanolbildung aufgrund des starken Hefewachstums und der daraus folgenden eventuellen Nährstoffarmut gehemmt werden könnte, wurden Versuche mit verschiedenen Zuckerkonzentrationen durchgeführt. Für die Fermentationen wurde mit Presssäften gearbeitet, deren Gesamtzuckergehalt mit Saccharose auf bis zu 170 g/l eingestellt wurden. Es erfolgte keine weitere Nährstoffzugabe. Die Ergebnisse sind in Tabelle 62 dargestellt.

Tabelle 62: Fermentation mit Saccharose angereicherter Zuckerhirsepresssäfte der Sorte 'Sugar Drip' mit einer Aktivtrockenhefeanfangskonzentration (Thermosacc® Dry) von 0,3 g/l bei 35 °C, n=2 (Mittelwerte und Standardabweichung)

Anfangs-zucker in g/l	End-zucker in g/l	Milch-säure in g/l	Ethanol in g/l	Glycerol in g/l	Ethanol-ausbeute in g Ethanol / g Zucker
79,7 ± 0,4	1,4 ± 0,0	2,9 ± 0,6	35,6 ± 0,3	1,8 ± 0,7	0,45 ± 0,0
105,3 ± 0,2	1,4 ± 0,0	1,7 ± 0,7	47,8 ± 0,1	4,2 ± 0,0	0,45 ± 0,0
128,9 ± 0,5	2,1 ± 0,1	6,7 ± 1,0	58,1 ± 0,4	5,2 ± 0,1	0,45 ± 0,0
148,8 ± 1,5	2,2 ± 0,0	5,3 ± 0,0	68,4 ± 0,4	5,8 ± 0,1	0,46 ± 0,0
170,0 ± 0,2	2,2 ± 0,0	6,6 ± 0,0	76,9 ± 0,1	6,6 ± 0,0	0,46 ± 0,0

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass keine Reduzierung der Fermentationsleistung bei hoher Substratkonzentration vorlag und unabhängig von der Substratkonzentration eine gleichbleibende Ethanolausbeute von 0,45-0,46 g Ethanol pro g Zucker erzielt werden konnte. Daher kann angenommen werden, dass auch bei sehr hohen Zuckergehalten die Nährstoffe des Presssaftes ausreichend vorhanden waren. Dementsprechend konnten bei einem maximalen Zuckergehalt von 170 g/l bis zu 77 g/l Ethanol gebildet werden. Ein vollständiger Umsatz des Zuckers zu Ethanol wurde allerdings nicht erreicht, da ein geringer Teil für Milchsäure- und Glycerolbildung verbraucht wurde und ein Restzuckeranteil von maximal 2,2 g/l verblieb. Dies ist jedoch nichts ungewöhnliches, da bekannt ist, dass bei der Hefe-Fermentation von zuckerhaltigen Medien, in der Regel ein gewisser Restzuckergehalt im Fermentationsmedium verbleibt [119] [162] [254]. Aus der oben dargestellten Tabelle wird deutlich, dass mit einer Erhöhung des Anfangszuckers auch die Gehalte an Glycerol und Milchsäure anstiegen. Die Zunahme der Glycerolkonzentration war zu erwarten, da Glycerol ein Nebenprodukt der Gärung ist. Der Anstieg der Milchsäurekonzentration deutet darauf hin, dass eine hohe Substratkonzentration die im Zuckerhirsesaft natürlich vorhandenen Milchsäurebakterien [172] [304] in ihrer Produktbildung stärken.

10.3.3.2 Auswahl geeigneter Fermentationsverfahren und Reaktionsbedingungen

Für die Fermentation von Zuckerhirsepresssaft sind unterschiedliche Verfahren möglich. Um einen Überblick der Ethanolproduktivität verschiedener Verfahren zu erhalten, wurden Batch-, Batch repetitiv und In-Field-Versuche durchgeführt und im Hinblick auf die maximale Produktivität und Ethanolausbeute verglichen. Zudem wurde das Einsetzen von recycelter Hefe (Melle-Boinot-Prozess) zur Ethanolproduktion überprüft. Im Batch-Verfahren wurde zusätzlich die Hefekonzentration variiert, um einen Anhaltspunkt für eine optimale Animpfzellkonzentration geben zu können. Temperaturunterschiede in den In-Field-Versuchen (Labor- und Außentemperatur) geben zusätzlich Auskunft über die Auswirkungen der Temperatur auf die Ethanolproduktion. Die Tabelle 63 fasst die An-

fangszuckergehalte, die Ethanolproduktivitäten, Ausbeuten und die maximal erreichte Ethanolkonzentration in Abhängigkeit der untersuchten Fermentationsverfahren zusammen. Es ist deutlich erkennbar, dass unabhängig vom angewendeten Verfahren, die Ethanolausbeuten in einem kleinen Spektrum variieren (0,39-0,47 g Ethanol / g Zucker) und damit erwartungsgemäß alle Verfahren für die Fermentation von Zuckerhirsepresssaft möglich sind. Für das In-Field-Verfahren standen Presssäfte mit einer geringen Zuckerkonzentration zur Verfügung, sodass die Ethanolkonzentrationen vergleichsweise niedrig waren. Gleichzeitig konnte geprüft werden, ob der vergorene Saft auch bei einer geringen Ethanolkonzentration bereits lagerfähig ist.

Tabelle 63: Ethanolbildung aus Zuckerhirsesaft bei verschiedenen Fermentationsverfahren, n=2

Verfahren	max. Ethanol-Produktivität in g l^{-1} h^{-1}	Ethanol-ausbeute in g Ethanol / g Zucker	max. Ethanol-konzentration in g/l	Anfangs-zuckergehalt in g/l
Batch, temperaturkontrolliert				
~3 x 10^8 Lebendzellen/ml	6,7 ± 0,1	0,46	64 ± 0	139 ± 0
~1 x 10^7 Lebendzellen/ml	3,8 ± 0,1	0,43	77 ± 3	179 ± 7
Batch, repetitiv, unkontrolliert				
Beginn (0,5 l)			49 ± 0	179 ± 0
1. Feed (+ 0,5 l)	nicht	0,46	77 ± 0	118 ± 0
2. Feed (+ 0,5 l)	bestimmt	0,44	78 ± 2	62 ± 1
3. Feed (+ 0,5 l)		0,44	80 ± 0	48 ± 0
In-Field, unkontrolliert				
Laborbedingungen	> 0,5	0,47	26 ± 0	55 ± 0
Außenlager	0,1 ± 0,0	0,46	26 ± 0	56 ± 1
Melle-Boinot-Prozess				
Zu Beginn: ~1 x 10^7 Lebendzellen/ml	3,7 ± 0,0	0,44	77 ± 2	200 ± 21
1. Recycling, 35°C 2-3 x 10^8 Lebendzellen/ml	6,1 ± 0,5	0,39	72 ± 7	169 ± 11
2. Recycling, 35°C 4-5 x 10^8 Lebendzellen/ml	12,4 ± 0,5	0,44	73 ± 1	166 ± 2

Aus Tabelle 63 ist ersichtlich, dass die Fermentationen unter kontrollierten Bedingungen (konstante Temperierung und Durchmischung) schneller verliefen als unkontrollierte Fermentationen (z. B. In-Field-Fermentation). Ein Einfluss auf die Ethanolausbeute konnte dabei nicht beobachtet werden. In beiden Fällen wurden ca. 0,46 g Ethanol pro g Zucker gebildet. Beim kontrollierten Batch-Verfahren war zu erkennen, dass mit zunehmender Anzahl an Hefezellen die maximale Produktivität von 3,8 auf 6,7 g $l^{-1}h^{-1}$ bzw. bis zu 12,4 g $l^{-1}h^{-1}$, im Melle-Boinot-Prozess, erhöht werden konnte. Dabei hatte die Herkunft der Zellmassen, zugegeben als Trockenhefe oder durch den Melle-Boinot-Prozess selbst vermehrt, keinen Einfluss auf die Ethanolbildungsrate (vgl. Batch temperaturkontrolliert mit Melle-Boinot-Prozess „Beginn“ und „1. Recycling). Die Ergebnisse in Tabelle 63 zeigen zudem, dass geringe Hefekonzentrationen bereits ausreichend sind, um hohe Ethanolausbeuten zu erreichen und dass auch mit recycelter Hefe im Melle-Boinot-Prozess sehr gute Ethanolausbeuten (0,44 g pro g Zucker) erzielbar sind. Ebenfalls ist eine Verlängerung der Fermentationsphase mit chargenweiser Zugabe weiteren Presssaftes ohne Reduzierung der Ausbeute möglich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch eine Temperierung oder Erhöhung der Zellzahl die Fermentation beschleunigt werden kann. Daher ist der Einsatz höherer Trockenhefemengen sicherlich vorteilhaft. Im Kleinmaßstab hat sich jedoch der Melle-Boinot-Prozess durch die zusätzlichen Verfahrensschritte zur Aufbereitung der gebildeten Hefe als aufwendig erwiesen. Jedoch konnten auch mit geringen Zellzahlen und nicht temperierten und gerührten Fermentationen erfolgreich Presssaft zu Ethanol umgesetzt werden. Je nach Schwerpunkt des Konzeptes zur Ethanolgewinnung kann hier ein geeignetes Verfahren gewählt werden.

10.3.3.3 Haltbarkeit von vergorenem Zuckerhirsepresssaft

Für die weitere Aufbereitung ist es wichtig zu wissen, wie lange vergorener Zuckerhirsepresssaft haltbar ist. Um dies zu prüfen wurden Presssäfte der Sorte ‘Umbrella‘ (Ernte- und Presstermin: 18.10.2010) mit einem Anfangszuckergehalt von 55 g/l mittels In-Field-Verfahren mit 0,3 g/l Hefe versetzt und bei schwankenden Außentemperaturen fermentiert. Nach ca. elf Tagen war die Ethanolproduktion (90 %) abgeschlossen und die Ethanolausbeute betrug ca. 26 g/l. Der erhaltene vergorene Saft wurde über 160 Tage ohne eine wesentliche Verringerung der Ethanolkonzentration gelagert. Parallel dazu wurde ein Dreifach-Ansatz im Labor kultiviert, welcher ein vergleichbares stabiles Ethanolkonzentrationsprofil aufzeigte. Jedoch war hier die Gärung bereits nach vier Tagen beendet.

Abbildung 81 zeigt zudem, dass unter diesen Bedingungen nur eine geringfügige Reduktion des Ethanolgehalts von ca. 3 g/l zu erkennen ist und eine Lagerung von 160 Tagen möglich ist. Allerdings ist eine Lagerung mit höheren Ethanolgehalten in der Maische anzustreben, um so ein Kontaminationsrisiko durch Fremdorganismen zu minimieren.

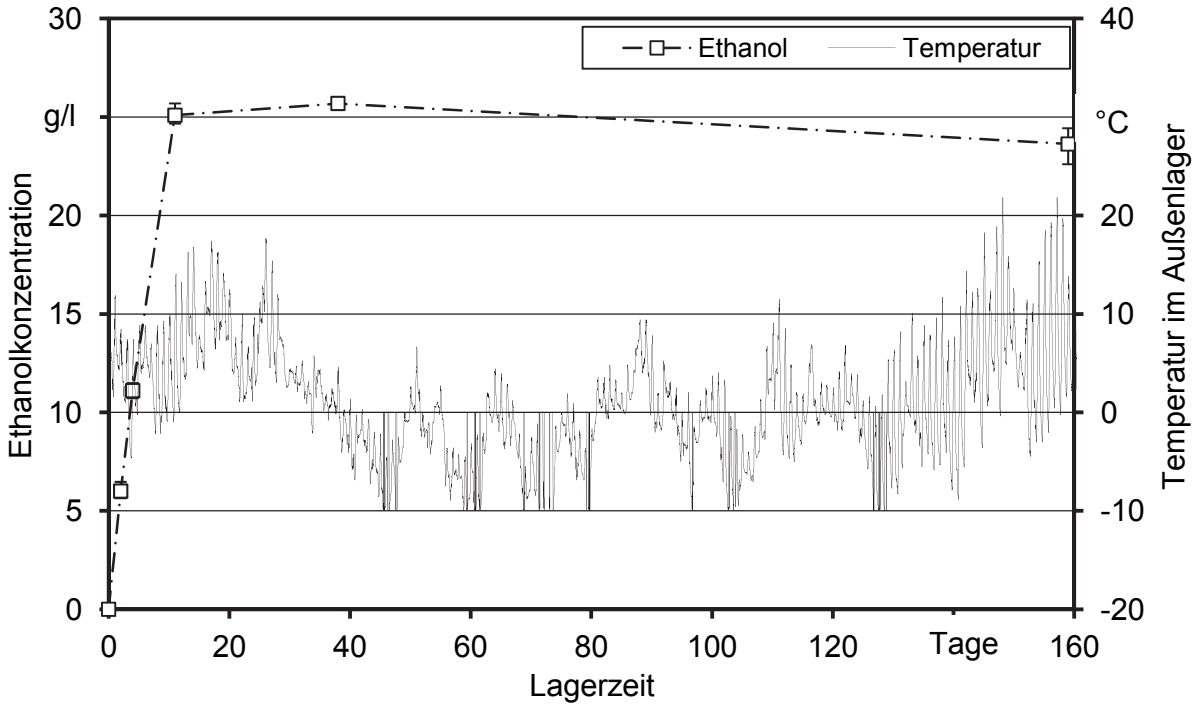


Abbildung 81: Ethanolkonzentration (von Zuckerhirsepresssaft der Sorte 'Umbrella') in Abhängigkeit von der Lagerzeit und Temperatur im Außenlager („In-Field"-Verfahren) im 10 l-Maßstab, n=3

10.3.3.4 Aufbereitung und Fermentation von ameisensäurekonservierten Presssäften

Die Haltbarmachung der in der Zuckerhirse enthaltenen Zucker erfolgte im Rahmen des Projekts durch Konservierung der Ganzpflanze mit bis zu 1,0 Masse-% Ameisensäure (AS). Durch diesen Konservierungsschritt ist auch in gewonnenem Zuckerhirsepresssaft Ameisensäure enthalten, wobei pH-Werte von bis zu 3,3 vorlagen (Kapitel 8.7.2). Der gewonnene Presssaft war dadurch nicht mehr direkt zu Ethanol fermentierbar, was auf eine Inhibierung der Hefe sowohl durch die pH-Wert-Erniedrigung, als auch durch die hohe Konzentration undissoziierter Ameisensäure hervorgerufen wurde. Aus diesem Grund wurden beide Einflüsse separat untersucht.

Zuckerhirsepresssaft mit zugeführter Ameisensäure im Vergleich zu Schwefelsäure

Die Auswirkungen unterschiedlicher Ameisensäurezugaben auf den Fermentationsprozess wurden systematisch untersucht. Dafür wurden unterschiedliche Ameisensäurekonzentrationen (1-15 g/l) in den Presssäften eingestellt. In Tabelle 64 sind die resultierenden Anfangs-pH-Werte aufgezeigt. Bereits durch die Zugabe von 1 g/l Ameisensäure senkte sich der pH-Wert von 5,6 auf 4,3. Mit 15 g/l Ameisensäure konnte der pH-Wert auf 3,0 gesenkt werden.

Tabelle 64: Anfangs-pH-Werte der mit unterschiedlichen Ameisensäurekonzentrationen versetzten Zuckerhirsepresssäfte, n=2

Ameisensäurekonzentration in g/l	pH-Wert
0,0	5,6
1,0	4,3
2,5	3,8
5,0	3,4
10,0	3,1
15,0	3,0

Die Fermentationen der mit 1 g/l Ameisensäure versetzten Presssäfte erreichten nach 48 Stunden eine Zuckerumsetzung zu Ethanol von 89,5 %. Damit konnte die Ethanolmenge um 10 % gegenüber Presssäften, die nicht mit Säure versetzt wurden, erhöht werden. Diese Ergebnisse stimmen mit der Aussage von LARSSON et al. (1999) [165] überein, dass bei Anwesenheit niedriger Säurekonzentrationen die Ethanolbildung verstärkt werden kann. Bei Ameisensäurekonzentrationen über 1 g/l, konnten keine Ethanolbildungen beobachtet werden.

Weiterhin wurden Fermentationen mit schwefelsäureversetzten Presssäften durchgeführt, um zu prüfen, ob der niedrige pH-Wert ausschlaggebend für die Inhibierung der Hefen ab 2,5 g/l Ameisensäure war. Die Ergebnisse der anschließenden Fermentation sind in Abbildung 82 dargestellt. Es wurde deutlich, dass der niedrige pH-Wert die Hefen zwar inhibieren kann, jedoch trat eine starke Inhibierung der Hefen erst zwischen pH=3 und 2,5 ein. Folgende Abbildung zeigt den Ethanolgehalt nach 24 bzw. 48 Stunden.

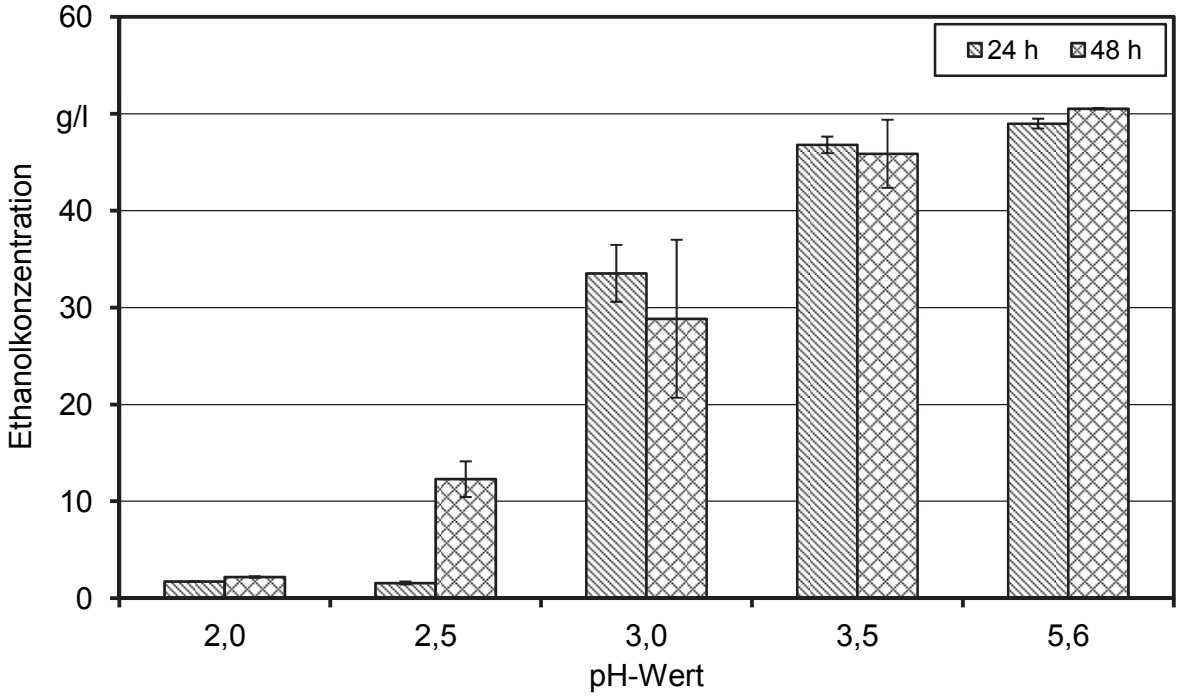


Abbildung 82: Ethanolkonzentration nach 24 und 48 Stunden von mit Schwefelsäure auf unterschiedliche Anfangs-pH-Werten eingestellten Zuckerhirsepress-säften mit 0,3 g ADY/l (Thermosacc® Dry) bei 35 °C°, n=2

Im nächsten Versuchsansatz wurden den mit Ameisensäure versetzten Säften verschiedene Mengen Calciumcarbonat zugegeben, um den pH-Wert zu erhöhen bzw. die Ameisensäure zu binden. Als Referenz zur Beurteilung des Fermentationserfolgs wurde ein unbehandelter (ohne Ameisensäure- und Calciumcarbonatzugabe) Presssaft mitgeführt. Folgende Abbildung zeigt die Ethanolgehalte in den Ansätzen nach 24 bzw. 48 h.

Die in Abbildung 83 dargestellten Untersuchungen zeigen deutlich, dass eine pH-Anhebung auf 4,0 mit Calciumcarbonat nicht ausreichend war, um einen mit 10 g/l Ameisensäure versetzten Zuckerhirsesaft fermentierbar zu machen. Im Gegensatz dazu war eine Fermentation möglich, wenn der pH-Wert auf 4,8 angehoben wurde. Allerdings ist auch eine leichte Inhibierung innerhalb der ersten 24 Stunden erkennbar und erst nach 48 Stunden konnte eine vergleichbare Menge Ethanol zum Presssaft ohne AS und $CaCO_3$ gefunden werden. Wurde der pH-Wert eines Presssaft mit geringerer Ameisensäurekonzentration von 5 g/l mit Calciumcarbonat ebenfalls auf 4,8 ± 0,1 angehoben, konnte keine Inhibierung festgestellt werden. Dies macht deutlich, dass nicht allein der pH-Wert sondern auch die Ameisensäurekonzentration für die Fermentierbarkeit ausschlaggebend ist. Die aufgeführten Ergebnisse zeigen eine verstärkt inhibierende Wirkung der Ameisensäure auf die Hefen. Es muss z. B. $CaCO_3$ eingesetzt werden, um den Anteil an dissoziierter Ameisensäure zu verringern (siehe Kapitel 3.8.2.3.2).

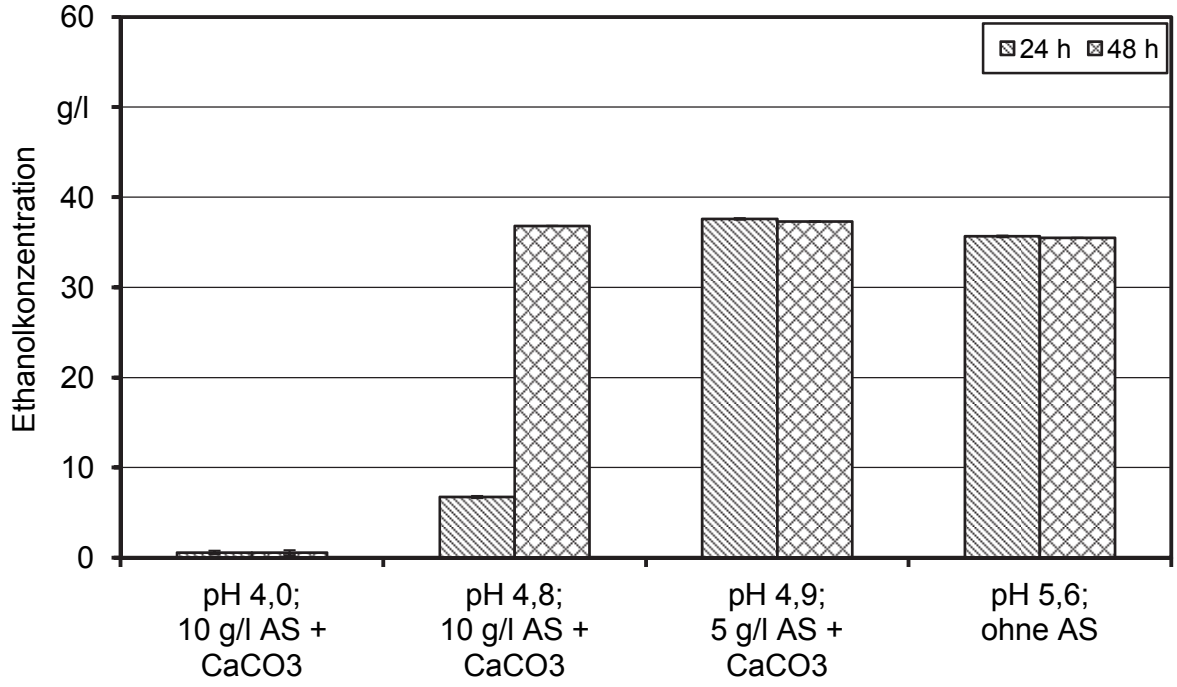


Abbildung 83: Ethanolkonzentration nach 24 und 48 Stunden von mit Ameisensäure (AS) und Calciumcarbonat auf unterschiedliche Anfangs-pH-Werten eingestellten Zuckerhirsepresssäften mit 0,3 g ADY/l (Thermosacc® Dry) bei 35 °C, n=2

pH-Wert Anhebung der Presssäfte aus mit Ameisensäure konservierten Häckseln

Da in Press- und Sickersäften aus ameisensauerem Material keine Ethanolbildung möglich war, wurden die pH-Werte der Säfte vor Fermentationsbeginn durch Zusatz anorganischer Basen (Calciumcarbonat und Calciumdihydroxid) von ca. 3,4 auf 5 und 6 angehoben, um somit den Anteil an dissoziierter Ameisensäure zu verringern. Als Ausgangsmaterial dienten Presssäfte, welche aus mit Ameisensäurekonzentrationen von 0,75 und 1 Masse-% konservierten Ganzpflanzen gepresst wurden. Zusätzlich wurden verschiedene Reaktionsvolumina (0,1 l und 10 l) getestet, um eventuelle Änderungen der Ethanolausbeute durch eine Maßstabsvergrößerung verfolgen zu können. Die Ergebnisse der Fermentationen der Presssäfte des mit 0,75 Masse-% Ameisensäure vorbehandelten Materials und einem anfänglichen pH-Wert von 3,4 ± 0,1 sind in Tabelle 64 dargestellt.

Tabelle 65: Ethanolausbeuten von Presssäften aus mit 0,75 Masse-% Ameisensäure konserviertem Ausgangsmaterial der Sorte 'Top 76' nach pH-Einstellung mit verschiedenen Basen bei 35 °C mit 0,3 ADY g/l Hefe (Thermosacc® Dry) nach 48 Stunden

Reaktionsvolumen in l	0,1			10
Wiederholungen n	2	2	2	3
pH-Wertanhebung	5	6	6	6
Eingesetzte Base	$CaCO_3$	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	$Ca(OH)_2$
Anfangszucker in g/l	110,3	117,3	105,0	115,7
Ethanol in g/l	44,6	52,4	44,4	50,7
Ethanolausbeute in g Ethanol / g Zucker	0,40	0,45	0,42	0,44

Eine Zugabe von 0,75 Masse-% Ameisensäure zu Zuckerhirsehäckseln erwies sich als ausreichend für eine Konversion der Häcksel (siehe Kapitel 8.7.2). Wurde dem Presssaft aus dieser Konservierung (Sorte 'Top 76' (2011)) Calciumcarbonat bis zum Erreichen von pH 5 zugesetzt, konnten im 0,1 l-Maßstab bis zu 0,40 g Ethanol pro g Zucker, als Glucoseäquivalent, gebildet werden. Allerdings mussten hohe Calciumcarbonatkonzentrationen von ca. 80 g/l eingesetzt werden. Bei Erhöhung auf pH 6 wurde eine Erhöhung der Ethanolausbeute auf 0,45 g Ethanol pro g Zucker, als Glucoseäquivalent, gefunden. Im Vergleich dazu, wurde für Calciumdihydroxid 0,42 g Ethanol pro g Zucker, als Glucoseäquivalent, erreicht. Da durch die sehr geringe Wasserlöslichkeit des Calciumcarbonats in diesen Versuchen sehr hohe Mengen eingesetzt werden mussten, wurde zur Bereitstellung von ethanolhaltigem fermentierten Saft für Destillationsversuche im 10 l Maßstab Calciumdihydroxid zur Neutralisation eingesetzt. Mit 7,1 bis 7,5 g/l Calciumdihydroxid konnte der pH-Wert von 3,4 auf 6 angehoben werden, was in etwa der zu erwartenden stöchiometrischen Basemenge (siehe Kapitel: 3.8.2.3.2) zur Neutralisation von 0,75 Masse-% Ameisensäure entsprach. Der im 10 l-Maßstab mit Calciumdihydroxid neutralisierte und anschließend fermentierte Presssaft erreichte 50,5 bis 50,9 g/l Ethanol mit einer Konversion von 0,44 g Ethanol pro g Zucker, als Glucoseäquivalent, und ist damit mit den Ethanolausbeuten aus nichtkonserviertem Material vergleichbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Fermentationen der Presssäfte des mit 0,75 Masse-% Ameisensäure konservierten Materials, bei Erhöhung des pH-Werts auf 6, hohe Ethanolausbeuten von bis zu 0,45 g Ethanol pro g Glucoseäquivalent nach 48 Stunden erreicht werden konnten. Für vergleichbare Presssäfte, welche nicht mit Ameisensäure konserviert wurden, konnte bereits nach 24 Stunden Ethanolkonzentrationen von 55 g/l (0,45 g Ethanol pro g Glucoseäquivalent) erreicht werden. Zusätzlich wurden Untersuchungen mit Presssäften durchgeführt, die aus Häckseln mit Ameisensäurekonzentrationen von 1,0 Masse-% gepresst wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 66 dargestellt. Es zeigte sich, dass bei einem Reaktionsvolumen von 0,1 l nach 48 Stunden Ethanolausbeuten von 0,45 g Ethanol pro g Zucker, als Glucoseäquivalent, bei pH=6 erreichbar wa-

ren. Für pH=5 sind Schwankungen in der Ethanolumsetzung erkennbar, wobei die erhaltenen Werte niedriger als für pH=6 lagen.

Tabelle 66: Ethanolausbeute von Presssäften aus mit 1 Masse-% Ameisensäure konserviertem Ausgangsmaterial der Sorte 'Top 76' nach pH-Einstellung mit Calciumcarbonat bei 35 °C mit 0,3 ADY g/l Hefe (Thermosacc® Dry) nach 48 Stunden

Reaktionsvolumen in l	0,1	0,1
Wiederholungen n	3	2
pH-Wertanhebung	5	6
Eingesetzte Base	$CaCO_3$	$CaCO_3$
Anfangszucker in g/l	114,2	114,5
Ethanol in g/l	29,6 - 49,3	51,3
Ethanolausbeute in g Ethanol / g Zucker	0,31 - 0,43	0,45

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im 0,1 l-Maßstab nach 48 Stunden und pH=6, unabhängig von der Ameisensäurekonzentration, ebenso hohe Ethanolausbeuten erreicht werden konnten, wie mit unkonservierten Presssäften. Einzig die erforderliche Fermentationszeit hat sich verlängert, da im Gegensatz zum unkonservierten Saft, die Fermentationen nicht innerhalb von 24 Stunden beendet waren (Abbildung 84).

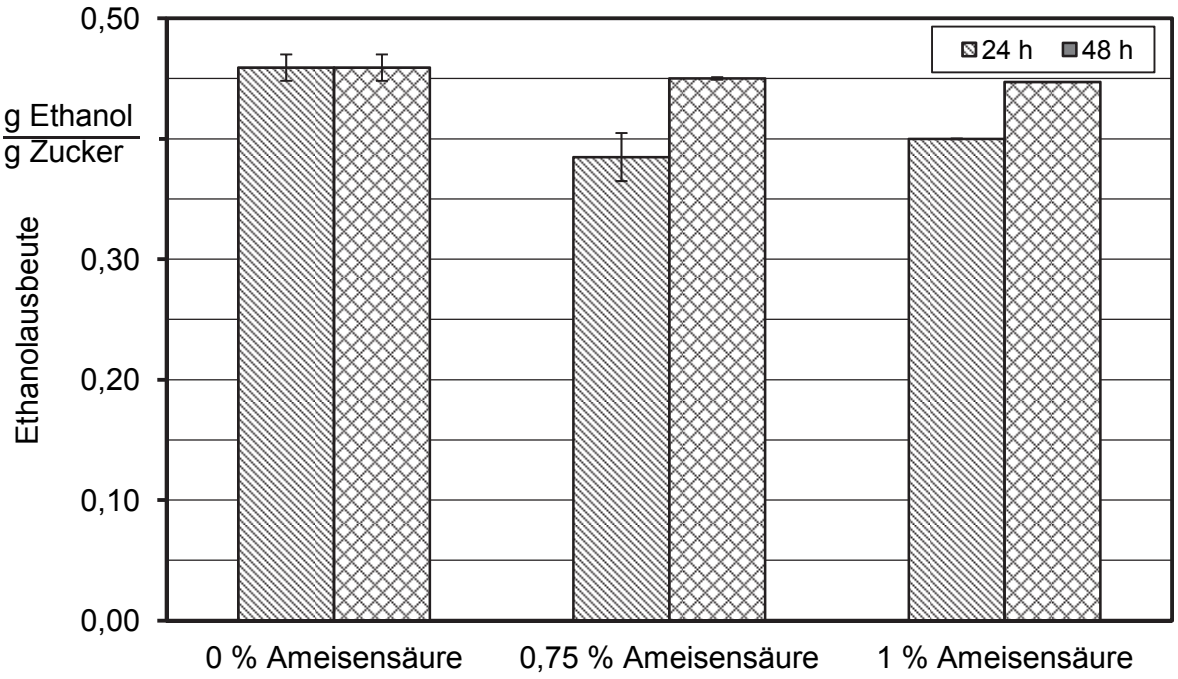


Abbildung 84: Ethanolausbeute nach 24 und 48 Stunden mit Zuckerhirsepresssäften aus Häckseln der Sorte 'Top 76' mit unterschiedlichen Ameisensäurekonzentrationen, 0,3 ADY g/l Hefe Thermosacc® Dry bei 35 °C, pH=6, n=2

Ameisensäurekonservierte Sickersäfte

Sickersäfte aus mit 0,75 Masse-% Ameisensäure konservierten Häckseln (Erntedatum: 26.10.2011) wurden ebenfalls vor der Fermentation mit Calciumcarbonat auf einen pH-Wert von fünf eingestellt. Nach 24 Stunden wurden ca. 0,46 g Ethanol pro g Zucker, als Glucoseäquivalent, erhalten. Durch eine pH-Anhebung ist auch mit Sickersäften eine hohe und mit unkonservierten Säften vergleichbare Ethanolausbeute zu erreichen.

10.3.3.5 Fazit

Bei Verwendung von Zuckerhirsepresssäften wurden Ethanolausbeuten von 0,46 g Ethanol pro g Zucker erreicht, welche auch nicht durch sehr hohe Anfangszuckergehalte von ca. 170 g/l gemindert wurden. Der Presssaft enthielt ausreichend Nährstoffe, um den im Zuckerhirsepresssaft enthaltenen Zucker zu Ethanol umzuwandeln. Das angewendete Fermentationsverfahren hatte kaum Einfluss auf die Ausbeuten an Ethanol, allein die maximale Produktivität kann durch eine geeignete Auswahl erhöht werden. Eine Lagerung der vergorenen Presssäfte war ohne deutlichen Ethanolverlust möglich. Die Ethanolbildung der Zuckerhirsepresssäfte aus mit 0,75 und 1,0 Masse-% Ameisensäure konserviertem Häckseln war mit guten Ethanolausbeuten von ca. 0,44 g Ethanol pro g Zucker, als Glucoseäquivalent, bei pH=6 möglich. Der pH-Wert musste jedoch vor der Fermentation auf mindestens 5 erhöht werden, um hinreichend Ethanol gewinnen zu kön-

nen. Calciumdihydroxid stellt hierfür eine mögliche Base dar, sie ist leicht dosierbar, kostengünstig und es werden nur geringe Mengen (stöchiometrisch) benötigt.

10.3.4 Konversion von Bagasse

10.3.4.1 Bagassezusammensetzung

Die verschiedenen nach der Pressung erhaltenen Bagassen zeigten deutliche Unterschiede in den Trockenmassegehalten. Für die Bagasse aus der Ganzpflanze (frisch verarbeitet) der Zuckerhirsesorte ‘Umbrella‘ wurde der niedrigste TM-Gehalt von 58,9 % (58,3 - 59,4 %, n=3) bestimmt. Die Proben, die aus der Sorte ‘Top 76‘ erzeugt wurden, variierten im TM-Gehalt in Abhängigkeit der Vorbehandlung. So wies die säureunbehandelte Variante der gehäckselten Ganzpflanze einen TM-Gehalt von 65,3 % (65,1-65,7 %, n=3), die entblätterte Variante einen leicht höheren Wert von 67,0 % (66,9-67,0 %, n=3) und die säurebehandelte Bagasse den höchsten Wert von 78,3 % (77,9-78,6 %, n=3) auf. In Tabelle 67 sind die Inhaltstoffe der Bagassen dargestellt.

Tabelle 67: Inhaltsstoffe von Zuckerhirsebagassen, n=3

Inhaltsstoffe	Bagasse ‘Umbrella‘ Frischmaterial, Ganzpflanze	Bagasse ‘Top 76‘ Frischmaterial, Ganzpflanze	Bagasse ‘Top 76‘ säurekonserviert, Ganzpflanze	Bagasse ‘Top 76‘ Frischmaterial, entblättert
	in % i.d. TM	in % i.d. TM	in % i.d. TM	in % i.d. TM
Gerüstzucker				
Glucan	36,2 ± 0,3	35,6 ± 0,6	37,2 ± 0,5	39,8 ± 0,1
Xylan	21,5 ± 0,2	20,6 ± 0,6	21,6 ± 0,1	21,1 ± 0,1
Arabinan	3,1 ± 0,2	3,2 ± 0,5	2,5 ± 0,4	2,6 ± 0,3
Galactan	1,6 ± 0,1	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	0,9 ± 0,1
Lignin	13,1 ± 0,1	17,3 ± 0,8	18,4 ± 1,3	17,9 ± 0,4
Extraktstoffe				
Lösliche Zucker	4,5 ± 0,2	6,2 ± 0,1	5,2 ± 0,1	8,0 ± 0,1
Fette und Wachse	1,7 ± 0,2	1,1 ± 0,1	1,0 ± 0,1	0,3 ± 0,1
Sonstige				
Protein	7,3 ± 0,1	6,0 ± 0,1	5,2 ± 0,1	2,6 ± 0,1
Asche	4,9 ± 0,1	3,7 ± 0,1	4,9 ± 0,1	2,8 ± 0,1
Unbekannte	6,1	5,3	3,2	3,9

Die gemessenen Cellulosegehalte der Bagassen lagen in einem Bereich zwischen 35 und 40 % i.d. TM. Die Gehalte der beiden Sorten ‘Umbrella‘ und ‘Top 76‘ unterschieden sich nur geringfügig voneinander und die Werte lagen innerhalb des Fehlerbereichs der Standardabweichungen. Die Bagasse der entblätterten Variante wies den höchsten Cellulosegehalt auf, was auf eine unterschiedliche Zusammensetzung von Stängel- und Blattfraktion schließen lässt. Die Hemicellulose-Zusammensetzungen (Summe aus Xylan, Arabinan, Galactan) der verschiedenen Bagassen unterschieden sich nicht wesentlich voneinander und lagen im Bereich zwischen 25 und 26 % i.d. TM. Im Ligningehalt sind Unterschiede zwischen den Sorten ‘Umbrella‘ und ‘Top 76' erkennbar, jedoch nicht innerhalb der verschiedenen Varianten der Sorte ‘Top 76‘.

Die Gehalte an löslichen Zuckern in den Bagassen weisen ein Verhalten entsprechend der löslichen Zuckergehalte der Ausgangsmaterialen der verwendeten Zuckerhirsen auf (Kapitel 9.3). Fette und Wachse waren in allen betrachteten Bagassen mit weniger als 2 % i.d. TM enthalten. Die niedrigsten Anteile wurden in der entblätterten Variante bestimmt, was mit höheren Fett- und Wachsgehalten in den Blattfraktionen begründet werden kann.

Die Proteingehalte der Bagassen aus den gehäckselten Ganzpflanzen lagen zwischen 5 und 7 % i.d. TM. Die entblätterte Variante wies die geringsten Anteile mit unter 3 % i.d. TM auf. Die Aschegehalte lagen zwischen 3 und 5 % i.d. TM, wobei die geringsten Anteile in der Bagasse aus der entblätterten Zuckerhirse vorlagen.

10.3.4.2 Hydrothermale Vorbehandlung

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der hydrothermalen Vorbehandlung im Hinblick auf dessen Einfluss auf die Hemicelluloselöslichkeit und die Zusammensetzung des verbleibenden Feststoffs eingegangen.

In Abbildung 85 ist das Löslichkeitsverhalten von Hemicellulose (Summe aus Xylan, Arabinan, Galactan) aus Zuckerhirsebagasse in Abhängigkeit der Behandlungshärte und Zieltemperatur dargestellt.

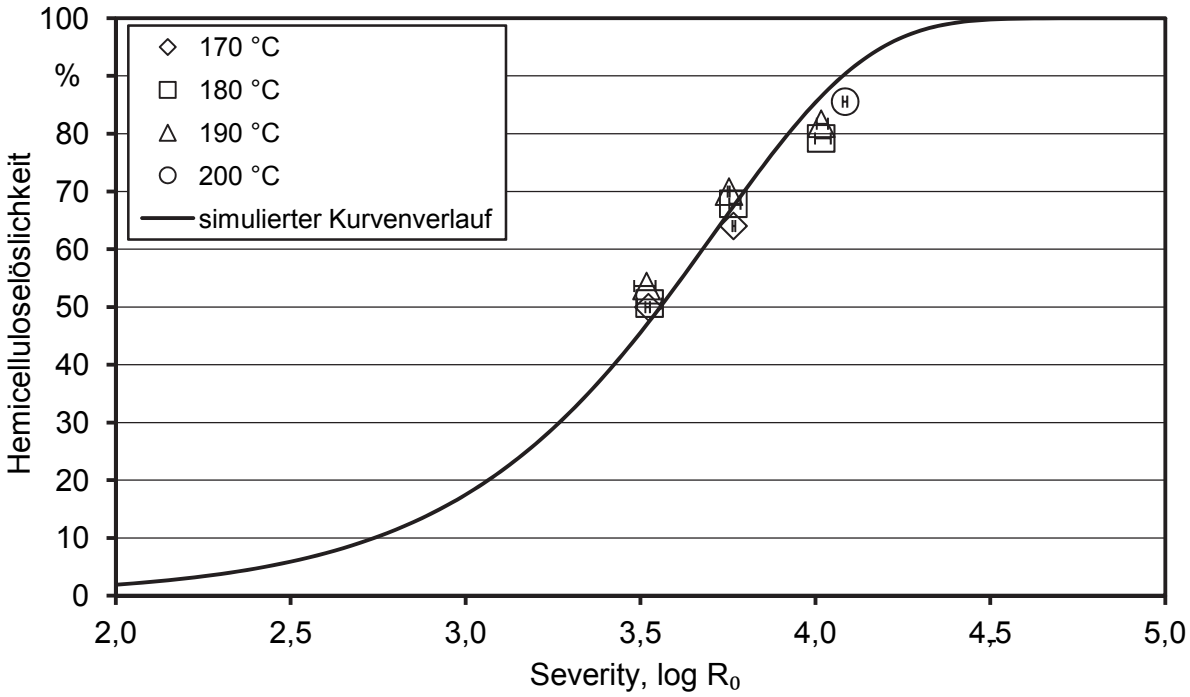


Abbildung 85: Hemicelluloselöslichkeit hydrothermal vorbehandelter Zuckerhirsebagasse der Sorte 'Umbrella' bei verschiedenen Behandlungshärten und Zieltemperaturen, n=3

Durch die hydrothermale Vorbehandlung unter den beschriebenen Bedingungen konnte Hemicellulose in einem Bereich zwischen 50 und 86 %, bezogen auf den Anfangsgehalt, in Lösung gebracht werden. Es konnte gezeigt werden, dass bei der Anwendung einer bestimmten Behandlungshärte, für unterschiedliche Temperaturen, eine gute Übereinstimmung im Löslichkeitsverhalten vorliegt und ein funktioneller Zusammenhang, gemäß der Theorie von OVEREND und CHORNET (1987) [204] besteht.

Für die Löslichkeit der Hemicellulose wurde folgende mathematische Funktion zwischen der verbleibenden Hemicellulose-Konzentration als Feststoff und der ursprünglichen Feststoffkonzentration (bezogen auf die Gesamtmasse in der Aufschlussapparatur) in Anhängigkeit der Behandlungshärte über nichtlineare Regression (R^2=0,98) erhalten:

$$\ln\left(\frac{c_{Hemicellulose}}{c_{Hemicellulose,t=0}}\right) = -1{,}94 \times 10^{-4} \cdot R_0 \qquad 10\text{-}13$$

Zwischen dem Anteil an Hemicellulose, der im Feststoff verbleibt, wurde eine Abhängigkeit erster Ordnung angenommen [224].

Mit steigender Behandlungshärte waren niedrigere pH-Werte feststellbar, was mit der Bildung von Abbaunebenprodukten wie Essig- und Ameisensäure zu erklären ist. Die niedrigsten pH-Werte von 3,9 bis 4,0 lagen bei Behandlungshärten von log R_0=4 vor. Aus Literaturangaben ist bekannt, dass es bei pH-Werten < 4 zu einer vermehrten Bil-

dung von Nebenprodukten kommt [124]. Behandlungshärten von über log R_0=4 sind deshalb für die betrachtete Zuckerhirsebagasse zu vermeiden.

Der Abbau von Cellulose während der hydrothermalen Vorbehandlung ist als gering einzustufen und lag bei maximal 7 %. Der Cellulosegehalt (als Glucan) im verbleibenden Feststoff nach der hydrothermalen Vorbehandlung ist in Abbildung 86 dargestellt.

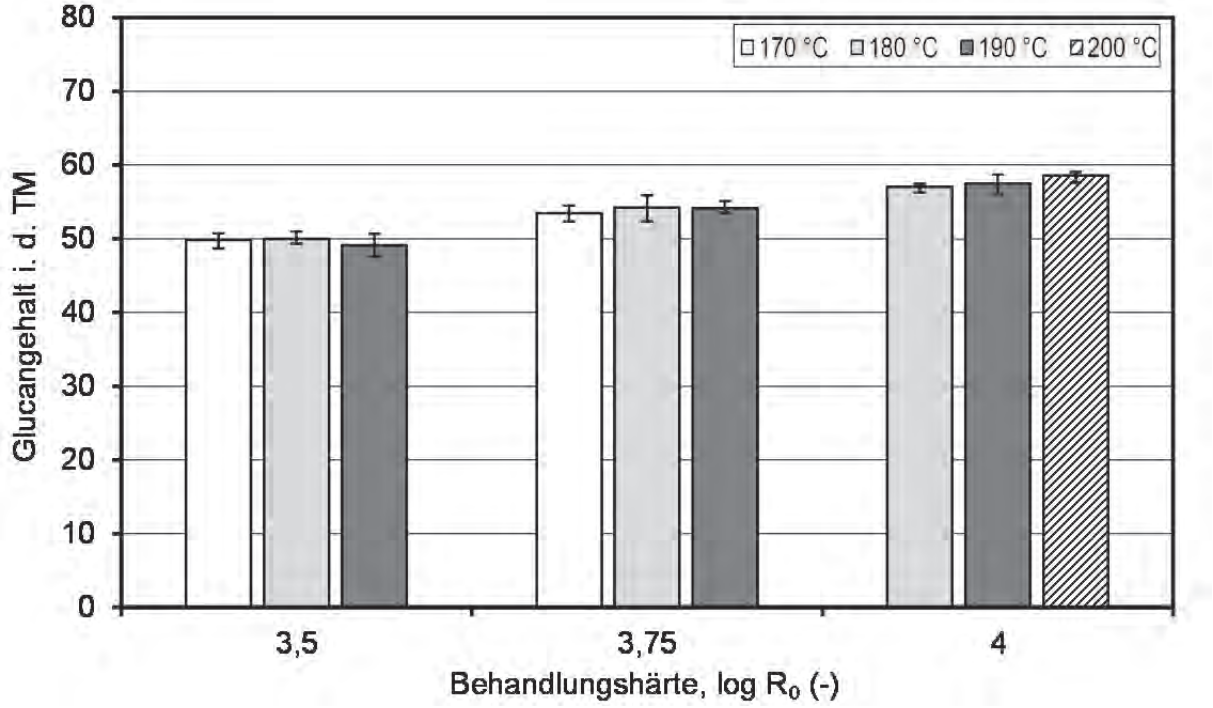


Abbildung 86: Glucangehalt von hydrothermal vorbehandelter Zuckerhirsebagasse der Sorte 'Umbrella' bei verschiedenen Behandlungshärten und Zieltemperaturen, n=3

Es konnte gezeigt werden, dass durch die hydrothermale Vorbehandlung der Glucangehalt von 36,2 % i.d. TM im Ausgangsmaterial (siehe Tabelle 67) auf Werte zwischen 49 und 59 % i.d. TM in Abhängigkeit der Behandlungshärte angehoben werden konnte. Der Cellulosegehalt hat eine wichtige Bedeutung in Bezug auf die erzielbare Ethanolkonzentration beim SSF-Verfahren und sollte daher möglichst hoch sein. Eine hydrothermale Vorbehandlung mit einer Behandlungshärte von log R_0=4 stellt für die betrachtete Zuckerhirsebagasse einen Kompromiss aus maximal möglichem Glucangehalt im Feststoff und noch tolerierbarem pH-Wert dar und wurde als Behandlungsmethode für die weiteren Untersuchungen verwendet.

In Tabelle 68 sind die Zusammensetzungen hydrothermal vorbehandelter Bagassen (log R_0=4,0, 190 °C) wiedergegeben, welche in den Bagasse-Fermentationsexperimenten eingesetzt wurden.

Tabelle 68: Feststoffzusammensetzung von hydrothermal vorbehandelten Zuckerhirsebagassen bei 190 °C, log R_0=4,0, n=3

Inhaltsstoffe	Bagasse 'Umbrella' Frischmaterial, Ganzpflanze in % i.d. TM	Bagasse 'Top 76' Frischmaterial, Ganzpflanze in % i.d. TM	Bagasse 'Top 76' säurekonserviert, Ganzpflanze in % i.d. TM	Bagasse 'Top 76' Frischmaterial, entblättert in % i.d. TM
Glucan	57,5 ± 1,3	57,9 ± 0,6	58,9 ± 0,5	63,4 ± 1,0
Hemicellulose	7,2 ± 0,4	7,1 ± 0,3	5,6 ± 0,1	7,2 ± 0,3
Lignin	23,2 ± 2,7	29,1 ± 1,9	29,2 ± 0,7	26,3 ± 0,4
Asche	2,8 ± 0,2	1,6 ± 0,3	1,6 ± 0,3	0,8 ± 0,2

Der Glucangehalt im Feststoff der hydrothermal vorbehandelten Bagassen lag für das als Ganzpflanze vorliegende Ausgangsmaterial zwischen 56 und 59 % i.d. TM. Für Bagasse mit entblättertem Ausgangsmaterial, bei dem auch der höchste Glucangehalt vorlag, wurden Werte von durchschnittlich 63 % i.d. TM detektiert. Der Hemicellulosegehalt der säurekonservierten Variante lag im Vergleich mit den anderen Bagassen niedriger. Die pH-Werte dieser Variante lagen zu Reaktionsende mit pH=3,5 (n=3) deutlich unterhalb der Grenze für den empfohlenen pH-Wertbereich von > 4, was auf einen vermehrten Abbau der in Hemicellulose enthaltenen Zucker zurückzuführen sein könnte.

Die Werte für Lignin zeigten eine vergleichsweise hohe Standardabweichung. Hinsichtlich des Lignins bewirkt die hydrothermale Vorbehandlung zum einen das Aufbrechen von Bindungen zwischen Lignin und Hemicellulose und zum anderen dem Lösen von Ligninfragmenten [110]. Diese sind gekennzeichnet durch ein geringes Molekulargewicht und hohe Reaktivität, die bei Anwesenheit von organischen Säuren zu Kondensationsprodukten repolymerisieren können [110] [55].

10.3.4.3 Simultane Verzuckerung und Fermentation

In Abbildung 87 sind die Ethanolkonzentrationsverläufe der ersten Versuchsreihe der simultanen Verzuckerungs- und Fermentationsversuche dargestellt.

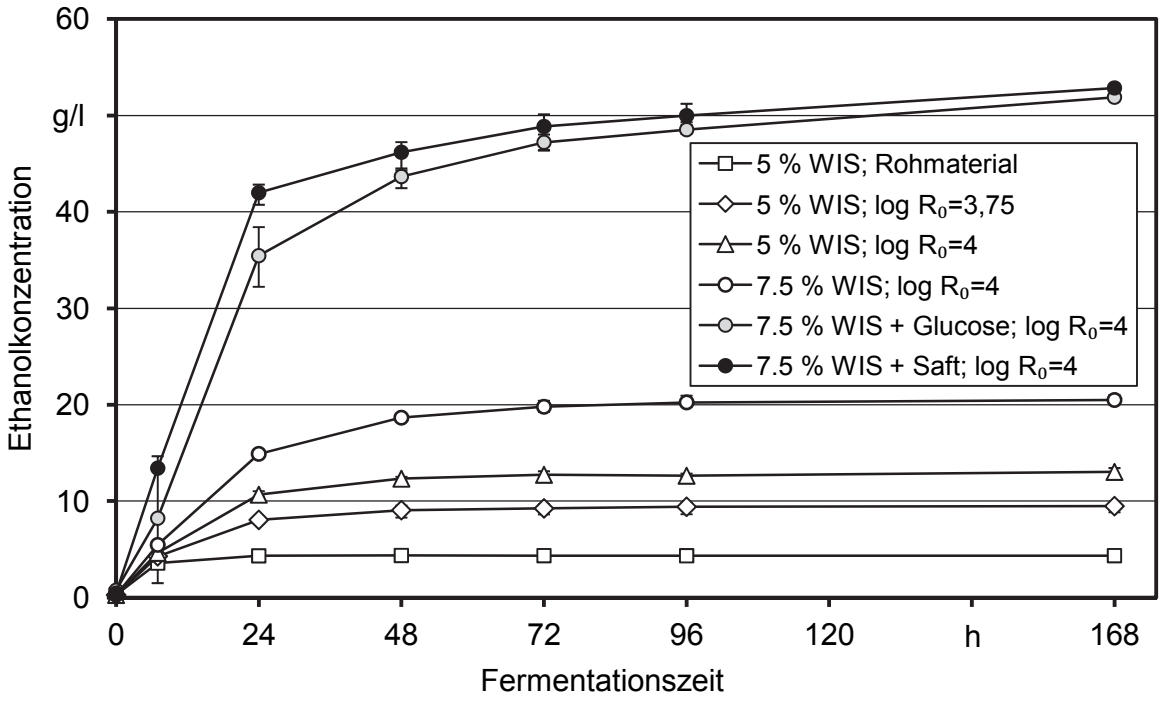


Abbildung 87: Konzentrationsverläufe der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse der Sorte 'Umbrella' für verschiedene Vorbehandlungshärten und Feststoffkonzentrationen, n=3

Die geringsten Ethanolkonzentrationen wurden mit dem unbehandelten Ausgangmaterial bei 5 % WIS erzielt. Nach Durchführung von Experimenten, bei denen keine Enzyme zugeben wurden, konnte errechnet werden, dass 27 % des gebildeten Ethanols auf die in der unbehandelten Bagasse vorhanden frei fermentierbaren Zuckern zurückgeführt werden konnte und 73 % auf Cellulose basieren. Mit hydrothermal vorbehandeltem Material (log $R_0 \geq 3{,}75$), bei gleichem eingesetzten WIS-Gehalt, konnten im Vergleich zu unbehandeltem Material die Ethanolkonzentrationen um mindestens das Doppelte gesteigert werden. Dies kann zum einen mit einer höheren Cellulosekonzentration im Ausgangsmaterial und zum anderen auf eine bessere Substratzugänglichkeit zurückgeführt werden. Die bessere Verwertbarkeit bzw. Zugänglichkeit mit steigender Behandlungshärte wird auch aus Abbildung 88 deutlich, in der die Cellulosekonversionsraten für die jeweiligen Versuche dargestellt sind. Durch eine Anhebung des WIS-Gehalts in den Ansätzen, konnte zusätzlich eine Steigerung der Ethanolkonzentration mit vergleichbaren Cellulosekonversionsraten erzielt werden, sodass mit der konventionellen simultanen Verzuckerungs- und Fermentationsstrategie Ethanolkonzentrationen von ca. 20 g/l realisiert werden konnten. Die erzielten Konzentrationen können aus energetischen und wirtschaftlichen Gründen als nicht zufriedenstellend gelten.

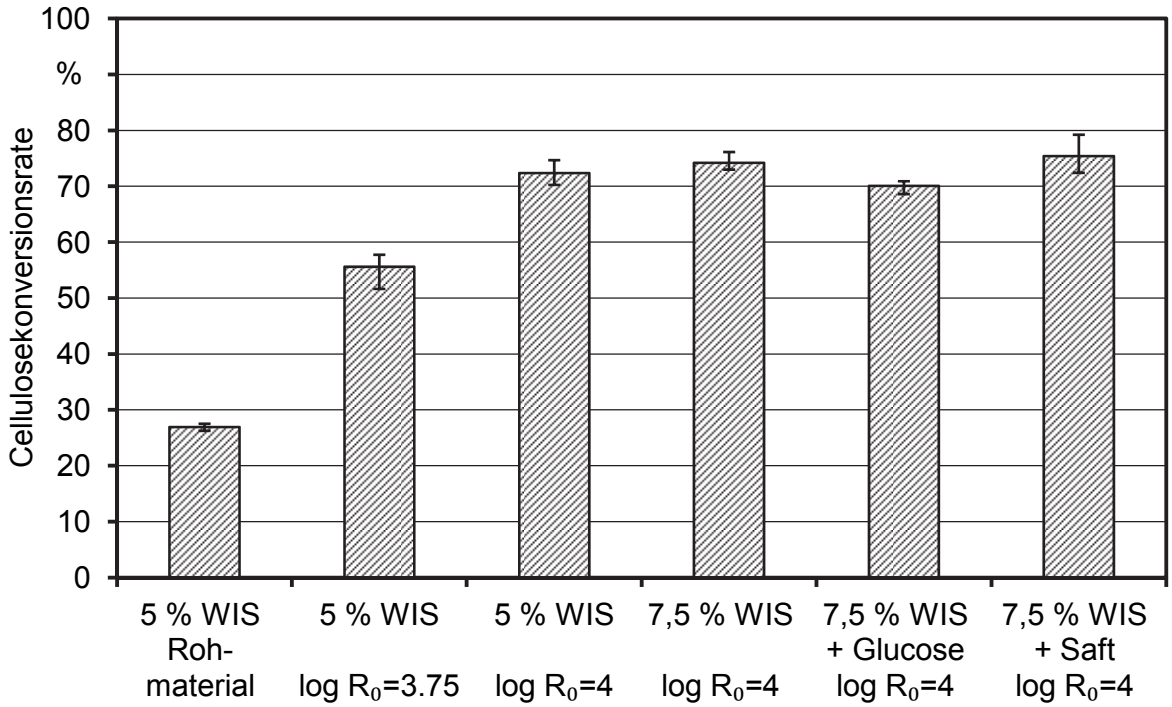


Abbildung 88: Cellulosekonversionsraten der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse der Sorte 'Umbrella' für verschiedene Vorbehandlungshärten und Feststoffkonzentrationen, n=3

Durch die Zugabe von Glucose bzw. von mit Glucose angereichertem Presssaft konnten nach 168 h zufriedenstellende Konzentrationen von über 50 g/l Ethanol erzielt werden. Im Vergleich zum Referenzversuch ohne Zuckerzugabe, bei dem die Ethanolbildung bereits nach 96 h abgeschlossen war, waren bei den Versuchen mit Zuckerzugabe noch deutliche Steigerungen in der Ethanolkonzentration zu erkennen. Gründe hierfür können die zu Versuchsbeginn vorhandenen hohen Zuckerkonzentrationen und den damit verbundenen Inhibierungseinflüssen auf die eingesetzten Enzyme sein. Die Inhibierungseinflüsse sind bei Saft weniger stark ausgeprägt als bei der reinen Glucosezugabe. Grund hierfür ist, dass Fructose im Vergleich zu Glucose keine merkliche inhibierende Wirkung auf das Enzymsystem hat. Positiv ist, dass die Cellulosekonversionsrate von ca. 75 % nach 168 h bei Saftzugabe nicht wesentlich beeinträchtigt wurde und das vergleichbare Raten wie beim Referenzversuch ohne Zuckergabe vorhanden waren (siehe Abbildung 88). Der Anteil an Ethanol, auf Basis der Nutzung der in Bagasse enthaltenen Substrate lag beim kombinierten Saftfermentationsverfahren nach 168 h bei ca. 39 %.

Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

In der zweiten Versuchsreihe wurden verschiedene Bagassesorten im Hinblick auf deren Eignung als Substrat für die SSF-Fermentation getestet. In Abbildung 89 sind die Ethanol-Konzentrationsverläufe der simultanen Verzuckerung- und Fermentation für die unterschiedlichen Bagassen (Behandlungshärte: log R_0=4,0, 8 % WIS im Ansatz) dargestellt. Die Fermentation konnte mit allen Substraten erfolgreich durchgeführt werden. Es ergaben sich jedoch deutliche Unterschiede in den Verläufen. Mit Bagasse der Sorte

'Umbrella' waren die höchsten Ethanolkonzentrationen von 24 g/l erzielbar, wobei eine ähnlich gute Cellulosekonversionsrate von 76,3 % (73,6-77,74 %, n=3) wie in den Versuchen mit 7,5 % WIS im Ansatz erzielt werden konnte (Abbildung 88).

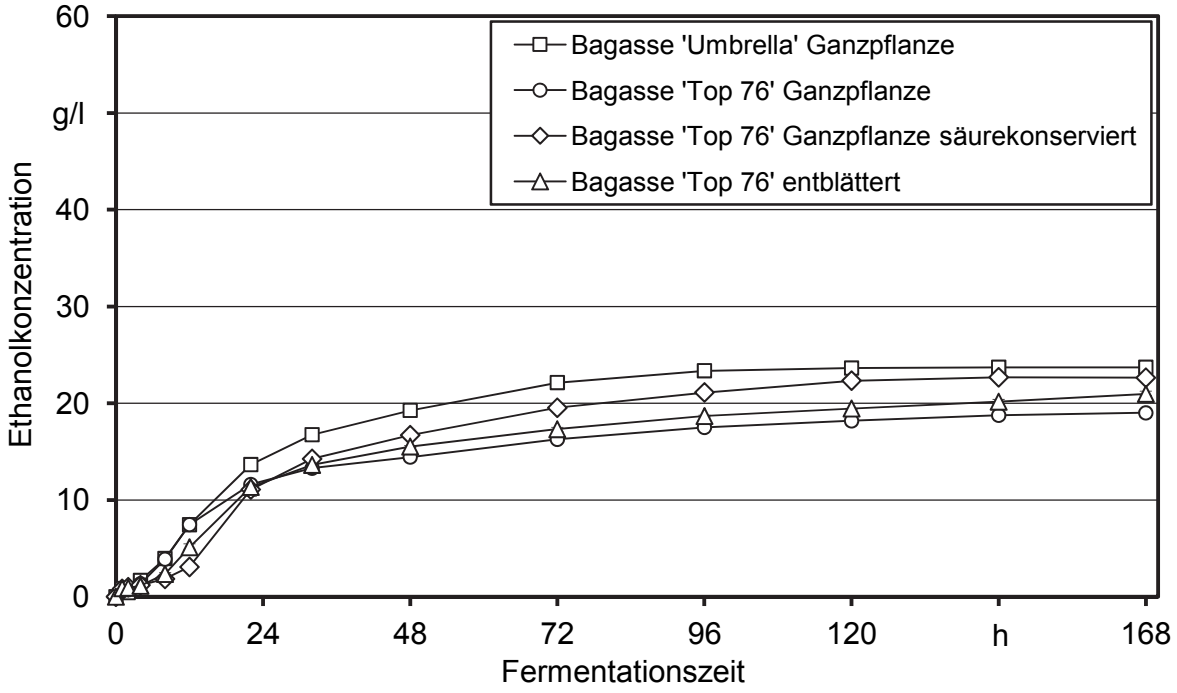


Abbildung 89: Konzentrationsverläufe bei der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse für verschiedene Bagassevarianten, bei einer Feststoffkonzentration von 8 % WIS, n=3

Die Ethanolkonzentrationen mit Bagassen der Sorte 'Top 76' waren generell niedriger. Eine toxische Einwirkung auf die Hefe erscheint als unwahrscheinlich, da die Glucosekonzentrationen nach 22 Stunden bis zu Fermentationsende bei allen Ansätzen Werte < 0,5 g/l enthielten. Als Begründung für die geringeren Ethanolkonzentrationen könnte entweder eine schlechtere Enzymzugänglichkeit an das Substrat oder eine Inhibierung der Enzyme durch Bestandteile der in der flüssigen Phase des Aufschlussprodukts vorhandenen Substanzen in Frage kommen. Gegen eine Enzyminhibierung sprechen die höheren Ethanolkonzentrationen aus dem säurekonservierten Material gegenüber dem unbehandelten, da hier die Inhibitoren durch die Anwesenheit der Ameisensäure (pH-Wert < 4) während des hydrothermalen Aufschlussverfahrens verstärkt zur Geltung kommen müssten. Zudem ist beim nicht säurebehandelten Material selbst nach 168 h noch kein Plateau erreicht, sodass sowohl die enzymatische Hydrolyse als auch die Fermentation bis dahin aktiv waren. Durch die Anwesenheit der Ameisensäure während des hydrothermalen Aufschlussverfahrens und des damit verbunden geringeren pH-Werts ist von einer vergleichsweise stärkeren Behandlungshärte auszugehen. Dies kann dazu führen, dass das Material für die Enzyme besser zugänglich ist. Die Cellulosekonversionsrate nach 168 Stunden war für das säurebehandelte Material mit 74,7 % (73,4-

76,0 %, n=3) um 10 % höher als das nicht säurebehandelte Material mit 65,0 % (63,5-66,0 %, n=3). Auch mit dem entblätterten Ausgangsmaterial waren die Cellulosekonversionsraten mit 63,1 % (62,5-64,0 %, n=3) vergleichsweise niedrig.

In Abbildung 90 sind die Konzentrationsverläufe für Ethanol der verschiedenen Bagassen unter Zugabe des korrespondierenden Presssaftes, ohne weitere Nährstoffzugabe, dargestellt. Bei den Versuchen mit säurekonservierten Material und dem Ameisensäurehaltigen Presssaft trat keine Fermentation ein und wurde deshalb in Abbildung 90 nicht abgebildet. Gründe für die nicht erfolgreiche fermentative Umsetzung sind hier sicherlich in der inhibierenden Wirkung von Ameisensäure auf die Hefen zu erklären, die unter den vorgegebenen Bedingungen besonders stark ausgeprägt war. Für alle weiteren Bagassen konnten im Vergleich zu den Versuchen ohne Saftzugabe jeweils nach 168 Stunden höhere Endethanolkonzentrationen erzielt werden. Für die Zuckerhirsebagasse der Sorte 'Umbrella' ließen sich die besten Ergebnisse erzielen und es konnten nach 168 Stunden Cellulosekonversionsraten von 73,5 % (72,2-74,4 %, n=3) detektiert werden. Die Raten sind damit vergleichbar zu den erhaltenen Ergebnissen der 1. Versuchsreihe. Für die Bagasse der Ganzpflanze der Sorte 'Top 76' konnten bei Saftzugabe im Vergleich zu Versuchen mit der Sorte 'Umbrella' keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Innerhalb des betrachteten Zeitraums konnten die frei verfügbaren Zucker nicht vollständig umgesetzt werden. Auffällig war, dass die Ethanolkonzentrationsverläufe innerhalb von 168 Stunden weitestgehend den Verläufen ohne Enzymzugabe entsprachen (Daten nicht dargestellt). Aus den Versuchsreihen mit Bagasse unter denselben Konditionen aber ohne Enzymzugabe, lagen die Ethanolausbeuten nach 168 Stunden für den Saft der Ganzpflanze bei lediglich 0,40 g Ethanol / g Zucker als Glucoseäquivalent und für den Saft der entblätterten Variante bei 0,36 g Ethanol / g Zucker als Glucoseäquivalent. Im Vergleich dazu hatte der Saft der Zuckerhirse 'Umbrella' bereits nach 22 Stunden sein Maximum erreicht und eine Ethanolausbeute von 0,46 g Ethanol / g Zucker als Glucoseäquivalent erzielt.

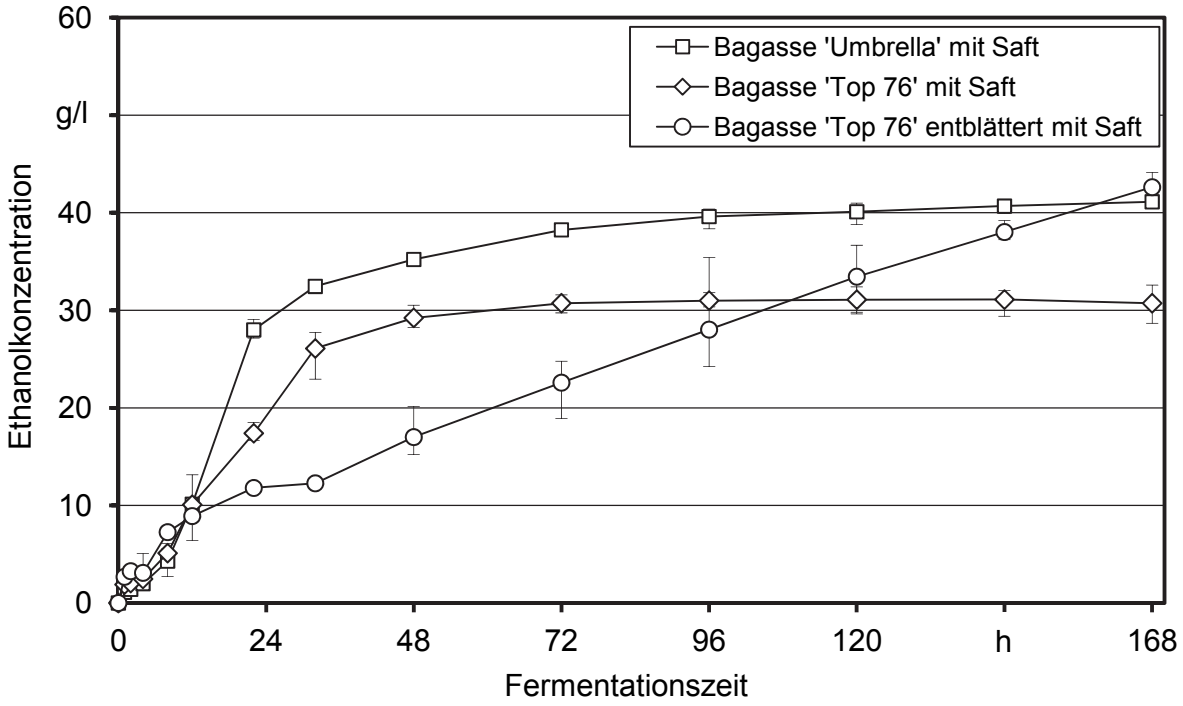


Abbildung 90: Konzentrationsverläufe bei der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse für verschiedene hydrothermal vorbehandelten Bagassevarianten unter Zugabe des jeweiligen Presssaftes, bei einer Feststoffkonzentration von 8 % WIS, n=3

Mögliche Ursachen für das schlechte Gärverhalten könnten prinzipiell mit einem Nährstoffmangel oder einer Inhibierung der Hefezellen in Verbindung gebracht werden. Um den Nährstoffeinfluss besser beurteilen zu können, wurden die Versuche für die Bagassen 'Top 76' nochmals mit Nährstoffzugabe, analog zu den Versuchen ohne Saftzugabe, durchgeführt. Zudem wurden die Presssäfte separat unter denselben Konditionen, aber ohne Feststoff, mit und ohne Nährstoffzugabe fermentiert. Die Fermentationen der Presssäfte der Ganzpflanze als auch der entblätterten Variante verhielten sich normal und es konnten unabhängig von der Nährstoffzugabe durchweg Ethanolausbeuten von ≥ 0,45 g Ethanol / g Zucker als Glucoseäquivalent innerhalb von 48 Stunden gefunden werden. Die Fermentation des Presssaftes des säurekonservierten Materials war vergleichsweise sehr viel langsamer und es konnte trotz einer zusätzlichen Nährstoffzugabe nach 48 Stunden nur eine Ausbeute von 0,36 g Ethanol / g Zucker als Glucoseäquivalent erzielt werden, die im weiteren Verlauf (bis 168 h) noch auf Werte von 0,44 g Ethanol / g Zucker als Glucoseäquivalent gesteigert werden konnte. Bei den wiederholten SSF-Versuchen konnte trotz einer Nährstoffzugabe keine Steigerungen erzielt werden.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das unbefriedigende Gärverhalten nicht auf einen Nährstoffstoffmangel zurückzuführen war. Wahrscheinlicher ist ein Inhibierungseinfluss. Die Störeinflüsse waren innerhalb der ersten 12 Stunden nur gering ausgeprägt, gewannen aber an Einfluss mit höherem Ethanolgehalt. Durch die Anwesenheit von Ameisensäure im Presssaft wird der Inhibierungseffekt noch weiter verstärkt, sodass es hier zu einem vollständigen Erliegen der Fermentation gekommen ist. Bei den Inhibie-

rungsstoffen kann es sich um Komponenten handeln, welche sich während der hydrothermalen Vorbehandlung oder während des Fermentationsprozesses gebildet haben. Ein Zusammenhang mit der enzymatischen Hydrolyse kann ausgeschlossen werden, da die Effekte ebenfalls im Material ohne Enzymzugabe auftraten (siehe Abbildung 91). Um die Inhibierungseffekte der Flüssigphase auf die Fermentation zu prüfen, wurden den Säften der Zuckerhirse 'Top 76' die äquivalente Menge an Flüssigphase des hydrothermalen Aufschlussprozesses hinzugesetzt, wie sie auch in den SSF-Versuchen mit Saftzugabe vorlagen. Um einen direkten Vergleich inhibierender Effekte der Flüssigphase des hydrothermalen Aufschlussprozesses auf die alkoholische Gärung zu erhalten, wurden parallel Versuche durchgeführt, bei denen die Säfte mit Wasser anstelle der Flüssigphase versetzt wurden. Die Versuche erfolgten jeweils im Dreifachansatz. Wie aus Abbildung 91 ersichtlich, verlief zwar die Fermentation mit Zugabe an Flüssigphase tendenziell etwas langsamer, jedoch sind die großen Unterschiede zu den Fermentationen, bei denen hydrothermal vorbehandelte Bagasse eingesetzt wurde, mit einem inhibierenden Einfluss aus der Flüssigphase nicht zu erklären. Wahrscheinlicher ist es, dass sich die Inhibitoren während der Fermentation gebildet haben. Es ist bekannt, dass z. B. niedermolekulare phenolische Moleküle aus Lignin freigesetzt werden können und einen vergleichsweise sehr starken inhibierenden Einfluss besitzen [62]. Durch das während der Fermentation gebildete Ethanol, kann dieser Effekt noch verstärkt werden, da Ethanol als Lösungsmittel (organosolv) fungiert.

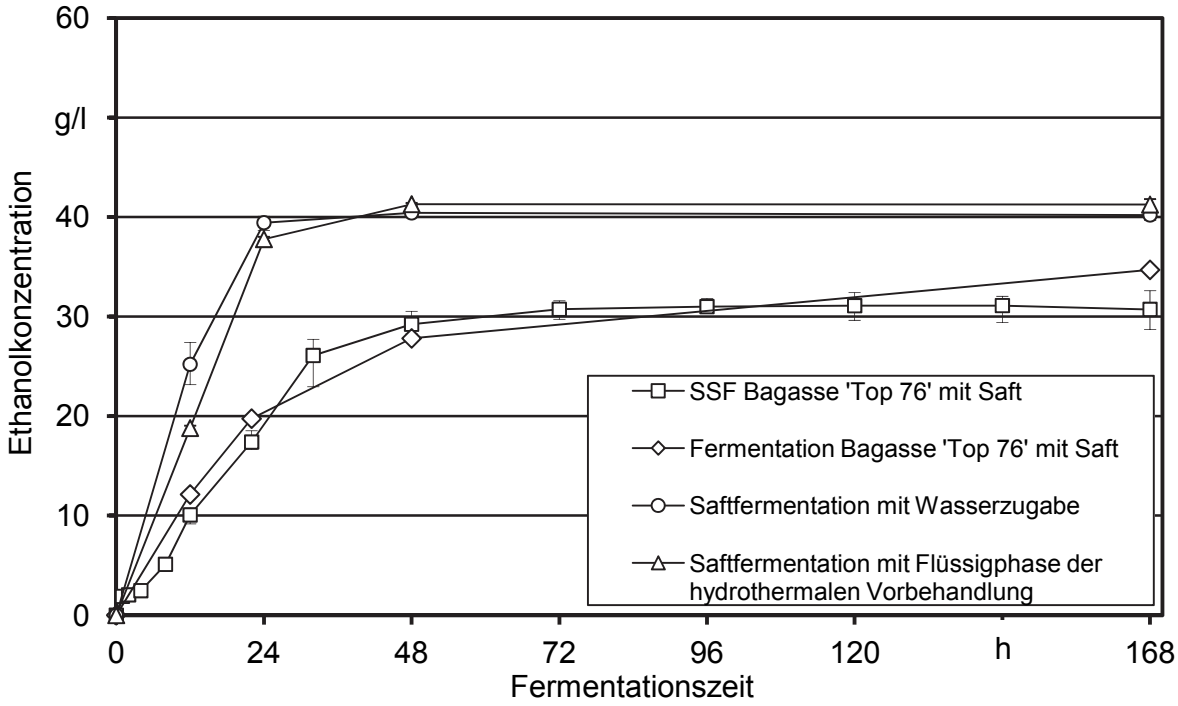


Abbildung 91: Konzentrationsverläufe bei der simultanen Verzuckerung und Fermentation von Zuckerhirsebagasse (Ganzpflanze) der Sorte 'Top 76' zur Überprüfung von Inhibierungseinflüssen der flüssigen Phase aus dem Aufschlussverfahren auf den Fermentationsprozess

10.3.4.4 Biogaspotenzial der Flüssigfraktion aus hydrothermal vorbehandelter Zuckerhirsebagasse

Die zeitlichen Verläufe der Batch-Versuche zur Bestimmung des Biogaspotenzials für flüssige Fraktionen aus der hydrothermalen Bagasse-Vorbehandlung sind in Abbildung 92 dargestellt. Die angegebenen Biogaserträge sind blindwertkorrigiert und wurden gemäß VDI 4630 auf Normbedingungen (1.013 mbar, 0 °C) umgerechnet.

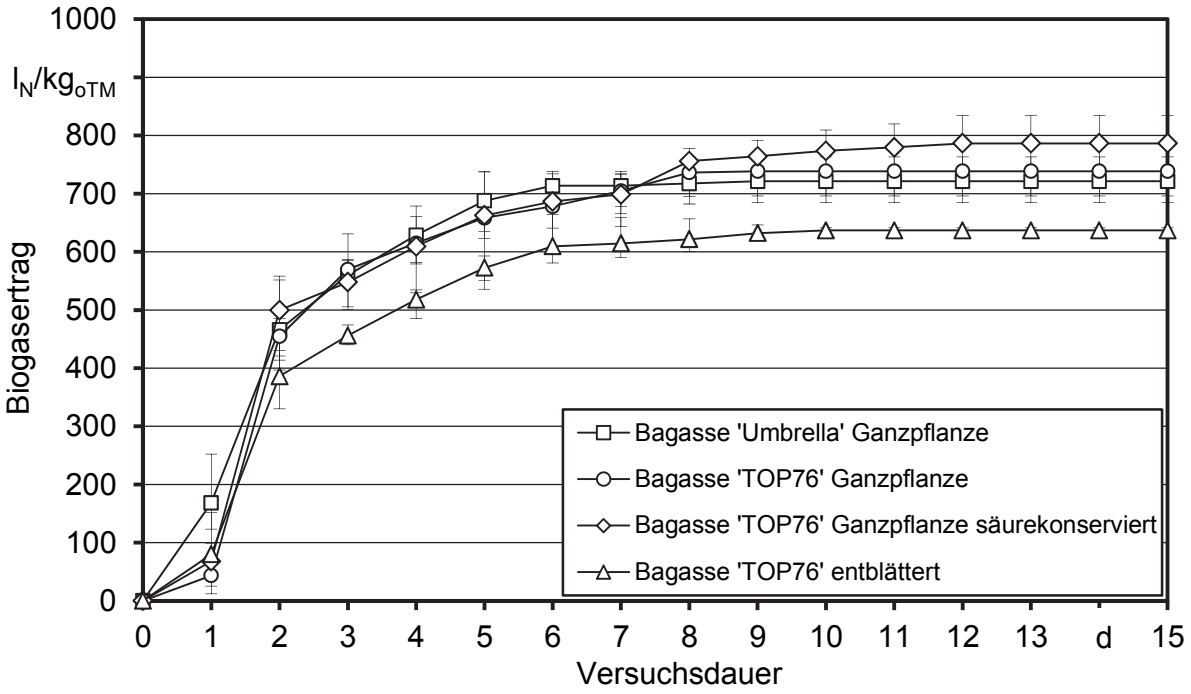


Abbildung 92: Biogasbildung der untersuchten Flüssigfraktionen hydrothermal vorbehandelter Bagassen bei einer Versuchsdauer von 15 Tagen, n=3

Die Gewinnung von Biogas war mit allen untersuchten Substraten möglich. Die Umsetzung der in den Flüssigkeiten enthaltenen organischen Bestandteile bis zum Erreichen des maximalen Biogasertrags wurde in allen Versuchen innerhalb von neun Tagen erzielt. Die Ergebnisse zu Versuchsende für den Biogasertrag, der verbliebenen $CSB_{lös}$-Konzentration sowie den pH-Wert sind in Tabelle 69 aufgeführt. Limitierungen im anaeroben Abbauprozess konnten in den Versuchen nicht festgestellt werden.

Tabelle 69: Ergebnisse (Mittelwerte und Standardabweichungen) der Batch-Versuche zur Biogaserzeugung für flüssige Fraktionen hydrothermal vorbehandelter Bagassen nach 15 Tagen, n=3

Biogasertrag, $CSB_{lös}$, pH-Wert	Bagasse 'Umbrella' Frischmaterial, Ganzpflanze	Bagasse 'Top 76' Frischmaterial, Ganzpflanze	Bagasse 'Top 76' säurekonserviert, Ganzpflanze	Bagasse 'Top 76' Frischmaterial, entblättert
Biogasertrag $l_N/kg_{oTM,zugeführt}$	721 ± 32	739 ± 37	787 ± 62	637 ± 6
$CSB_{lös}$ (g/l)	1,2 ± 0,0	1,2 ± 0,1	1,4 ± 0,1	1,1 ± 0,0
pH-Wert (-)	7,4 ± 0,1	7,1 ± 0,1	7,2 ± 0,1	7,3 ± 0,2

Mit den eingesetzten Substratproben wurden im Mittel, bezogen auf zugeführte Organik, Biogaserträge zwischen 637 und 787 l_N/kg_{oTM} erzielt. Diese Werte sind vergleichbar mit gängigen NaWaRo-Substraten wie z. B. Maissilage mit 650 l_N/kg_{oTM} und liegen damit über denen von Rinder- und Schweingülle für die gemäß KTBL ein Richtwert von 380 bis 420 l_N/kg_{oTM} angesetzt werden kann [153].

Die Biogaspotentiale der Flüssigphasen aus Bagasse von entblättertem Material waren im Schnitt um ca. 13 % geringer als die Vergleichswerte mit Blättern. Die abweichenden Werte für die Flüssigphase aus Bagasse von entblättertem Material sind nicht in Zusammenhang mit den analysierten Inhaltstoffen (siehe Kapitel 10.1.4.4) zu sehen. Eine Erklärung ist daher schwierig. Die höchsten Biogaserträge wurden mit dem säurekonservierten Material verzeichnet. Auffällig ist, dass sich die Biogasbildung während der ersten sieben Tage kaum vom nicht säurekonservierten Material unterschied und es erst danach zu erkennbaren Unterschieden kam. Ein Zusammenhang mit den analysierten Inhaltstoffen (siehe Kapitel 10.1.4.4) ist auch hier nicht klar ersichtlich. Die in den Ansätzen verbliebenen $CSB_{lös.}$-Konzentrationen lagen unabhängig vom eingesetzten Substrat in einem Bereich zwischen 1,1 und 1,4 g/l.

10.3.4.5 Fazit

Das in Kapitel 10.1.4.1 dargestellte Fermentationskonzept zur simultanen Verzuckerung und Fermentation von Bagasse unter Beisein von Zuckerhirsepresssaft wurde auf die Machbarkeit hin überprüft und es waren ökonomisch vertretbare Ethanolkonzentrationen erzielbar.

Im Vergleich zu einem Verfahren, bei dem z. B. nur Getreidestroh als Substrat eingesetzt wird, kann ein Verfahren, welches Zuckerhirsebagasse verwendet und die Synergieeffekte mit Presssaft nutzt, positive Effekte in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit haben. Hierfür sprechen ein reduzierter Einsatzbedarf an Nährstoffen, der über die Saftzugabe bereitgestellt werden kann, sowie eine geringer einzusetzende Feststoffkonzentration für die enzymatische Hydrolyse, um hohe Ethanolkonzentrationen zu erreichen.

Für die Zuckerhirsebagasse der Sorte 'Umbrella' konnten im Vergleich zu den anderen untersuchten Bagassesorten sehr gute Ergebnisse bezüglich der Ethanolgewinnung erreicht werden und eine Saftzugabe erscheint hier als sehr sinnvoll. Betrachtet man einen Prozess, bei dem die simultane Verzuckerung und Fermentation von Bagasse getrennt von der Saftfermentation betrieben wird und die Fermentationsprodukte im Anschluss für die Destillation gemischt werden, ergeben sich klare Vorteile für die kombinierte Prozessführung. Unter der Annahme, dass in einem Saft mit 100 g/l Zucker 46 g/l Ethanol gebildet werden können, und dieser mit dem SSF-Produkt in welchem 24 g/l Ethanol enthalten ist (8 % WIS im Ansatz) und im selben Verhältnis wie bei der kombinierten Prozessführung gemischt werden, wäre eine erzielbare Ethanolkonzentration von 34 g/l realistisch. Demgegenüber wären bei einer erfolgreichen Fermentation im kombinierten Verfahren bis zu 58 g/l Ethanol möglich (Annahmen: Entwässerung der hydrothermal vorbehandelten Bagasse auf 26 % WIS, 8 % WIS im Ansatz, Cellulosekonversionsrate 75 %, Ethanolausbeute bezogen auf den Saft 0,46 g/g). Dies entspräche einer Steigerung der Ethanolkonzentration um 41 %. Experimentell nachgewiesen werden konnten 53 g/l Ethanol im kombinierten Verfahren, bei dem Zuckerhirsepresssaft der Sorte 'Umbrella' mit Glucose auf 100 g/l angereichert wurde und bei 7,5 % WIS im Ansatz vorlagen.

Um die genaue Ursachenbeschreibung für die teilweise vorhandenen Inhibierungseinflüsse bei der alkoholischen Gärung auf die Hefe ausfindig zu machen und daraus Lösungsansätze ableiten zu können, wären hier weitere Untersuchungen notwendig, um hydrothermal vorbehandelte Zuckerhirsebagasse zu Fermentationszwecken technisch einzusetzen.

Die gute Nutzung der in den Flüssigphasen des Aufschlussverfahrens enthaltenen Inhaltstoffe als Biogassubstrat konnte gezeigt werden. Um Aussagen bezüglich der technischen Nutzung treffen zu können, wären in einem nächsten Schritt kontinuierliche Vergärungsversuche notwendig. Damit ließen sich Aussagen über die Prozessstabilität, dem durchschnittlichen Methangehalt des erzeugten Biogases und der maximal erzielbaren Raumbelastung treffen.

10.3.5 Thermische Aufbereitung der Fermentationsmaischen

In Tabelle 70 sind die Analyseergebnisse der untersuchten Destillationsprodukte (Kapitel 10.1.6) dargestellt. Die Werte zeigen, dass die in DIN EN 15376 vorgegebenen Grenzwerte [85] nahezu problemlos eingehalten wurden. Eine Ausnahme bildet das Ethanol, das aus der unkontrollierten Fermentation hergestellt wurde. Hier lag der Wassergehalt mit 0,315 Masse-% etwas über dem geforderten Maximalwert von 0,300 Masse-%. Da die Wasserabtrennung substratunspezifisch ist, ist die Abweichung im Zusammenhang mit der verwendeten Versuchsapparatur zu sehen. Zudem wurde einmal innerhalb des Dreifachansatzes in den Versuchen mit Presssäften aus der Ameisensäurekonservierung der Grenzwert für den Gesamtsäuregehalt nicht eingehalten. Eventuell könnte dies mit einer Verschleppung der Ameisensäure in Zusammenhang gebracht werden.

Tabelle 70: Analyseergebnisse von Zuckerhirse-Ethanol zur Verwendung als Blendkomponente in Ottokraftstoff gemäß DIN EN 15376 vier verschiedener Versuchsansätze

Versuchsnummer		1	2	3	4	
Anzahl der Abtriebe n		3	1	1	3	
Prüfparameter	Einheit	Prüfergebnis				Grenzwert DIN EN 15376 (2011) [85]
Ethanol	Masse-%	> 99,3	99,6	99,5	99,9	min. 98,7
Höhere Alkohole	Masse-%	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	max. 2,0
Methanol	Masse-%	< 0,10	< 0,05	< 0,01	< 0,05	max. 1,0
Wasser	Masse-%	< 0,266	0,195	0,315	< 0,150	max. 0,300
Anorg. Chlor	mg/l	< 0,2	0,2	0,31	< 0,2	max. 6,0
Kupfer	mg/kg	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	max. 0,1
Gesamtsäure	Masse-%	0,001	0,001	0,003	< 0,010	max. 0,007
Phosphor	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,5[1]	< 0,1	max. 0,15
Schwefel	mg/kg	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 1,0	max. 10,0
Nichtflüchtige	mg/100ml	2-7	5	5	< 1	max. 10

[1] *Analysiert nach DIN EN 15376 (2009) [84]; Grenzwert max. 0,5*

10.3.5.1 Qualitätsbestimmende Eigenschaften des Gärrests

Um Aussagen darüber treffen zu können, wofür die Schlempe aus dem destillierten Zuckerhirsepresssaft verwendet werden kann, wurde diese hinsichtlich TM-, oTM-, Asche- und Proteingehalt untersucht. Als Ausgangsmaterial diente der Gärrest aus der in der Destillation abgetriebenen Maische der Versuchsnummer 1 (siehe Tabelle 57). Der TM-Gehalt lag bei 8,40 % (8,38 – 8,44 %, n=3), der Aschegehalt bei 1,78 % (1,75 – 1,82 %, n=3), der oTM-Gehalt bei 6,62 % (6,58 – 6,65 %, n=3) und der Proteingehalt bei 2,38 % (2,38 %, n=3). Das über einen Bach-Ansatz bereitgestellte Destillat hatte vor Eintritt in die Rektifikation eine Ethanolkonzentration von 15,8 Vol.-%. In der Praxis sind jedoch in kontinuierlich betriebenen Maischedestillationskolonnen Konzentrationen zwischen 40 und 55 Vol.-% üblich [142]. Damit ist anzunehmen, dass die untersuchte Schlempe vergleichsweise konzentriert vorlag, da mehr Wasser in das Destillat überführt wurde.

Bezogen auf den Trockenmassegehalt setzte sich die Schlempe aus 28,3 % i.d. TM Protein, 50,5 % i.d. TM sonstige organische Bestandteile und zu 21,2 % i.d. TM aus Asche zusammen. In der Praxis liegt der Proteingehalt bezogen auf die Trockenmasse je nach verwendetem Rohstoff etwa zwischen 29 bis 36 % i.d. TM [142]. Der bestimmte Wert liegt somit an der Untergrenze.

10.3.5.2 Fazit

Nach dem bisherigen Erkenntnisstand konnten im Ethanolprodukt, gewonnen aus Zuckerhirsepresssaft, keine unerwünschten Begleiterscheinungen festgestellt werden. Es konnte gezeigt werden, dass durch die im Labor angewandte Destillations- und Absolutierungsmethode eine DIN-konforme Bereitstellung von Ethanol aus Zuckerhirse zu Kraftstoffzwecken möglich war.

Eine Aussage über die Zusammensetzung des Gärrests und dessen Verwendungsmöglichkeit gestaltet sich aufgrund der Vielzahl von Einflussparametern (Zuckerhirsesorte, Presse, Vorbehandlungs- und Fermentationsverfahren, Destillationsstrategie usw.) als äußerst schwierig. Die Eignung einzelner Stichproben für eine allgemeingültige Aussagefähigkeit ist äußerst kritisch anzusehen, sodass weitere Untersuchungen notwendig wären, wenn eine konkrete Anlagenplanung bzw. Prozessumsetzung vorliegt.

11 Thermische Verwertung der Bagasse

11.1 Vorgehensweise

Beim Betrieb von Feuerungen für biogene Festbrennstoffe treten – anders als bei Feuerungen, die mit homogenen und leicht dosierbaren Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas betrieben werden – stets eine Vielzahl von Einfluss- und Störgrößen auf, die die Aussagekraft und die Verallgemeinerungsfähigkeit von Emissions- und Leistungsmessungen beeinträchtigen. Dazu zählen neben Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften auch dynamische, mehr oder weniger stark schwankende Betriebszustände in der Feuerung, durch die sich die Strömungsverhältnisse in den Mess- und Probenahmestrecken laufend ändern. Messungen an Feuerungen für biogene Festbrennstoffe sind daher stets mit einer relativ hohen Unsicherheit verbunden, mit der die jeweilige Feuerungsart repräsentativ für das gesamte mögliche Einsatzspektrum abgebildet werden kann. Die versuchstechnischen und methodischen Maßnahmen stellen daher notwendigerweise einen Kompromiss zwischen messtechnisch wünschenswertem und wirtschaftlich vertretbarem Aufwand dar. Das gilt nicht nur für die Auswahl der Feuerungsanlage, ihre Betriebszustände und die verwendeten Brennstoffe, sondern auch für die Wiederholbarkeit der Messungen, für Versuchsdurchführung und -aufbau, sowie die messtechnische Ausstattung.

11.1.1 Beschreibung der ausgewählten Feuerungsanlage

Die Auswahl der Feuerungsanlage für die Prüfstandsmessungen erfolgte aufgrund ihrer Eignung für den Einsatz von Nicht-Holz-Brennstoffen wie Miscanthus oder Getreide. Von der Firma Guntamatic wurde eine Kesselanlage des Typs Powerchip 20/30 zur Verfügung gestellt. Abbildung 93 zeigt schematisch den Aufbau und die Funktion sowie die Ansicht der Anlage.

Abbildung 93: Funktionsdarstellung und Ansicht der Anlage Guntamatic Powerchip 20/30 (Quelle: Guntamatic)

Die Anlage weist beim Einsatz von Holzbrennstoffen wie Pellets oder Hackschnitzeln ein Leistungsspektrum von 7 bis 30 kW und bei der Verwendung von Energiekorn als Brennstoff ein Leistungsspektrum von 7 bis 25 kW auf. Der Brennstoff wird über ein Heißluftgebläse automatisch gezündet und bei einer Feuerraumtemperatur von ca. 650 °C verbrannt. Ein beweglicher Treppenrost sorgt für eine automatische Rostreinigung, für die notwendige Bewegung im Glutbett und für den Ascheabtransport. Die Anlage verfügt über eine elektronische Regelung mit Lambdasonde, die Primärluftzufuhr erfolgt durch den Treppenrost und die Sekundärluft wird in eine Ausbrandzone oberhalb des Glutbetts eingeblasen. Die Reinigung des Rohrbündelwärmetauschers erfolgt automatisch in frei programmierbaren Zeitintervallen.

11.1.2 Versuchsbrennstoff

Für die Feuerungsversuche im Jahr 2011 stand entgegen den ursprünglichen Planungen lediglich eine Charge Bagasse zur Verfügung, die Material aus verschiedenen Saftgewinnungsversuchen mit den Sorten 'Umbrella', 'Sugar Drip' und 'Della' enthielt. Die Bagasse wurde im Oktober 2010 mit einer Seiherstabpresse erzeugt. Im Jahr 2012 standen drei Chargen Bagasse für die Feuerungsversuche zur Verfügung, die ebenfalls mit einer Seiherstabpresse erzeugt wurden. Die Bagasse wurde einheitlich aus gehäckselter Hirse der Sorte 'Top 76' gewonnen, wobei sowohl frisches als auch mit Ameisensäure konserviertes Material verwendet wurde. Zusätzlich wurden bei dem konservierten Ausgangsmaterial zwei Presseneinstellungen unterschieden. Tabelle 71 gibt einen Überblick zu den Versuchsbrennstoffen.

Tabelle 71: Versuchsbrennstoffe

Bezeichnung	Jahr	Sorte	Konservierung	Presse
ZH-Bagasse 2011	2011	Mischung	ohne	Seiherstab
ZH-Bagasse 2012-1	2012	'Top 76'	ohne	Seiherstab
ZH-Bagasse 2012-2	2012	'Top 76'	Ameisensäure	Seiherstab
ZH-Bagasse 2012-3	2012	'Top 76'	Ameisensäure	Seiherstab mit Pelletierscheibe

Die an den Versuchsbrennstoffen durchgeführten Untersuchungen sind in Tabelle 72 zusammengefasst. Die Probenvorbereitung sowie die Bestimmung der physikalischen und feuerungstechnischen Kenngrößen erfolgten im Labor des TFZ, während die chemischen Analysen von einem externen Labor durchgeführt wurden.

Tabelle 72: Untersuchte Brennstoffparameter und angewandte Prüfmethoden

Parameter	Norm
Physikalische Kenngrößen	
Schüttdichte	DIN EN 15103 [78]
Feuerungstechnische Kenngrößen	
Wassergehalt	DIN EN 14774-3 [75]
Aschegehalt	DIN EN 14775 [76]
Heizwert	DIN EN 14918 [77]
Chemische Analysen	
Elementaranalyse (C, H, N)	DIN EN 15104 [79]
Gehalt an S und Cl	DIN EN 15289 [80]
Hauptelemente (Ca, Mg, K, Si, Na)	DIN EN 15290 [81]

11.1.3 Versuchsaufbau und Messanordnung

Die Messungen wurden auf dem Feuerungsprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) in Straubing durchgeführt. Die messtechnische Ausstattung wurde entsprechend der Aufgabenstellung gewählt.

Die Abgasmessstrecke umfasst den Abschnitt des Rauchgasrohres, in dem alle erforderlichen Messöffnungen angeordnet sind und befindet sich zwischen Kesselanschluss und der Förderleitung zur Kaminanlage des Prüfstandes. Der Versuchsaufbau besteht abgasseitig aus einer senkrechten Messstrecke mit einem Krümmer und einer oder mehreren Reduzierungen zum Anschluss an den Abgasstutzen der Feuerungsanlage. In der

verwendeten Messstrecke waren die notwendigen Messöffnungen für die Messung von Abgastemperatur, Schornsteinzug, Abgasgeschwindigkeit, Probenahme der gasförmigen Bestandteile sowie Probenahme zur Bestimmung des Gesamtstaubgehaltes gemäß VDI 2066, Blatt 1 [149] angeordnet.

Die Kesselanlage wurde wasserseitig an einen speziellen Kühlkreislauf angeschlossen, der die direkte Erfassung der vom Kessel abgegebenen Nutzwärme ermöglicht. Die hydraulische Messstrecke entspricht dabei den Anforderungen der DIN EN 303 Teil 5 [73] bzw. DIN EN 304 [74].

Im Rahmen des Messprogramms wurden folgende Anlagenparameter und Emissionsmessgrößen erfasst:

- Luftverunreinigende Stoffe im Abgas:
  - Kohlenstoffmonoxid (CO),
  - flüchtige organische Stoffe (C_nH_m),
  - Stickstoffoxide (NO_x),
  - Chlorwasserstoff (HCl),
  - Schwefeldioxid (SO_2) und
  - Gesamtstaub.
- Betriebsparameter der Feuerungsanlage:
  - Sauerstoff (CO_2),
  - Abgasfeuchte (H_2O),
  - Wärmeleistung und feuerungstechnischer Wirkungsgrad,
  - Abgastemperaturen, Vor- und Rücklauftemperaturen, Raum- bzw. Verbrennungslufttemperatur,
  - Förderdruck sowie
  - Abgasgeschwindigkeit.

Die Anordnung der jeweiligen Messgeräte im Abgasstrom zeigt Abbildung 94. Alle Messgrößen mit Ausnahme des Gesamtstaubgehalts, der diskontinuierlich gemessen wird, wurden kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Eine Übersicht über die bei den kontinuierlichen Messungen eingesetzten Geräte und Verfahren zeigt Tabelle 73. Die Verbrennungsversuche wurden im April 2011 sowie im März 2012 jeweils mit dem Material des Vorjahres durchgeführt. Die Versuchsdurchführung wird nachfolgend beschrieben.

Die Feuerungsanlage wurde auf dem Prüfstand des Technologie- und Förderzentrums aufgebaut und in Betrieb genommen. Anschließend wurden Vorversuche mit dem Prüfbrennstoff durchgeführt, um mit der Bedienung der Anlage vertraut zu werden und um

eine für den Versuchsbrennstoff geeignete Feuerungseinstellung zu finden. Die Anlage wurde vor jedem Versuch auf den Versuchsbrennstoff und die gewählte Laststufe eingestellt. Dabei wurde als Optimierungsgröße im Rahmen der technischen Möglichkeiten ein minimaler CO-Gehalt bei größtmöglichem CO_2-Gehalt im Abgas angestrebt. Die Einstellungen waren lediglich im Rahmen der Möglichkeiten, die der Anlagenhersteller mit seiner Regelung bietet, variierbar. An der gewählten Anlage können die Leistung, die Brennstoffmenge und die Luftmenge in vorgegebenen Grenzen eingestellt werden.

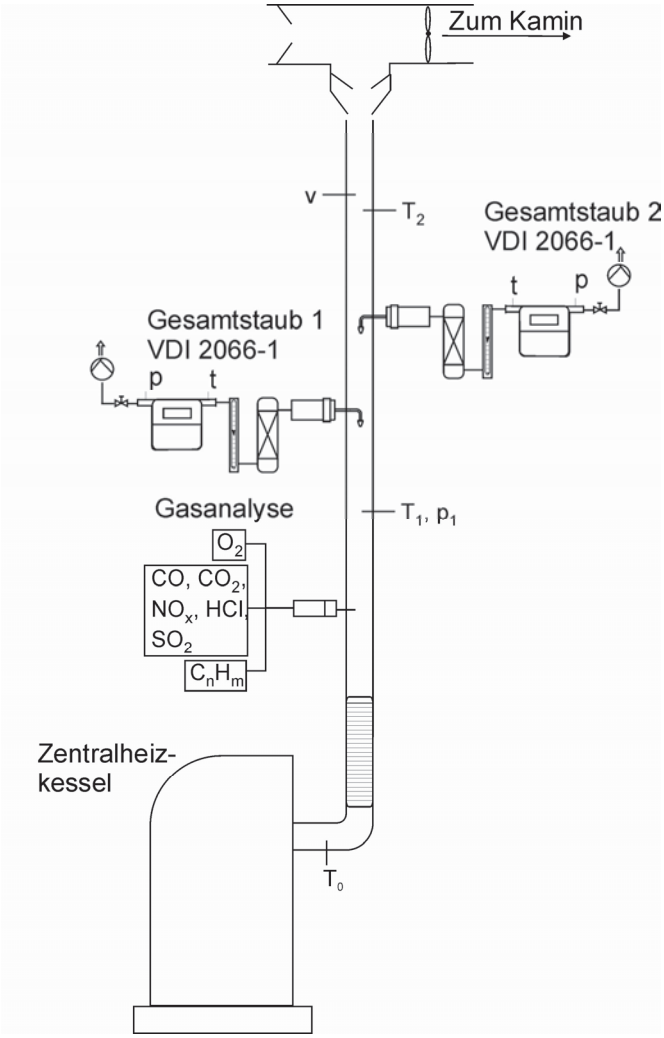


Abbildung 94: Schematischer Aufbau des Versuchs auf dem Prüfstand

Die Bestimmung der Gesamtstaubemissionen erfolgte nach dem in der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [149] beschriebenen Messverfahren. Bei diesem Probenahmeverfahren wird ein staubbeladener Teilgasstrom unter isokinetischen Bedingungen entnommen und einem Rückhaltesystem zur Staubabscheidung zugeführt. Als Abscheidemedium wurde eine mit Quarzwatte gestopfte Filterhülse mit einem Quarzfaserplanfilter (Retention 99,998 % gemäß DOP (0,3 µm), Durchmesser 45 mm) kombiniert und im Filterkopfgerät eingesetzt, das außerhalb des Abgaskanals angeordnet war. Das Absaugrohr und das

Rückhaltesystem wurden beheizt, um eine Unterschreitung des Abgastaupunktes im Filtersystem zu vermeiden. Nach dem Filterkopfgerät gelangte das Messgas in die Absaugapparatur. Diese besteht aus einer Einheit zur Gastrocknung, den Geräten zur Ermittlung des Volumenstromes sowie des Gaszustandes und einer Saugpumpe. Mit Hilfe einer automatischen Regelung wurde der für die isokinetische Probenahme erforderliche Volumenstrom über die Drehzahl der Vakuumpumpe eingestellt.

Tabelle 73: Kontinuierlich erfasste Messgrößen und eingesetzte Messgeräte

Messgröße	Messgerät/Hersteller	Messprinzip/ -verfahren	Aktiver Messbereich
Umgebungsbedingungen und Betriebsparameter			
Abgastemperatur	Thermoelement (Typ K)	Thermoelektrizität	0 - 1.000 °C
statischer Druck	Differenzdrucktransmitter, GE LPX 5000	Membran mit induktivem Abgriff	-200 - 200 Pa
Abgasgeschwindigkeit	Flügelradanemometer	Drehzahlmessung am Flügelrad	0,4 – 20 m/s
Lufttemperatur	Toss Kombisensor Typ 20500	temperaturabhängige Widerstandsänderung	-20 - 50 °C
Abgasbestandteile			
CO_2	Gasmet CX 4000 FTIR Fa. Ansyco	fouriertransformierte Infrarotabsorption	0 – 12,5 Vol.-%
H_2O			0 – 12,5 Vol-%
CO			0 – 100 ppm 100 – 5.000 ppm
NO_x			0 – 200 ppm 200 – 2.000 ppm
HCl			0 – 1.000 ppm
SO_2			0 – 1.000 ppm
O_2	PMA 100-L Fa. M&C Products	Paramagnetismus	0 – 21 Vol.-%
Ges.-C	Thermo-FID, Fa. Mess- & Analysentechnik GmbH	Flammenionisation	0 – 100 ppm
Wärmeleistung und Wirkungsgrad			
Kesselwasserdurchfluss	Promag 53 P Fa. Endress+Hauser	magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem	15 – 3.000 l/h
Temperatur	Widerstandsthermometer, (PT 100, Klasse B)	temperaturabhängige Widerstandsänderung	0 - 100 °C

11.2 Brennstoffeigenschaften

Analysen zur Bestimmung des Heizwertes, des Aschegehaltes sowie der verschiedenen Elementgehalte erfolgten nur für die Bagasse. Die als Vergleich aufgeführten Daten für Stroh und Holz wurden aus der NAWARO-Datenbank des Technologie- und Förderzentrums [121] entnommen. In Tabelle 74 sind die Daten der Brennstoffe dargestellt.

Tabelle 74: Heizwert sowie Asche- und Elementgehalte der untersuchten Brennstoffe (für Getreidestroh und Holz Datenbankangaben gemäß [121])

Brennstoffart	Asche	Heizwert Hu	Elementgehalte, bezogen auf Trockenmasse (TM) in % TM				
	in % TM	in kJ/kg TM	C	O	H	S	N
ZH-Bagasse 2011	4,6	17.490	46,6	41,6	6,0	0,07	1,11
ZH-Bagasse 2012-1	3,6	17.820	47,3	42,0	6,2	0,05	0,71
ZH-Bagasse 2012-2	3,8	17.670	47,1	42,2	6,4	0,05	0,38
ZH-Bagasse 2012-3	3,8	17.770	47,3	42,1	6,1	0,04	0,54
Getreidestroh	5,7	17.190	45,1	42,9	5,9	0,07	0,47
Holz	0,7	18.620	48,8	43,9	6,3	0,03	0,32

Im Rahmen des Vorhabens wurde die Bagasse auf ihren Gehalt an den Elementen Ca, K, Mg, Na, Si, S, N und Cl untersucht. Hinsichtlich ihres Einflusses auf die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen sind die Gehalte an Stickstoff, Schwefel und Chlor von Bedeutung. Bagasse weist einen deutlich höheren Gehalt an Stickstoff auf, als die beiden Vergleichsbrennstoffe (Tabelle 74). Damit sind zunächst bei der Verbrennung entsprechend höhere Emissionen an Stickoxiden zu erwarten, wobei diese Emission nicht proportional zum Brennstoffstickstoffgehalt ansteigt, da nur ein geringer Anteil des Brennstoffstickstoffs als Stickoxid emittiert wird und die Höhe der Stickoxidemissionen auch von anderen Betriebsparametern (Brennraumtemperatur, Luftüberschuss etc.) beeinflusst wird.

Positiv fällt der gegenüber Stroh deutlich geringere Chlorgehalt der Bagasse auf. Der Schwefelgehalt liegt in der Größenordnung von Stroh und damit beim ca. zweifachen des Schwefelgehaltes von Holz. Das Risiko von Korrosion aufgrund der Brennstoffzusammensetzung ist somit beim Einsatz von Bagasse eher gering einzuschätzen. Der Gehalt an Kalium, das wegen eines Einflusses auf das Ascheschmelzverhalten sowie als Aerosolbildner von Bedeutung ist, ist deutlich geringer als in Stroh. Diese vergleichsweise niedrigen Gehalte an löslichen Elementen sind ein Resultat der Saftgewinnung, da die leicht löslichen Elemente beim Abpressen in den Saft übergehen. So kann beispielsweise der Kaliumgehalt, der in der Zuckerhirse zwischen 1,4 und 1,9 % i.d.TM beträgt (s. Kapitel 5.2.3 Tabelle 29 und Tabelle 30), durch das Abpressen auf Werte zwischen 0,2 und 0,4 % i.d.TM in der Bagasse (Tabelle 75) gesenkt werden.

Neben Kalium und Chlor zählen auch Natrium, Schwefel sowie die Schwermetalle Blei und Zink zu den aerosolbildenden Elementen im Brennstoff [42]. Bei einem hohen Gehalt eines oder mehrerer dieser Elemente im Brennstoff kann somit generell von einem größeren Risiko erhöhter Partikelemissionen ausgegangen werden. Da bei naturbelassenen biogenen Festbrennstoffen die Gehalte an Zink und Blei sehr gering und damit gegenüber den Gehalten an den anderen Aerosolbildnern eher unbedeutend sind, kann dieser Zusammenhang vereinfachend auch für die Summe der Gehalte an Na, K, Cl und S nachgewiesen werden. An einer weitgehend baugleichen Feuerung wurde in früheren Untersuchungen des TFZ der Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Aerosolbildnern und den Staubemissionen deutlich nachgewiesen [122]. Alle Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen sowie die entsprechenden Gehalte der beiden Vergleichsbrennstoffe sind in Tabelle 75 dargestellt.

Tabelle 75: Elementgehalte Bagasse (Mittelwert der 4 Versuchsbrennstoffe jeweils ± Standardabweichung) im Vergleich zu ausgewählten biogenen Festbrennstoffen (Daten der Vergleichsbrennstoffe gem. [121]); Alle Angaben in mg/kg i.d.TM

Parameter	Bagasse	Getreidestroh	Holz
Kalzium (Ca)	1.950 ± 480	3.100	4.700
Kalium (K)	3.050 ± 880	10.800	2.000
Magnesium (Mg)	620 ± 275	600	700
Natrium (Na)	19 ± 17	90	80
Silizium (Si)	11.675 ± 3.020	13.000	2.800
Schwefel (S)	520 ± 120	740	320
Stickstoff (N)	6.900 ± 3.100	4.700	3.200
Chlor (Cl)	740 ± 310	2.500	125
Aerosolbildner (∑Na, K, Cl, S)	4.335 ± 770	14.130	2.525

Als wesentlicher Parameter zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Bagassebrennstoffe wurde deren Schüttdichte bestimmt. Hier werden deutliche Unterschiede zwischen dem Material der Versuche 2011 und dem des Jahres 2012 sichtbar. Während die im Jahr 2011 untersuchte Bagasse mit 110 kg/m^3 eine Schüttdichte aufweist, die wesentlich geringer als die Schüttdichte von Holzhackschnitzeln ist und in der Größenordnung der Schüttdichte von gehäckseltem Miscanthus liegt, wurden im Jahr 2012 deutlich höhere Schüttdichten für die Bagasse bestimmt (Tabelle 76). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Bagasse, die 2011 eingesetzt wurde, eine Mischprobe aus verschiedenen Ausgangsmaterialien und Pressenparametern war und daher nicht direkt mit dem Material der folgenden Versuche vergleichbar ist. Die höhere Schüttdichte des frischen Materials 2012 (Bagasse 2012-1) gegenüber 2011 ist eventuell durch höhe-

re Trockenmassegehalte im Ausgangsmaterial sowie die geringere Durchsatzleistung der Presse und die damit verbundene intensivere mechanische Aufbereitung zu erklären (s.a. Kapitel 9.3). Die deutlich höheren Schüttdichten der beiden Bagassebrennstoffe aus konservierter Zuckerhirse (Bagasse 2012-2 und 2012-3) sind ggf. auf den chemischen Aufschluss des Materials durch die Einwirkung der Ameisensäure zurückzuführen, die sich auch durch einen positiven Einfluss auf die Saftgewinnung auswirkt (s.a. Kapitel 9.3.3). Durch den Einsatz einer Pelletierscheibe während der Saftgewinnung konnte die Schüttdichte nur geringfügig von 400 auf 420 kg/m^3 gesteigert werden.

Tabelle 76: Schüttdichte und Wassergehalt der verschiedenen Bagassebrennstoffe

Probenbezeichnung	Schüttdichte in kg/m^3	Wassergehalt in %
Bagasse 2011	110	11,0
Bagasse 2012-1	250	6,8
Bagasse 2012-2	400	6,3
Bagasse 2012-3	420	6,6

Die geringen Wassergehalte der Bagassebrennstoffe, die Werte zwischen 6 und 11 % aufweisen, ergaben sich durch natürliche Trocknung der in offenen Behältern gelagerten Bagasse. Die einzelnen Chargen, die für die Verbrennungsversuche eingelagert wurden, hatten bei der Einlagerung unmittelbar nach der Pressung Wassergehalte von ca. 30 %.

11.3 Emissionen

Der für die Versuche eingesetzte Kessel ist laut Herstellerangaben für den Einsatz von Holzhackschnitzeln, Holzpellets, Miscanthus und Getreide als Brennstoff geeignet. Die Bagasse kann aufgrund ihrer Zusammensetzung und Struktur als Brennstoff der Ziffer 8 in § 3 der 1. BImSchV „Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe, nicht als Lebensmittel bestimmtes Getreide wie Getreidekörner und Getreidebruchkörner, Getreideganzpflanzen, Getreideausputz, Getreidespelzen und Getreidehalmreste sowie Pellets aus den vorgenannten Brennstoffen“ zugeordnet werden [47]. Die bei der Überwachung durch den Schornsteinfeger zulässigen Emissionen werden entsprechend § 5 der 1. BImSchV [47] auf 0,10 g/Nm^3 Staub und 1,0 g/Nm^3 Kohlenstoffmonoxid (CO) bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 13 % im Abgas begrenzt. Weitere Emissionsbegrenzungen bestehen hinsichtlich der regelmäßigen Überwachung nicht, jedoch müssen zusätzlich die Anforderungen der Anlage 4 Nr. 2 der 1. BImSchV bei der Typenprüfung erfüllt werden. Dort werden zusätzlich die Emissionen für Dioxine/Furane (0,1 ng/Nm^3) und Stickoxide (600 mg/Nm^3) begrenzt. Die Ergebnisse aus den Messungen mit der Bagasse werden im

Folgenden Ergebnissen aus Messungen mit verschiedenen Holz- und Nicht-Holz-Brennstoffen gegenübergestellt, die mit einem baugleichen Kessel unter vergleichbaren Bedingungen in früheren Versuchen am Prüfstand des TFZ ermittelt wurden.

Mit den Bagassebrennstoffen konnte der CO-Grenzwert von 1,0 g/Nm^3 bzw. 1.000 mg/Nm^3 lediglich in einem Versuch nicht unterschritten werden, während mit den Vergleichsbrennstoffen stets eine meist deutliche Unterschreitung des Grenzwertes möglich ist. Die CO-Emissionen bei der Bagasseverbrennung weisen mit Werten zwischen ca. 10 und über 1.100 mg/Nm^3 eine sehr große Spannweite auf. Insbesondere der Wert von 1.159 mg/Nm^3 beim Einsatz der Bagasse 2012-1 ist auf den instabilen Anlagenbetrieb zurückzuführen, der sich aufgrund von Problemen bei der Dosierung des Brennstoffes ergab (s.a. Kapitel 11.4). Sobald diese Probleme durch manuelle Eingriffe des Prüfstandspersonals oder aufgrund einer geeigneteren Struktur des Brennstoffes gemindert waren, lagen die CO-Emissionen auf einem vergleichbaren Niveau wie bei Holzhackschnitzeln oder Holzpellets. Insgesamt lassen die niedrigen CO-Emissionen darauf schließen, dass bei diesen ersten Versuchen bereits eine sehr gute Anlageneinstellung für den Betrieb mit Bagasse gefunden wurde. Die Ergebnisse der CO-Messungen sind in Abbildung 95 dargestellt.

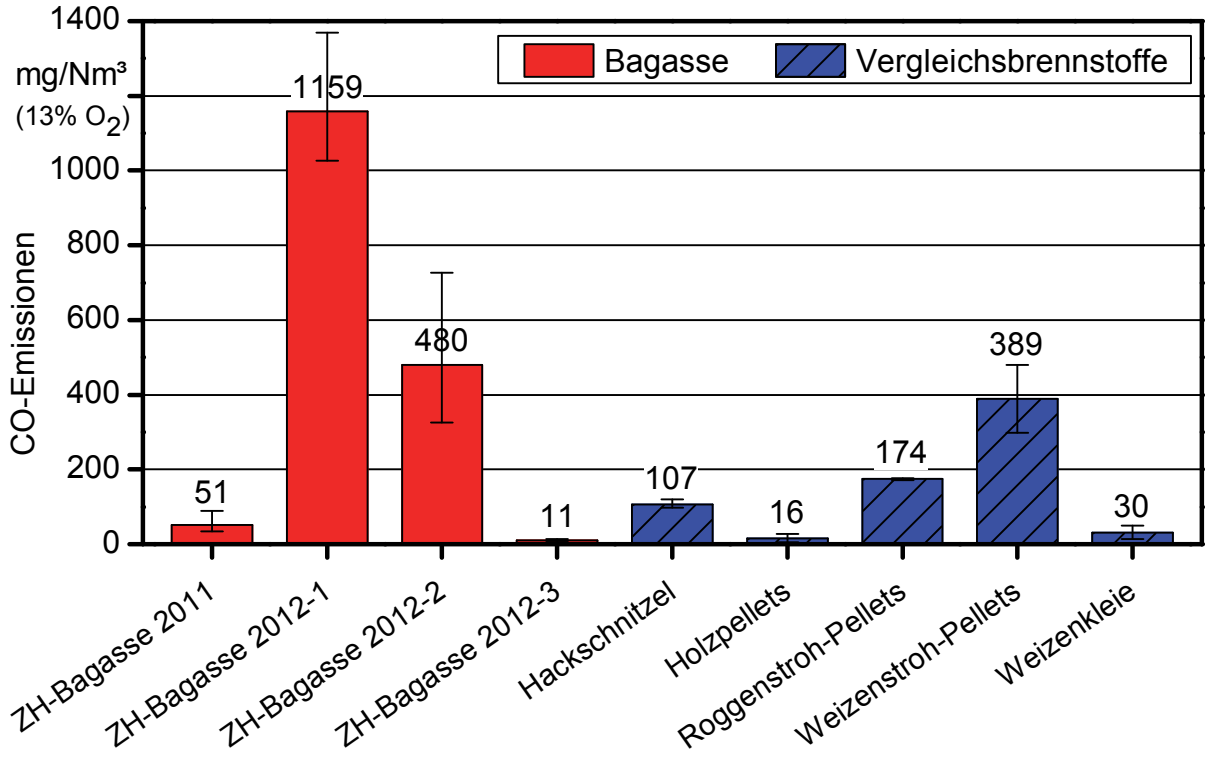


Abbildung 95: CO-Emissionen beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus mindestens 3 Wiederholungen mit Spannweite)

Die Emissionen an flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (Ges.-C) sind wie die CO-Emissionen ein Maß für die Qualität der Verbrennung. Hohe CO-Emissionen sind

daher meist auch mit hohen Ges.-C-Emissionen verbunden. Die höchsten Ges.C-Emissionen werden mit 34 mg/Nm^3 aufgrund des instabilen Anlagenbetriebs bei der Verbrennung der Bagasse 2012-1 gemessen. Beim Einsatz von der Bagasse 2011 und 2012-3 liegt der Messwert mit 3 bzw. 2 mg/Nm^3 nur knapp über der Nachweisgrenze des Messgerätes. Die Messungen mit den beiden Holzbrennstoffen ergaben Werte unterhalb der Nachweisgrenze von 2 mg/Nm^3. Eine Übersicht über die Emissionen an flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (Ges.-C) gibt Abbildung 96.

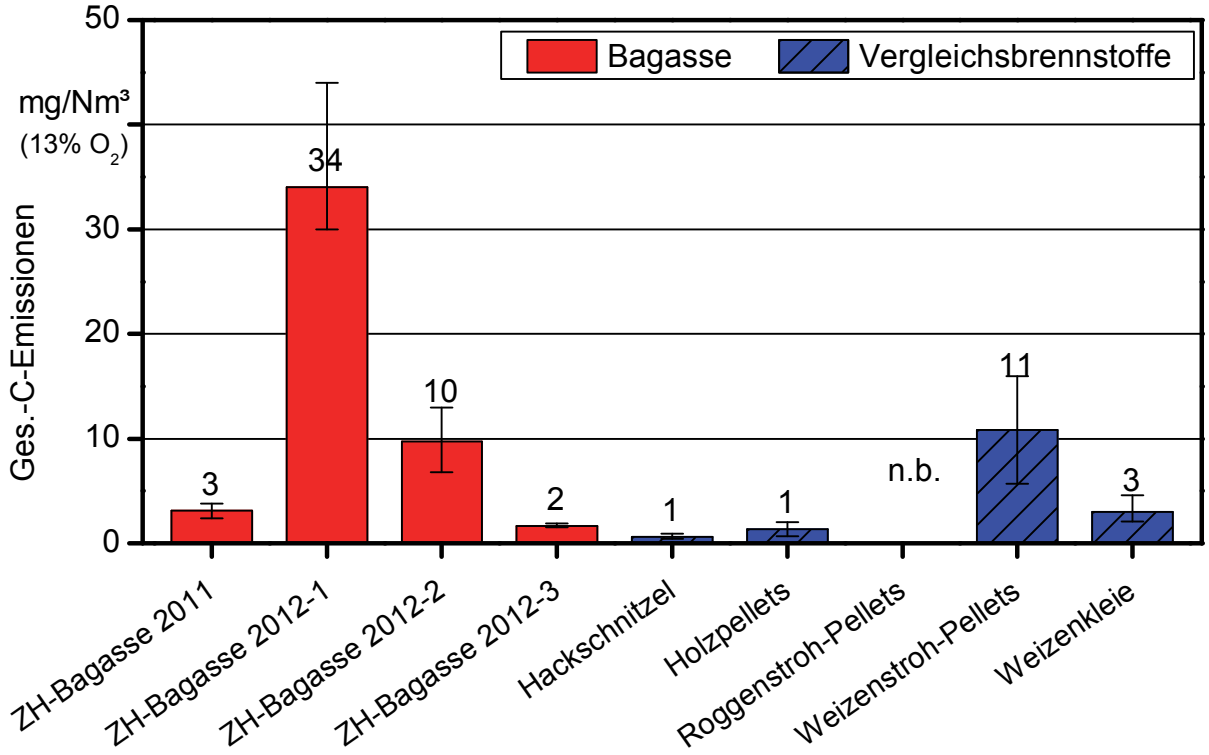


Abbildung 96: Emissionen an Gesamt-C beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite)

Die Stickoxidemissionen betragen beim Einsatz von Bagasse zwischen 450 und ca. 500 mg/Nm^3 und liegen damit deutlich über den Werten für Holz oder Strohbrennstoffe. Die Stickoxidemissionen der Vergleichsbrennstoffe zeigen eine deutliche Gruppierung: Holzbrennstoffe mit Werten zwischen 150 und 200 mg/Nm^3, Strohbrennstoffe mit Werten zwischen 250 und 350 mg/Nm^3 sowie die Kleie mit NOx-Emissionen über 600 mg/Nm^3. Damit ist ein direkter Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt des Brennstoffes und den zugehörigen Stickoxidemissionen zu erkennen, da höhere Stickstoffgehalte im Brennstoff (Kleie > Bagasse > Strohbrennstoffe > Holzbrennstoffe; siehe auch Tabelle 74) zu entsprechend höheren Stickoxidemissionen führen. Die Emissionen an Stickoxiden steigen jedoch nicht proportional zum Brennstoffstickstoffgehalt an, da nur ein geringer Anteil des Brennstoffstickstoffs als Stickoxid emittiert wird und die Stickoxidemissio-

nen auch von anderen Betriebsparametern (Brennraumtemperatur, Luftüberschuss etc.) beeinflusst werden.

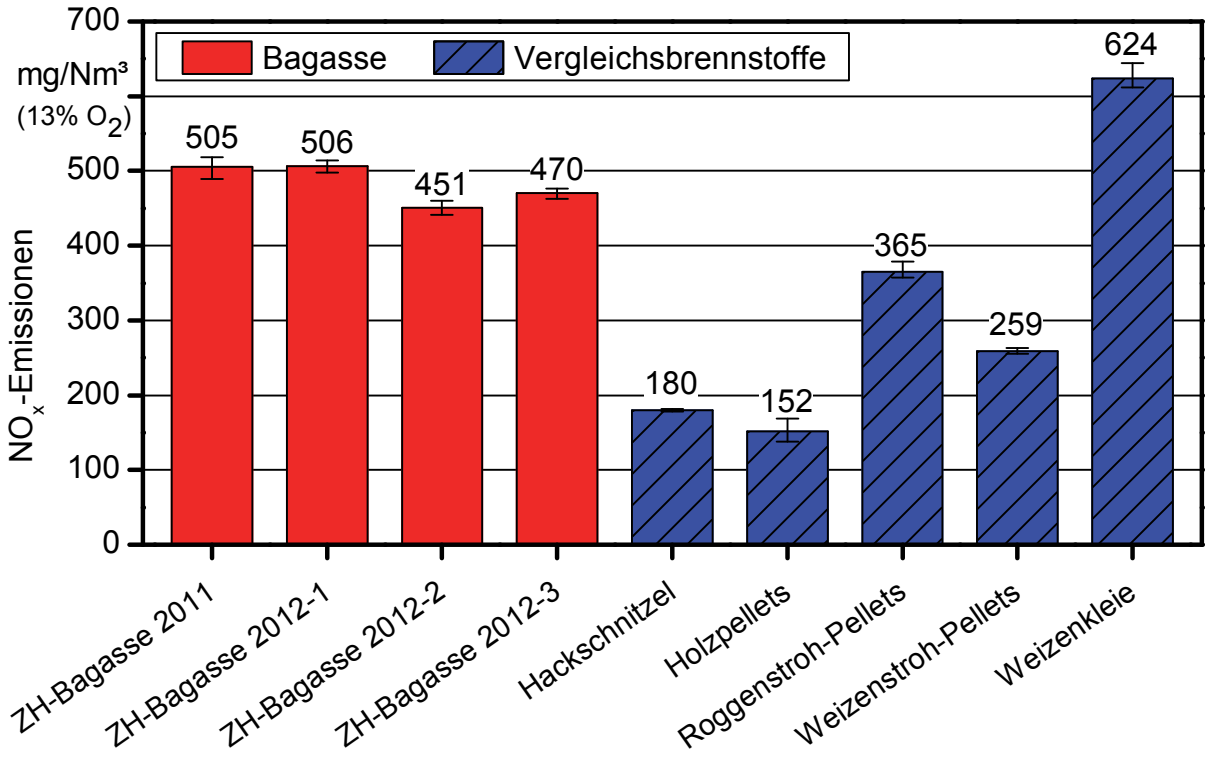


Abbildung 97: Emissionen an Stickoxiden beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite)

Die Emissionen an Schwefeldioxid liegen bei drei der vier Messungen mit Bagasse im Bereich zwischen 100 und 130 mg/Nm^3. Lediglich die Messung mit der Bagasse 2012-1 führt mit 176 mg/Nm^3 zu deutlich höheren Schwefeldioxidemissionen, die nicht durch einen höheren Schwefelgehalt im Brennstoff begründet werden können, da sich die Schwefelgehalte der Bagassebrennstoffe nicht wesentlich unterscheiden (Tabelle 75). Ggf. ist auch hier eine Begründung durch den instabilen Anlagenbetrieb bei diesen Versuchen gegeben, welcher vielleicht zu einer geringeren Einbindung von Schwefel in die Asche geführt haben kann. Die Schwefeldioxidemissionen der Vergleichsbrennstoffe haben eine deutlich höhere Spannweite, die durch die unterschiedlichen Schwefelgehalte der Brennstoffe begründet ist, da die Schwefeloxidemissionen im Wesentlichen durch diesen bestimmt werden. Eine Übersicht über die SO_2-Emissionen gibt Abbildung 98.

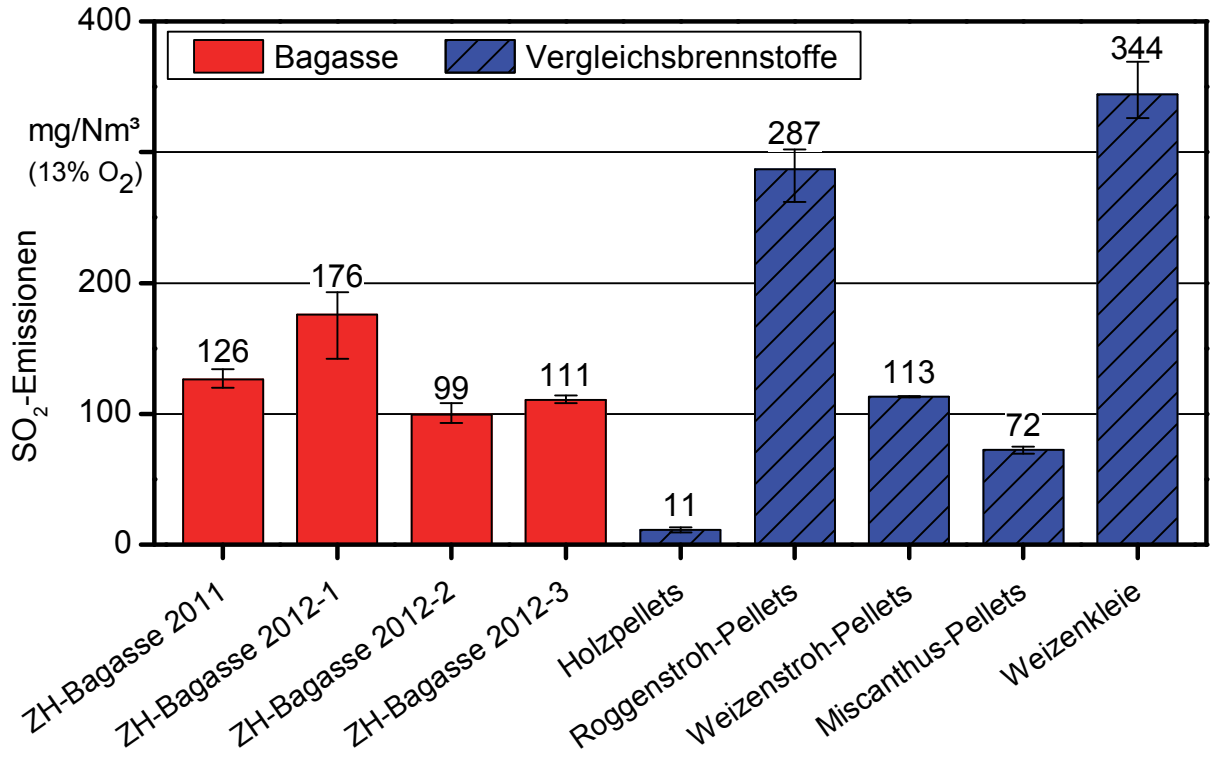


Abbildung 98: Emissionen an Schwefeldioxid beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite)

Der Grenzwert für die Staubemissionen konnte nicht mit allen Brennstoffen eingehalten werden. Insbesondere bei den Versuchen mit solchen Vergleichsbrennstoffen, die für die Powerchip-20/30-Anlage von Guntamatic nicht ausdrücklich freigegeben worden waren (Strohpellets und Weizenkleie), lagen die Staubemissionswerte über dem Grenzwert von 100 mg/Nm^3. Bei Messungen mit zugelassenen Getreidebrennstoffen (z. B. Gerste) konnte der Grenzwert jedoch erreicht bzw. unterschritten werden [122].

Bei den Messungen mit den vier untersuchten Bagassebrennstoffen liegen die Werte in drei von vier Fällen (25 und 51 mg/Nm^3) in der Größenordnung von Holzhackschnitzeln (34 mg/Nm^3). Noch niedrigere Emissionen werden lediglich mit Holzpellets gemessen (11 mg/Nm^3). Bei dem Versuch mit der Bagasse 2012-1 wirken sich die instabilen Betriebsbedingungen auch auf die Staubemissionen aus, welche mit 175 mg/Nm^3 deutlich höher sind als bei den anderen Messungen mit Bagassebrennstoffen. Dieser Versuch zeigt, dass eine optimale Anlageneinstellung und eine Brennstoffaufbereitung, die eine gleichmäßige und störungsfreie Dosierung ermöglicht, die Voraussetzung für einen emissionsarmen Betrieb sind.

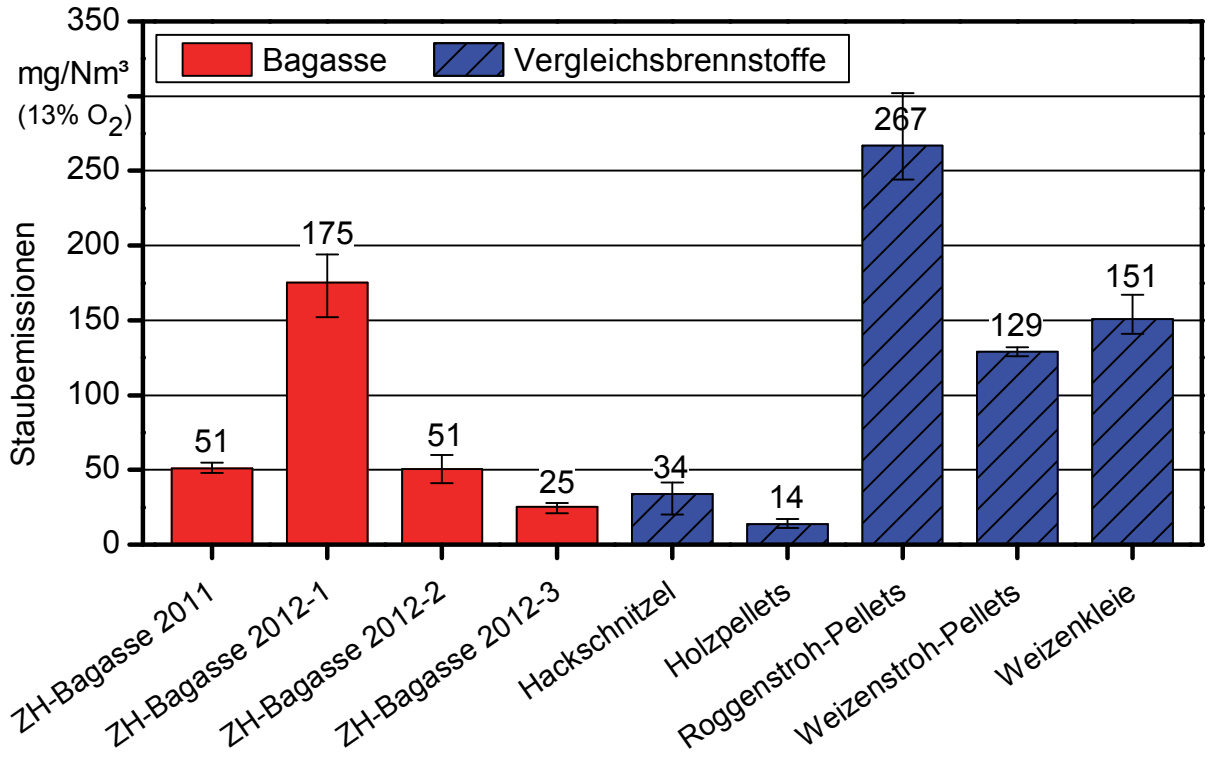


Abbildung 99: Staubemissionen beim Einsatz verschiedener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30 (Mittelwerte aus 3 Wiederholungen mit Spannweite)

Neben Kalium und Chlor zählen auch Natrium, Schwefel sowie die Schwermetalle Blei und Zink zu den aerosolbildenden Elementen im Brennstoff [42]. Bei einem hohen Gehalt eines oder mehrerer dieser Elemente im Brennstoff kann somit generell von einem gestiegenen Risiko erhöhter Partikelemissionen ausgegangen werden. Dieser Zusammenhang ist auch für die hier verwendete Feuerung nachgewiesen. Durch Vielzahl verschiedener Brennstoffe und Mischungen, die im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben an dieser Feuerung eingesetzt wurden, ergibt sich eine große Bandbreite von Brennstoffeigenschaften, die unter diesem Gesichtspunkt ausgewertet werden kann.

Eine entsprechende Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Gesamtstaubemission und der Summe der aerosolbildenden Brennstoffbestandteile zeigt Abbildung 100. Da der Gehalt an Schwermetallen nicht bei allen Brennstoffproben bestimmt wurde, konnten Zink und Blei nicht berücksichtigt werden. Allerdings ist deren Gehalt bei naturbelassenen Brennstoffen in der Regel so gering (vgl. [121]), dass die hier dargestellte Summe der für die Staubbildung relevanten Elemente nicht deutlich verändert werden kann. In welchem Maß die einzelnen Elemente selbst stärker oder schwächer zur Staubbildung beitragen, kann hier aber nicht festgestellt werden. Für eine solche Gewichtung der Inhaltstoffe wäre eine größere Anzahl von Messwerten erforderlich gewesen. Allerdings zeigt das mit R^2=0,67 (Abbildung 100) angegebene Bestimmtheitsmaß, dass die gemessenen Unterschiede beim Staubausstoß überwiegend durch das Vorhandensein der hier berücksichtigten Elemente erklärt werden können. Die Messungen mit den Bagassebrennstoffen fügen sich dabei recht gut in das Gesamtbild ein, wobei lediglich die

Staubemissionen bei Einsatz der Bagasse 2012-3 (25 mg/Nm^3) mit einer größeren Abweichung auffallen und damit einen Hinweis auf offensichtlich besonders günstige Betriebsbedingungen geben.

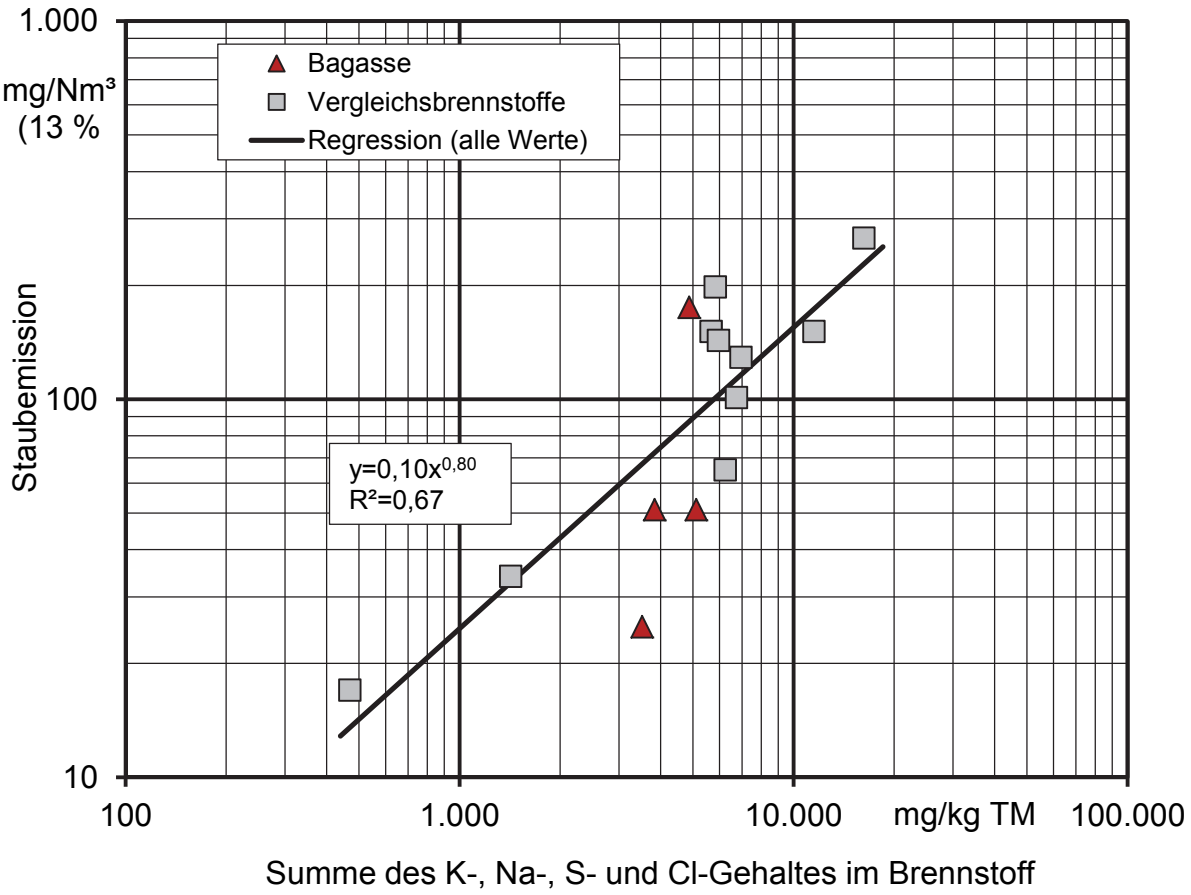


Abbildung 100: Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Aerosolbildnern (K, Na, S und Cl) sowie den Staubemissionen bei Einsatz verschiedener anderer biogener Brennstoffe in einer Feuerung vom Typ Guntamatic Powerchip 20/30

In Tabelle 77 sind wesentliche Betriebsdaten des Kessels während der Versuche mit den verschiedenen Bagassebrennstoffen zusammengefasst. Entgegen den Empfehlungen des Herstellers wurde der Kessel auch bei der Verwendung von Bagasse teilweise mit einer Leistung von ca. 30 kW betrieben, sofern dies bei störungsfreiem Betrieb möglich war.

Tabelle 77: Betriebsbedingungen der Feuerung bei Betrieb mit verschiedenen Brennstoffen

Parameter	Einheit	Messung mit Bagassebrennstoff			
		2011	2012-1	2012-2	2012-3
Sauerstoffgehalt	Vol-%	10,6	13,2	13,3	9,1
Luftüberschusszahl	-	1,9	2,3	2,4	1,6
Wärmeleistung	kW	29	22	23	34
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	%	92,7	97,3	89,0	91,2

Die nur geringfügigen Unterschiede im Wirkungsgrad beim Betrieb mit den einzelnen Bagassebrennstoffen erlauben keine eindeutige Differenzierung, zumal der niedrigste Wert (87,3 %) beim Betrieb mit der Bagasse 2012-1 bestimmt wurde und damit aufgrund der Probleme bei der Brennstoffdosierung nur von geringer Aussagekraft ist. Die Wirkungsgrade der Messungen mit den weiteren Bagassebrennstoffen liegen in der Größenordnung der Werte, die auch mit anderen biogenen Brennstoffen an dieser Anlage gemessen wurden [122].

11.4 Betriebserfahrungen

Im ersten Versuchsjahr konnte nach einer Phase der Optimierung ein stabiler Anlagenbetrieb über mehrere Stunden realisiert werden, der die Durchführung der erforderlichen Messungen ermöglichte. Die Brennstoffzuführung über 2 Schneckenförderer (Durchmesser 120 bzw. 100 mm) funktionierte nicht immer störungsfrei, da es im Bereich des Schneckeneinlaufs wiederholt zur Brückenbildung und damit zu Unterbrechungen in der kontinuierlichen Brennstoffzuführung kam. Der Brennstoff fällt aufgrund seiner geringen Dichte nur schlecht aus dem Dosierbehälter in die darunterliegende Schnecke, so dass diese Schnecke nur teilweise befüllt und damit die Förderleistung der Schnecke gemindert wird. Diese Störungen wurden jeweils umgehend vom Prüfstandspersonal beseitigt, so dass sie nicht zu einer Beeinträchtigung der Messungen führten. Für den Dauerbetrieb sind jedoch technische Anpassungen (größere Durchmesser der Schnecken, aktive Befüllung der Schnecke) oder eine Aufbereitung des Brennstoffes (Pelletierung, Brikettierung) erforderlich.

Im zweiten Versuchsjahr waren die zuvor beschriebenen Probleme wieder zu beobachten, obwohl die eingesetzte Bagasse deutlich höhere Schüttdichten aufwies (s. Tabelle 76). Offensichtlich bewirkte die höhere Schüttdichte des Materials der ersten Versuche (Bagasse 2012-1) noch keine signifikante Verbesserung des Dosierverhaltens. Erst mit den Brennstoffen des zweiten und dritten Versuchs (Bagasse 2012-2 und 2012-3), welche eine nochmals deutlich höhere Schüttdichte aufwiesen, wurden wieder bessere Er-

gebnisse erzielt, wobei auch bei diesen Versuchen eine ständige Beaufsichtigung der Brennstoffdosierung erforderlich war, um ggf. auftretende Unterbrechungen der Brennstoffzuführung sofort beseitigen zu können. In Abbildung 101 werden zwei Beispiele für die Probleme bei der Dosierung von Bagassebrennstoffen gezeigt.

Abbildung 101: Dosierung von Bagasse: Brückenbildung bei der Befüllung der Dosierschnecke (links) und unvollständige Befüllung der Dosierschnecke (rechts)

Im ersten Versuchsjahr traten bei der Verbrennung von Bagasse keinerlei Probleme hinsichtlich Schlackebildung oder Anbackungen von Asche am Rost bzw. den Feuerraumwänden auf. Die aus der Verbrennung resultierende Asche war feinkörnig und konnte mit den vorhandenen Fördersystemen problemlos ausgetragen werden.

Im zweiten Jahr konnten diese Ergebnisse jedoch nicht bestätigt werden. Hier waren nach den Versuchen erste Anzeichen von Anbackungen an den Feuerraumwänden zu beobachten. Auch bildete sich eine locker aggregierte Schlacke, die aber durch die Rostbewegung und den Austrag in der Ascheschnecke zerkleinert werden konnte und während der Dauer der Versuche keine Funktionsstörungen an der Anlage verursachte. In Abbildung 102 ist die beobachtete Schlackebildung wiedergegeben. Eine abschließende Beurteilung der Bagasse hinsichtlich der Schlackebildung ist bei dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich, da hierzu Versuche über längere Zeiträume und mit verschiedenen Bagassen (Herkunft, Zusammensetzung) erforderlich wären. Aber die ersten Erfahrungen hinsichtlich der Verbrennungseigenschaften sind insgesamt positiv zu bewerten.

Abbildung 102: Asche- bzw. Schlacke im Feuerraum nach der Verbrennung von Bagasse: Erste Anbackungen an den Feuerraumwänden (links) und Schlacke am Übergang vom Rost in die Entaschungsschnecke (rechts)

11.5 Fazit

Die Brennstoffuntersuchungen zeigen, dass Bagasse aus der mechanischen Saftgewinnung von Zuckerhirse ein Brennstoff ist, der aufgrund seiner chemischen Eigenschaften bei der Verbrennung deutlich weniger Probleme erwarten lässt als andere Reststoffe aus der Landwirtschaft wie beispielsweise Stroh. Ein nachteiliger Einfluss der Konservierung auf verbrennungsrelevante Merkmale der Bagasse konnte nicht festgestellt werden. Da der Aschegehalt der Bagasse mit ca. 4 % deutlich über dem von Holzbrennstoffen liegt, müssen Kesselanlagen eingesetzt werden, die für den Einsatz landwirtschaftlicher Brennstoffe mit hohen Aschegehalten aber auch niedrigen Ascheschmelztemperaturen geeignet sind.

Infolge der mechanischen Belastung des Pflanzenmaterials während der Saftgewinnung werden nachteilige schüttgutmechanische Eigenschaften des Brennstoffes ausgebildet (d. h. geringe Fließfähigkeit, geringe Schüttdichte). Die Verbrennungsversuche an der für landwirtschaftliche Brennstoffe ausgelegten Kesselanlage zeigen, dass eine Erhöhung der Schüttdichte der Bagasse zu einer deutlichen Verbesserung der Betriebssicherheit sowie zu einer Minderung der Schadstoffemissionen führen kann. Die Steigerung der Schüttdichte kann direkt bei der Pressung durch entsprechende Presseneinstellungen oder durch eine nachträgliche Aufbereitung (z. B. Pelletierung) erreicht werden.

Die Emissionen an Kohlenmonoxid und Gesamtstaub, die bei der Verbrennung der Bagasse bestimmt wurden, liegen teilweise etwas höher als beim Einsatz von Holzbrennstoffen, sie sind aber deutlich niedriger als beim Einsatz von Stroh. Lediglich die gegenüber Holz deutlich erhöhten Stickstoffgehalte führen zu entsprechend höheren Stickstoffoxidemissionen. Damit ist die Bagasse grundsätzlich als geeigneter Brennstoff einzuordnen, sofern die schüttgutmechanischen Probleme gelöst werden. Diese Probleme wurden während des Betriebs der Feuerung im Bereich der Brennstoffzuführung sichtbar,

indem es zu Störungen in Form von Brückenbildung und Verstopfungen kam. Für einen sicheren Dauerbetrieb ist daher eine angepasste Brennstoff-Zuführtechnik oder eine Aufbereitung zu Pellets oder Briketts erforderlich. Während der Versuche ließ sich ein stabiler Anlagenbetrieb nur durch kontinuierliche manuelle Eingriffe aufrechterhalten. Weitere Störungen waren nicht zu beobachten, insbesondere kam es zu keinerlei Störungen aufgrund von Schlackebildung oder zu festen Anbackungen von Asche an Rost oder Feuerraumwänden.

12 Ökonomische Einordnung der Bioethanolerzeugung aus Zuckerhirse in dezentralen Kleinanlagen

Die in Deutschland vorhandenen landwirtschaftlichen Brennereien haben ein großes Potenzial, um mit den bestehenden Anlagenkapazitäten Ethanol zu produzieren (siehe hierzu auch Kapitel 3.8.3). Durch den Wegfall des Branntweinmonopols für landwirtschaftliche Verschlussbrennereien zum 30. September 2013 werden Alternativlösungen gesucht, um Möglichkeiten für eine weitere Nutzung der Brennereien auf dem freien Markt zu ermöglichen. Zuckerhirse könnte hier aus ökonomischer Sicht eine interessante Rohstoffpflanze darstellen, mit der in analoger Weise zu Zuckerrohr in Brasilien die Ethanol-Herstellungskosten im Vergleich zu stärkehaltigen Rohstoffen gesenkt werden könnten.

Im Folgenden wird auf Basis der im Rahmen des Projektes gewonnenen Daten eine ökonomische Einordung der Erzeugung von Bioethanol aus Zuckerhirse in dezentralen Kleinanlagen durchgeführt. Als Berechnungsgrundlage wird die Größe einer durchschnittlichen landwirtschaftlichen Brennerei mit einer Produktionskapazität von 2.000 m³ Ethanol pro Jahr [297] (entspricht 1.580 t pro Jahr) angenommen. Ausgehend vom Rohstoffbedarf für eine solche Anlage werden die vorgelagerten Produktionsschritte dimensioniert. Als Rohstoff soll hierbei ausschließlich konservierte Zuckerhirse dienen, ein Mischbetrieb mit unterschiedlichen Rohstoffen ist nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Um den Aufwand für die Modifikation und den Investitionsaufwand der landwirtschaftlichen Brennereien möglichst gering zu halten, wird eine Option untersucht, bei der der Heizkessel zur Prozesswärmebereitstellung erneuert wird, wobei die Peripherieeinheiten des Dampfsystems gleich bleiben.

12.1 Beschreibung des Modellszenarios

Bei einer angenommenen Ethanolausbeute von 0,46 g Ethanol pro g Zucker (siehe hierzu auch Kapitel 10.3.3) bei der Fermentation müssen der Modellanlage insgesamt 3.435 t Zucker pro Jahr zugeführt werden. Die dazu benötigte Menge an Zuckerhirse hängt sehr stark von der Sorte, sowie den Anbau-, Vegetations- und Erntebedingungen ab. Für die Bilanzierung wurden die im Rahmen des Projektes ermittelten Werte der Sorte ‘Top 76‘ herangezogen, da für diese Sorte die meisten Erfahrungen und Daten zu Konservierung, Lagerung, Pressung und Fermentation der gewonnenen Pressäfte vorliegen. Mit dieser Sorte wurden Trockenmassegehalte von 22,9 % und Zuckergehalte von 38,3 % i.d. TM im Feldversuch erreicht (siehe Tabelle 27, Seite 104).

Unter Einbezug von Zuckerverlusten bei der Lagerung und Konservierung von 5 % und einer Zuckerextraktionsrate bei der Pressung von 90 %, werden jährlich insgesamt 45.689 t FM Zuckerhirse benötigt. Um diese Menge bereitzustellen, müsste auf insgesamt 744 ha Zuckerhirse angebaut werden (bei einem im Sortenscreening für ‘Top 76‘ ermittelten Trockenmasseertrag von 16,5 t/ha abzüglich 15 % Praxisabschlag). Das re-

sultierende jährliche Flächenertragspotenzial hinsichtlich des Zuckerertrags liegt bei etwa 5,4 t/ha Zucker und für Ethanol unter Berücksichtigung der genannten Zuckerverluste bei ca. 2,7 m³/ha. Der Wert liegt damit im oberen Bereich im Vergleich zu Getreide (Roggen, Triticale, Weizen), für welches Ethanolerträge von 2,0 bis 2,8 m³/ha in der Literatur beschrieben sind [102]. Für Zuckerrüben ist das jährlich zu erwartende Flächenertragspotenzial von 5,0 bis 5,8 m³/ha Ethanol [142] aufgrund des größeren Zuckerertrags pro Hektar deutlich höher als im betrachteten Szenario.

Zur Konservierung der 45.689 t FM Zuckerhirse werden bei einer Zugabe von 0,75 Masse-% jährlich etwa 343 t Ameisensäure benötigt. Während der Lagerung im Silo fallen bei einem durchschnittlichen Sickerwasseranteil in Höhe von 20 % (vgl. Tabelle 43, Seite 167) pro Jahr 7.825 t zuckerhaltiges Sickerwasser an, welches nach einer pH-Wert-Anhebung direkt dem Fermentationsprozess zugeführt werden kann. Dadurch reduziert sich das in der Pressanlage zu verarbeitende konservierte Zuckerhirsematerial auf etwa 36.825 t. Bei der Pressung fallen 27.037 t Zuckerhirsepresssaft und 8.365 t Bagasse an. Bei angenommenen Wasserdampfverlusten von etwa 5 % (siehe Kapitel 9.3) entweichen dabei ca. 1.423 t Wasserdampf pro Jahr.

Vor der Fermentation erfolgt eine Anhebung des pH-Wertes des Eingangsmaterials auf einen pH-Wert von 6. Im Rahmen der Modellbetrachtung wird hierzu Calciumdihydroxid ($Ca(OH)_2$) verwendet. Bei einer Zugabe von 7,5 g $Ca(OH)_2$ pro Liter Eingangsmaterial werden pro Jahr 256 t benötigt. Nach dem Prozessschritt der thermischen Aufbereitung werden 1.927 t Ethanol mit einem Reinheitsgrad von 82 Masse-% produziert, als Nebenprodukte fallen 1.512 t CO_2 und 32.693 t Schlempe an. Das gewonnene Ethanol wird durch Lohnabsolutierung weiter aufkonzentriert.

Das bei der Pressung anfallende Produkt Bagasse soll als Brennstoff verwendet werden, um für den Prozessschritt der Fermentation und thermischen Aufbereitung Prozesswärme bereitzustellen. Zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften soll die Bagasse im Lohn pelletiert und auf einen Feuchtegehalt von 8 Masse-% eingestellt werden, dadurch kann voraussichtlich ein sicherer Betrieb einer geeigneten Feuerungsanlage gewährleistet werden. Aus den 8.365 t Bagasse werden 6.365 t Bagassepellets hergestellt. Hiervon werden 982 t für die Bereitstellung der Prozesswärme benötigt, der Rest kann als Brennstoff oder anderweitig vermarktet werden. Prinzipiell wäre die Bagassemenge auch zum Betrieb einer Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage geeignet, dies soll jedoch im Rahmen dieser ökonomischen Einordnung vernachlässigt werden.

Abbildung 103 zeigt ein vereinfachtes Prozessschema mit den relevanten Massenströmen, um einen Überblick über das zugrunde gelegte Modellszenario zu geben.

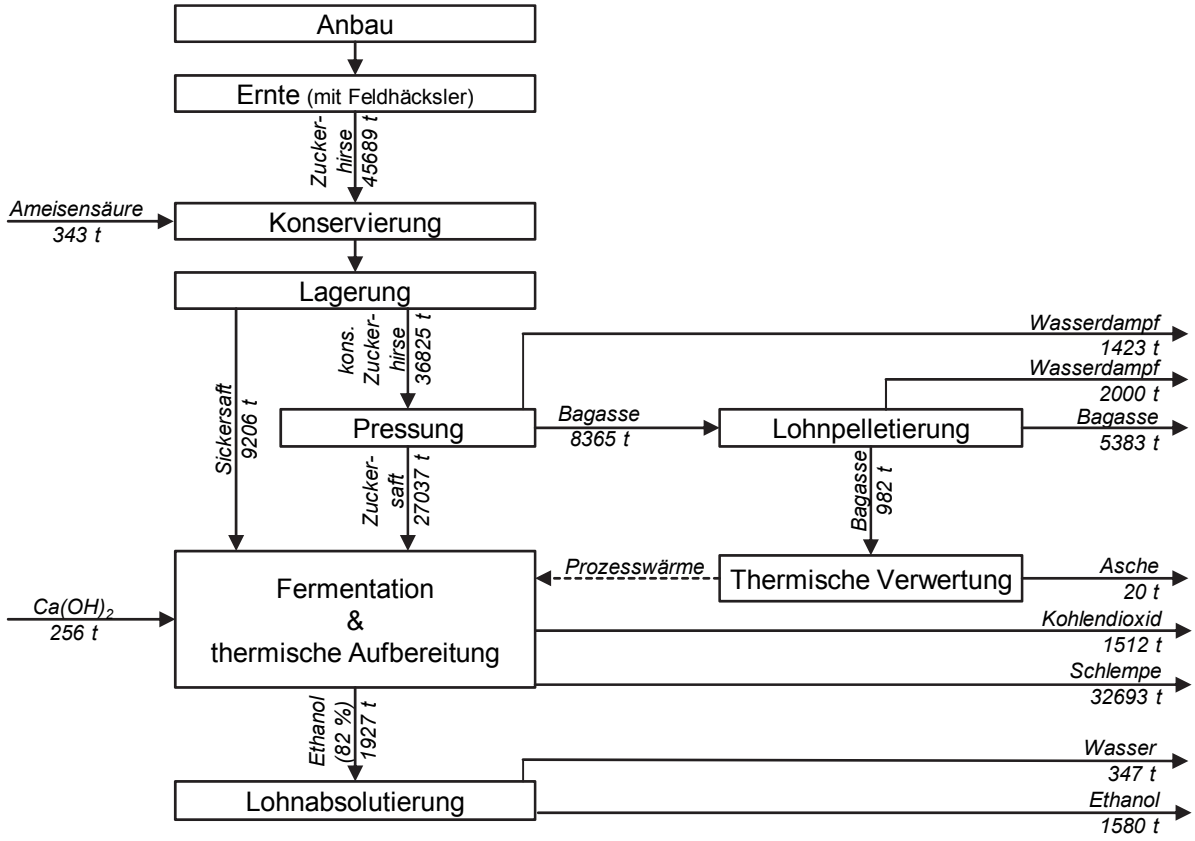


Abbildung 103: Verwendetes Prozessschema und relevante Massenströme des Modellszenarios zur ökonomischen Einordnung der Bioethanolerzeugung aus Zuckerhirse in dezentralen Kleinanlagen

12.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Ausgehend vom beschriebenen Modellszenario wird im Folgenden eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, gegliedert nach den einzelnen Prozessschritten durchgeführt.

Anbau

Die Kosten für die Substratbereitstellung wurden in Anlehnung an die für Silomais zu veranschlagenden Produktionskosten berechnet [21], da das Anbauverfahren für Zuckerhirse dem für Silomais im Wesentlichen gleicht. Unterschiede im Düngebedarf und den Pflanzenschutzaufwendungen wurden berücksichtigt. Die Produktionskosten je Hektar für die Bereitstellung des Pflanzenmaterials ab Feld betragen 1.257 €/ha. Bei dem im Modellszenario veranschlagten TM-Ertrag von 14,1 t/ha (incl. Praxisabschlag) fallen ca. 89 €/t TM an. Im Vergleich zum Ethanolrübenanbau mit 1.993 €/ha und ca. 111 €/t TM (bei FM Ertrag von 77,9 t/ha [21]) ist der Zuckerhirseanbau somit günstiger. Allerdings ist der Zuckergehalt der Zuckerrübe wesentlich höher und der Anbau kostet bezogen auf die produzierte Zuckermenge deshalb deutlich weniger. Ein Anbau von Zuckerhirse wäre somit vermutlich auf für die Zuckerrübe ungünstige Standorte limitiert. Eine Übersicht zu den Produktionskosten von Zuckerhirse unter bayerischen Bedingungen gibt Tabelle 78.

Tabelle 78: Produktionskosten von Zuckerhirse (in Anlehnung an Silomaisproduktionskosten [21])

Kostenposition	spezifische Kosten in €/ha
Variable Direktkosten	
Saatgut (Analog Preis für Futterhirse)	112
Düngung	357
Pflanzenschutz	40
Hagelversicherung	24
Variable Maschinenkosten	
Grundbodenbearbeitung	57
Saatbettbereitung	33
Einzelkornsaat	19
Pflanzenschutz	5
Düngerstreuen	9
Festkosten	
Flächenkosten	220
Personalkosten	135
Sonstige Festkosten	97
Kalkulatorische Faktorkosten	149
Gesamtsumme	**1.257**

Annahmen: Zuckerhirse ab Feld; Eigenmechanisierung; Flächengröße 2 ha; Entfernung 5 km; Zinsansatz 2 % des Umlaufvermögens 475 €/ha; Pachtansatz für eigene Fläche 140 €, 60 % Pachtfläche; 6 AKh/ha; 15 €/AKh; Dieselpreis: 1,428 €/l brutto, Agrardieselrückvergütung 0,2148 €/l berücksichtigt

Bezogen auf das Modellszenario mit einer benötigten Anbaufläche von 744 ha zur Produktion von 2.000 m³ Ethanol, ergeben sich für den Prozessschritt des Anbaus spezifische Kosten von 0,468 € pro Liter Ethanol.

Ernte, Konservierung und Lagerung

Die Ernte der Zuckerhirse erfolgt im betrachteten Modell mittels eines Selbstfahrer-Feldhäckslers, hierfür entstehen Kosten in Höhe von 130 €/ha [179]. Für den Transport des Häckselgutes vom Feld zum Lager ergeben sich in Anlehnung an Berechnungen nach DÖRING et al. (2010) [89] (aktualisiert nach [179]) für eine durchschnittliche Entfernung zwischen Feld und Lager von 6 km Kosten in Höhe von ca. 300 €/ha. Die Konservierung des Häckselgutes erfolgt mit 0,75 Masse-% Ameisensäure, wofür unter den getroffenen Annahmen bei einem Netto-Bezugspreis von 0,78 €/kg Ameisensäure (85 %) Kosten von 359 €/ha zu veranschlagen sind.

Zur Lagerung des säurekonservierten Häckselgutes werden Fahrsiloanlagen mit einem Fassungsvermögen von jeweils 11.000 m³ verwendet. Der anfallende Sickersaft wird in Behältern mit jeweils 5.000 m³ Volumen (hergestellt analog Güllelagerbehälter aus Beton, Oberflächenbeschaffenheit für pH-Wert von Sickersaft angepasst, erweitert um Doppelmembranspeicher) gelagert.

Lagerbefüllung und Verdichtung, Abdeckung mit Folien und die Entnahme aus dem Silostock erfolgen analog dem Vorgehen bei Silomais. Die jeweils zu veranschlagenden Kosten wurden entsprechend Maschinenring Verrechnungssätzen [179] ermittelt.

Tabelle 79: Ernte-, Konservierungs- und Lagerkosten von Zuckerhirse

Kostenposition	spezifische Kosten in €/ha
Ernte mit Selbstfahrer-Feldhäcksler	130
Transport (Einzugsradius: 6 km)	300
Konservierung mit Ameisensäure	359
Lagerkosten Häckselgut	75
Lagerkosten Sickersaft	61
Lagerbefüllung und Verdichtung	40
Abdeckung mit Folien	16
Entnahme aus Silostock	127
Gesamtsumme	**1.108**

Für das betrachtete Modellszenario ergeben sich somit spezifische Kosten für den Bereich von Ernte, Konservierung und Lagerung in Höhe von 0,412 € pro Liter Ethanol.

Zuckersaftgewinnung

Für den neu zu erstellenden Anlagenteil der Zuckersaftgewinnung wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung in Anlehnung an dezentrale Ölgewinnungsanlagen nach REMMELE (2009) [219] durchgeführt. Der Anlagenteil soll ganzjährig betrieben werden und lediglich zu Wartungs- und Reparaturzwecken stillgelegt werden. Es wird eine jährliche Anlagenverfügbarkeit von 8.000 h angenommen. Um die nach dem Modellszenario anfallende konservierte Zuckerhirsemenge verarbeiten zu können, muss die Anlage eine Verarbeitungskapazität von 4,60 t/h aufweisen. Die Anlage soll mit Seiherstabschneckenpressen ausgestattet werden, die hierzu notwendigen Investitionskosten belaufen sich auf etwa 770.000 €. Nach GRAF und REINHOLD (2005) [115] beträgt der Anteil der Presse an den Investitionskosten einer dezentralen Ölmühle (ohne Gebäude und peripherietechnische Anlagen) etwa 34 %, eigene Umfragen bei Ölmühlen aus dem Jahre 2008 ergaben einen Anteil der Presse an den Investitionskosten der Anlage (mit Umbau eines vorhandenen Gebäudes und peripherietechnischen Anlagen) von 26 %. Im Rahmen dieser Modellrechnung wird von einem Anteil der Kosten der Presse von 30 % ausgegangen, so das

sich für den Anlagenteil der Zuckersaftgewinnung Investitionskosten von etwa 2.570.000 € ergeben. In Abhängigkeit von den vorliegenden Bedingungen der Brennerei, an welche dieser Anlagenanteil angegliedert wird, können sich auch deutlich unterschiedliche Investitionskosten ergeben.

Zur Abschätzung des elektrischen Energiebedarfs des Anlagenteils wird ein Leistungsbedarf von 45 kW pro t/h Verarbeitungskapazität angenommen, so dass die elektrische Leistungsaufnahme der Anlage insgesamt 210 kW beträgt. Bei einem Strompreis von 0,20 €/kWh (Ökostrom) fallen etwa 336.000 € Stromkosten jährlich an.

Für den Betrieb der Anlage werden pro t/h Verarbeitungskapazität 4 AKh (Arbeitskraftstunden) angesetzt, so dass bei einem Stundenlohn von 15 €/AKh jährlich ca. 91.910 € Lohnkosten auflaufen.

In der Wirtschaftlichkeitsabschätzung werden zudem Betriebsmittel, Unterhalts- und Versicherungskosten angesetzt. Tabelle 80 gibt einen Überblick zur Modellrechnung für den Anlagenteil der Zuckersaftgewinnung. Insgesamt fallen für diesen Anlagenteil jährliche Kosten in Höhe von 918.560 € an, umgelegt auf die produzierte Ethanolmenge des Gesamtprozesses belaufen sich die spezifischen Kosten der Zuckersaftgewinnung auf 0,459 € pro Liter Ethanol.

Tabelle 80: Modellrechnung für den Anlagenteil der Zuckersaftgewinnung (in Anlehnung an REMMELE (2009) [219]

Modellparameter Zuckersaftgewinnung	Einheit	Wert
Auslastung und Leistungskennzahlen		
Kampagnedauer	h/a	8.000
Anlagenverfügbarkeit	h/d	24
Produktionstage	d/a	333
Benötigte Verarbeitungskapazität	t/h	4,60
Leistungsbedarf (45 kW pro t/h Verarbeitungskapazität)	kW_{el}/h	210
Arbeitszeitbedarf (4 h pro t/h Verarbeitungskapazität)	AKh/d	18,4
Investitions- und Betriebskosten		
Anschaffungskosten Presse[1)]	€	770.000
Anschaffungskosten Gesamtanlage (incl. Presse)	€	2.570.000
Strompreis (Ökostrom)	€/kWh	0,20
Stundenlohn	€/AKh	15,00
Betriebsmittel (1 €/h pro t/h Verarbeitungskapazität)	€/h	4,60
Jährliche Kosten		
Abschreibung für Anschaffung (7 % Anschaffungskosten)	€/a	179.900
Zins(an)satz (6 % der halben Anschaffungskosten)	€/a	77.100
Unterhalt (2 % der Anschaffungskosten)	€/a	51.400
Versicherung (0,5 % der Anschaffungskosten)	€/a	12.850
Stromkosten	€/a	336.000
Betriebsmittel	€/a	169.400
Lohnkosten	€/a	91.910
Summe der jährlichen Kosten	**€/a**	**918.560**

1) für Seiherstabschneckenpresse nach REMMELE (2009) [219] bei 3 % jährlichem Preisanstieg

Fermentation, thermische Aufbereitung und Absolutierung

Zu den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Bioethanolerzeugung in dezentralen Kleinanlagen gibt es bereits sehr detaillierte Untersuchungen [269] [296] [295]. Diese Veröffentlichungen betrachteten neben Betriebs- auch Investitionskosten zum Bau einer Anlage. Als Grundlage für eine Kostenkalkulation werden die Betriebskosten aus der Studie von WETTER und BRÜGGING (2004) [296] herangezogen, die Anlage weist mit einer Ethanolproduktionskapazität von 2.160 m³/a in etwa die Größe der im Modellszenario betrachteten Anlage auf. Da im Szenario angenommen wird, dass die Brennerei bereits besteht und die Investition abgeschrieben ist, werden keine weiteren Abschreibungskosten veranschlagt. Weiterhin fallen keine Brennstoffkosten an, da die Wärmebereitstellung

durch die thermische Nutzung der anfallenden Bagasse erfolgen soll, welche im separaten Prozessschritt der thermischen Verwertung der Bagasse ökonomisch betrachtet wird. Zusätzlich werden beim Modellszenario 256 t Calciumdihydroxid benötigt, um den pH-Wert des Zuckerhirsepress- und -sickersaftes anzuheben.

Eine Aufstellung der im Rahmen dieser ökonomischen Abschätzung einbezogenen Kosten der landwirtschaftlichen Brennerei in Anlehnung an WETTER und BRÜGGING (2004) [296] gibt Tabelle 81. Da die Modellanlage dieser Studie eine ca. 8 % geringere Produktionskapazität als die Anlage aus der Studie von WETTER und BRÜGGING (2004) [296] aufweist, wird im Rahmen der vereinfachten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung davon ausgegangen, dass der Größenunterschied in etwa die Inflation ausgleicht. Lediglich bei den Stromkosten wurde eine Anpassung auf den Strompreis von 0,20 €/kWh vorgenommen. Zur Berechnung der Jahreskosten in Abhängigkeit von den Investitionskosten wurden zudem die nicht für die Konversion von Zuckerhirsepress- und -sickersaft in Ethanol benötigten Prozessschritte (z. B. Maischlinie und Rohstoffaufbereitung) aus der Kalkulation entfernt.

Insgesamt ergeben sich für den Betrieb der Teilbereiche der Brennerei Jahreskosten in Höhe von 340.732 €. Bezogen auf die produzierte Ethanolmenge von 2.000 m³ ergeben sich spezifische Verarbeitungskosten von 0,170 € pro Liter Ethanol für diesen Prozessschritt.

Tabelle 81: Jahreskosten einer dezentralen Brennerei mit einer Verarbeitungskapazität von 2.000 m³ pro Jahr (ohne Heizöl- und Abschreibungskosten) in Anlehnung an WETTER und BRÜGGING (2004) [296] und angepasst an das Modellszenario

Modellparameter Brennerei	Einheit	Wert
Bauliche Investitionen		
Gebäude und Außenanlagen (ohne Erschließung)	€	332.300
Ethanollager	€	102.300
Sonstige Tanks	€	10.200
Technische Investitionen		
Destillation	€	204.500
Gäranlage	€	153.400
Hefestation	€	15.300
Wasserversorgung	€	25.600
Sonstige technische Investitionen	€	51.100
Jährliche Kosten		
Abschreibung für Anschaffung[1)]	€/a	0
Versicherung (1 % der baulichen Investition)	€/a	4.448
Sonstiges (9,5 % der baulichen Investitionen)	€/a	42.256
Instandhaltungskosten (5 % der technischen Investition)	€/a	22.495
Stromkosten[2)] (100 kWh / m³ Ethanol)	€/a	40.000
Calciumdihydroxid (60 €/t[3)])	€/a	15.533
Personalkosten (1,2 Arbeitskräfte)	€/a	54.000
Absolutierungskosten (0,075 €/l)	€/a	150.000
Summe der jährlichen Kosten	**€/a**	**328.732**

[1)] im Modellszenario wird eine bestehende Anlage angenommen die bereits abgeschrieben ist
[2)] bei Stromkosten von 0,20 €/kWh
[3)] Preisauskunft Walhalla Kalk GmbH & Co. KG, Regensburg, 08.12.2011

Thermische Verwertung der Bagasse

Zur Konversion von Zuckersaft in Ethanol werden 6,1 MJ pro Liter Ethanol (abgeleitet nach WETTER und BRÜGGING (2004) [296]) benötigt. Diese Prozesswärme soll im Modellszenario durch die Verbrennung von Bagasse in einer neu zu errichtenden Feuerungsanlage bereitgestellt werden. Für die Modellanlage werden insgesamt 12.200 GJ Prozesswärme benötigt. Unter Berücksichtigung eines internen Bedarfs für die Dampferzeugung von 10 % und einem Nutzungsgrad der Feuerungsanlage von 85 % beträgt die erforderliche Brennstoffwärme 15.788 GJ bzw. 4.386 MWh. Bei einer Auslastung von 8000 h im Jahr wird eine Feuerungsanlage mit einer Feuerungsleistung von etwa

550 kW benötigt. Die Investitionskosten für einen Heizkessel mit Regelung, Brennstoffzuführung und Ascheaustrag (ohne Baukosten) belaufen sich auf 302.500 €. Ein Reservekessel wird hierbei nicht berücksichtigt, da hierzu noch der in der Brennerei vorhandene Heizölkessel dienen kann.

Um einen reibungslosen Betrieb der Anlage zu gewährleisten wird die anfallende Bagasse durch Pelletierung im Lohn aufbereitet. Die Pelletierungskosten werden mit 55 €/t Bagassepellets angesetzt [200]. Bei einem Heizwert von 16,08 MJ/kg (Wassergehalt 8 %) werden für die Bereitstellung der Prozesswärme insgesamt 982 t Bagassepellets benötigt. Eine Übersicht zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Anlagenteils der thermischen Bagasseverwertung gibt Tabelle 82. Die jährlichen Kosten für die Wärmebereitstellung (incl. Bagasseaufbereitung) belaufen sich auf 121.913 € und somit betragen die spezifischen Kosten für diesen Anlagenteil 0,061 €/l.

Tabelle 82: Modellrechnung des Anlagenteils der thermischen Verwertung von Bagasse zur Prozesswärmebereitstellung

Modellparameter thermische Bagasseverwertung	Einheit	Wert
Leistungskennzahlen		
Feuerungsleistung	kW	550
Betriebsdauer	h/a	8.000
Brennstoffverbrauch (Bagassepellets)	t/a	982
Investitions- und Betriebskosten		
Anlagentechnik (550 €/kW installierte Leistung)	€	302.500
Brennstoffaufbereitung (Pelletierung) im Lohn	€/t	55
Strompreis (Ökostrom)	€/kWh	0,20
Stundenlohn	€/AKh	15,00
Entsorgungskosten Asche	€/t	100
Jährliche Kosten		
Abschreibung für Anschaffung[1)]	€/a	24.866
Instandsetzung (2,5 % nach VDI 2067)	€/a	7.563
Personalkosten (für Bedienung; 650 h/a)	€/a	9.750
Reinigung und Wartung (2,5 % nach VDI 2067)	€/a	7.563
Emissionsüberwachung, Kaminkehrer	€/a	500
Brennstoffaufbereitungskosten	€/a	53.022
Stromkosten (2 % der Nutzwärme; 0,20 €/kWh)	€/a	14.911
Entsorgungskosten Asche	€/a	2.749
Summe der jährlichen Kosten	**€/a**	**120.924**

1) Zinsansatz 4,5 % bei 18 Jahren Nutzungsdauer

Erlöse und Kosten von Nebenprodukten

Als Nebenprodukte fallen beim betrachteten Modellszenario vor allem Schlempe und Bagasse an. Die Menge an Schlempe kann zu etwa 32.693 t abgeschätzt werden. Die Schlempe soll im vorliegenden Szenario als Düngemittel auf Ackerflächen ausgebracht werden. Die Kosten für Transport und Ausbringung frei Feld durch einen Lohnunternehmer werden mit 6 bis 8 €/t bei einer Ausbringmenge von 30 t/ha angesetzt. Der Nährstoffwert der Schlempe wird mit 7,20 €/t veranschlagt, wie in Tabelle 83 dargestellt. Vereinfachend wird im Rahmen der Kalkulation angenommen, dass sich die Ausbringkosten mit dem Nährstoffwert der Schlempe kompensieren und somit keine Kosten oder Erlöse durch die Schlempe anfallen. Da die genaue Zusammensetzung der Schlempe unbekannt ist und sich somit auch geringere oder höhere Nährstoffwerte ergeben können, kann die Schlempe aufgrund der großen anfallenden Menge die Wirtschaftlichkeit stark beeinflussen.

Tabelle 83: Ableitung des Nährstoffwertes von Zuckerhirseschlempe

	Einheit	N	P	K	S	Quelle
Nährstoffgehalt	kg/t	0,80	1,99	1,95	1,36	[300]
Nährstoffpreis	€/kg	1,20	1,56	0,84	1,11	[21]
Nährstoffwert	€/t	0,96	3,10	1,64	1,50	

Bei der Pressung entstehen insgesamt 8.679 t Bagasse, ein Teil hiervon wird zur Prozesswärmebereitstellung bereits im Prozess verwendet. Im Modellszenario wird die gesamte produzierte Menge Bagasse pelletiert. Insgesamt ergibt sich eine Menge von 5.383 t Bagassepellets, die zur Vermarktung herangezogen werden kann. Für die Bagassepellets werden zwei Absatzmöglichkeiten betrachtet. Zum einen als Brennstoff für geeignete Feuerungsanlagen (Tabelle 84) und in einer zweiten Variante zur Nutzung als Einstreu im Bereich der Pferdehaltung (Tabelle 85).

Je nach Vermarktungsvariante lassen sich somit die spezifischen Kosten für die Produktion von Ethanol um 0,124 bzw. 0,544 € pro Liter Ethanol reduzieren.

Tabelle 84: Kalkulation der Erlöse durch Vermarktung der überschüssigen Bagasse als Brennstoff

Modellparameter Bagassenutzung als Brennstoff	Einheit	Wert
Wert des Vergleichsprodukts (Hackschnitzel)	€/t	120[2)]
Wert der Bagassepellets[1)]	€/t	114
Aufbereitungskosten (Trocknung, Pelletierung)	€/t	54
Kosten für Lagerung und Transport	€/t	14
Erlös für die Bagasse	€/t	46
Summe des jährlichen Erlöses	**€/a**	**247.618**

[1)] Aufgrund des Heizwertunterschiedes von 5 % gegenüber Hackschnitzel
[2)] abgeleitet aus dem Hackschnitzelpreisindex von C.A.R.M.E.N. e.V. (Stand Juli 2012)

Tabelle 85: Kalkulation der Erlöse durch Vermarktung der überschüssigen Bagasse als Einstreu für Pferdehalter

Modellparameter Bagassenutzung als Einstreu	Einheit	Wert
Wert des Vergleichsprodukts (Strohpellets)	€/t	280[1)]
Wert der Bagassepellets	€/t	280
Aufbereitungskosten (Trocknung, Pelletierung)	€/t	54
Abfüllkosten in BigBag	€/t	10
Kosten für Lagerung und Transport	€/t	14
Erlös für die Bagasse	€/t	202
Summe des jährlichen Erlöses	**€/a**	**1.087.366**

[1)] abgeleitet aus einer Preisrecherche im Internet bei sechs verschiedenen Anbietern (Stand Juli 2012)

Spezifische Produktionskosten von Ethanol im Modellszenario

Insgesamt ergeben sich für das betrachtete Modellszenario spezifische Produktionskosten für die Herstellung von Ethanol in einer bestehenden landwirtschaftlichen Brennerei bei Verwendung von Zuckerhirse in Höhe von 1,02 bis 1,44 € pro Liter Ethanol, je nach Vermarktungsweg der überschüssigen Bagassepellets. Tabelle 86 und Tabelle 87 geben einen Überblick zur Zusammensetzung der Gesamtkosten und Erlöse.

Tabelle 86: Spezifische Herstellungskosten von Ethanol im Modellszenario bei Nutzung der überschüssigen Bagasse als Brennstoff

Parameter	Einheit	spezifische Kosten
Zuckerhirseanbau	€/l	0,468
Ernte-, Konservierungs- und Lagerkosten	€/l	0,412
Zuckersaftgewinnung	€/l	0,459
Fermentation, thermische Aufbereitung, Absolutierung	€/l	0,164
Thermische Verwertung Bagasse (Prozesswärme)	€/l	0,060
Bagasseerlös - Brennstoff	€/l	-0,124
Spezifische Produktionskosten gesamt	**€/l**	**1,439**

Tabelle 87: Spezifische Herstellungskosten von Ethanol im Modellszenario bei Nutzung der überschüssigen Bagasse als Einstreu

Parameter	Einheit	spezifische Kosten
Zuckerhirseanbau	€/l	0,468
Ernte,Konservierungs- und Lagerkosten	€/l	0,412
Zuckersaftgewinnung	€/l	0,459
Fermentation, thermische Aufbereitung, Absolutierung	€/l	0,164
Thermische Verwertung Bagasse (Prozesswärme)	€/l	0,060
Bagasseerlös - Einstreu	€/l	-0,544
Spezifische Produktionskosten gesamt	**€/l**	**1,019**

Unabhängig vom betrachteten Vermarktungsweg für die überschüssige Bagasse, liegen die Produktionskosten für eine landwirtschaftliche Brennerei mit Weizen als Rohstoff niedriger. Nach der Kalkulation von WETTER und BRÜGGING (2004) [296] ergeben sich für eine Anlage mit aktualisierten Rohstoffkosten und an die Rahmenbedingungen des Modellszenarios angepassten Eingangsgrößen (abgeschriebene Anlage, Strompreis von 0,20 €/kWh, Weizenpreis von 200 €/t, Heizölpreis von 0,85 €/l) Herstellungskosten in Höhe von ca. 0,88 €/l. Die Marktpreise von Ethanol bewegten sich im Jahr 2011 in Europa im Bereich von etwa 0,60 bis 0,65 €/l (fob Rotterdam) [303].

Für das Modellszenario lässt sich dem Bereich der Rohstoffbereitstellung (Anbau, Ernte, Konservierungs- und Lagerkosten) mit 56 % der Großteil der Kosten zuordnen. Auch bei der Ethanolproduktion aus Weizen entstehen knapp die Hälfte der Kosten im Bereich der Rohstoffbereitstellung [296]. Die Konservierungs- und Lagerungskosten für das Zuckerhirsehäckselgut machen 16,1 % der Kosten aus und fallen beispielsweise bei der Produktion von Ethanol aus Zuckerrohr kaum an, da die Ernte- und Kampagnendauer über einen langen Zeitraum erfolgen kann.

Dem speziell in diesem Modellszenario benötigten Anlagenteil der Zuckersaftgewinnung lassen sich 29 % der Kosten zuordnen. Die Fermentation, thermische Aufbereitung, Absolutierung und thermische Bagasseverwertung machen einen vergleichsweise geringen Anteil von 15 % der Gesamtkosten aus, wie aus Abbildung 104 zu erkennen ist.

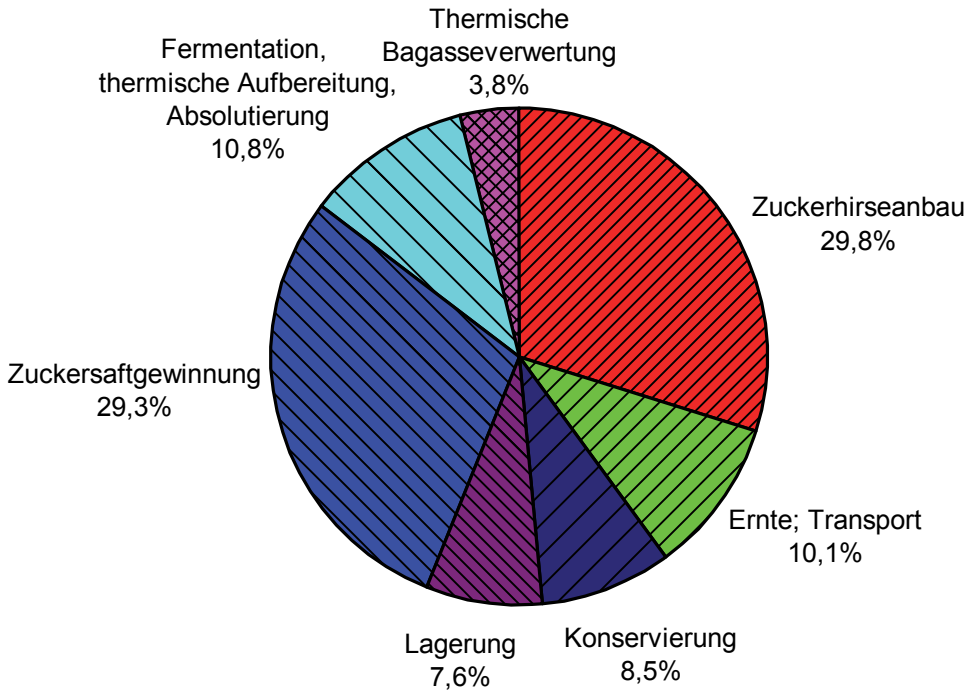


Abbildung 104: Zusammensetzung der Herstellungskosten (ohne Erlöse) für Ethanol aus Zuckerhirse nach dem Modellszenario

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit müssten in allen Bereichen, besonders aber im Bereich der Rohstoffbereitstellung und der Zuckersaftgewinnung Einsparungen erfolgen. Ließen sich im Bereich des Zuckerhirseanbaus Ertragssteigerungen im TM-Gehalt auf 200 dt/ha bei gleichbleibendem Zuckeranteil erzielen, so würden sich die spezifischen Produktionskosten um etwa 0,15 € pro Liter Ethanol verringern. Dies allein reicht jedoch für eine konkurrenzfähige Produktion im Modellszenario nicht aus. Einen großen Unsicherheitsfaktor im Modellszenario stellt vor allem der Kostenbereich der Zuckersaftgewinnung dar, da hier zum einen technische Fragestellungen noch gelöst werden müssen und daher auch periphere Anlagenbauteile hinsichtlich Ihrer Kosten schwer eingeschätzt werden können. Ließen sich im Bereich der Zuckersaftgewinnung die Anschaffungs-, Energie- und Betriebsmittelkosten um 30 % reduzieren, so könnten bei einer Vermarktung der Überschussbagasse als Einstreu spezifische Produktionskosten von 0,76 € pro Liter Ethanol realisiert werden, die jedoch immer noch deutlich über dem Marktpreis liegen, allerdings etwas geringer als bei der Produktion von Ethanol aus Weizen in landwirtschaftlichen Brennereien sind. Einen weiteren Unsicherheitsfaktor bei der Modellkalkulation stellt die Schlempe dar. Wäre hier, je nach Zusammensetzung, eine Vermark-

tung als Düngemittel möglich, könnten hierfür ebenfalls Erlöse zur Reduktion der spezifischen Produktionskosten erzielt werden.

12.3 Fazit

Letztlich kann festgestellt werden, dass unter derzeitigen Gegebenheiten und mit den vorhandenen Zuckerhirsesorten unter süddeutschen Bedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit keine wirtschaftlich konkurrenzfähige Produktion von Ethanol aus Zuckerhirse möglich ist. Durch Ertragssteigerungen im Bereich des Zuckerhirseanbaus, Einsparungen im Bereich der Anlagentechnik und hochpreisige Vermarktung der Nebenprodukte lassen sich Kostenreduktionen erzielen, die gegebenenfalls unter günstigen Voraussetzungen mittel- bis langfristig eine wirtschaftliche Produktion ermöglichen könnten. Hierzu sind jedoch weitere Forschungsaktivitäten notwendig.

13 Fazit und Ausblick

Anbaubedingungen und Ertragspotential

Die Untersuchungen des TFZ Straubing zum Anbau von Zuckerhirse zeigen, dass diese Kultur unter bayerischen Klimabedingungen ein hohes Ertragspotential hat. Allerdings kann ihr Anbau aufgrund noch ungelöster Probleme wie eine hohe Lageranfälligkeit, niedrige TM-Gehalte zur Ernte oder die mangelnde Verfügbarkeit von kommerziellem Saatgut derzeit noch nicht empfohlen werden.

In Feldversuchen erreichten die besten Sorten am Standort Straubing Erträge bis 200 dt/ha. Der maximale theoretisch mögliche Zuckerertrag, ohne Berücksichtigung von Press- oder Lagerverlusten sowie Praxisabschlägen, wurde mit über 76 dt/ha ermittelt. Die Ertragsstabilität der Sorten über mehrere Jahre kann nicht beurteilt werden, da diese Ergebnisse z. T. nur auf einjährigen Feldversuchen beruhen.

Als wichtiger Produktionsfaktor für maximale Erträge stellte sich die Wasserversorgung heraus. Hirse gilt zwar als trockentolerant, zur Absicherung hoher Erträge sind dennoch warme Standorte mit ausreichender Wasserversorgung vorteilhaft.

Durch eine Stickstoff- und Kalidüngung kann die Biomasseproduktion moderat gesteigert werden. Im Versuch wurde jedoch das gute Nährstoffaneignungsvermögen dieser Kultur deutlich, da auf guten Böden auch bei niedriger Düngestufe nur geringe Ertragsabnahmen im Vergleich zur intensiven Düngung zu verzeichnen waren. Der Zuckergehalt wird durch die Düngung nicht signifikant beeinflusst. Folglich können Empfehlungen aus dem Futterhirseanbau von ca. 150 kg N/ha als Sollwert für die Gesamt-N-Versorgung übernommen werden.

Die Ernte von Zuckerhirse ist möglichst zwischen Blüte und Milchreife der Pflanzen durchzuführen, da in diesem Stadium die höchsten Zuckergehalte zu erwarten sind. In der Regel wird dieses Stadium erst sehr spät erreicht. Eine Ernte sollte deshalb erst ab (Mitte) Oktober erfolgen. Ebenso sind die Trockenmassegehalte (TM-Gehalt) zum optimalen Reifestadium meist nicht ausreichend und verursachen Probleme und hohe Kosten bei Ernte, Lagerung und Transport.

Die Züchtung von an bayerische Klimabedingungen angepassten Sorten könnte einige dieser Probleme lösen. Im Bereich der Futterhirse, die in Deutschland und Bayern bereits für die Biogasnutzung angebaut wird, sind züchterische Fortschritte in Bezug auf den TM-Gehalt zur Ernte zu erkennen. Somit sollte eine züchterische Verbesserung auch bei Zuckerhirse möglich sein. Eine Vorverlegung des Saattermins auf Mitte Mai könnte sich, sofern keine Frostgefahr gegeben ist oder sobald kühletolerante Sorten verfügbar sind, ebenfalls positiv auf den TM-Gehalt und damit auf die zu transportierende Wassermenge bei Ernte und den gesamten Verarbeitungsprozess auswirken. Dies sollte allerdings in weiteren Untersuchungen abgeklärt werden. Züchterisch angepasste Sorten müssten ausreichende TM-Gehalte von möglichst 28 % bis zum Stadium der Milchreife erreichen, da es mit Einsetzen der Stärkeeinlagerung (ab Beginn Teigreife) zu einer Abnahme des Zuckergehaltes kommen kann. Ob diese Ansprüche umsetzbar sind bleibt

ungewiss, da verbesserte TM-Gehalte oftmals physiologisch mit einer schnelleren Entwicklung der Pflanze und damit auch mit einer früheren, unerwünschten Stärkeeinlagerung einhergehen. Hinsichtlich der Lagerneigung werden bei Futterhirsen bereits jetzt deutliche Sortenunterschiede und auch ein züchterischer Erfolg sichtbar. Kurzstielige aber relative standfeste Zuckerhirsesorten wie z. B. ‘Top 76‘ könnten von Vorteil sein, etwas geringere Erträge müssten dann in Kauf genommen werden.

Als äußerst problematisch hat sich die Saatgutbeschaffung im Laufe des Projektes herausgestellt. Kommerzielle „echte“ (hochzuckerhaltige) Zuckerhirsen sind in Deutschland nicht verfügbar. Eine Beschaffung aus dem Ausland, wie sie für die vorliegenden Untersuchungen getätigt wurde, wird sich in der Praxis sicherlich nicht durchsetzen und ohne eine intensive Nachfrage werden die Züchter für den deutschen Markt keine angepassten Sorten bereitstellen.

Weiterhin ist zu bedenken, dass die durchaus beachtlichen Trockenmasse- und Zuckererträge dennoch deutlich unter den bayerischen Zuckererträgen der Zuckerrübe (110 bis 130 dt Zucker/ha) liegen. Das Produktionsverfahren für Zuckerhirse ist zwar kostengünstiger, aber durch die im Vergleich zur Zuckerrübe niedrigeren Zuckergehalte sind die Kosten je Tonne Zucker deutlich höher.

Als positiv zu bewerten ist die Tatsache, dass sämtliche Produktionstechnik von Bodenbearbeitung, Saat bis zur Pflege aus dem Maisanbau, der in ganz Deutschland verbreitet ist, übernommen werden kann. Somit sind für den Landwirt keine Neuanschaffungen zu tätigen bzw. er ist mit dem Anbauverfahren z. T. bereits weitgehend vertraut. Aus technischer Sicht steht dem Zuckerhirseanbau nichts entgegen. Als vorteilhaft ist auch die Möglichkeit der Integration von Zuckerhirse in ein Zweikultur-Nutzungssystem zu nennen. Eine Saat Mitte Mai würde an Standorten mit ausreichender Wasserversorgung noch den Anbau einer früh reifenden Energiepflanze wie z. B. Grünroggen (zur Futter- oder Biogasnutzung) erlauben und die Flächeneffizienz erhöhen.

Ernte und Transport

Mit einem herkömmlichen reihenunabhängigen selbstfahrenden Feldhäcksler (Arbeitsbreite 7,50 m) konnte Zuckerhirse im Rahmen des Projektes in 2010 und 2011 an drei verschiedenen Standorten problemlos geerntet werden. Bei geringen Trockenmassegehalten (< 20 %) sollte mit hoher Motordrehzahl in den Bestand eingefahren werden, um einer Verstopfung der Häckslertrommel vorzubeugen.

Zuckerhirsehäckselgut kann mit üblichen landwirtschaftlichen Transportgespannen problemlos befördert werden. Beim Vorliegen geringer Trockenmassegehalte (< 20 %) wäre die Anbringung einer Dichtlippe im Entladebereich der verwendeten Muldenkipper bzw. Abschiebewagen zur Vermeidung von Sickersaftverlusten während des Transports sinnvoll. Entsprechend der bislang gewonnenen Erfahrungen kann die gesamte existierende Silomais-Logistikkette für Zuckerhirsehäckselgut genutzt werden.

Lagerung und Konservierung

Im Rahmen des Projekts wurden in den Versuchsjahren 2009, 2010 und 2011 Versuche zur Lagerung von Zuckerhirse in unterschiedlichen Aufbereitungsformen durchgeführt. Ausschließlich die Konservierung von Zuckerhirsehäckselgut mit Ameisensäure unter anaeroben Bedingungen ermöglicht eine werterhaltende mittel- bis langfristige Lagerung von Zuckerhirse bei tolerierbaren Verlusten.

Prinzipiell kann die zur Zuckerkonservierung nötige Ameisensäurelösung während des Erntevorgangs im selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. unmittelbar bei der Befüllung der Siloanlage dem Zuckerhirsehäckselgut zugegeben werden. Mittels Zudosierung im Feldhäcksler ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Konservierungsmittels Ameisensäure im Erntegut einfacher umzusetzen als bei der Lagerbefüllung. Aufgrund der korrosiven Wirkung von Ameisensäure sollte die Säurezugabe allerdings erst im Bereich des Auswurfrohres erfolgen, um einen säurebedingten erhöhten Verschleiß der vorab im Feldhäcksler mit der Biomasse berührten Bauteile zu vermeiden. Durch die Messung des vorliegenden Materialflusses im Auswurfbereich des Feldhäckslers kann die erforderliche Menge an Ameisensäurelösung kontinuierlich über gewöhnliche (z. T. bereits vorhandene) Zudosiereinrichtungen direkt durch Besprühen vom Rand des Auswurfrohres in den Häckselgutstrom appliziert werden. Im Sinne einer angestrebten, möglichst gleichmäßigen Verteilung der Ameisensäurelösung im Zuckerhirsehäckselgut erscheint dies für die Praxis vorteilhafter.

Die Säurezugabe am Standort der Siloanlage erfordert Maschinen bzw. Anlagen für eine Einmischung ins Häckselgut und steht dem in der Praxis bekannten sehr zügigen Abkippen bzw. Abschieben der Biomasse in das Fahrsilo entgegen.

Aufgrund der korrosiven Wirkung von Ameisensäure sind Beschichtungen an den Kontaktflächen der eingesetzten Maschinen und Geräte erforderlich. Am SF-Feldhäcksler sollte die Ausführung des Endstücks am Auswurfrohr in Kunststoff bzw. mit einer Kunststoffbeschichtung (PE) genügen. Die für den Transport des mit Ameisensäurelösung behandelten Häckselguts eingesetzten Fahrzeuge benötigen an den Kontaktflächen, d. h. im Bereich von Ladefläche und Seitenwänden eine beständige (Kunststoff-) Beschichtung zum Korrosionsschutz. Neben den Bereichen Ernte und Transport ist hierbei auch die eingesetzte Einlagerungs- und Umschlagtechnik betroffen. Fahrzeuge und Anbaugeräte, die zur Verdichtung sowie zur späteren Materialentnahme verwendet werden müssen ebenfalls vor der stark korrosiven Wirkung geschützt werden. Zu diesem Zweck sind Untersuchungen hinsichtlich Schutzwirkung und mechanischer Beständigkeit geeignet erscheinender Materialien erforderlich. Neben der Beschichtung von Metallteilen mit Kunststoff könnte auch das Aufbringen eines Sprühfilms als Korrosionsschutz dienen.

Angesichts der Informationen zur Beschaffenheit des konservierten Zuckerhirsehäckselguts aus den Lagerversuchen (optische Beschaffenheit des Häckselgutes, pH-Wert des anfallenden Sickersaftes), ist davon auszugehen, dass für die Lagerung von mit Ameisensäure konservierter Zuckerhirse dieselben baulichen Anforderungen an die Lagerstätten zu stellen sind wie bei Maissilage.

Eine Besonderheit stellt bei der Lagerung von Zuckerhirse allerdings der anfallende Sickersaft dar. Mit dem Ziel einer Verfahrensoptimierung besteht die Notwendigkeit zur Erfassung des zuckerhaltigen Sickersaftes bzw. Verlustvermeidung durch geschlossene Fahrsiloanlagen.

Aufgrund des sauren Charakters des anfallenden Sickersafts erscheint die Verwendung von beschichteten Betonbehältern (Schutzanstrich) bzw. korrosionsbeständigen PE-Behältern empfehlenswert. Für Rohrleitungen sind die Materialanforderungen analog zu betrachten. Der üblicherweise bituminöse Schutzanstrich auf Bodenplatte und Seitenwänden muss regelmäßig auf Beschädigungen überprüft und im Bedarfsfall nach vorangegangener Reinigung erneuert werden.

Zuckersaftgewinnung

Die Gewinnung des Saftes aus der Zuckerhirse konnte durch einen einmaligen Abpressvorgang mit einer Seiherstab-Schneckenpresse mit einer Abtrenneffizienz von über 90 % und einer Zuckerextraktionsrate von über 90 % erfolgen. Dies gilt sowohl für das direkt nach der Ernte verarbeitete Frischmaterial, als auch für mit Ameisensäure konserviertes Zuckerhirsematerial. Eine Abtrennung von Blättern und Rispen vor der Zerkleinerung und Saftgewinnung erhöht zwar die Zuckerkonzentration im Presssaft von etwa 110 auf 150 g Zucker pro Liter, die Zuckerextraktion wird insgesamt jedoch nicht beeinflusst. Zudem sind Zuckerverluste zu erwarten. Durch die vorherige Abtrennung von Blättern und Rispen könnte jedoch andererseits die Verarbeitungskapazität der Pressanlage um 15 bis 35 % (Anteil der Blätterfraktion) reduziert werden.

Prinzipiell erscheinen Schneckenpressen für die Gewinnung des Zuckersaftes gut geeignet. Problematisch ist jedoch, dass im Rahmen der Versuche aufgrund der baulichen Ausführung der verwendeten Seiherstab-Schneckenpresse kein zuverlässiger kontinuierlicher Betrieb möglich war. Grund hierfür war eine verstärkte Brückenbildung und ein teilweiser Rückfluss des Zuckersaftes in den Einzugsbereich. Ob diese Störungen auch bei anderen Typen von Seiherstab-Schneckenpressen auftreten, kann anhand der Daten nicht abgeschätzt werden. Zum Verfahrensabschnitt der Zuckersaftgewinnung sind somit weitere Untersuchungen nötig. Darüber hinaus war bei der Verarbeitung von säurekonservierter Zuckerhirse ein erhöhter Verschleiß an einzelnen Bauteilen der Schneckenpresse zu beobachten, so dass auch in diesem Bereich noch offene Fragen bestehen, die es zu klären gilt.

Konversion zu Ethanol

Für die Saftfermentation wurden verschiedene industriell verwendete Hefestämme (*Saccharomyces cerevisiae*-Spezies) auf deren Eignung zur direkten Fermentation von ungeklärtem Zuckerhirsepresssaft untersucht. Dabei wurden Ausbeuten von ca. 90 % der theoretisch möglichen Zuckerkonversion zu Ethanol erreicht. Diese Daten decken sich mit Angaben aus der Literatur. Die Prozessführung der Hefegärung ist unkompliziert. Untersuchungen verschiedener Saftfermentationsverfahren (Batch temperaturkontrolliert, repetitiver Batch temperaturunkontrolliert, Melle-Boinot-Prozess, In-Field-Verfahren) haben gezeigt, dass grundsätzlich alle genannten Verfahren zur Fermentation von Zucker-

hirsepresssaft denkbar sind. Oben genannte Ausbeuten konnten auch dann erzielt werden, wenn der Zuckerhirsepresssaft nicht temperiert, gerührt oder vor der Fermentation sterilisiert wurde. Auch eine pH-Konstanz war nicht notwendig. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass ungeklärter und geklärter Presssaft, aus frischem bzw. gelagertem Pflanzenmaterial, ohne Vorbehandlung direkt und ohne Zugabe von Nährstoffen mit Hefen fermentierbar war. Eine Analyse der Zuckerhirsepresssäfte bestätigt einen ausreichenden Nährstoffgehalt (mineralisch) für Hefen, unabhängig vom Erntejahr und der Pflanzenfraktion (Ganzpflanze, Stängel). Untersuchungen zur Lagerstabilität des Fermentationsprodukts haben gezeigt, dass eine Lagerung über 160 Tage keinen merklichen Einfluss auf die Ethanolausbeute hatte.

Wurden die Presssäfte aus der ameisensäurekonservierten Ganzpflanze gewonnen, musste der pH-Wert auf mindestens pH 5 angehoben werden, um für eine Fermentation mit Hefen verwendet werden zu können. Für die pH-Einstellung war Calciumdihydroxid, aufgrund seines geringen Preises und der geringen benötigten Menge, ein geeignetes Neutralisationsmittel. Eine Ethanolbildung aus Zuckerhirsepresssäften des mit Ameisensäure konservierten Häckselguts war nach pH-Einstellung auf 6 mit guten Ethanolausbeuten von ca. 0,45 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent (mit 0,75 und 1,0 Masse-% Ameisensäure im Ausgangsmaterial) möglich.

Eine Fermentation von Zuckerhirse könnte auch ohne Pressung in zerkleinerter Form als Feststoff- oder Perkolat-Fermentation erfolgen. Die im Anschluss an die Ernte direkt durchgeführte Feststoff-Fermentation des gehäckselten Materials kann als eine alternative Lagerungsoption (Silofermentation) angesehen werden. Die Perkolat-Fermentation könnte hingegen ein Alternativfermentationsverfahren zur Presssaftfermentation in dezentralen Anlagen darstellen. Für beide Verfahrensvarianten konnte die Machbarkeit mit Zuckerhirse gezeigt werden.

Eine Feststoff-Fermentation der gehäckselten Zuckerhirsepflanze war grundsätzlich gut möglich und es konnten auch ohne weitere Zusätze Ethanolausbeuten von 0,37 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent erzielt werden. Es wurde jedoch eine deutliche Bildung von Milchsäure während der Fermentation festgestellt. Bei Nutzung der Feststoff-Fermentation als Lagervariante konnte durch Zugabe von Ameisensäure der Einfluss der natürlichen Keimbelastung verringert werden, sodass höhere Ethanolkonzentrationen erzielbar waren. Eine Zugabe von Ameisensäure wirkte sich bis zu einem bestimmten Konzentrationsbereich positiv auf die Ethanolausbeute aus. Die Ausbeute konnte somit auf 0,40 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent gesteigert werden, wenn 2,5 g/l Ameisensäure (pH=~4,2) bezogen auf die Flüssigphase vorlagen. Die Zugabe von höheren Ameisensäuremengen wirkte sich deutlich nachteilig auf die Gärgeschwindigkeit aus und es kam teilweise zu einem völligen Erliegen der Fermentation. Durch die Verwendung einer gepufferten Ameisensäure und der damit verbundenen pH-Wertanhebung ließ sich der Effekt abmildern.

Im Vergleich zur Feststoff-Fermentation waren mit der Perkolat-Fermentation höhere Ethanolausbeuten erzielbar. Eine Zugabe von Ameisensäure wirkte sich positiv aus und es konnte die Ethanolausbeute von 0,39 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent

auf 0,46 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent gesteigert werden. Die Ameisensäurekonzentration hatte aber im Vergleich zur Feststoffkonzentration bereits bei geringeren Konzentrationen einen inhibierenden Effekt auf die Hefegärung. Grund hierfür ist der niedrigere pH-Wert im Vergleich zur Feststoff-Fermentation. So lag bei einer eingestellten Ameisensäurekonzentration von 2,5 g/l der pH-Wertbereich unterhalb von 3,7 und es konnten innerhalb von 48 h nur sehr geringe Ausbeuten erzielt werden. Mit der Perkolat-Fermentation ließen sich im Vergleich zur Feststoff-Fermentation aufgrund von Verdünnungseffekten nur geringere Ethanolkonzentrationen erzielen. Die Machbarkeit einer wiederholten Perkolat-Fermentation konnte zwar gezeigt werden, es wurde aber eine Erniedrigung der Ethanolausbeute mit zunehmender Anzahl an Zyklen festgestellt. Dass die Perkolat-Fermentation in dezentralen Anlagen als Alternative zur Saftfermentation Anwendung findet, erscheint aus den genannten Schwierigkeiten sowie der technischen Umsetzung, die bisher nicht erprobt wurde, als unwahrscheinlich.

Die Nutzung der in Zuckerhirsebagasse enthalten Cellulose zu Ethanol konnte durch eine hydrothermale Vorbehandlung und einer anschließend durchgeführten simultanen Verzuckerung und Fermentation erfolgreich praktiziert werden. Durch eine kombinierte Fermentation von aufgeschlossener Bagasse und Zuckerhirsesaft konnte gezeigt werden, dass die Erzielung von wirtschaftlich vertretbaren Ethanolkonzentrationen (> 50 g/l) möglich ist. Die Ethanolkonzentrationen zeigten eine Abhängigkeit der Vorbehandlungshärte für das eingesetzte hydrothermale Aufschlussverfahren, dem verwendeten Presssaft sowie der Zuckerhirsesorte und Verarbeitungsvariante. Mit einer zunehmenden Behandlungshärte konnten höhere Cellulosekonversionsraten und damit Ethanolkonzentrationen erzielt werden. Bei Verwendung von Presssäften aus säurekonservierten Häckseln waren, im Gegensatz zu ameisensäurefreien Säften, keine Fermentationen mit den eingesetzten Hefen möglich. Dies ist mit einer toxischen Wirkung der Ameisensäure auf die Hefe bei den untersuchten Bedingungen begründbar. Die verwendeten Bagassen zweier unterschiedlicher Zuckerhirsesorten und der jeweiligen Variante (Ganzpflanze, entblättert, säurekonserviert) hatten Einfluss auf die Enzymzugänglichkeit an das Substrat sowie auf die Cellulosekonversionsrate. So traten bei Verwendung der Bagassen der Zuckerhirse ‘Top 76‘ bei einer kombinierten Fermentation von Bagasse und Saft, Inhibierungseffekte auf den verwendeten Gärorganismus auf. Die Vermutung liegt nahe, dass die Inhibierung auf während der Fermentation freigesetzte Stoffe, wie z. B. niedermolekulare phenolische Substanzen aus Lignin, zurückzuführen war. Um hydrothermal vorbehandelte Zuckerhirsebagasse zu Fermentationszwecken technisch einzusetzen, wären weitere Untersuchungen notwendig, um genaue Ursachen festzustellen und daraus Lösungsansätze ableiten zu können.

Die gute Nutzung der in den Flüssigphasen des Aufschlussverfahrens enthaltenen Inhaltstoffe als Biogassubstrat konnte in Batch-Gärtests gezeigt werden. Um Aussagen bezüglich einer Nutzung des Substrats für eine technische Umsetzung in die Praxis beurteilen zu können, wären hier weitere Untersuchungen zum Gärverhalten (Prozessstabilität, Methangehalt, Raumbelastung) in kontinuierlich betriebenen Vergärungsversuchen notwendig.

Thermische Aufbereitung der Fermentationsmaischen

Bezüglich Destillation/Rektifikation und Absolutierung ergaben sich keine unerwünschten Nebeneffekte. Die thermische Aufbereitung der Fermentationsmaischen der untersuchten Zuckerhirsepresssäfte konnte problemlos durchgeführt und die Eignung des erhaltenen Ethanol zur Verwendung als Blendkomponente in Ottokraftstoffen gemäß DIN EN 15376 nachgewiesen werden.

Thermische Verwertung der Bagasse

Die Brennstoffuntersuchungen zeigen, dass Bagasse aus der mechanischen Saftgewinnung von Zuckerhirse ein Brennstoff ist, der aufgrund seiner chemischen Eigenschaften bei der Verbrennung deutlich weniger Probleme erwarten lässt als andere Reststoffe aus der Landwirtschaft wie beispielsweise Stroh. Ein Einfluss der Konservierung auf verbrennungsrelevante Merkmale der Bagasse konnte nicht festgestellt werden. Da der Aschegehalt der Bagasse mit ca. 4 % deutlich über dem von Holzbrennstoffen liegt, wurde für die Verbrennungsversuche eine Kesselanlage ausgewählt, die für den Einsatz landwirtschaftlicher Brennstoffe mit hohen Aschegehalten aber auch niedrigen Ascheschmelztemperaturen geeignet ist.

Infolge der mechanischen Belastung des Pflanzenmaterials während der Saftgewinnung werden nachteilige schüttgutmechanische Eigenschaften des Brennstoffes ausgebildet (d. h. geringe Fließfähigkeit, geringe Schüttdichte). Die Verbrennungsversuche an der für landwirtschaftliche Brennstoffe ausgelegten Kesselanlage zeigen, dass eine Erhöhung der Schüttdichte der Bagasse zu einer deutlichen Verbesserung der Betriebssicherheit sowie zu einer Minderung der Schadstoffemissionen führen kann. Die Steigerung der Schüttdichte kann direkt bei der Pressung durch entsprechende Presseneinstellungen oder durch eine nachträgliche Aufbereitung (z. B. Pelletierung) erreicht werden.

Die Emissionen an Kohlenmonoxid und Gesamtstaub, die bei der Verbrennung der Bagasse bestimmt wurden, liegen teilweise etwas höher als beim Einsatz von Holzbrennstoffen, sind aber deutlich niedriger als beim Einsatz von Stroh. Lediglich die gegenüber Holz deutlich erhöhten Stickstoffgehalte führen zu entsprechend höheren Stickoxidemissionen. Damit ist die Bagasse grundsätzlich als geeigneter Brennstoff einzuordnen, sofern die schüttgutmechanischen Probleme gelöst werden. Diese Probleme wurden während des Betriebs der Feuerung im Bereich der Brennstoffzuführung sichtbar, indem es zu Störungen in Form von Brückenbildung und Verstopfungen kam. Für einen sicheren Dauerbetrieb ist daher eine angepasste Brennstoff-Zuführtechnik oder eine Aufbereitung zu Pellets oder Briketts erforderlich. Während der Versuche ließ sich ein stabiler Anlagenbetrieb nur durch kontinuierliche manuelle Eingriffe aufrechterhalten. Weitere Störungen waren nicht zu beobachten, insbesondere kam es zu keinerlei Schlackebildung oder zu Anbackungen von Asche an Rost oder Feuerraumwänden.

Ökonomische Einordnung

Unter den derzeitigen Gegebenheiten und mit den vorhandenen Zuckerhirsesorten ist unter bayerischen Anbau- und Rahmenbedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit keine wirtschaftlich konkurrenzfähige Produktion von Ethanol aus Zuckerhirse möglich. Die im Rahmen eines Modellszenarios berechneten Herstellungskosten von Ethanol aus Zuckerhirse in landwirtschaftlichen Brennereien liegen im Bereich von etwa 1,02 bis 1,44 €/l. Hierbei lassen sich 56 % der entstehenden Kosten dem Bereich der Rohstoffbereitstellung und weitere 29 % der Zuckersaftgewinnung zuordnen. Der Marktpreis von Ethanol im Jahr 2011 betrug in Europa 0,60 bis 0,65 €/l (fob Rotterdam) und die Herstellungskosten von Ethanol aus Weizen in landwirtschaftlichen Brennereien können auf 0,80 bis 0,90 €/l abgeschätzt werden. Die hier ermittelten Herstellungskosten von Ethanol aus Zuckerhirse liegen somit deutlich über dem Marktpreis bzw. den Herstellungskosten von Ethanol aus Weizen. Durch Ertragssteigerungen im Bereich des Zuckerhirseanbaus, Einsparungen im Bereich der Anlagentechnik und hochpreisige Vermarktung der Nebenprodukte Bagasse und Schlempe lassen sich Kostenreduktionen erzielen, die gegebenenfalls mittel- bis langfristig eine wirtschaftliche Produktion ermöglichen können.

Insgesamt ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Abschätzung der Kosten im Modellszenario Unsicherheiten beispielsweise im Bereich der Zuckersaftgewinnung oder der Nutzung der Schlempe bestehen (wo zum Teil noch technische Fragestellungen offen sind) und daher die Herstellungskosten gegebenenfalls deutlich von der Berechnung abweichen können. Aufgrund dessen sind für einige Prozessschritte, insbesondere im Bereich der Rohstoffbereitstellung, der Zuckersaftgewinnung und der Nutzung der Schlempe, weitere Forschungsaktivitäten notwendig, um die Herstellung von Ethanol aus Zuckerhirse unter bayerischen Rahmenbedingungen sowohl technisch als auch ökonomisch besser bewerten zu können.

14 Zusammenfassung

Anbaubedingungen und Ertragspotential

Zuckerhirse wird weltweit angebaut und ist eine interessante Kulturpflanze mit hohem Ertragspotential und der Möglichkeit, hochzuckerhaltiges Substrat für die Ethanolproduktion in direkt vergärbarer Form bereitzustellen. Im Rahmen von dreijährigen Untersuchungen zur Anbautechnik und Bestandesführung von Zuckerhirsen wurden mehrere Feldversuche mit über 300 Parzellen allein in 2011 durchgeführt sowie Großflächen zur Bereitstellung von Pflanzenmaterial für Press- und Gärversuche angelegt. Ein Sortenscreening mit bis zu 15 Zuckerhirsesorten sollte das Ertragspotential dieser Kultur unter bayerischen Klimabedingungen aufzeigen und die besten Sorten identifizieren. Weitere Feldversuche dienten der Beantwortung produktionstechnischer Fragestellungen wie z. B. Erntetermin, Düngung oder Saatstärke. Untersuchungen zur Entwicklung des Zuckergehaltes in verschiedenen Entwicklungsstadien sowie Versuche zum Einfluss von Wasser und Temperatur auf Wachstum und Zuckerbildung wurden im Gewächshaus durchgeführt und ergänzten die Erkenntnisse aus den Felderhebungen.

Die im Sortenscreening 2009 und 2011 geprüften Zuckerhirsesorten hatten ein Ertragsspektrum von 110 bis über 200 dt/ha Trockenmasse (TM). Erträge und Zuckergehalte schwankten stark in Abhängigkeit von der Sorte. 2009 wurden Zuckergehalte bis 32 % gemessen, 2011 lagen die Zuckergehalte der besten Sorten bei etwa 35 bis 37 % in der TM. Der theoretisch mögliche Zuckerertrag, ohne Berücksichtigung von Press- oder Lagerverlusten sowie Praxisabschlägen, variierte zwischen 22 und fast 76 dt/ha. Die besten Sorten waren in 2009 ‘Keller‘ und ‘KN Morris‘ sowie in 2011 ‘Sweet Bee‘ und ‘CSSH45‘. Die Sorte ‘KN Morris‘ sollte auf Grund ihrer ausgeprägten Lagerneigung nicht angebaut werden. ‘Sweet Bee‘ zeigte zweijährig gute Ergebnisse und ist für einen Anbau unter bayerischen Bedingungen am ehesten geeignet. Für die Sorten ‘CSSH45‘ kann aufgrund der nur einjährigen Prüfdauer keine Empfehlung erfolgen.

In dem zur Ermittlung des optimalen Erntetermins durchgeführten Gewächshausversuch zeigte sich, dass eine Ernte zwischen Blüte und Milchreife vorteilhaft ist, da zu diesem Zeitpunkt die höchsten Zuckergehalte zu erwarten sind. Im Feldversuch wurde dieses Entwicklungsstadium mit den sehr langsam reifenden Zuckerhirsesorten jedoch erst Mitte Oktober und von einigen Sorten gar nicht erreicht. Die Trockenmassegehalte zur Ernte von Zuckerhirse sind generell als kritisch einzustufen. Im Feldversuch lagen sie stets unter 25 % und können sich nachteilig auf Ernte, Transport und Lagerung auswirken. Deshalb wird eine möglichst späte Ernte, ab Oktober, jedoch vor dem ersten Frost angestrebt.

Ertragssteigerungen können durch eine Erhöhung der Saatstärke oder durch eine Stickstoff- und Kalium-Düngung erreicht werden. In Feldversuchen wurden höhere Erträge bei einer Steigerung der Saatstärke nachgewiesen. Aufgrund der abnehmenden Stängeldurchmesser und damit steigendem Lagerrisiko wird dennoch eine mittlere Saatstärke von 25 Pflanzen/m² angestrebt. Hinsichtlich der Düngung wurde in den Versuchen die gute Nährstoffaneignung von Zuckerhirse nachgewiesen, da auf nährstoffreichem Boden

auch ohne Düngung gute Erträge erreicht werden konnten. Stickstoff- und Kali-Gaben wirken sich nicht signifikant auf den Zuckergehalt aus. Das Lagerrisiko der generell sehr lageranfälligen Zuckerhirsen wird durch erhöhte N-Gaben eher gefördert. Dies sollte bei der Düngeplanung beachtet werden. Empfehlungen aus dem Futterhirseanbau von ca. 150 kg N/ha als Sollwert für die Gesamt-N-Versorgung sind auch für Zuckerhirse ein guter Richtwert.

Da zu Beginn des Projektes eine Entblätterung der Pflanzen bei der Ernte angedacht war, wurden die Ertragsanteile der jeweiligen Pflanzenfraktion im Feldversuch bestimmt. Es zeigte sich, dass bei einer Nichtbeerntung der Blattmasse mit einem nicht zu unterschätzenden Zuckerverlust von bis zu 17 % zu rechnen ist.

Untersuchungen im Gewächshaus zum Einfluss der Wasserversorgung und der Temperatur auf Zuckerbildung und Ertrag von Zuckerhirse wiesen den großen Einfluss des Faktors Wasser bei der Bildung maximaler Zuckererträge nach. Für das Wachstum und den TM-Gehalt zur Ernte sind hohe Temperaturen vorteilhaft. Warme Standorte, die jedoch auch über ausreichende Niederschlagsmengen verfügen, sind deshalb günstig für den Zuckerhirseanbau in Bayern oder Deutschland.

Als Hindernisse des Zuckerhirseanbaus in Bayern sind neben der langsamen Jugendentwicklung die bereits erwähnten, unzureichenden TM-Gehalte zur Ernte, die ausgeprägte Lagerneigung und die mangelnde Verfügbarkeit von kommerziellem Saatgut zu nennen. Die Lösung dieser Probleme – insbesondere die Verfügbarkeit von ertragreichen, standfesten und frühreifenden Zuckerhirsesorten – ist Voraussetzung für einen zukünftigen Zuckerhirseanbau in Bayern und Deutschland. Weiterhin dürfte in Gebieten, in denen Zuckerrüben angebaut werden können, der Rübenanbau aufgrund höherer Zuckererträge je Hektar den Vorrang haben. Die Möglichkeit Zuckerhirse als Zweitfrucht z. B. in Biogasfruchtfolgen anzubauen und damit die Flächeneffizienz zu erhöhen könnte diese Kultur in Biogasregionen wiederum interessant machen.

Ernte, Transport und Lagerung

Für eine wirtschaftliche Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff zur Ethanolproduktion und Festbrennstoffbereitstellung werden eine möglichst verlustarme Ernte vorausgesetzt und eine möglichst lange Erntekampagne angestrebt, um eine hohe Auslastung der erforderlichen Ernte-, Transport- und Saftaufbereitungstechnik erreichen zu können.

Nachdem Zuckerhirse phänotypische und morphologische Ähnlichkeiten mit Mais und Zuckerrohr aufweist, sind die bei diesen Kulturen eingesetzten Erntetechniken (Mähbinder, Zuckerrohrernter, Feldhäcksler) grundsätzlich auch für Zuckerhirse als geeignet anzusehen. Die Form des erzeugten Erntegutes (unzerkleinerte Ganzpflanzen, Stückgut, Häckselgut) und damit die Wahl des Ernteverfahrens üben einen wesentlichen Einfluss auf die Haltbarkeit von Zuckerhirse nach der Ernte aus.

Zur Ermittlung der Lagerfähigkeit von Zuckerhirse wurden Versuche unter Variation von Trockenmassegehalt, Lagerort, Aufbereitungsform, ohne/mit Belüftung und ohne/mit

Konservierungsmaßnahmen durchgeführt, um daraus die jeweiligen Einflussfaktoren bewerten zu können. Insgesamt wurden 38 verschiedene Varianten angelegt.

Für die Nutzung von Zuckerhirse unter süddeutschen Verhältnissen bietet sich entsprechend bekannter Literatur und im Rahmen des Projekts gewonnener Ergebnisse hinsichtlich der Lagerfähigkeit ausschließlich die Erntegutform Häckselgut, konserviert mit Ameisensäure unter anaeroben Bedingungen, an. Durch die Zugabe von Ameisensäure kommt es zu einer sofortigen pH-Wertabsenkung im Häckselgut, wodurch natürlich vorhandene Milchsäurebakterien den enthaltenen Zucker nicht verstoffwechseln und abbauen können. Die Erntegutformen Ganzpflanze und Stückgut scheiden infolge massiver Zuckerverluste innerhalb einer Lagerdauer von wenigen Wochen aus. Des Weiteren sind bei der Lagerung dieser beiden Erntegutformen auch massiver Schimmelbefall und Fäulnis zu beobachten.

Mit der zur Verfügung stehenden Erntetechnik Feldhäcksler kann Zuckerhirse erfolgreich und schlagkräftig geerntet werden. Des Weiteren kann die gesamte existierende Silomais-Logistikkette auch für Zuckerhirsehäckselgut genutzt werden. Dabei ergeben sich aufgrund der späteren Ernte von Zuckerhirse keine Konkurrenzsituationen, vielmehr können für Silomais bereits vorhandene Kapazitäten mit Zuckerhirse noch besser ausgelastet werden.

Durch den Einsatz von Ameisensäure und die Schaffung anaerober Verhältnisse durch Verdichtung und Folienabdeckung des Häckselguts kann Zuckerhirse in einen lagerstabilen Zustand versetzt und für eine spätere Verarbeitung außerhalb des Erntezeitraums vorgehalten werden. Die Notwendigkeit für einen Kampagnebetrieb, welcher sehr hohe Investitionskosten aufgrund kurzzeitig erforderlicher Verarbeitungskapazitäten verursacht, entfällt. Sofern der anaerobe Zustand im Lagergut nicht unterbrochen wird, kann von einem lagerstabilen Zustand bei unbegrenzter Lagerfähigkeit des säurekonservierten Häckselgutes und somit von einer ganz- bzw. sogar überjährigen Verarbeitung des gelagerten Zuckerhirsematerials ausgegangen werden.

Zuckerhirsehäckselgut mit unterschiedlichen Trockenmassegehalten und Häcksellängen wurde mit Ameisensäure in Konzentrationen von 0,5 sowie 0,75 und 1,0 Masse-% behandelt und unter anaeroben Verhältnisse in verdichtetem Zustand für 90, 120 und 150 Tage gelagert. In Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt der Zuckerhirse zum Zeitpunkt der Ernte ist bei der Zugabe von 0,75 Masse-% Ameisensäure mit einem Sickersaftanfall von 12 % (TM-Gehalt 24,6 %) bis zu 22 % (TM-Gehalt 20,6 %) der Erntemenge zu rechnen. Der zuckerhaltige Sickersaft kann als Substrat zur Ethanolherstellung genutzt werden und ist deshalb zur Minimierung von Zuckerverlusten zu berücksichtigen. Der Sickersaft weist bei der Zugabe von 0,75 bzw. 1,0 Masse-% Ameisensäure einen mittleren pH-Wert von 3,4 bzw. 3,2 auf, womit ein stärker saures Milieu vorliegt als beim Sickersaft von Maissilage mit einem pH-Wert von 4 bis 5.

Die Zugabe von 0,5 Masse-% Ameisensäure ist für eine erfolgreiche Konservierung nicht ausreichend. Bei der Konservierung von Zuckerhirse mit Ameisensäure in einer Konzentration von 0,75 bzw. 1,0 Masse-% unter anaeroben Bedingungen ist mit einem Zucker-

verlust von ca. 30 % gegenüber dem ursprünglich zum Zeitpunkt der Ernte im Häckselgut enthaltenen Gesamtzuckers zu rechnen. Wird der im anfallenden Sickerwasser enthaltene Zucker miteingerechnet, ist dagegen nur ein Zuckerverlust von ca. 2,5 bzw. 7 % zu erwarten. Die Variation der Häcksellänge (10 bzw. 20 mm) hat auf den Konservierungserfolg des enthaltenen Zuckers keinen Einfluss, für die Durchführung der Ernte erscheint die größere Häcksellänge jedoch vorteilhafter, um Verstopfungen im Häcksler bei geringeren Trockenmassegehalten vorzubeugen.

Zuckersaftgewinnung

Um die Konversion des in Zuckerhirse enthaltenen Zuckers in Ethanol mittels Fermentation zu ermöglichen, ist ein vorgelagerter Verfahrensschritt zur Abtrennung des Zuckersaftes notwendig. Dies kann prinzipiell durch Extraktion mit Wasser oder durch mechanisches Abpressen erfolgen. Für dezentrale Anlagen erscheint nach bisherigen Untersuchungen die mechanische Saftgewinnung mit Schneckenpressen als geeignete Technologie, da sich hierbei gute Abpressgrade und Zuckerextraktionswerte ergeben.

Ziel der Untersuchungen zur Zuckersaftgewinnung war es, den Einfluss von unterschiedlichem Ausgangsmaterial und von unterschiedlichen Presseneinstellungen (z. B. Schneckengeometrie) auf die Produkt- und Prozessqualität zu ermitteln. Hierzu wurden unter anderem der Abpressgrad, die Abtrenneffizienz und die Zuckerextraktionsrate herangezogen. Dadurch sollen notwendige Anforderungen an das Ausgangsmaterial und optimale Anlageneinstellungen ermittelt werden, um eine Verarbeitung von Zuckerhirse zu ermöglichen. Für die Untersuchungen wurden eine Lochseiher-Schneckenpresse und eine Seiherstab-Schneckenpresse verwendet.

Die Gewinnung des Saftes aus der Zuckerhirse konnte durch einen einmaligen Abpressvorgang mit einer Abtrenneffizienz und einer Zuckerextraktionsrate von über 90 % erfolgen, unabhängig von der Sorte, dem TM-Gehalt, der Zerkleinerung und der Konservierung des Ausgangsmaterials. Die Anforderungen an das Ausgangsmaterial sind somit primär ein hoher TM- und Zuckergehalt. Eine Abtrennung von Blättern und Rispen vor der Zerkleinerung und Saftgewinnung erhöht zwar die Zuckerkonzentration im Presssaft von etwa 110 auf 150 g Zucker pro Liter, die Zuckerextraktionsrate wird jedoch nicht beeinflusst. Ob sich der erhöhte Aufwand der vorherigen Materialabtrennung lohnt, muss daher im Einzelfall betrachtet werden.

Prinzipiell erscheinen Schneckenpressen für die Gewinnung des Zuckersaftes geeignet. Problematisch ist jedoch, dass im Rahmen der Versuche aufgrund der baulichen Ausführung der verwendeten Schneckenpressen kein zuverlässiger kontinuierlicher Betrieb möglich war, zudem trat bei der Verarbeitung von säurekonservierter Zuckerhirse erhöhter Verschleiß auf. Vor einer Praxiseinführung sind daher zwingend weitere Untersuchungen notwendig.

Konversion

Der durch die Schneckenpressung gewonnene Zuckerhirsepresssaft konnte durch Einsatz eines geeigneten Gärorganismus zu Ethanol fermentiert werden. Das Ziel der Un-

tersuchungen war es, eine möglichst effiziente Konversion der im Presssaft enthaltenen Zucker zu Ethanol ausfindig zu machen. Für die Umsetzung war die Auswahl eines geeigneten Gärorganismus entscheidend. In Frage kommen Bakterienkulturen und Hefen. Letztere haben den Vorteil, dass sie verfahrenstechnisch leicht anwendbar, robust und tolerant gegenüber niedrigeren pH-Werten sind, wodurch das Kontaminationsrisiko sinkt und eine Sterilisation der Fermentationsmedien überflüssig ist. Ein sehr gut untersuchter und oft in der Spirituosenherstellung, im Brauereiwesen und für die Biokraftstoffproduktion eingesetzter Organismus ist der Hefestamm *Saccharomyces cerevisiae*.

Für die Untersuchungen von Hefen bezüglich ihrer Ethanolkonversion, Ethanolproduktivität und Temperaturtoleranz wurden acht industrielle Hefepräparate getestet. Die besten Ergebnisse konnten mit den Hefepräparaten Thermosacc® Dry und SuperStart™ erzielt werden, die für weitere Fermentationsversuche genutzt wurden. Es konnten mit beiden Hefen innerhalb von 48 Stunden ca. 0,45 bis 0,46 g Ethanol pro g Zucker bei 35 °C hergestellt werden.

Um Rückschlüsse auf die im Zuckerhirsepresssaft enthaltenen Nährstoffe zu erhalten und damit eine eventuell erforderliche Nährstoffzugabe zu beurteilen, wurden Säfte aus verschiedenen Fraktionen (Stängel, Ganzpflanze) sowie Erntejahren (2010, 2011) bezüglich ihrer Nährstoffgehalte mittels Atomabsorptionsspektrometrie untersucht. Zudem wurden Ammoniumstickstoff/FAN, Phosphat und Sulfat bestimmt. Die ermittelten Nährstoffkonzentrationen (mineralisch) entsprachen den in der Literatur für Hefen aufgeführten Mindestmengen zur Kultivierung. Untersuchungen zum Fermentationsverhalten bestätigten zudem, dass eine Nährstoffzugabe nicht erforderlich ist.

Die Konversion von Zuckerhirsepresssaft zu Ethanol wurde unter verschiedenen Prozessführungsstrategien, wie Batch- (mit und ohne Zellrecycling), repetitiven Batch- und In-Field-Verfahren untersucht. Als Beurteilungsgröße der Verfahren dienten die maximale Produktivität und die erzielte Ethanolausbeute. Die Batch-Fermentation ist das in landwirtschaftlichen Brennereien am häufigsten eingesetzte Verfahren. Bei Verarbeitung zuckerhaltiger und geklärter Presssäfte ist zudem ein Hefezellrecycling möglich. Diese Prozessführung wird auch als Melle-Boinot-Prozess bezeichnet und stellt das Standardverfahren für die Fermentation von z. B. Zuckerrohrsaft dar.

Alle untersuchten Verfahren waren für eine Fermentation von Zuckerhirsepresssaft geeignet. So konnten verfahrensunabhängig, Ethanolausbeuten von 0,39 bis 0,47 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent erzielt werden. Es zeigte sich, dass die Ethanolausbeuten auch ohne Temperaturführung erreicht werden können. Für das Batch-Verfahren wurde außerdem die Hefekonzentration variiert, wobei durch Erhöhung der Animpfzelldichte eine Erhöhung der Produktivität, aber keine höheren Ethanolausbeuten zu finden waren. Ein Recycling der Hefen hatte keinen Einfluss auf die Ethanolausbeuten, jedoch konnte auf Grund der mit jedem Recycling steigenden Zellmasse die maximale Produktivität von 3,7 auf 12,4 g l^{-1} h^{-1} erhöht werden. Im Anschluss an die In-Field-Fermentation verweilte der vergorene Presssaft für 160 Tage bei Raumtemperatur im Labor bzw. bei natürlich schwankenden Außentemperaturen im Außenlager, wobei die Ethanolverluste während der Lagerung sehr gering waren.

Da die Konservierung von Zuckerhirsehäckseln durch Zugabe von Ameisensäure erfolgte, wurde der Einfluss der Säure auf das Fermentationsverhalten der Hefen näher untersucht. Hierfür wurden einerseits nicht konservierte Presssäfte mit Ameisensäure versetzt und zum anderen konservierte Säfte verwendet, deren Ausgangsmaterial mit 0,75 Masse-% oder 1,0 Masse-% Ameisensäure vorbehandelt wurden. Es zeigte sich, dass im Vergleich zu der nicht angesäuerten Variante durch eine voreingestellte Ameisensäurekonzentration von 1,0 g/l (pH 4,3) eine um 10 % höhere Ethanolausbeute erzielt werden konnte, als ohne Ameisensäurezugabe. Bei einer Erhöhung der Säurekonzentration fand jedoch keine Ethanolbildung mehr statt. Durch Anhebung des pH-Wertes mit Calciumcarbonat auf 4,8 wurde der Saft wieder fermentierbar. Es zeigte sich, dass die Inhibierung nicht allein pH-Wert-abhängig war, sondern zudem stark von der Ameisensäurekonzentration beeinflusst wurde.

Für die Säfte aus ameisensäurekonservierten Häckseln erfolgte die Anhebung auf Werte zwischen pH=5 und 6 mit den Basen Calciumdihydroxid und Calciumcarbonat. Die Fermentation erfolgte in Reaktionsvolumen von 0,1 und 10 l. Bei diesen Versuchen erwies sich besonders Calciumdihydroxid sehr gut zur pH-Wertanhebung.

Fermentationen mit den Säften aus 0,75 Masse-% Ameisensäure konservierten Häckseln, die auf einen pH-Wert von 6 eingestellt wurden, zeigten Ethanolausbeuten von ca. 0,45 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent nach 48 Stunden. Diese Werte sind somit mit den Ethanolausbeuten unkonservierter Säfte (0,46 g/g) vergleichbar. Allerdings benötigten die konservierten Säfte eine Fermentationszeit von 48 Stunden. Fermentationen von unkonservierten Säften waren bereits nach 24 Stunden abgeschlossen.

Eine weitere Möglichkeit, den in Zuckerhirse enthaltenen Zucker zu Ethanol umzuwandeln, stellt die direkte Fermentation von gehäckselter Zuckerhirse dar. Die fermentative Nutzung des gehäckselten Materials in Form einer Feststoff-Fermentation kann als eine alternative Lagerungsform (Silofermentation) angesehen werden, da nach erfolgreicher Fermentation durch die Ethanolbildung ein lagerstabiler Zustand erreicht werden kann. Eine Konservierung mit Ameisensäure könnte sich dadurch erübrigen.

Ziel der Untersuchungen zur Feststoff-Fermentation war es, herauszufinden, ob das Verfahren mit Zuckerhirsehäckseln prinzipiell möglich ist, in wie weit natürlich an den Zuckerhirsehäckseln befindliche Fremdorganismen auf das Fermentationsergebnis eine Auswirkung haben und ob es Möglichkeiten zur Unterdrückung mikrobiellen Fremdwachstums gibt. Die Untersuchungen erfolgten über 48 Stunden in Standkolben unter Laborbedingungen bei drei verschiedenen Temperaturen (25 bis 35 °C), fünf Hefezellanfangskonzentrationen (1×10^7 bis 1×10^9 Zellen/ml) sowie verschiedenen Ameisensäurekonzentrationen in einem Bereich von 1 bis 10 g/l bezogen auf das Flüssigkeitsvolumen ohne Feststoff.

Die Feststoff-Fermentation der gehäckselten Zuckerhirsepflanze war prinzipiell möglich und es konnten ohne Ameisensäurezusätze Ethanolausbeuten von 0,37 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent erzielt werden. Mit steigender Fermentationstemperatur verlief die Fermentation bei etwa gleichbleibender Ethanolausbeute zügiger. Die Fer-

mentation war durch eine deutliche Bildung von Milchsäure gekennzeichnet, die zu einer entsprechenden Herabsetzung der Ethanolausbeute führte. Die erzielten Ethanolausbeuten verhielten sich, bis auf den Ansatz mit der höchsten Hefezellkonzentration, bei dem ein Rückgang der Ethanolausbeute festgestellt wurde, sehr ähnlich. Um den Einfluss der natürlichen Keimbelastung zu verringern, wurde Ameisensäure zugegeben. Bei Zugabe von 2,5 g/l Ameisensäure (pH≈4,2), bezogen auf das Flüssigkeitsvolumen ohne Feststoff, konnte die Ausbeute um 8 % auf 0,40 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent gesteigert werden. Bei höheren Ameisensäurekonzentrationen traten deutliche Inhibierungseffekte auf, wodurch es bis zum völligen Erliegen der Fermentation kam. Durch die Verwendung einer gepufferten Ameisensäure und der damit verbundenen pH-Wertanhebung konnte gezeigt werden, dass sich der inhibierende Effekt deutlich abmildern lässt.

Als Alternative zu einem Saftfermentationsverfahren könnte das sogenannte „Ex-Ferm-Verfahren“ (Perkolat-Fermentation) eingesetzt werden. Auch hier sollte das Verfahren im Labormaßstab abgebildet werden und dessen Machbarkeit für die Ethanolgewinnung aus Zuckerhirse beurteilt werden. Im Vergleich zur Feststoff-Fermentation waren mit der Perkolat-Fermentation höhere Ethanolausbeuten von bis zu 0,39 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent möglich. Durch die Zugabe von Ameisensäure konnte die Ethanolausbeute nochmals gesteigert werden und es konnten 0,46 g Ethanol pro g Zucker als Glucoseäquivalent erzielt werden. Mit der Perkolat-Fermentation waren aber aufgrund von Verdünnungseffekten im Vergleich zur Feststoff-Fermentation nur geringere Ethanolkonzentrationen erzielbar. Bei der Wiederverwendung des Perkolats mit frischem Häckselmaterial wurde zudem eine Erniedrigung der Ethanolausbeute mit zunehmender Anzahl an Zyklen beobachtet. Aus den genannten Schwierigkeiten, sowie der nicht erprobten technischen Umsetzung des Verfahrens, erscheint die Perkolat-Fermentation derzeit als unattraktiv.

Neben der Verwendung der in Zuckerhirse bereits in direkt vergärbarer Form vorhandenen Zucker, besteht zudem die Möglichkeit, die im Pressrückstand (Bagasse) enthaltene Lignocellulose zu Ethanol zu konvertieren. Untersuchungen sollten zeigen, ob Zuckerhirsebagasse als Substrat für die alkoholische Gärung brauchbar eingesetzt werden kann. Wertbestimmend für den Einsatz von Bagasse als Fermentationssubstrat sind ein hoher Cellulose- und Hemicellulosegehalt. Insgesamt wurden vier verschiedene Ausgangsmaterialien eingesetzt. Es wurden Bagassen aus der gehäckselten Ganzpflanze (frisch, zwei Sorten), der entblätterten Variante (frisch) sowie aus der gehäckselten Ganzpflanze konserviert mit 0,75 Masse-% Ameisensäure nach 150 Tagen Lagerung verwendet. Der Cellulosegehalt der untersuchten Bagassen lag in einem Bereich zwischen 35 und 40 % i.d. TM, wobei die Bagasse der entblätterten Variante die höchsten Cellulosegehalte aufwies. Der Hemicellulosegehalt lag unabhängig von den untersuchten Bagassen zwischen 25 und 26 % i.d. TM.

Eine große Herausforderung bei der Ethanolherstellung aus Lignocellulose stellt derzeit die Erzielung ökonomisch vertretbarer Ethanolkonzentrationen dar, die in der Regel von der eingesetzten Feststoffkonzentration abhängig ist. Um mit konventionellen Feststoffgehalten (5 bis 10 Masse-%) ökonomisch sinnvolle Ethanolkonzentrationen zu erzielen,

wurde ein neuartiges Verfahrenskonzept für Zuckerhirse entwickelt. Hierbei soll Bagasse in einem hydrothermalen Vorbehandlungsschritt in eine cellulosereiche Feststoff- und eine hemicellulosehaltige Flüssigfraktion aufgeschlossen werden. Die in der flüssigen Fraktion enthaltenen Zucker (vorwiegend Pentosen) werden anstelle der Nutzung als Substrat für die Ethanolherstellung für die Biogaserzeugung eingesetzt, um den Einsatz gentechnisch modifizierter Mikroorgansimen zu vermeiden. Für die alkoholische Gärung wird die aus dem Aufschluss erhaltene und entwässerte Feststoffphase mit Zuckersaft versetzt (kombinierte Saft- und Bagassefermentation), um einen hohen Anfangszuckergehalt zu erzielen.

Ein wesentlicher Bestandteil der experimentellen Untersuchungen war es, das hydrothermale Vorbehandlungsverfahren für Zuckerhirsebagasse in Bezug auf die Behandlungshärte und dessen Auswirkung auf das Produkt zu untersuchen. Hierfür wurde Bagasse bei neun verschiedenen Temperatur-/Zeitkombinationen, in einem Temperaturbereich zwischen 170 °C und 200 °C eingesetzt. Durch die hydrothermale Vorbehandlung konnte Hemicellulose in einem Bereich zwischen 50 und 86 %, bezogen auf den Anfangsgehalt, in Lösung gebracht werden. Mit zunehmender Behandlungshärte sank der pH-Wert des aufgeschlossenen Materials, was mit der Bildung von Abbaunebenprodukten, wie Essig- und Ameisensäure, zu erklären ist. Durch die Optimierung der hydrothermalen Vorbehandlung konnte der Glucangehalt (Glucose als Polysaccharid) von 36,2 % i.d. TM im Ausgangsmaterial auf Werte zwischen 49 und 59 % i.d. TM in Abhängigkeit von der Behandlungshärte angehoben werden. Der Abbau von Cellulose während der hydrothermalen Vorbehandlung war gering und lag nach der hydrothermalen Vorbehandlung bei maximal 7 %. Eine hydrothermale Vorbehandlung mit einer Behandlungshärte von log R_0=4 stellte für die betrachtete Zuckerhirsebagasse einen Kompromiss aus maximal möglichem Glucangehalt im Feststoff und noch tolerierbarem pH-Wert für eine anschließende Fermentation dar.

Das Verfahrenskonzept zur kombinierten Saft- und Bagassefermentation sollte auf dessen Machbarkeit überprüft werden. Die Fermentationsversuche erfolgten bei 37 °C unter Zugabe von Cellulasepräparaten und Aktivtrockenhefe. Die Konversion der in Zuckerhirsebagasse enthalten Cellulose zu Ethanol konnte erfolgreich praktiziert werden und es konnten wirtschaftlich vertretbare Ethanolkonzentrationen (> 50 g/l) erzielt werden. Die Ethanolkonzentrationen zeigten eine Abhängigkeit von der Vorbehandlungshärte des hydrothermalen Aufschlussverfahrens, dem verwendeten Presssaft sowie der Zuckerhirsesorte und Verarbeitungsvariante (mit und ohne Blätter, Konservierung). Mit einer zunehmenden Behandlungshärte waren höhere Cellulosekonversionen von bis zu 76 % erreichbar. Bei Verwendung von Presssäften aus säurekonservierten Häckseln waren im Gegensatz zu ameisensäurefreien Säften keine Fermentationen durchführbar, was mit einer toxischen Wirkung der Ameisensäure auf die eingesetzte Hefe bei den untersuchten Bedingungen begründbar ist. Außerdem war die Inhibierung des Gärorganismus auch von der Zuckerhirsesorte abhängig. So traten bei Verwendung der Bagassen der Zuckerhirse ‘Top 76’ im Gegensatz zur 'Umbrella' Inhibierungseffekte auf. Um hydrothermal vorbehandelte Zuckerhirsebagasse zu Fermentationszwecken technisch einzu-

setzen, wären hier weitere Untersuchungen notwendig, um die genaue Ursache der Hefeinhibierung herauszufinden.

Die aus dem Aufschlussprozess der hydrothermal vorbehandelten Bagassen erhaltenen Flüssigphasen wurden in Batch-Gärtests auf dessen Biogaspotenzial untersucht. Bezogen auf die eingesetzte organische Trockenmasse konnten Biogaserträge zwischen 637 und 787 l_N/kg_{oTM} erzielt werden. Diese Werte liegen im Bereich für gängige Biogassubstrate wie z. B. Maissilage und oberhalb der von Rinder- und Schweinegülle. Die bisher erhaltenen Ergebnisse verdeutlichen das vielversprechende Potenzial, Flüssigphasen aus hydrothermal vorbehandelten Bagassen als Substrat für die Biogasherstellung nutzen zu können. Um Aussagen bezüglich der technischen Nutzung, wie z. B. Prozessstabilität, Methangehalt und Raumbelastung der kontinuierlichen Vergärung treffen zu können, wären auch hier zusätzliche Untersuchungen notwendig.

Um zu untersuchen, inwiefern unerwünschte Gärungsnebenprodukte bei der verfahrenstechnischen Auslegung der thermischen Aufbereitung eine Rolle spielen können, wurde vergorener Zuckerhirsepresssaft über thermische Verfahren (Destillation, Rektifikation, Absolutierung) weiter aufbereitet. Als Ausgangsmaterial wurden insgesamt vier verschiedene zu Ethanol vergorene Presssäfte untersucht. Drei Säfte stammten aus der Pressung der gelagerten Ganzpflanze (Bündellagerversuch), der vierte Presssaft aus der gehäckselten Ganzpflanze mit Ameisensäurekonservierung (0,75 Masse-%) nach 90 Tagen Lagerung. Der durch die Fermentation entstandene Alkohol wurde im ersten Schritt von der vergorenen Maische in einer Destillationsapparatur abgetrennt. Im Anschluss daran erfolgte die Rektifikation und Absolutierung in einer Batch-Rektifikationsanlage. Für die Trocknung des Ethanol-Wassergemisches wurde Ethylenglykol als Entrainer prozessintegriert in der Rektifikationskolonne verwendet. Gemäß DIN EN 15376 zur Verwendung von Ethanol als Blendkomponente im Ottokraftstoff konnten die Grenzwerte eingehalten werden. Mit dem bisherigen Erkenntnisstand sind für die Destillation/Rektifikation und Absolutierung keine unerwünschten Nebeneffekte für Zuckerhirse als Substrat zu erwarten.

Thermische Verwertung der Bagasse

Die Brennstoffuntersuchungen zeigen, dass Bagasse aus der mechanischen Saftgewinnung von Zuckerhirse ein Brennstoff ist, der aufgrund seiner chemischen Eigenschaften bei der Verbrennung deutlich weniger Probleme erwarten lässt als andere Reststoffe aus der Landwirtschaft wie beispielsweise Stroh. Ein Einfluss der Konservierung auf verbrennungsrelevante Merkmale der Bagasse konnte nicht festgestellt werden. Da der Aschegehalt der Bagasse mit ca. 4 % deutlich über dem von Holzbrennstoffen liegt, wurde für die Verbrennungsversuche eine Kesselanlage ausgewählt, die für den Einsatz landwirtschaftlicher Brennstoffe mit hohen Aschegehalten aber auch niedrigen Ascheschmelztemperaturen geeignet ist.

Infolge der mechanischen Belastung des Pflanzenmaterials während der Saftgewinnung werden nachteilige schüttgutmechanische Eigenschaften des Brennstoffes ausgebildet (d. h. geringe Fließfähigkeit, geringe Schüttdichte). Die Verbrennungsversuche an der für

landwirtschaftliche Brennstoffe ausgelegten Kesselanlage zeigen, dass eine Erhöhung der Schüttdichte der Bagasse zu einer deutlichen Verbesserung der Betriebssicherheit sowie zu einer Minderung der Schadstoffemissionen führen kann. Die Steigerung der Schüttdichte kann direkt bei der Pressung durch entsprechende Presseneinstellungen oder durch eine nachträgliche Aufbereitung (z. B. Pelletierung) erreicht werden.

Die Emissionen an Kohlenmonoxid und Gesamtstaub, die bei der Verbrennung der Bagasse bestimmt wurden, liegen teilweise etwas höher als beim Einsatz von Holzbrennstoffen, sie sind aber deutlich niedriger als beim Einsatz von Stroh. Lediglich die gegenüber Holz deutlich erhöhten Stickstoffgehalte führen zu entsprechend höheren Stickoxidemissionen. Damit ist die Bagasse grundsätzlich als geeigneter Brennstoff einzuordnen, sofern die schüttgutmechanischen Probleme gelöst werden. Diese Probleme wurden während des Betriebs der Feuerung im Bereich der Brennstoffzuführung sichtbar, indem es zu Störungen in Form von Brückenbildung und Verstopfungen kam. Für einen sicheren Dauerbetrieb ist daher eine angepasste Brennstoff-Zuführtechnik oder eine Aufbereitung zu Pellets oder Briketts erforderlich. Während der Versuche ließ sich ein stabiler Anlagenbetrieb nur durch kontinuierliche manuelle Eingriffe aufrechterhalten. Weitere Störungen waren nicht zu beobachten, insbesondere kam es zu keinerlei Schlackebildung oder zu Anbackungen von Asche an Rost oder Feuerraumwänden.

Ökonomische Einordnung

Unter den derzeitigen Gegebenheiten und mit den vorhandenen Zuckerhirsesorten lässt sich unter bayerischen Anbaubedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit keine wirtschaftlich konkurrenzfähige Produktion von Ethanol aus Zuckerhirse darstellen. Dies ergeben Berechnungen eines Modellszenarios für eine landwirtschaftliche Brennerei, bei denen die Herstellungskosten von Ethanol aus Zuckerhirse auf 1,02 bis 1,44 €/l abgeschätzt werden. Diese Kosten liegen deutlich über dem Marktpreis für Ethanol (0,60 bis 0,65 €/l in 2011 in Europa) und auch über den Herstellungskosten von Ethanol aus Weizen (0,80 bis 0,90 €/l für eine landwirtschaftliche Brennerei). Durch Ertragssteigerungen im Bereich des Zuckerhirseanbaus, Einsparungen im Bereich der Anlagentechnik und hochpreisige Vermarktung der Nebenprodukte Bagasse und Schlempe lassen sich Kostenreduktionen erzielen, die gegebenenfalls mittel- bis langfristig eine wirtschaftliche Produktion ermöglichen könnten.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der durchgeführten Kostenabschätzung Unsicherheiten in verschiedenen Prozessschritten bestehen (an denen zum Teil noch technische Fragestellungen offen sind) und daher die Herstellungskosten gegebenenfalls deutlich von der Berechnung abweichen können. Aufgrund dessen sind für einige Prozessschritte weitere Forschungsaktivitäten notwendig, um die Herstellung von Ethanol aus Zuckerhirse unter bayerischen Rahmenbedingungen sowohl technisch als auch ökonomisch besser bewerten zu können.

15 Abstract

The origin of sweet sorghum is Africa. It is a C4 crop and a member of the grass family. It shows a good resistance to draught and tolerates heat. Sweet sorghum varieties belong to the species *Sorghum bicolor* [L.] Moench and the subspecies *S. bicolor*. They are particularly bred with regard to high sugar contents in the stem and are common in the U.S.A., India, China, and other tropical countries. Sweet sorghum has a high yield potential and the sugary juice of this plant, which is mainly located in the stems, can be fermented to produce ethanol.

Within this three year project field studies with more than 300 plots in 2011 were carried out in order to assess the yield potential of this thermophile crop under climatic conditions in Bavaria. Furthermore we intended answering questions about fertilization, seed density or the optimal harvest time. Investigations on the influence of temperature, water supply and growth stage on sugar accumulation in the plant were carried out in a greenhouse.

Among the 15 tested sweet sorghum varieties yields varied between 11 and 20 t/ha. Best varieties were ’Keller’, ’CSSH45’ and ’Sweet Bee’ with good dry matter yields, high sugar contents and a theoretical (calculated) sugar yield of 5.9, 6.4, and 7.7 tons per hectare. Problems in sweet sorghum cultivation, as revealed in this project, are the very low dry matter contents at the harvest time (< 25 %), a high risk of lodging and the limited availability of commercial seeds.

Further experiments were carried out for the investigation of the storage condition of chopped sweet sorghum variety ‘Top 76’. The goal was to find out how the chopped biomass needs to be stored to provide a low-loss supply for ethanol purposes. For this reason sweet sorghum was harvested with a common self-propelled-forage-chopper with adjustable cutting length and transported by a farm trailer. In a pilot plant scale two different particle sizes (length 10 mm and 20 mm, respectively) and three different loadings of 0.5 % (FM), 0.75 % (FM) and 1.0 % (FM) of formic acid were tested under anaerobic conditions in barrels. The dry matter content of the raw material varied between 20.76 and 24.75 %. The initial sugar content was between 340.1 and 367.6 mg sugar (given as glucose) per gram dry matter.

On predetermined dates, the barrels were drained with an integrated valve and the leachate was collected and analysed. The parameters examined were sugar content, pH value, formic acid, lactic acid, acetic acid and ethanol. After 90, 120 and 150 days the barrels were opened and samples were taken to analyse the remaining soluble sugar content. It can be seen that the addition of 0.75 % (FM) formic acid preserved the sugars for more than 150 days with a loss of less than 30 % of the initial sugar content. Using of the sugar content in the leachate, the loss of the initial sugar content can be reduced at a level of 2.5 % to 7.5 %. The addition of 0.5 % (FM) formic acid suppresses the formation of lactic acid but not all activity of other microorganisms. This results in a loss of sugar content to a higher degree of 48 %.

The addition of formic acid to chopped sweet sorghum ensured the conservation of the sugar under anaerobic conditions for at least 150 days. Sugar losses due to leachate should be avoided. Hence, the leachate should be collected and used in the ethanol fermentation process.

Before processing sweet sorghum to ethanol, the sugar juice from sweet sorghum has to be separated. Hence, a screw press (press cage with steel bars) was used. A sugar juice yield of more than 90 % can be achieved by pressing the chopped material only one time. The principal suitability of using this kind of screw press for an efficient sugar juice separation could be shown. However, some technical problems like material bridging or high wear by treating preserved material needs to be solved.

Another key activity was the research on the bioconversion of the whole plant to ethanol. The simplest way to produce ethanol from sweet sorghum is the utilization of directly fermentable sugars in the pressed juice. Alternatively, the direct fermentation of chopped particles in a solid-state fermentation process could be another option. In addition to the use of direct fermentable sugars (first generation ethanol), the utilization of sugars from lignocellulose of the plant fibres represents a new way of ethanol production (second generation ethanol). Both, first and second generation ethanol production from sweet sorghum was part of the investigations.

For the fermentation process the amount of nutrients in the fermentation media is of major concern. Different samples of pressed juices were analysed regarding their content of mineral compounds, phosphate, sulphate and free amino nitrogen. The results confirmed that the values for the considered mineral compounds were within the range of literature data for *Saccharomyces cerevisae*. In addition, fermentation trials on various pressed sweet sorghum juices showed the good fermentability of the juice without adding any nutrients.

Different fermentation strategies with the juice, like batch with and without cell recycling, repeated batch and In-field fermentation were tested. The fermentation of clarified and non-clarified juice was shown to be easily feasible. Regardless of the fermentation strategy an ethanol yield between 0.39 and 0.47 g Ethanol /g sugar was achievable. The solid-state fermentation of chopped particles was also feasible and it was shown that the addition of small amounts of formic acid (up to 2.5 g/l in the liquid phase, pH ≥ 4.0) had a positive impact on fermentation and could enhance the ethanol yield due to inhibition of other natural activity of microorganisms.

The preservation of the chopped sweet sorghum particles requires the addition of formic acid during the storage period. After pressing, the juice of the preserved material has pH-values below 3.5. Hence, the fermentation with the applied active dry yeast was no longer feasible. Therefore, the impact of the acid on yeast fermentation was investigated. It was shown that the fermentability was affected by the pH-value and formic acid concentration. Using pressed juice from chopped particles, which were preserved with 0.75 % formic acid, the juice had to be neutralized with $Ca(OH)_2$ to values of about 6 to be fermentable again.

The obtained ethanol from fermentation was intended for fuel purposes. Hence, various fermentation products were distilled, rectified, dried and analysed according to DIN EN 15376 using the thermal purified ethanol as a blending component for petrol. The results showed that there are no unexpected side effects when using sweet sorghum juice as a substrate.

For a commercial breakthrough of ethanol production from lignocelluloses, one main challenge still exists in achieving high ethanol concentrations during fermentation. Therefore a new concept was developed, which combines the fermentation of hydrothermally pre-treated sweet sorghum bagasse and sweet sorghum juice in one process step. It could be shown that the production of more than 50 g/l of ethanol is possible when applying the concept. The convertibility of cellulose remained unaffected by the juice addition but was dependent on the sweet sorghum variety used. Residual liquid streams after pre-treatment, which mainly consists of pentose's and are not fermentable for non-genetically modified yeast like *Saccharomyces cerevisae*, were tested for its application for biogas purposes. The biogas potential obtained was between 636 and 787 l_N/kg_{oTM} and is comparable with values of common biogas substrates like maize silage.

The suitability of sweet sorghum bagasse as solid fuel was determined by fuel characterization and boiler tests in a test stand. The fuel trials showed that bagasse is a fuel, which due to its chemical properties may cause fewer problems than other agricultural fuels such as straw. During the boiler operation it was seen, that the main disadvantages are the mechanical properties of the bagasse (bad flow properties, low bulk density). For an undisturbed operation it will be necessary to improve the mechanical properties by an additional pre-treatment (e.g. pelletisation). The emissions of carbon monoxide and dust, which were determined during the combustion of the bagasse, are little higher than the emissions of wood combustion, but significantly lower than the emissions of straw combustion. Therefore bagasse is generally a suitable fuel, if the problems with the mechanical properties can be solved.

Finally, the economic feasibility was estimated by calculating the costs for a virtual agricultural distillery. The calculated production costs ranged between 1.02 and 1.44 €/l, depending on the usage of the by-products. The costs are higher than the market price of ethanol in Europe (0.60 to 0.65 €/l in 2011) and higher than the production costs of ethanol from wheat (0.80 to 0.90 €/l for an agricultural distillery in Germany). So it can be concluded that under actual Bavarian circumstances an economic operation of such a distillery with sweet sorghum as feedstock seems not to be feasible. Further optimization of the whole process (beginning with the growing of sweet sorghum) could lead to an economic production of ethanol in a medium- or long-term. Still, further research is necessary to get a better technical and economic assessment of the usage of sweet sorghum for ethanol production in Bavaria.

Quellenverzeichnis

[1] ABERNATHY, D. G.; SPEDDING, G.; STARCHER, B. (2009): Analysis of protein and total usable nitrogen in beer and wine using a microwell ninhydrin assay. In: Inst. Brew., Jg. 115, S. 122-127

[2] AGCO-MF (2009): AGCO-MF SUGAR CANE HARVESTERS, Online im Internet: http://www.agcocorp.com [02.04.2009]

[3] ALLEN, G. S.; KAM, L. C.; ZEMAN, A. J.; ANTAL, M. J. JR. (1996): Fractionation of Sugar Cane with Hot, Compressed, Liquid Water, In: Industrial Engineering Chemistry Research, Vol. 35, S. 2709-2715

[4] ALMODARES, A.; HADI M. R. (2007): Inter-relationship between growth analysis and carbohydrate contents of sweet sorghum cultivars and lines. In: J. Environ. Biol. Jg. 28, S. 527-531

[5] ALMODARES, A.; HADI M. R. (2009): Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. In: African Journal of Agricultural Research, Jg. 4, Nr. 9, S. 772-780

[6] ALMODARES, A.; HADI M. R.; RANJBAR, M.; TAHERI, R. (2007): The Effects of Nitrogen Treatment, Cultivars and Harvest on Stalk Yield and Sugar Content in Sweet Sorghum. In: Asian Journal of Plant Science. Jg. 6, Nr. 2, S. 423-426

[7] ALMODARES, A.; TAHERI, R.; ILL MIN CHUNG; FATHI, M. (2008): The effect of nitrogen and potassium fertilizers on growth parameters and carbohydrate contents of sweet sorghum cultivars. In: J. Environmental. Biol., Jg. 29, Nr. 6, S. 849-852

[8] AMORIM, H. V., BASSO, L. C., LOPES, M. L. (2009): Sugar cane juice and molasses and sweet sorghum: Composition and usage. In: INGLEDEW, W. M.; KELSALL, D. R.; AUSTI, G. D.; KLUHSPIES, C. (Hrsg.): The alcohol textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 5th Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 541 Seiten, ISBN 1-904-76165-5

[9] ANDA, A.; PINTER, L. (1994): Sorghum Germination and Development as Influenced by Soil Temperature and Water Content. In: Agronomy Journal, Jg. 86, Nr. 4, S. 621-624

[10] ANDERLEI, J. (1986): Zuckerhirsebericht 1985. Unveröffentlichte Versuchsergebnisse der KWS, Seligenstadt

[11] ANDERSON, I. C. (1995): Biomass production and ethanol potential from sweet sorghum. Competitive Grant Report 91-46. Leopold Center for Sustainable Agriculture. Jg. 4, S. 97-101

[12] ANNEMÜLLER, G.; MANGER, H. J.; LIETZ, P. (2008): Die Hefe in der Brauerei. 2. Auflage. Berlin: VLB Berlin, 429 Seiten, ISBN 978-3-921690-57-4

[13] ARSEN, B. (2008): Processing of Sweet Sorghum for Bioethanol Production: Online im Internet: http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=2008029163&IA=GB2007003395&DISPLAY=DESC [24.06.2009]

[14] ARTHUR, M. F.; DAVIS, M; KRESOVICH, S.; LAWHON, W. T.; LIPINSKY, E. S.; PRICE, M.; RUDOLPH, A. (1980): Research report on development of sweet sorghum as an energy crop. Volume I. Agricultural Task to US Department of Energy. U.S.A. 240 Seiten

[15] ASIM, M.; MOHAMMAD AKMAL; AHMAD KHAN; FARHATUALAH; RAZIUDDIN (2012): Rate of nitrogen application influences yield of maize at low and high population in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. In: Pakistan Journal of Botany Nr. 44, (1), S. 289–296.

[16] ATZ ENTWICKLUNGSZENTRUM (2012): Biogaspotenzial autoklavierter Substratproben. Kurzbericht, Juni 2012, 8 Seiten (unveröffentlicht)

[17] BADGER, P. C. (2002): Ethanol from Cellulose: A General Review. In: JANICK, J.; WHIPKEY, A. (Hrsg.): Trends in new crops and new uses. Alexandria: ASAH Press, S. 17-21, ISBN 0-970756-5-5

[18] BAHRANI, M.J.; DEGHANI GHENATEGHESTANI, A. (2004): Summer Forage Sorghum Yield, Protein and Prussic Acid Contents as Affected by Plant Density and Nitrogen Topdressing. Journal of Agricultural Science and Technology, Nr. 6, S. 73–83

[19] BANGARWA, K. S.; GREWAL, R. P. S.; LODHI, G. P. (1987): A single recessive gene for stem sweetness in sorghum. In: Euphytica 36, S. 225-226

[20] BAST, E. (2001): Mikrobiologische Methoden. 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 429 Seiten, ISBN 978-3-8274-1072-6

[21] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2012): Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Silomais. Online im Internet https://www.stmelf.bayern.de/idb/silomais.html [26.06.2012)

[22] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2010): Bayerischer Agrarbericht 2010. Zuckerrübe. Online im Internet: http://www.agrarbericht-online.bayern.de/landwirtschaft-laendliche-entwicklung/ zuckerrueben-flaechennutzung.html [15.5.2012], 1 Seite

[23] BECK, P. A.; HUTCHISON, S.; GUNTER, S. A.; LOSI, T. C.; STEWEART, C. B.; CAPPS, P. K.; PHILLIPS, J. M. (2007): Chemical composition and in situ dry matter and fibre disappearance of sorghum x Sudangrass hybrids. In: J. Anim Sci. Jg. 85, S. 545-555

[24] BELLETTI, A. (1986): Sweet Sorghum: An energy crop for fuel-alcohol-production. International Congress on Renewable Energy Sources, Madrid

[25] BELLMER, D. (2008): Small-Scale Conversion of Ethanol from Sweet Sorghum: Online im Internet: http://www.ars.usda.gov/meetings/Sorghum/presentations/Bellmer.pdf [09.06.2009]

[26] BELLMER, D. (2008): Sweet Sorghum Q&A. Sorghum Grower Magazine, Nr. 3, S. 17

[27] BELLMER, D.; HUHNKE, R. (2007): Sweet Sorghum Ethanol: In-Field Fermentation Issues. Presentation, thematic area C: Agronomy. In: INTERNATIONAL FUND FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT (IFAD) (Hrsg.): Global consultation on pro-poor sweet sorghum development for biofuel production and introduction to tropical sugar beet, 8-9 November 2007. Rome, Italy: International Fund for Agricultural Development (IFAD), Online im Internet: http://www.ifad.org/events/sorghum/index.htm [19.02.2010], 36 Seiten

[28] BERNING, F. (2009): Selber fahren, Kosten sparen? - Technikserie Transport. In: top agrar, Nr. 6/2009, Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH, S. 76-80, ISSN0936-8302

[29] BILBRO, J.D; UNDERSANDER, D.J; FRYREAR, D.W; LESTER., C.M (1991): A survey of lignin, cellulose, and acid detergent fiber ash contents of several plants and implications for wind erosion control. In: Journal of Soil and Water Conservation 46 (4), S. 314–316

[30] BIRCH, R. M; UND WALKER, G. M. (2000): Influence of Magnesium Ions on Heat Shock and Ethanol Stress Response of *Saccharomyces cerevisiae*. In: Enzyme and Microbial Technology, Jg. 26, S. 678-687

[31] BLACKBURN, F. (1984): Sugar-cane. Longman Group Limited, New York (U.S.A.), ISBN 0-582-46028-X

[32] BLUDAU, D. (1987): Landwirtschaftliche Kenndaten und angepasste Produktionstechnik der Zuckerhirse als Energiepflanze in der Bundesrepublik Deutschland. Diplomarbeit, Technische Universität München, Institut für Landtechnik, Weihenstephan, 87 Seiten

[33] BLUDAU, D. (1994): Verfahrenstechnische Voraussetzungen zur Ernte der Zuckerhirse als Energiepflanze. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Landtechnik, Weihenstephan, 161 Seiten, ISSN 0931-6264

[34] BLUDAU, D.; STREHLER, A. (1992): Zuckerhirse – Bereitstellung und Nutzung als Energiepflanze. In: Landtechnik, Jg. 47, Nr. 11, S. 559-561

[35] BLUDAU, D.; TUROWSKI, P. (1992): Erarbeitung geeigneter Verfahren zur Ernte, Lagerung und Bagasseverwertung von Zuckerhirse. Gelbes Heft, Nr. 43. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), 225 Seiten

[36] BNDES; CGEE (2008): Sugarcane-based bioethanol: energy for sustainable developments. Rio de Janeiro: BNDES, 304 Seiten, ISBN 978-85-87545-27-5

[37] BOGUSLAWSKI, E. ATANASIU, N.; SHAABAN, K. (1965): Nährstoffaufnahme, Nährstoffentzug, Nährstoffbedarf und Ertragsleistung von Sorghum-Hirse (Sorghum vulgare var. Sacch. Und var. Techn.) unter gemäßigten Klimabedingungen. In: Acker- und Pflanzenbau, Jg. 122, S. 251-266

[38] BOLIK, C.-J. (1991): Leistungen der Standard-Sorten ZH 105 und ZH 108 in den Versuchen 1988 – 1990 auf 3 Standorten. Unveröffentlichte Versuchsergebnisse der KWS, Einbeck 1991

[39] BOLIK, C.-J. (1994): Anbau und Nutzung der Zuckerhirse im Süddeutschen Raum. Dissertation. Technische Universität. München, Lehrstuhl für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, 170 Seiten

[40] BRAUNSCHWEIGISCHE MASCHINENBAUANSTALT AG (1989): Prospekte zu Rohrdiffusionsanlagen und Gleitlager-Zuckerrohrmühlen

[41] BROADHEAD, D. M. (1972): Effects of stalk chopping on leaf removal and juice quality of Rio Sweet Sorghum. In: Agronomy Journal Jg. 64, S. 306-308

[42] BRUNNER, T. (2006): Aerosols and coarse fly ashes in fixed-bed biomass combustion. Formation, characterisation and emissions. Dissertation University of Technology (Faculty of Mechanical Engineering), Eindhoven. Series Thermal Biomass Utilization, Nr. 7. Graz: BIOS Bioenergiesysteme, 158 Seiten, ISBN 978-3-9501980-4-1

[43] BRYAN, W. L. (1981): Evaluation of Sweet Sorghum for Fuel Alcohol. ASAE Paper No. 81-3571

[44] BRYAN, W. L. (1990): Solid-state fermentation of sugars in sweet sorghum. In: Enyzme Microbial and Technology, Jg. 12, Nr. 6, S. 437-442

[45] BRYAN, W. L.; MONROE, G. E.; CAUSSANEL, P. M. (1985): Solid phase fermentation and alternate juice expression systems for Sweet Sorghum. In: Transactions of the ASAE, Jg. 28, S. 268-274

[46] BRYAN, W. L.; MONROE, G. E.; GASCHO, G. J. (1985): Juice expression from Sweet Sorghum Cultivars of Different Fiber Content. Transactions of the ASAE, Jg. 28, Nr. 3, S. 980-985

[47] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2010): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BimSchV). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 4, S. 38 – 56

[48] BUREAU, O. (2007): Praj Ind setting up sweet sorghum ethanol plant. Tuesday, Oct 09, 2007, Business Daily from THE HINDU group of publications, Kasturi & Sons Ltd.

[49] CABELA, E. (1982): Energie aus Biomasse – Energiebilanzstudie. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf

[50] CARDONA, C. A.; QUINTERO J. A., PAZ, I. C. (2010): Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. In: Bioresource Technology, Jg. 101, S. 4754-4766

[51] CARL ROTH GMBH + CO. KG: Datenblatt von Calciumcarbonat, URL: http://www.carlroth.com/media/_de-de/sdpdf/6230.PDF (Stand: 06.06.2012)

[52] CARL ROTH GMBH + CO. KG: Datenblatt von Calciumdihydroxid, URL: http://www.carlroth.com/media/_de-de/sdpdf/CN87.PDF (Stand: 06.06.2012)

[53] CARL ROTH GMBH + CO. KG: Datenblatt von Natriumhydroxid, URL: http://www.carlroth.com/media/_de-de/sdpdf/P031.PDF (Stand: 06.06.2012)

[54] CASE IH-AUSTOFT (2009): AUSTOFT CANE HARVESTERS, Online im Internet: http://www1.caseih.com/australia/Products/Harvesting/AustoftCaneHarvesters/Pages/cane-harvesters.aspx [02.04.2009]

[55] CHANDRA, R. P.; BURA, R.; MABEE, W. E.; BERLIN, A.; PAN, X.; SADDLER, J. N. (2007): Substrate Pretreatment: The Key to Effective Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosics? In: Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, Jg. 108, S. 67-93

[56] CHANG, V.; BURR, B; UND HOLTZAPPLE, M. (1997): Lime pretreatment of switchgrass. In: Applied Biochemistry and Biotechnology, Jg. 3, S. 63-65

[57] CHAVAN, U.D.; PATIL, J.V.; SHINDLE,.S.; (2009): An assessment of sweet sorghum cultivars for ethanol production. Sugar Technology, Jg. 11, Nr. 4, S. 319-323

[58] CHIARAMONTI, D.; GRASSI, A.; AGTERBERG, A.; GRASSI, G.; VORTMEYER, N.; RESTER, A.; GRIMM, H.-P.; HELM, P. (2002): ECHI-T – Large Bio-ethanol Project from Sweet Sorghum in P. R. China and Italy. Executive Summary. Fifth Framework Programme, Florence: ETA, 56 Seiten, ISBN 88-900442-6-8

[59] CHMIEL, H. (2011): Bioprozesstechnik. 3. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 540 Seiten, ISBN 978-38274-2476-1

[60] CHOHNAN, S.; NAKANE, M.; RAHMAN, M. H.; NITTA, Y.; YOSHIURA, T.; OHTA, H.; KURUSU, Y. (2011): Fuel ethanol production from sweet sorghum using repeated-batch fermentation. In: Journal of Bioscience and Bioengineering, Jg. 111, Nr. 4, S. 433-436

[61] CLAAS OHG (1986): CLAAS Informations: Sweet Sorghum Harvesting

[62] CLARK, T. A.; MACKIE, K. L. (1984): Fermentation Inhibitors in Wood Hydrolysates Derived from the Softwood *Pinus radiata.* In: Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Jg. 34B, S. 101-110

[63] COBLE, C.; EGG, R.; SHMULEVICH, I. (1984): Processing Techniques for Ethanol Production from Sweet Sorghum. In: Biomass, Nr. 6, S. 111-117

[64] COLEMAN, O. (1970): Syrup and sugar from Sweet Sorghum. In: Sorghum Production and Utilization, edited by Wall, J. S. And Ross, W. M.. Westport (U.S.A.): The AVS Publishing Company

[65] CUNDIFF, J. S.; PARRISH, D. J. (1983): Whole stalk sweet sorghum storage. ASAE Paper No. 83-3058

[66] CURT, M.D.; FERNANDEZ, J.; GONZALES, J.; GIL, J.L. (2000): Comparative Growth Analysis of Two Sorghum Cultivars in Badajoz (Spain). Biomass for Energy and Industry: Proceedings of the 1st World Conference. Sevilla, Spain: S. 1877-1880

[67] D`AMORE, T.; PANSCHAL, C. J.; RUSSEL I.; STEWART, G. G. (1990): A Study of ethanol tolerance in yeast. In: Critical Reviews in Biotechnology, Jg. 9, S. 287-304

[68] DALIANIS, C.; ALEXOPOULOU, E.; DERCAS, N.; SOOTER, CH. (1996): Effect of Plant Density on Growth, Productivity and Sugar Yields of Sweet Sorghum in Greece. In: Chartier, P.; Ferrero, G.L.; Henius, U.M.; Hultberg, S.; Sachau, J.; Wiinblad, M. (Hrsg.): Biomass for Energy and the Environment: Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference. Copenhagen, Denmark: S. 582-587

[69] DAVILA-GOMEZ, F. J.; CHUCK-HERNANDEZ, C.; PEREZ-CARRILLO, E.; ROONEY, W. L; SERNA-SALDIVAR, S. O. (2011): Evaluation of bioethanol production from five different varieties of sweet and forage sorghums (Sorghum bicolor (L) Moench), In: Industrial Crops and Products, Jg. 33, S. 611-616

[70] DELGENES, J. P.; ESCARE, M. C; LAPLACE, J. M.; MOLETTA, R.; NAVARRO, J. M. (1998): Biological production of industrial chemicals, i.e. xylitol and ethanol, from lignocelluloses by controlled mixed culture systems. In: Industrial Crops and Products, Jg. 7, Nr. 2-3, S. 101-111

[71] DEMMLER, D. (1984): Versuche mit Zuckerhirse in der Pfalz. In: Die Zuckerrübenzeitung. Jg. 20, Nr. 4, S. 18

[72] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1995): DIN 1319-1:1995-01: Grundlagen der Messtechnik. Teil 1: Grundbegriffe. Berlin: Beuth Verlag

[73] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1999): DIN EN 303-5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistungen bis 300 kW; Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. Berlin: Beuth Verlag

[74] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2004): DIN EN 304: Heizkessel – Prüfregeln für Heizkessel mit Ölzerstäubungsbrennern. Berlin: Beuth Verlag

[75] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2009): DIN EN 14774-3: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 3: Wassergehalt in allgemeinen Analysenproben; Deutsche Fassung EN 14774-3. 2009. Berlin: Beuth Verlag

[76] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2009): DIN EN 14775: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes; Deutsche Fassung EN 14775. 2009. Berlin: Beuth Verlag

[77] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2009): DIN EN 14918: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Heizwertes; Deutsche Fassung EN 14918. 2009. Berlin: Beuth Verlag

[78] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2009): DIN EN 15103: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung der Schüttdichte; Deutsche Fassung EN 15103. 2009. Berlin: Beuth Verlag

[79] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2011): DIN EN 15104: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff – Instrumentelle Verfahren; Deutsche Fassung EN 15104. 2011. Berlin: Beuth Verlag

[80] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2011): DIN EN 15289: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor; Deutsche Fassung EN 15289. 2011. Berlin: Beuth Verlag

[81] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (2011): DIN EN 15290: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung von Hauptelementen – Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti; Deutsche Fassung EN 15290. 2011. Berlin: Beuth Verlag

[82] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2010): DIN EN ISO 5983-2, Futtermittel – Bestimmung des Stickstoffgehaltes und Berechnung des Rohproteingehaltes – Teil 2 Blockaufschluss- und Dampfdestillationsverfahren (ISO 5983-2:2009); Deutsche Fassung EN ISO 5983-2:2009. Berlin: Beuth Verlag

[83] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2007): DIN EN 15376, Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Ethanol als Verwendung als Blendkomponente in Ottokraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag, 8 Seiten

[84] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2009): DIN EN 15376, Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Ethanol als Verwendung als Blendkomponente in Ottokraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag, 8 Seiten

[85] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2011): DIN EN 15376, Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Ethanol als Verwendung als Blendkomponente in Ottokraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren. Berlin: Beuth Verlag, 8 Seiten

[86] DHILLON, S. L.; SHAPTER, F. M.; HENRY, R. J.; CORDEIRO, G.; IZQUIERDO, L.; LESS, L. S.; 2007: Domestication to crop improvements: Genetic resources for Sorghum and Saccharum (Andropogoneae). In: Ann. Bot., Nr. 100, S. 975-989

[87] DOBBS, T. L. (1984): Alternative crops for ethanol fuel production: Agronomic, processing and economic considerations. Research Report 84-1, Economics Department, South Dakota State University

[88] DOGARIS, I.; KARAPATI, S.; MAMMA, D.; KALOGERIS, E.; KEKOS, D. (2009): Hydrothermal Processing and Enzymatic Hydrolysis of Sorghum Bagasse for Fermentable Carbohydrates Production. In: Bioresource Technology, Vol. 100, S.6543-6549

[89] DÖRING, G.; SCHILCHER, A.; STROBL, M.; SCHLEICHER, R.; SEIDL, M.; MITTERLEITNER, J. (2010): Verfahren zum Transport von Biomasse. Biogas Forum Bayern, Nr. II – 6/2010, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (Hrsg.), Online im Internet: http://www.biogas-forum-bayern.de [02.06.2010]

[90] DÖRING, G.; SCHLEICHER, R. (2010): Verfahrensalternativen für Biomassetransporte. Biogas Forum Bayern, Nr. II – 9/2010, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (Hrsg.), Online im Internet: http://www.biogas-forum-bayern.de [02.06.2010]

[91] DOTT, W.; HEINZEL, M.; UND TRÜPER, H. G. (1977): Sulfite formation by wine yeasts. In: Archives of Microbiology, Jg. 112, S. 283-285

[92] DOWE, N.; MCMILLAN, J. (2001): SSF Experimental Protocols – Lignocellulosic Biomass Hydrolysis and Fermentation. Laboratory Analytical Procedure (LAP), Technical Report NREL/TP-510-42630

[93] DURST, L.; EBERLEIN, M. (2010): Bereitung hochwertiger Silage - die Grundlage für hohen Biogasertrag. Biogas Forum Bayern, Nr. II – 7/2010, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (Hrsg.), Online im Internet: http://www.biogas-forum-bayern.de [02.06.2010]

[94] DÜSSEL, R. (1996): Zerlegung azeotroper Gemische durch Batch-Rektifikation. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3, Nr. 476. Düsseldorf: VDI Verlag, 148 Seiten, ISBN 3-183-68603-1

[95] ECKERT, F. (2007): Alkohol Jahrbuch 2007. Balve: Zimmermann Druck + Verlag, 352 Seiten, ISBN 3-890-53110-6

[96] EGHBAL, K. (1993): Einfluss von Standort und variierten Stickstoffgaben auf die Ertragsleistung und Biomassequalität von Zuckerhirse als möglicher nachwachsender Energierohstoff. In: Agribiol. Res., Jg. 46, Nr. 1, S.1-9

[97] EILAND, B. R. (1982): Losses of fermentable sugar in Sweet Sorghum during storage. In: Sugar Journal 45, S. 17-21

[98] EILAND, B. R. (1983): Losses of fermentable sugar in Sweet Sorghum during storage. Transactions of the ASAE 26; 5

[99] EILAND, B. R.; CLAYTON, J. E. (1984): Storage characteristics of sweet sorghum. ASAE Paper No. 84-3579

[100] EL BASSAM, N.; DAMBROTH, M.; RÜHL, G. (1987): Die Zuckerhirse – Eine neue Rohstoffbasis für die Zuckerindustrie. In: Landbauforschung Völkenrode, 37. Jahrgang, S. 201-206

[101] EUROPÄISCHE UNION (2008): Verordnung (EG) Nr. 121/2008 der Kommission vom 11. Februar 2008 zur Festlegung der Analysemethode zur Bestimmung des Stärkegehalts in Zubereitungen von der zur Fütterung verwendeten Art (KN-Code 2309), 6 Seiten

[102] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (2011): Basisdaten Bioenergie Deutschland. Stand: September 2011. URL: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_469-basisdaten_9x16_web.pdf (Stand: 25.07.2012)

[103] FERNANDEZ, J.; CURT, M.D.; MARTINEZ, M. (1992): Biomass Production of Sweet Sorghum cv. Keller in Relation to Water Supply. In: HALL, D.O.; GRASSI, G.; SCHEER, H. (Hrsg.): Biomass for Energy and Industry: Proceedings of the 7th International E. C. Conference. Florence, Italy: S. 661-665

[104] FORTMEIER, R.; SCHUBERT, S. (1995): Storage of Non-structural Carbohydrates in Sweet sorghum [sorghum bicolor (L.) Moench] Comparison of Sterile and Fertile Lines. J. Agronomy & Crop Science, Jg. 175, S. 189-193

[105] FRANKE, M.; WEGER, A.; FAULSTICH, M. (2008): Dezentrale Produktion von Bioethanol und Biogas. In: TH AACHEN, INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.): 2. Aachener Kongress Dezentrale Infrastruktur Wasser-Energie-Abfall am 28.10 und 29.10.2008. Schriftreihe Gewässerschutz – Wasser – Abwasser, Band 215. Institut für Siedlungswasserwirtschaft RWTH Aachen, Kapitel 3, S. 1-13

[106] FRIEDL, A.; PFEIFFER, M.; WUKOVITS, W.; DANZINGER, G.; POBER, M.; BECKMANN, G.; HENNESSCHLÄGER, M.; PRECHTL, M. (2006): Polygeneration Bruck/Leitha. Produktion alternativer Treibstoffe, Wärme, Strom & nichtenergetischer Produkte unter Berücksichtigung der Optimierung der Gesamtenergiebilanz sowie der Materialflüsse. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Nr. 77, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.), 106 Seiten

[107] FÜRBETH, H. (1963): Vergleichende Untersuchungen über die Anbaumöglichkeiten von Sorghum-Variäteten im kontinentalen und gemäßigten Klima. Osteuropastudien der Hochschulen des Landes Hessen, Reihe I, Giessener Abhandlungen zur Agrar- und Wirtschaftsforschung des Europäischen Ostens; Nr. 27. Zugl.: Gießen, Justus-Liebig-Univ., Diss., 1963. Gießen: Kommissionsverlag Wilhelm Schmitz, 77 Seiten

[108] GALBE, M.; ZACCHI, G. (2007): Pretreatment of Lignocellulosic Materials for Efficient Bioethanol Production. In: Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, Jg. 108, S. 41-65

[109] GARRETT, R. H.; GRISHAM, C. M. (2010): Biochemistry. Vierte Auflage. Boston: Brooks/Cole, 1184 Seiten, ISBN 978-0-495-10935-8

[110] GARROTE, G.; DOMÌNGUEZ, H.; PARAJÒ, J. C. (2002): Interpretation of deacetylation and hemicelluloses treatments on the basis of the severity factor. In: Process Biochemistry, Jg. 37, S. 1067-1073

[111] GHOSE, T. K. (1987): Measurement of Cellulase activities. Pure and Applied Chemistry, Jg. 59, Nr. 2, S. 257-268

[112] GIBBONS, W. R.; WESTBY, C. A.; DOBBS, T. L. (1986): Intermediate-Scale, Semicontinuous Solid-Phase Fermentation Process for Production of Fuel Ethanol from Sweet Sorghum. In: Applied and Environmental Microbiology, Jg. 51, Nr. 1, S. 115-122

[113] GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A. (2010): Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: A review. In: Bioresource Technology, Jg. 101, S. 4980-4991

[114] GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A.; WYMAN, C. E. (2005): Refining sweet sorghum to ethanol and sugar: economic trade-offs in the context of North China. Bioresource Technology, Jg. 96, S. 985-1002

[115] GRAF, T.; REINHOLD, G. (2005): Betriebswirtschaftliche Aspekte der dezentralen Ölsaatenverarbeitung. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL) (Hrsg.): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung. 1st ed. Münster: Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, S. 122-129

[116] GRASSI, G.; CHIARAMONTI, D.; GRASSI, A.; AGTERBERG, A.; VORTMEYER, N.; RESTER, A.; GRIMM, H.-P.; HELM, P.; CODA, B.; LINDSTEDT, J.; NARDI, A.; CANTAFIO, L.; LAURETI, D., RANALLI, P.; FJÄLLSTRÖM, T.; CHAPELLE, J.; TROZ, P. O. DE; WOUTERS, H.; PAISNER, B. L.; MARRUCELLI, A.; GHERI, F.; MENGIJE, W.; XIANGJUN, Y.; WEI, D. (2002): Large Bio-ethanol Project from Sweet Sorghum in P. R. China and Italy (ECHI-T), Contract number ENK6-CT-2000-80130, Fifth Framework Programme, The European Commission Community Research. Florence: Energia Trasporti Agricoltura (ETA), 56 Seiten, ISBN 88-900442-6-8

[117] GRASSI, G.; MONCADA, P.; ZIBETTA, H. (1992): Sweet Sorghum – Promising Industrial Energy Crop. Recent developments in Europe. Report EUR-14684. Brussels, Luxembourg: Commission of the European Communities, 69 Seiten

[118] GROTE, K. H.; FELDHUSEM, J. (2007). Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau. 22.Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1844 Seiten, ISBN: 978-3-540497-14-1

[119] GYALAI-KORPOS, M.; FECZÁK, J.; RÉCZEY, K. (2008): Sweet sorghum juice an Bagasse as a possible feedstock for bioethanol production. Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszprem, Jg. 36, S. 43-48

[120] HARTMANN, A.; FRITZ, M. (2011): Anbautechnik Sorghumhirse – Eine Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenspektrums. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 69 S. (unveröffentlicht)

[121] HARTMANN, H.; BÖHM, T., MAIER, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.). Reihe „Materialien“, Nr. 154, München: BstfLU, 155 Seiten (Download: www.tfz.bayern.de)

[122] HARTMANN, H.; ROßMANN, P.; TUROWSKI, P.; ELLNER-SCHUBERT, F.; HOPF, N.; BIMÜLLER, A. (2007): Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte. Berichte aus dem TFZ, Nr. 13. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 126 S. (Download: www.tfz.bayern.de)

[123] HECKMANN, M. (2000): Die Verbesserung der Destillation durch hybride Systeme. In: Vakuum in Forschung und Praxis, Nr. 2, S. 108-111

[124] HENDRIKS, A.; ZEEMAN, G. (2009): Pretreaments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. In: Bioresource Technology, Jg. 100, S.10-18

[125] HENK, L. L.; LINDEN, J. C. (1996): Solid-State Production of Ethanol from Sorghum. In: Applied Biochemistry and Biotechnology 57/58, S. 489-501

[126] IANELLI, P.; RIVELLI, A.R.; SACCA, A. (1996): Adaptation and Productivity of new Varieties of Sweet Sorghum in Mediterranean Semi-Arid Environments. In: Chartier, P.; Ferrero, G.L.; Henius, U.M.; Hultberg, S.; Sachau, J.; Wiinblad, M. (Hrsg.): Biomass for Energy and the Environment: Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference. Copenhagen, Denmark: S. 589-591

[127] IBG MONFORTS OEKOTEC GMBH & CO. KG: Produktinformation. Online im Internet: http://www.oekotec.ibg-monforts.de/de/23.html [23.02.2010]

[128] IEA BIOENERGY TASK 39: Status of 2nd Generation Biofuels Demonstration Facilities. URL: http://demoplants.bioenergy2020.eu/projects/info/223. (Stand: 13.07.2012)

[129] INGLEDEW, W. M., AUSTIN, G. D., KRAUS, J. K. (2009): Commercial yeast production for the fuel ethanol and distilled beverage industries. In: Ingledew, W. M.; Kelsall, D. R.; Austi, G. D.; Kluhspies, C. (Hrsg.): The alcohol textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 5th Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 541 Seiten, ISBN 1-904-76165-5

[130] INTERNATIONAL ORGANISATION OF LEGAL METROLOGY (1975): International Recommendation No 22. Alcoholometry “International alcoholometric tables”. Paris: International Bureau of Legal Metrology, 71 Seiten, ISBN: 978-0-903778-20-6

[131] JACQUES, K. A.; LYONS, T. P.; KELSALL, D. R. (2003): The alcohol Textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 4th Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 448 Seiten, ISBN 1-897-67613-1

[132] JASBERGER, B. K.; MONTGOMERY, R. R.; ANDERSON, R. A. (1984) Preservation of sweet sorghum biomass. In: Scott, C. D. (Hrsg.): Fifth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals. Proceedings, held in Gatlinburg, Tennessee, May 10-13, 1983. New York, N. Y.: Wiley & Sons, S. 113-120

[133] JEFFRIES, T. W. (1985): Effects of Culture Conditions on the Fermentation of Xylose to Ethanol by Candida shehatae. Biotechnology and bioengineering symposium , Nr. 15, New York, N. Y.: Wiley & Sons, S. 149-166

[134] JOHN DEERE-CAMECO (2009): CAMECO SUGAR CANE HARVESTERS, Online im Internet: http://www.camecosugar.com [02.04.2009]

[135] JONES, R. R.; GREENFIELD, P. F. (1984): A review of yeast ionic nutrition, Part I: Growth and fermentation requirements. In: Process Biochemistry, Jg. 4, S. 48-60

[136] JONES, R. P.; PAMMENT, N.; GREENFIELD, P. F. (1981): Alcohol Fermentation by Yeasts: the Effect of Environmental and Other Variables. In: Process Biochemistry. Nr. 16; S. 42-49

[137] JORGENSEN, H.; KRISTENSEN, J. B.; FELBY, C. (2007): Enzymatic conversion of lignocellulose into fermentable sugars: challenges and opportunities. In: Biofuels Bioproducts and Biorefining, Jg. 1, Nr. 2, S. 119-134

[138] JULIUS-KÜHN-INSTITUT (2011): Roggen und Sorghum als alternative Energiepflanzen. http://www.jki.bund.de/no_cache/en/startseite/institute/zuechtungsforschung-landwirtschaft/41-vorteile-von-sorghum.html, [07.06.2011]

[139] JÚNIOR, M. M.; BATISTOTE, M.; CHILLI, E. M.; ERNANDES, J. R. (2009): Sucrose Fermentation by Brazilian Ethanol Production Yeasts in Media Containing Structurally Complex Nitrogen Sources. Journal of the Brewing Institute. Jg. 115, Nr. 3, S. 191-197

[140] KAAR, W. E.; HOLTZSAPPLE, M.T. (2000): Using lime pretreatment to facilitate the enzymatic hydrolysis of cornstover. In: Biomass and Bioenergy, Jg. 18, S. 189-199

[141] KABIR KAZI, F.; FORTMAN, J.; ANEX, R.; KOTHANDARAMAN, G.; HSU, D.; ADEN, A.; DUTTA, A. (2010): Technoeconomic analysis of biochemical scenarios for production of cellulosic ethanol, Technical Report, NREL/TP-6A2-46588, Gloden, Colorado

[142] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2009): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1030 Seiten, ISBN 978-3-540-85094-6

[143] KANEMASU, E. T; BARK, D. L.; CHIN CHOY, E. (1975): Effect of soil temperature on sorghum emergence. Plant and Soil, Jg. 43, Nr. 1-3. S. 411-417

[144] KARGI, F.; CURME, J. A. (1985): Solid-State Fermentation of Sweet Sorghum to Ethanol in a Rotary-Drum Fermentor. In: Biotechnology and Bioengineering, Jg. 27, Nr. 8, S. 1122-1125

[145] KARGI, F.; CURME, J. A.; SHEEHAN, J. J. (1985): Solid-State Fermentation of Sweet Sorghum to Ethanol. In: Biotechnology and Bioengineering, Jg. 27, Nr. 1, S. 34-40

[146] KAVANAGH, K; WHITTAKER, P. A. (1994): Application of the Melle-Boinot process to the fermentation of xylose by Pachysolen tannophilus. In: Appl Microbiol Biotechnol. Springer-Verlag, S. 28-31

[147] KELSALL, D. R.; LYONS, T. P. (2003): Grain dry milling and cooking procedures: extracting sugars in preparation for fermentation. In: JACQUES, K. A.; LYONS, T. P.; KELSALL, D. R. (Hrsg.): The alcohol textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 4th Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 441 Seiten, ISBN 1-897676-13-1

[148] KIM, J. G. (1982): Ertrags- und Stoffbildung einiger Sorten von Sorghum – Sudangras, Hybrid-Sorghum und Silomais in Abhängigkeit von Anbaumaßnahmen und Temperaturbedingungen. Dissertation, Weihenstephan

[149] KOMMISSION ZUR REINHALTUNG DER LUFT (KRDL) IM VDI UND DIN-NORMENAUSSCHUSS (2006): VDI 2066, Blatt 1: Messen von Partikeln; Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung; Übersicht, 11/2006. Berlin: Beuth

[150] KÖPPEN, S.; REINHARDT, G.; GÄRTNER, S. (2009): Assessment of energy and greenhouse gas inventories of Sweet Sorghum for first and second generation bioethanol. Environmental and natural resources series Nr. 30. Commissioned by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome

[151] KRESOVICH, S. (1981): Sweet Sorghum – Sorghum 335xide335ur (saccharatum group). In: Handbook of Biosolar Resources (Hrsg.: Zaborsky, O. R.). CRC Press, Boca Raton, Florida (U.S.A.), S. 147-156

[152] KRISHNAN, M. S.; XIA, Y.; TSAO, G. T.; KASTHURIKRISHNAN; SRINIVASAN, N.; COOKS, R. G. (1995): Process Engineering of High-Ethanol-Tolerance-Yeast for the Manufacture of Ethanol. In: Applied Biochemistry and Biotechnology, Jg. 51/52, S. 479-493

[153] KTBL KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (2010): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In KTBL-Heft 88, 2. überarbeitete Auflage. Darmstadt: KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 36 Seiten, ISBN 978-3-941583-42-9

[154] KUNDIYANA, D. K.; BELLMER, D. D.; HUHNKE, R. L.; WILKINS, M. R.; CLAYPOOL, P. L. (2010): Influence of temperature, pH and yeast on in-field production of ethanol from unsterilized sweet sorghum juice. In: Biomass and Bioenergy, Nr. 34, 1481-1486

[155] KÜNTZEL, U. (1990): Disappearance of sugar during ensiling of Sweet Sorghum. Unveröffentlichtes Manuskript, Institut für Grünland- und Futterpflanzen der FAL Braunschweig-Völkenrode

[156] KUNZE, W. (2007): Technologie der Brauer & Mälzer. Berlin: VLB Berlin, 1118 Seiten, ISBN: 978-3-921690-56-7

[157] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL) (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft, 14. Auflage Darmstadt: KTBL-Schriftenvertrieb im Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 1180 Seiten, ISBN 978-3-939371-91-5

[158] LALLEMAND ETHANOL TECHNOLOGY 1 (2010): Thermosacc® Dry, active dry yeast. Produktinformationsblatt, Handreichung

[159] LALLEMAND ETHANOL TECHNOLOGY 2 (2010): SuperstartTM, active dry yeast. Pro duktinformationsblatt. Handreichung

[160] LAMB, M. E.; BARGEN, K. V.; BASHFORD, L. L. (1982): Mechanical Expression of Sweet Sorghum Juice. ASAE Paper No. 82-3110, ASAE, St. Joseph, Michigan (U.S.A.), 20 Seiten

[161] LAOPAIBOON, L.; NUANPENG, S.; SRINOPHAKUN, P.; KLANRIT, P.; LAOPAIBOON, P. (2009): Ethanol from sweet sorghum juice using very high gravity technology: Effects of carbon and nitrogen supplementations. In: Bioresource Technology, Jg. 100, S. 4176-4182

[162] LAOPAIBOON, L.; THANONKEO, P.; JAISIL, P.; LAOPAIBOON, P. (2007): Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by Saccharomyces cerevisiae. In: World Journal of Microbiology and Biotechnology, Jg. 23, Nr. 10, S. 1497-1501

[163] LAPLACE, J. M.; DELGENES, J. P.; MOLETTA, R.; NAVARRO, J. M. (1991): Alcoholic fermentation of glucose and xylose by Pichia stipidis, Candida shehatae, Saccharomyces cerevisiae and Zymomonas mobilis: oxygen requirements as a key factor. In: Applied Microbiology and Biotechnology, Jg. 36, Nr. 2, S. 158-162

[164] LAPLACE, J. M.; DELGENES, J. P.; MOLETTA, R.; NAVARRO, J. M. (1993): Cofermentation of Glucose and Xylose to Ethanol by a Respiratory-Deficient Mutant of Saccharomyces cerevisiae Co-Cultivated with a Xylose-Fermenting Yeast. In: Journal of fermentation and bioengineering, Jg. 75, Nr. 3, S. 207-212

[165] LARSSON, S.; PALMQVIST, E.; HAHN-HÄGERDAL, B.; TENGBORG, C; STENBERG, K.; ZACCHI, G. (1999): The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. In: Enzyme Microbial. Technol., Jg. 24, S. 151-159

[166] LASER, M.; SCHULMAN, D.; ALLEN, S. G.; LICHWA, J.; ANTAL, M. J.; LYND, L. R. (2002): A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol. In: Bioresource Technology, Jg. 81, Nr. 1, S. 33-44

[167] LEBEAU, T.; JOUENNE, T.; JUNTER, G.-A. (1997): Simultaneous fermentation of glucose and xylose by pure and mixed cultures of Saccharomyces cerevisiae and Candida shehatae immobilized in a two-chambered bioreactor. In: Enzyme and Microbial Technology, Jg. 21, Nr. 4, S. 265-272

[168] LEBEAU, T.; JOUENNE, T.; JUNTER, G.-A. (1998): Continuous alcoholic fermentation of glucose/xylose mixtures by co-immobilized Saccharomyces cerevisiae and Candida shehatae. In: Applied Microbiology and Biotechnology, Jg. 50, Nr. 3, S. 309-313

[169] LEGWAILA, G. M; BALOLE, T. V; KARIKARI, S. K (2003): Review of sweet sorghum: a potential cash and forage crop in Botswana. In: UNISWA Journal of Agriculture 12.

[170] LEIBLE, L. (1986): Ertragspotential von Topinambur, Zuckerhirse und Sonnenblume für die Bereitstellung fermentierbarer Zucker resp. Öl unter besonderer Berücksichtigung der N-Düngung. Dissertation. Universität Hohenheim

[171] LEIBLE, L.; KAHNT, G. (1991): Untersuchungen zum Einfluss von Standort, Saatstärke, N-Düngung, Sorte und Erntezeitpunkt auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Zuckerhirse. In: J. Agronomy & Crop Science, Jg. 166, S. 8-18

[172] LEVINE, A. S; FELLERS, C. R. (1940): Action of Acetic Acid in Food Spoilage Microorganisms. In: J. Bacteriol., Jg. 39, S. 499-515

[173] LI DAJUE (1997): Developing sweet sorghum to accept the challenge problems on food, energy and environment in the 21st century. Proceedings First International Sweet Sorghum Conference. Beijing, China: S. 19-34

[174] LINDE, M.; GALBE, M.; ZACCHI, G. (2006): Simultaneous saccharification and fermentation of steam-pretreted barley straw at low enzyme loadings and low yeast concentration. In: Enzyme and Microbial Technology, Jg. 40, S. 1100-1107

[175] LINDGREN, S.; LINGVALL, P.; KASPERSSON, A.; DE KARTZOW, A.; RYDBERG, E. (1983): Effect of Inoculants, Grain and Formic Acid on Silage Fermentation. Swedish Journal of Agricultural Research, Jg. 13, S. 91-100

[176] MACESIC, D.; UHER, D.; STAFA, Z. (2008): Biomass Production and Ethanol Potential from Sweet Sorghum in Croatia. VII Alps-Adria Scientific Workshop. Stara Lesna, Slovakia: S. 527-530

[177] MAMMA, D.; CHRISTAKOPOULOS, P.; KOULLAS, D.; KEKOS, D.; MACRIS, B. J.; KOUKIOS, E. (1995): An alternative approach to the bioconversion of sweet sorghum carbohydrates to ethanol. In: Biomass and Bioenergy, Jg. 8, Nr. 2, S. 99-103

[178] MARTÍN, C.; GONZÁLEZ, Y.; FERNÁNDEZ, T.; THOMSEN, A. B. (1996): Investigation of cellulose convertibility and ethanolic fermentation of sugarcane bagasse pretreated by wet oxidation and steam explosion. Journal of Chemical Technology and Biotechnologym Jg. 81, S.1669-1677

[179] MASCHINEN- UND BETRIEBSHILFSRING STRAUBING-BOGEN E. V. (2012): Flächenleistung, Technik und Verrechnungssatz von überbetrieblich durchgeführter Silomais- bzw. Futterhirseernte und Transport, persönliche Mitteilung vom 20.03.2012

[180] MASCHINENFABRIK REINARTZ GMBH & CO. KG: Produktinformation. Online im Internet: http://www.reinartz.de/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=28&lang=de [23.02.2010]

[181] MASI, C. E. A.; MARANVILLE, J. W. (1998): Evaluation of sorghum root branching using fractals.In: J. Agric. Camb. Jg. 131, S. 259-265

[182] MASSACCI, A.; BATTISTELLI, A.; LORETO, F.; (1996): Effect of Drought Stress on Photosynthetic Characteristics, Growth and Sugar Accumulation of Field-grown Sweet Sorghum. In: Aust. J. Plant Physiol., Jg. 23, S. 331-340

[183] MASTRORILLI, M.;KATERJI, N.; RANA, G. (1999): Productivity and water use efficiency of sweet sorghum as affected by soil water deficit occurring at different vegetative growth stages. European Journal of Agronomy, Jg. 11 S. 207–215

[184] MENGE-HARTMANN, U.; SOUFAN, W.; GREEF, J.-M. (2009): Einfluss von Pflanzenentwicklungsstadium und N-Düngung auf Gehalte wasserlöslicher Kohlenhydrate und von Fruktanen bei unterschiedlichen Sorten von Lolium perenne. Journal für Kulturpflanzen, Jg 61, Nr.10, S. 365-374

[185] MERSMANN, A.; KIND, M.; STICHLMAIR, J. (2005): Thermische Verfahrenstechnik – Grundlagen und Methoden. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 644 Seiten, ISBN 978-3-540-23648-1

[186] MONROE, G. E.; NICHOLS, R. L.; BRYAN, W. L.; SUMNER, H. R. (1984): Sweet Sorghum juice extraction with 3-roll mills. In: Transactions of the ASAE, Jg. 27, S. 651-654

[187] MONROE, G. E.; SUMNER, H. R. (1983): A harvesting and handling system for Sweet Sorghum. ASAE Paper No. 83-3551

[188] MORRIS, D. R.; MCCORMICK, M. E. (1994): Ensiling Properties of sweet sorghum. Communications in soil science and plant analysis, Jg. 25, Nr. 15, S. 2583–2595

[189] MOSIER, N. S.; HENDRICKSON, R.; BREWER, M.; HO, N.; SEDLAK, M.; DRESHEL, R.; WELCH, G.; DIEN, B. S.; ADEN.; LADISCH, M. R. (2005): Industrial scale-up of pH-controlled liquid hot water pretreatment of corn fiber for fuel ethanol production. In: Applied Biochemistry and Biotechnology, Jg. 125, S. 77-97

[190] MÜCKL, M. (2006): Alkoholerzeugung in einer bestehenden landwirtschaftlichen Brennerei im 3-Schichtbetrieb. Ergebnisbericht, Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Land- und Ernährungswirtschaft, Freising, 128 Seiten

[191] MURRAY, S. C.; ROONEY, W. L.; HAMBLIN, T.; MITCHELL, S. E.; KRESOVICH, S.; (2009): Sweet Sorghum Genetic Diversity and Association Mapping for Brix and Height. In: The Plant Genome, Jg. 2, Nr. 1, S.48-62

[192] NARENDRANATH, N. V.; THOMAS, K. C.; INGLEDEW, W. M. (2001): Effects of acetic acid and lactic acid on the growth of *Saccharomyces cerevisiae* in a minimal medium. In: Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, Jg. 26, S. 171-177

[193] NATHAN, R.A.; (1978): Fuels form Sugar Crops. System Study for Sugarcane, Sweet Sorghum, and Sugar Beets. Honululu, Hawaii: University Press of the Pacific, 137 Seiten, ISBN: 1-4102-2315-9

[194] NICHOLAS, N. N.; MONCEAUS, D. A.; DIEN, B. S.; BOTHAST, R. J. (2008): Production of Ethanol from Corn and Sugarcane. In: Bioenergy. Chapter 1. (Hrsg.: Wall et al.), ASM Press Washington D.C. (U.S.A.), S. 3-15, ISBN 1-555-81478-6

[195] NORMAG (2009): Technische Daten zu Füllkörperschüttungen. NORMAG Labor- und Prozesstechnik GmbH. Handreichung

[196] NUANPENG, S.; LAOPAIBOON, L.; SRINOPHAKUN, P.; KLANRIT, P.; JAISIL, P.; LAOPAIBOON, P. (2011): Ethanol production from sweet sorghum juice under very high gravity conditions: Batch, repeated-batch and scale up fermentation. In: Electronic Journal of Biotechnology. Jg. 14, Nr. 1, 12 Seiten

[197] NUESE, G. A.; HUNT, D. R. (1983): Field Harvest of Sweet Sorghum Juice. ASAE – American Society of Agricultural Engineers, Nr. 0001-2351/83, S. 656 – 660

[198] NUESE, G. A.; HUNT, D. R. (1983): Sweet Sorghum juice harvesting. Transactions of the ASAE 001-2351/83

[199] O'KENNEDY, K.; REID, G. (2008): Yeast nutrient management in winemaking. The Australian & New Zealand Grapegrower & Winemaker, Nr. 537, S. 92-100

[200] OBERNBERGER, I.; THEK, G.: The Pellet Handbook. London, Washington: Earthscan Ltd., 2010, ISBN 978-1-84407-631-4

[201] OLBRICH, H. (1979): Zwei Marginalfragen: Was ist Bagasse? Wozu dient sie hauptsächlich?. In: Die Branntweinwirtschaft, Heft 2

[202] OLOFSSON, K.; BETILSSON, M.; LIDÉN, G. (2008): A short review on SSF – an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. In: Biotechnology for Biofuels, Jg. 1, Nr.7, 14 Seiten

[203] OSTERTAG, J. (2010): Beprobung von Mais- und Grassilagen, persönliche Mitteilung vom 30.06.2010

[204] OVEREND, R. P.; CHORNET, E. (1987): Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A, Jg. 321, S. 523-536

[205] PALMQVIST, E.; GRAGE, H.; MEINANDER, N.Q.; HAHN-HÄGERDAL B. (1999): Main and interaction effects of acetic acid, furfural and phydroxybenzoic acid on growth and ethanol productivity of yeasts. In: Biotechnol Bioeng, Jg. 63, S. 46-55

[206] PALMQVIST, E.; HAHN-HÄGERDAL, B. (2000): Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: Inhibitors and mechanisms of inhibition. In: Bioresource Technology, Jg. 74, S. 25-33

[207] PAMPULHA, M. E.; LOUREIRO-DIAS, M. C. (1989): Combined effect of acetic acid, pH and ethanol on intracellular pH of fermenting yeast. In: Appl Microbiol Biotechnol, Jg. 20, S. 286–293

[208] PARI, L. (1988): Raccolta meccanica del sorgo zuccherina. Sonderdruck aus: Machine el motori agricoli – IMA, No. 9

[209] PARI, L. (1990): Present development of Sweet Sorghum mechanization. In: Sweet Sorghum, Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research and Development, Brüssel

[210] PARI, L.; GRASSI, G.; SÉNÉCHAL, S.; CAPACCIOLI, S.; COCCHI, M. (2008): State of the art: Harvesting, storage and logistic of the sweet sorghum. In: Schmid, J.; Grimm, H.-P.; Helm, P.; Grassi, A. (Hrsg.): 16th European Biomass Conference & Exhibition – from research to industry and markets. Proceedings of the International Conference held in Valencia, Spain, 2-6 June 2008. Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies, S. 174-177, ISBN 978-88-89407-58-1

[211] PASQUALI, L. (1997): Innovative Harvesting and Sugar-Juice Separating Machine for Sweet Sorghum and Fibre Sorghum, Online im Internet: http://biomatnet.org/secure/Fair/F329.htm [22.06.2009]

[212] PERIS-TORTAJADA, M. (2000): HPLC Detection of Carbohydrates in Foods. In: Nollet, L. M. L (Hrsg.): Food Analysis by HPLC. 2nd Edition. New York: Marcel Dekker Inc., 1068 Seiten, ISBN 978-0824-78460-7

[213] PETRINI, C.; BELLETTI, A.; SALAMINI, F. (1993): Accumulation and distribution of dry matter and soluble carbohydrate in two sweet sorghum cultivars: influence of sowing date and harvesting time. Eur. In: J. Agron. Jg. 2, Nr. 3; S. 185-192

[214] PHOLSEN, S.; SUKSRI, A. (2007): Effects of Phosphorus and Potassium on Growth, Yield and fodder Quality of IS 23585 Forage Sorghum Cultivar (Sorghum bicolor L. Moench). In: Pakistan Journal of Biological Sciences. Jg. 10, Nr. 10. S. 1604-1610

[215] POLLACH, G. (1988): Zuckerhirse – Zichorie – Topinambur, Alternative Rohstoffe für die Zuckerfabrik? Vortrag im Zuckerinstitut der Technischen Universität Berlin anläßlich eines zuckertechnischen Kolloquiums, 34 Seiten

[216] POWER, R. F. (2003): Enzymatic conversion of starch to fermentable sugars. In: Jacques, K. A.; Lyons, T. P.; Kelsall, D. R. (Hrsg.): The alcohol textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 4th Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 441 Seiten, ISBN 1-897676-13-1

[217] REHM, S.; ESPIG, G. (1984): Die Kulturpflanzen der Tropen und Subtropen. Anbau, wirtschaftliche Bedeutung, Verwertung. 2. Aufl. Stuttgart: Ulmer, 504 Seiten, ISBN 3-8001-4108-6

[218] REIN, P. (2007): Cane Sugar engineering. 1. Auflage, Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens, 768 Seiten, ISBN 3-870-40110-9

[219] REMMELE, E. (2009): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. 2. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 88 Seiten, ISBN 978-3-9803927-9-2

[220] RICAUD, R.; MARTIN, F. A.; COCHRAN, B. J. (1981): Sweet Sorghum for Biomass and Alcohol Production. In: Louisiana Agriculture 24, H. 4, S. 18-19

[221] RIEMENSCHNEIDER, H. (1983): Entfeuchten durch Pressen. Dissertation. Universität Stuttgart (TH). Stuttgart: Behr-Fotodruck, 171 Seiten

[222] RITTER, K. B.; MCINTYRE, C. L.; GODWIN, I. D.; JORDAN, D. R.; CHAPMAN, S. C. (2007): An assessment of the genetic relationship between sweet and grain sorghums, within Sorghum biocolor ssp. Bicolor (L.) Moench, using AFLP markers. In: Euphytica, Jg. 157, Nr. 1-2, S. 161-176

[223] ROEHR, M. (2000): The biotechnology of ethanol. Weinheim: WILEY-VCH-Verlag, 232 Seiten, ISBN 3-527-30199-2

[224] ROHOWSKY, B.; HÄßLER, T.; GLADIS, A.; REMMELE, E.; SCHIEDER, D.; FAULSTICH, M. (2012): Feasibility of simultaneous saccharification and juice co-fermentation on hydrothermal pretreated sweet sorghum bagasse for ethanol production. In: Applied Energy (in Press)

[225] RÖHRICHT, C.; ZANDER, D.; BARTHELMES, G.; MÄRTIN, M.; KNOBLAUCH, S.; WAGNER, M.; FRITZ, M.; HARTMANN, A. (2010): Sorghumhirsen. Fortschritt. Joule – Agrarenergie, Technik, Politik, Wirtschaft, Jg. 3, Nr. 2, S. 80-83

[226] ROLLER, A.; BLOCH, D.; STICKSEL, E.; FRITZ, M. (2012): Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff. Sortenscreening und Anbauszenarien. Berichte aus dem TFZ, Nr. 28. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 158 S. (Download: www.tfz.bayern.de)

[227] ROLLER, A.; STICKSEL, E. (2007): Hirse für Biogas anbauen. In:DLZ - Agrarmagagzin, Nr 10, S. 24-27

[228] ROLZ, C.; CABRERA, S.; GARCIA, R. (1979): Ethanol from Sugar Cane: EX-FERM Concept. In: Biotechnology and Bioengineering, Jg. 21, Nr. 12, S. 2347-2349

[229] ROßBERG, D.; MICHEL, V.; NEUKAMPF, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd., Jg. 59, Nr. 7, S. 155-161

[230] ROSSELL, C. E. (1988). Sugar cane Processing to Ethanol for Fuel Purposes. In: Clark, M. A.; Godshall, M. A. (Hrsg.): Chemistry and Processing of Sugarbeet and Sugar cane. Amsterdam: Elsevier, S. 349 - 366, ISBN 978-0-444430-20-5

[231] RUSSEL, I. (2003): Understanding of yeast fundamentals. In: Jacques, K. A.; Lyons, T. P.; Kelsall, D. R. (Hrsg.): The alcohol textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 4TH Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 441 Seiten, ISBN 1-897676-13-1

[232] RUSSEL, I. (2003): Understanding yeast fundamentals. In: Jacques, K. A.; Lyons, T. P.; Kelsall, D. R. (Hrsg.): The alcohol textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 4th Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 441 Seiten, ISBN 1-897676-13-1

[233] SAHARA, J.; SAWADA, T.; HIDAKA, M.; TAKEDA, I.; ABE, A. (1979): Comparison of Chemical Composition and Nutiritve Value in Grain Sorghum and Other Forage Plants such as Sweet Sorghum, Corn and Italian Ryegrass. J. Japan. Grassl. Sci. Jg. 24. S. 345-352

[234] SAHEB, D.S.; SINGH, H.K.; SINGH, C.B. (1997): Effect of plant population and nitrogen on biomass and juice yield of sweet sorghum (Sorghum bicolor). Indian J. Agron., Jg. 42, Nr. 4, S. 634-636

[235] SAHM, H.; BRINGER-MEYER, S. (1987): Ethanolherstellung mit Bakterien. Chemie Ingenieur Technik, Jg. 59, Nr. 8, S. 695-700

[236] SALZBRUNN, W. (1982): Ethanol aus Zuckerhirse in Österreich. 5. Symposium Technische Mikrobiologie, Berlin, Institut für Gärungsgewerbe und Biotechnologie, Dellweg, H. (Hrsg.), S. 298-304

[237] SANJEEVREDDI G. REDDI (2006): Studies on Production Potential of Sweet Sorghum [Sorghum bicolor (l.) Moench] Gentoypes for Grain and Ethanol Production as Influenced by Management Practices. Dissertation. Department of Agronomy, University of Agricultural Sciences, Dharwad, India. 197 Seiten

[238] SARATH, G. MITCHELL R.B. SATTLER S.E. FUNNELL D. PEDERSEN J.F. GRAYBOSCH R.A. VOGEL K.P (2008): Opportunities and roadblocks in utilizing forages and small grains for liquid fuels. In: Journal Ind Microbiol Biotechnol Jg. 35, Nr.5, S. 343–354

[239] SASSNER, P.; GALBE, M.; ZACCHI, G. (2006): Bioethanol production based on simultaneous saccharification and fermentation of steam-pretreated Salix at high dry-matter content. In: Enzyme and Microbial Technology, Jg. 39, S. 756-762

[240] SCHAFFERT, R. (2008): Development of cultivars for industrial processing/Ethanol production in Brazil - International workshop on Sorghum for biofuels (Houston/Texas), Online im Internet: http://www.ars.usda.gov/meetings/Sorghum/presentations/schaffert.pdf [18.06.2009]

[241] SCHIEDER, D.; ROHOWSKY, B.; FAULSTICH, M.; SIEBER, V. (2010): Bioethanol der zweiten Generation – wo stehen wir? In: OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT E. V. (Hrsg.): Bioenergie, Festbrennstoffe, Flüssigkraftstoffe, Biogas. Neunzehntes Symposium (Kloster Banz, 25.-26. November 2010). Regensburg: OTTI, S. 137-142, ISBN 978-3-941785-37-3

[242] SCHLEGEL, H. G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie. 7. überarbeitete Auflage, Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 634 Seiten, ISBN 3-134-44607-3

[243] SCHMIDT, J.; SIPOCZ, J.; KASZÁS, I.; SZAKÁCS, G.; GYEPES, A.; TENGERDY, R. P. (1997): Preservation of Sugar Content in Ensiled Sweet Sorghum. In: Bioresource Technology, Jg. 60, S. 9-13

[244] SCHMITZ, N. (2003): Bioethanol in Deutschland. Schriftreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 21, Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH, 358 Seiten, ISBN 3-784-33217-X

[245] SCHOBER, C. (2008): Untersuchungen zum Einsatz technischer und mikrobiell hergestellter Enzymsysteme zur Hydrolyse der Lingnocellulose in Maissilage. 1. Auflage, Berlin: Logos Verlag, 159 Seiten, ISBN 3-832-52049-6

[246] SCHÜTTE, A. (1991): Bewertung der Stickstoffdynamik und Abschätzung von Nitratausträgen (anhand von Nmin-Daten) bei verschiedenen Varianten des Zuckerhirseanbaus. Dissertation, Fachbereich Landwirtschaft, Gesamthochschule Kassel, 127 Seiten

[247] SEABRA, J. E. A; MACEDO, I. C (2011): Comperative analysis for power and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. In: Energy Policy, Jg. 39, S. 421-428

[248] SEEBALUCK, V.; MOHEE, R.; SOBHANBABU, P. R. K.; ROSILLO-CALLE, F.; LEAL, M. R. L. V.; JOHNSON, F. X. (2008): Biological conversion. In: Bioenergy for sustainable development and global competiveness. Stockholm: Stockholm Enviromental Institute, S. 54, ISBN 978-91-86125-01-1

[249] SENN, T. (2003): Die Produktion von Bioethanol als Treibstoff unter dem Aspekt der Energie-, Kosten- und Ökobilanz. Fachtagung „Regenerative Kraftstoffe“, 13./14. November 2003, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart, S. 87-98, Online im Internet: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2003-2/ws2003-2_02_03.pdf [22.06.2009]

[250] SENN, T., LUCA, S. F. (2002): Studie zur Bioethanolproduktion aus Getreide in Anlagen mit einer Jahres-Produktionskapazität von 2, 5 und 9 Mio. Litern. Bundesverband landwirtschaftliche Rohstoffe verarbeitende Brennereien e.V. unter Beteiligung des Bundesverbandes Deutscher Kartoffelbrenner e.V., 48 Seiten, Online im Internet: https://www.uni-hohenheim.de/gaerung/dateien/Gesamtstudie%20120503.pdf [22.06.2009]

[251] SHEN, F.; LIU, R. (2009): Research on Solid-State Ethanol Fermentation Using Dry Sweet Sorghum Stalk Particles with Active Dry Yeast. In: Energy & Fuels, Jg. 23, Nr. 1, S. 519-525

[252] SHIRINGANI, A. L. (2009): Identification of genomic regions of Sorghum bicolor (L.) Moench linked to biofuel-related traits in grain x sweet sorghum recombinant inbred lines. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Giessen, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement, 103 Seiten

[253] SINGH, B.R.; SINGH, D.P. (1995): Agronomic and physiological response of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. Field Crops Research, Jg. 42, S. 57-67

[254] SIPOS, B.; RECZEY, J.; SOMORAI, Z.; KADAR, Z.; DIENES, D.; RECZEY, K. (2009): Sweet Sorghum as feedstock for Ethanol Production: Enzymatic Hydrolysis of Steam-Pretreated Bagasse. In: Applied Biochemistry and Biotechnology, Jg. 153, Nr. 1-3, S. 151-161

[255] SLUITER, A.; HAMES, B.; HYMAN, D.; PAYNE, C; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER, J.;TEMPLETON, D.; WOLFE, J. (2008): Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Samples. Laboratory Analytical Procedure (LAP), Technical Report NREL/TP 510-42621

[256] SLUITER, A.; HAMES, B.; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER J.; TEMPLETON, D.; CROCKER, D. (2006): Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory Analytical Protocol, National Renewable Energy Laboratory, 16 Seiten

[257] SLUITER, A.; HAMES, B.; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER, J.; TEMPLETON, D. (2005): Determination of Ash in Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP), Technical Report NREL/TP 510-42618

[258] SLUITER, A.; HAMES, B.; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER, J.; TEMPLETON, D. (2005): Determination of Ash in Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP), Technical Report NREL/TP 510-42622

[259] SLUITER, A.; HAMES, B.; RUIZ, R.; SCARLATA, C.; SLUITER, J.; TEMPLETON, D.; CROCKER, D. (2008): Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP), Technical Report NREL/TP 510-42618

[260] SMITH, B. A.; REEVES, S. A. (1979): Sweet Sorghum Biomass, Part I: Agronomic Data, Part II: Plant Composition. In: Sugar y Azucar, Jg. 74, S. 23-35

[261] SMITH, B. A.; REEVES, S. A. (1981): Sweet Sorghum Biomass, Part III: Cultivars and plant constituents. In: Sugar y Azucar, Jg. 76, S. 40-50

[262] SMITH, G. A.; BUXTON, D. R. (1993): Temperate zone sweet sorghum ethanol production potential. In: Bioresource Technology, Jg. 43, S. 71-75

[263] SORGANOL – WHAT IS IT?, Online im Internet: http://www.sorganol.com [08.06.2009]

[264] SPIEKERS, H.; ATTENBERGER, E. (2009): Silagesickersaft und Gewässerschutz: Anfall und Verwertung von Silagesickersaft aus Futtermitteln und Biomasse für Biogasanlagen (LfL-Information). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), 6. Auflage, Dezember 2009, Online im Internet: http://www.lfl.bayern.de [02.06.2010]

[265] STANGL D. (2009): Zuckersaftgewinnung aus Zuckerhirse Forsten. Diplomarbeit, Regensburg: Hochschule Regensburg, 81 Seiten

[266] STEINBÜCHEL, A.; OPPERMANN-SANIO, F. B. (2003): Mikrobiologisches Praktikum, Versuche und Theorie. Heidelberg: Springer-Verlag, 447 Seiten, ISBN 3-540-44383-5

[267] STORHAS, W. (1994): Bioreaktoren und periphere Einrichtungen. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg Verlag, 337 Seiten, ISBN 3-528-06510-9

[268] STREHLER, A.; STÜTZLE, W.; BLUDAU, D. (1987): Zuckerhirse – Technische Vorschläge zur Gewinnung von Zucker, Futtermitteln und Ethanol aus Zuckerhirse in Bezug auf die Verfahrensschritte vom Anbau bis zum Endprodukt unter besonderer Beachtung der Wirtschaftlichkeit. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.)

[269] STÜRZER, M., STÜRZER, S. (2005): Brennereikonzept Gut Hüll. URL: http://www.carmen-ev.de/dt/energie/beispielprojekte/biotreibstoffe/netzwerk/downloads/e85_kongress/02_stuerzer.pdf [10.06.2012]

[270] SUKSRI, A. (1999): Some agronomic and physiological aspects in growing crops in. Northeast Thailand. 1st Ed. Khon Kaen University Press, Khon Kaen 40002, Thailand. 212 Seiten. Zitiert nach: PHOLSEN, S.; SUKSRI, A. (2007): Effects of Phosphorus and Potassium on Growth, Yield and fodder Quality of IS 23585 Forage Sorghum Cultivar (Sorghum bicolor L. Moench). Pakistan Journal of Biological Sciences. Jg. 10, Nr. 10. S. 1604-1610

[271] SUN, Y; CHENG, J. Y. (2002): Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. In: Bioresource Technology, Jg. 83, S. 1-11

[272] SWEETHANOL (2011): Early Manual. Diffusion of a sustainable EU model to produce 1st generation ethanol from sweet sorghum in decentralized plants. Poligrafiche San Marco S. a. s. Gorizia, Italien

[273] TAHERZADEH, M.J.; KEIKHOSRO, K. (2008): Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. In: Bioresources, Jg. 2, S. 707-738

[274] TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM (2010): Sortenversuch Standort Straubing 2011. Online im Internet: http://www.tfz.bayern.de [10.05.2012]

[275] THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2010): Untersuchung von N_{min}-Gehalt und N-Bilanz in Fruchtfolgen im Rahmen des N_{min}-Monitorings auf Dauertestflächen. Themenblatt-Nr. 21.13.210/2010

[276] TSUCHIHASHI, N.; GOTO, Y. (2004): Cultivation of Sweet Sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) and Determination of its Harvest Time to Make Use as the Raw Material for Fermentation, Practiced during Rainy Season in Dry Land of Indonesia. In: Plant Production Science, Nr. 7, S. 442-448

[277] TULLNER ZUCKERFABRIK (1984): Bericht über das Forschungsprojekt 1981/82 „Ethanol aus Zuckerhirse“

[278] TUROWSKI, P. (1991): Untersuchungen zur mechanischen Saftgewinnung aus Zuckerhirse. Diplomarbeit, Technische Universität München, Institut für Landtechnik, Weihenstephan, 88 Seiten

[279] TUSCHL, P. (1983): Vorstudie für die Optimierung eines Zuckerhirsesortimentes für die Gewinnung von Power Alkohol. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf

[280] ULLMANNS ENCYKLOPÄDIE DER TECHNISCHEN CHEMIE, 4. Auflage, Band 8

[281] ULTIMATE BIO FUELS; HYDERABAD, INDIEN; WILMINGTON, U.S.A., Online im Internet: http://www.electworld.com/clients/UBFwebsite/technology.html#sweet [01.03.2010]

[282] VAN DER POEL, P. W.; SCHIWECK, H.; SCHWARTZ, T. (2000): Zuckertechnologie: Rüben- und Rohrzuckergewinnung. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens, 1184 Seiten, ISBN 3-870-40070-6

[283] Van Walsum, G. P.; Allen, S. G.; Spencer, M. J.; Laser, M. S.; Antal, M. J. Jr., Lynd, L. R. (1996): Conversion of Lignocellulosics Pretreated with Liquid Hot Water to Ethanol. In: Applied Biochemistry and Biotechnology, Jg. 57/58, S. 157-170

[284] VANE, L. M. (2008): Separation technologies for the recovery and dehydration of alcohols from fermentation broths. In: Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Jg. 2, S. 553-588

[285] VDI 4630 (2006): Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Berlin: Beuth Verlag, 92 Seiten

[286] VDLUFA (1976): Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, Methodenbuch Band III, 3. Aufl. 1976, VDLUFA-Verlag Darmstadt, ISBN 3-922-71214-2

[287] VENTURI, P.; VENTURI, G. (2003): Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. Biomass and Bioenergy, 25, S. 235-255

[288] VERDUYN, C. (1991): Physiology of yeasts in relation to biomass yields. Antonie Van Leeuwenhoek, In: Biomedizin & Life Sciences, Volume 60, Numbers 3-4, S. 325-353

[289] VERDUYN, C.; POSTMA, E.; SCHEFFERS, W.A.; VAN DIJKEN, J.P. (1992): Effect of benzoic acid on metabolic fluxes in yeasts: a continuous culture study on the regulation of respiration and alcoholic fermentation. In: Yeast, Jg. 8, S.501-517

[290] VERTES, A. A.; QURESHI, N.; BLASCHEK, H. P.; YUKAWA, H. (2010): Biomass to Biofuels: Strategies for Global Industries. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 559 Seiten, ISBN 978-0-470-51312-5

[291] VIIKARI, L.; ALAPURANEN, M.; PURANEN, T.; VEHEMAANPERÄ, J.; SIIKA-AHO, M. (2007). Thermostable Enzymes in Lignocellulose Hydrolysis. In: Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, Jg. 108, S.121-145

[292] VOS, J BIEMOND, H. (1992): Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant: I. Leaf appearance, expansion, growth, life span of the leaves and stem branching. In: Annals of Botany Nr. 70, S. 27–35

[293] WAGNER, U.; IGELSPACHER, R. (2003): Ganzheitliche Systemanalyse zur Erzeugung und Anwendung von Bioethanol im Verkehrssektor. Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung „Gelbes Heft Nr. 72“, München: Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), 107 Seiten

[294] WALL, J. S.; ROSS, W. M. (1970): Sorghum production and utilization; major feed and food crops in agriculture and food series. The AVI Publishing Company Inc., Westport, Connecticut. 702 Seiten

[295] WETTER, C. (2004): Bioethanolerzeugung in landwirtschaftlichen Kleinbrennereien als Element einer zukunftsfähigen Energieversorgung. URL: https://www.fh-muenster.de/fb4/.../bioethanol_in_brennerei.pdf (Stand: 20.06.2012)

[296] WETTER, C.; BRÜGGING, E. (2004): Machbarkeitsstudie zur Bioethanolproduktion in landwirtschaftlichen Brennereien. Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie – Gebäude – Umwelt, 63 Seiten

[297] WETTER, C.; BRÜGGING, E.; DOETKOTTE, F. (2005): Machbarkeitsstudie zur Absolutierung von Bioethanol aus landwirtschaftlichen Brennereien. Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie – Gebäude – Umwelt, 67 Seiten

[298] WIEDENFELD, R.P (1984): Nutrient requirements and use efficiency by sweet sorghum. In: Energy in Agriculture 3, S. 49–59

[299] WIKLICKY, L. (1984): Biosprit: Der Tag X sollte nicht mehr fern sein. In: Agrozucker, Nr. 1, S. 4-5

[300] WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. (2010): Stillage characteriziation and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventinal and cellulosic feedstocks. In: Biomass & Bioenergy, Volume 19, S. 63-102

[301] WINGREN, A.; GALBE, M.; ZACCHI, G. (2007): Energy considerations for a SSF-based softwood ethanol plant. In: Bioresource Technology, Jg. 99, S. 2121-2131

[302] WOOD, T. M.; BHAT, K. M. (1988): Methods for measuring cellulase activities. In: Methods in enzymology, Band 160, S. 87-112

[303] WORLD ASSOCIATION OF BEET AND CANE GROWERS (2012): FlashMarket April – Mai 2012. URL: http://www.wabcg.org/

[304] WU, X.; STAGGENBORG, S.; PROPHETER, J. L.; ROONEY, W. L.; YU, J.; WANG, D. (2010): Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanolfermentation. In: Industrial Crops and Products, Jg. 31, Nr. 1, S. 164-170

[305] WYMAN, C. E. (1996): Handbook on Bioethanol: Production and Utilization. Washington: Tylor & Francis, 424 Seiten, ISBN 1-560-32553-4

[306] YU, J.; ZHANG, X.; TAN, T. (2007): An novel immobilization method of Saccharomyces cerevisiae to sorghum bagasse for ethanol production. In: Journal of Biotechnology, Jg. 129, Nr. 3, S. 415-420

[307] YU, J.; ZHANG, X.; TAN, T. (2008): Ethanol production by solid state fermentation of sweet sorghum using thermotolerant yeast strain. In: Fuel Processing Technology, Jg. 89, Nr. 11, S. 1056-1059

[308] ZANIN, GISELLA M.; SANTANA CESAR C.; BON, ELBA P. S.; GIORDANO, RAQUEL C. L.; MORAES, FLÁVIO F.; ANDRIETTA SILVIO R.; DE CARVALHO NETO, CARLOS COELHO; MACEDO ISAIAS C., FO. LAHR, DJALMA; RAMOS, LUIZ P., FONTANA, JOSÉ D. (2000): The Brazilian Bioethanol Program. In: Applied Biochemistry and Biotechnology, Jg. 84-86, S. 1147–1161

[309] ZEGADA-LIZARAZU, WALTER; MONTI, ANDREA (2012): Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock? A review on field management practices. In: Biomass and Bioenergy Nr. 40, S. 1–12.

[310] ZEISE, K.; FRITZ, M.; (2011): Sorghumhirsen als Biogassubstrat. Online im Internet: ttp://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/substratproduktion [05.06.2012]

[311] ZEISE, K.; HARTMANN, A.; FRITZ, M. (2011): Sorghum. Der universelle Rohstoffliefe-rant. TFZ-Kompakt, Nr. 4. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompe-tenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 15 Seiten

[312] ZELLER, F. J. (2000): Sorghum: Nutzung, Genetik, Züchtung. In: Bodenkultur, Jg. 51, Nr. 1, S. 71-85

[313] ZHANG, Z. (2009): Batch fermentation and fermentor design. In: Ingledew, W. M.; Kelsall, D. R.; Austi, G. D.; Kluhspies, C. (Hrsg.): The alcohol textbook. A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 5th Edition. Nottingham: Nottingham University Press, 541 Seiten, ISBN 1-904-76165-5

[314] ZHAO, Y. L.; DOLAT, A.; STEINBERGR, Y.; WANG, X.; OSMAN, A.; GUANG HUI, X. (2009): Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. In: Field Crops Research, Jg. 111, S. 55-64

[315] ZHAO, YA LI; STEINBERGER, YOSEF; SHI, MO; HAN, LI PU; XIE, GUANG HUI (2012): Changes in stem composition and harvested produce of sweet sorghum during the period from maturity to a sequence of delayed harvest dates. In: Biomass and Bio-energy Nr. 39, S. 261–273

[316] ZOECKLEIN, B. W.; FUGELSANG, K. C.; GUMP, B. H.; NURY, F. S. (1995): Laboratory procedures in Wine analysis and production. Chapman & Mall, New York, S. 445-446

[317] ZUCKERFORSCHUNG TULLN GMBH (1985): Bericht über die Arbeiten am Projekt „Ethanol aus Zuckerhirse“ im Zeitraum Oktober 1983 bis Februar 1985. Handrei-chung der Zuckerforschung Tulln GmbH, 21 Seiten

Anhang

Anhang 1: Schüttdichte von Zuckerhirse in Form von Stückgut und Häckselgut – Literaturangaben

Erntegutform	TM in %	Schüttdichte in kg/m³	Quelle
Stückgut			
10 cm	22,7	370	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
20 cm	24,0	227	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
25 cm	21,6	187	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
28 cm	k.A.	162 - 210	EILAND U. CLAYTON (1984) [99]
30 cm	24,0	150	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
30 cm	k.A.	218	MONROE U. SUMNER (1983) [187]
40 cm	23,2	112	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
50 cm	k.A.	119 - 126	EILAND U. CLAYTON (1984) [99]
Häckselgut			
4 mm lose	28,0	317	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
4 mm abgesetzt	28,0	423	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
6 mm lose	k.A.	427	MONROE U. SUMNER (1983) [187]
10 mm lose	26,5	292	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
10 mm abgesetzt	26,5	380	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
20 mm lose	26,5	238	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
20 mm abgesetzt	26,5	322	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
42 mm lose	25,0	231	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
42 mm abgesetzt	25,0	340	BLUDAU U. TUROWSKI (1992) [35]
60 mm lose	k.A.	398	MONROE U. SUMNER (1983) [187]

Anhang 2: Eigenschaften des Ausgangsmaterials zur Untersuchung verschiedener Presseinstellungen einer Seiherstab-Schneckenpresse (n=12)

	Trockenmasse in %	Zuckergehalt (Glucoseäquivalent) in % i.d. TM
Mittelwert	23,9	33,7
Median	23,8	33,7
Standardabweichung	0,5	1,0
Minimum	23,1	32,3
Maximum	24,9	35,2

Anhang 3: Eigenschaften des Ausgangsmaterials ausgewählter Vorversuche zur Darstellung der Abhängigkeit des Abpressgrades von der Trockenmasse des Ausgangsmaterials

Sorte	Ernte-datum	Häcksel-länge in mm	Trocken-masse in %	Zuckergehalt (Glucoseäquivalent) in % i.d. TM
Sugar Drip	25.10.2010	10	18,1 ± 0,0 (n=2)	32,9 ± 0,4 (n=2)
Umbrella	25.10.2010	10	17,0 ± 0,0 (n=2)	36,2 ± 0,3 (n=2)
Della	29.10.2010	10	19,5 ± 0,0 (n=2)	33,6 ± 0,0 (n=2)

Anhang 4: Gesamtzuckergehalt der Zuckerhirseproben von gebündelten Ganzpflanzen, Stückgut und Häckselgut im Außenlager im Versuchsjahr 2009

	Gesamtzuckergehalt in % i.d. TM						
Termin	A			B			C
	1	2	3	1	2	3	3
05.10.2009	45,25	45,96	46,70	45,25	45,96	46,70	22,90
13.10.2009	36,53	42,20	33,99	36,53	42,20	33,99	21,11
15.10.2009	---	---	---	---	---	---	4,97
17.10.2009	---	---	---	---	---	---	1,77
19.10.2009	---	---	---	---	---	---	1,28
26.10.2009	17,43	20,32	20,02	21,20	25,51	24,86	---
09.11.2009	11,50	15,47	22,67	16,47	21,43	19,20	---
07.12.2009	13,63	12,99	9,00	11,85	10,71	15,77	---
04.01.2010	6,13	5,10	5,45	9,62	11,24	5,91	---

A: Ganzpflanzen; B: Stückgut; C: Häckselgut
1: Sorte 'Keller'; 2: Sorte 'KN Morris'; 3: Sorte 'Sweet Bee'
T: thermische Behandlung von gebündelten Ganzpflanzen;
S: Säurebehandlung der Stängelenden von gebündelten Ganzpflanzen bzw. von Stückgut

Anhang 5: Gesamtzuckergehalt der Zuckerhirseproben von gebündelten Ganzpflanzen und Stückgut im Hallenlager im Versuchsjahr 2009

	Gesamtzuckergehalt in % i.d. TM								
Termin	A					B			
	1	1 T	2	2 S	3	1	2	2 S	3
05.10.2009	45,25	45,25	45,96	45,96	46,70	45,25	45,96	45,96	46,70
13.10.2009	36,53	36,53	42,20	42,20	33,99	36,53	42,20	42,20	33,99
27.10.2009	30,29	27,39	20,87	17,78	20,05	29,11	21,68	24,74	24,40
10.11.2009	27,70	13,70	20,42	13,84	22,66	24,87	21,95	19,65	23,73
08.12.2009	15,51	14,37	10,22	12,45	6,69	16,53	15,63	13,60	15,33
05.01.2010	6,49	11,67	4,75	3,99	7,50	11,26	9,02	6,41	11,47

A: Ganzpflanzen; B: Stückgut;
1: Sorte 'Keller'; 2: Sorte 'KN Morris'; 3: Sorte 'Sweet Bee'
T: thermische Behandlung von gebündelten Ganzpflanzen;
S: Säurebehandlung der Stängelenden von gebündelten Ganzpflanzen bzw. von Stückgut

Anhang 6: Gesamtzuckergehalt der Zuckerhirseproben von gebündelten Ganzpflanzen, Stückgut und Häckselgut im Kühllager im Versuchsjahr 2009

Termin	Gesamtzuckergehalt in % i.d. TM						
	A			B			C
	1	2	3	1	2	3	3
05.10.2009	45,25	45,96	46,70	45,25	45,96	46,70	22,90
13.10.2009	36,53	42,20	33,99	36,53	42,20	33,99	21,11
15.10.2009	---	---	---	---	---	---	6,19
17.10.2009	---	---	---	---	---	---	2,29
19.10.2009	---	---	---	---	---	---	0,88
23.10.2009	40,75	39,73	45,22	42,15	37,44	42,04	---
06.11.2009	24,01	27,08	28,43	27,00	23,94	21,82	---
04.12.2009	14,83	21,99	20,33	16,87	17,53	26,20	---
04.01.2010	12,95	9,40	13,86	10,91	7,68	12,84	---

A: Ganzpflanzen; B: Stückgut; C: Häckselgut
1: Sorte 'Keller'; 2: Sorte 'KN Morris'; 3: Sorte 'Sweet Bee'

Anhang 7: Bonitur von entblätterten Ganzpflanzen ohne Belüftung im Versuchsjahr 2010

Datum	Zustand der unbelüfteten Stängel zur Beprobung
24.11.2010	satt grün, Stängel fest, geringfügig Schimmelbefall
01.12.2010	grün, z. T. Stängel aufgeweicht, z. T. Schimmelbefall
08.12.2010	matt grün, z. T. Stängel aufgeweicht und feucht, Schimmelbefall erkennbar
15.12.2010	matt grün, z. T. Grauschleier auf Oberfläche, Stängel stark aufgeweicht und feucht, Schimmelbefall erkennbar
12.01.2011	grau-grün, Grauschleier auf Oberfläche, Stängel sehr stark aufgeweicht und feucht, starker Schimmelbefall

Anhang 8: Bonitur von entblätterten Ganzpflanzen mit Belüftung im Versuchsjahr 2010

Datum	Zustand der belüfteten Stängel zur Beprobung
24.11.2010	satt grün, Stängel fest, kein Schimmelbefall
01.12.2010	grün, Stängel fest, kein Schimmelbefall
08.12.2010	grün aufgehellt, Stängel fest, kein Schimmelbefall
15.12.2010	grün aufgehellt, z. T. Grauschleier auf Oberfläche, Stängel fest, Schimmelbefall erkennbar
12.01.2011	grau-grün, Stängel fest, starker Schimmelbefall

Anhang 9: Bonitur von Stückgut ohne Belüftung im Versuchsjahr 2010

Datum	Zustand des unbelüfteten Stückgutes zur Beprobung
24.11.2010	satt grün, Stängelstücke fest, geringfügig Schimmelbefall
01.12.2010	grün aufgehellt, z. T. Stängelstücke aufgeweicht, z. T. Oberfläche schmierig, z. T. Schimmelbefall
08.12.2010	matt grün, z. T. Stängelstücke aufgeweicht, Stängeloberfläche schmierig, Schimmelbefall deutlich erkennbar
15.12.2010	matt grün, z. T. Grauschleier auf Oberfläche, Stängelstücke stark aufgeweicht und feucht, starker Schimmelbefall
12.01.2011	grau-grün, Stängelstücke sehr stark aufgeweicht und feucht, sehr starker Schimmelbefall

Anhang 10: Bonitur von Stückgut mit Belüftung im Versuchsjahr 2010

Datum	Zustand des belüfteten Stückgutes zur Beprobung
24.11.2010	satt grün, Stängelstücke fest, oberes Stapeldrittel feucht, kein Schimmelbefall
01.12.2010	grün, Stängelstücke fest, geringfügig Schimmelbefall
08.12.2010	grün, Stängelstücke fest, geringfügig Schimmelbefall
15.12.2010	grün aufgehellt, z. T. Grauschleier auf Oberfläche, Oberfläche schmierig, Stängelstücke fest, starker Schimmelbefall
12.01.2011	grau-grün, Grauschleier auf Oberfläche, Oberfläche schmierig, Stängelstücke fest, sehr starker Schimmelbefall (Staub)

Anhang 11: Bonitur des Häckselgutes ohne bzw. mit Ameisensäurezugabe unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2010

Variante	Datum	Zustand des Häckselgutes zur Beprobung
10 mm	04.02.2011	kein Schimmel, im unteren Drittel essigsaurer Geruch
10 mm	05.03.2011	kein Schimmel, typischer Silagegeruch
10 mm	04.04.2011	kein Schimmel, typischer Silagegeruch
10 mm, AS 0,5	02.02.2011	2 sehr kleine Schimmelflecke am Fassrand, 1 Schimmelfleck im Überlappungsbereich der Folie, Ameisensäuregeruch feststellbar
10 mm, AS 0,5	04.03.2011	kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar
10 mm, AS 0,5	03.04.2011	kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar
10 mm, AS 1,0	04.02.2011	kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar
10 mm, AS 1,0	05.03.2011	Schimmelfleck, Schimmelpunkte am Fassrand, Ameisensäuregeruch feststellbar
10 mm, AS 1,0	04.04.2011	kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar
20 mm	31.01.2011	sauer, gute Silierung, typischer Silagegeruch
20 mm	02.03.2011	kein Schimmel, sehr saurer Geruch (Essigsäure, Buttersäure), geringer verdichtet
20 mm	01.04.2011	kein Schimmel, typischer Silagegeruch
20 mm, AS 0,5	01.02.2011	2 graue Schimmelherde Ø ca. 8 und 13 cm auf der Häckselgutoberfläche und am Fassrand, Ameisensäuregeruch feststellbar
20 mm, AS 0,5	03.03.2011	kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar
20 mm, AS 0,5	02.04.2011	kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar
20 mm, AS 1,0	31.01.2011	kein Schimmel, süßlich-stechender Geruch
20 mm, AS 1,0	02.03.2011	Kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar
20 mm, AS 1,0	01.04.2011	kein Schimmel, Ameisensäuregeruch feststellbar

Anhang 12: Bewertungsschlüssel für die Bonitur von Häckselgut ohne bzw. mit Ameisensäurezugabe unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011

Bewertung	Milchsäure	Ameisensäure	Alkohol	Schimmel	Bräunung
0	nicht …	nicht …	nicht …	nicht …	normale Farbe
1	schwach …	schwach …	schwach …	---	bräunlicher als normal
2	deutlich …	deutlich …	deutlich …	---	deutlich gebräunt
3	---	stark …	---	schwach …	---
4	stark …	---	stark …	---	stark gebräunt
5	---	---	---	deutlich …	---
6	---	---	---	---	---
7	---	---	---	stark …	---

… wahrnehmbar

Anhang 13: Bonitur des Häckselgutes ohne bzw. mit Ameisensäurezugabe unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „2 Wochen vor HET I" am 06.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	Milchsäure	Ameisensäure	Alkohol	Schimmel	Bräunung
Nullprobe	09.01.12	2	0	2	0	1
Nullprobe	03.02.12	2	0	2	0	1
Nullprobe	05.03.12	2	0	2	0	0
0,5 Masse-% AS	09.01.12	0	1	1	0	0
0,5 Masse-% AS	03.02.12	0	1	0	5	0
0,5 Masse-% AS	05.03.12	0	1	0	5	0
0,75 Masse-% AS	09.01.12	0	0	1	0	0
0,75 Masse-% AS	03.02.12	0	2	0	3	0
0,75 Masse-% AS	05.03.12	0	2	0	7	0
1,0 Masse-% AS	09.01.12	0	0	0	5	0
1,0 Masse-% AS	03.02.12	0	3	0	5	0
1,0 Masse-% AS	05.03.12	0	3	0	7	0
0,5 Masse-% ASg	09.01.12	0	1	0	0	0
0,5 Masse-% ASg	03.02.12	0	1	0	0	0
0,5 Masse-% ASg	05.03.12	0	1	0	0	0
0,75 Masse-% ASg	09.01.12	0	2	0	0	0
0,75 Masse-% ASg	03.02.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% ASg	05.03.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% ASg	09.01.12	0	2	0	0	0
1,0 Masse-% ASg	03.02.12	0	2	0	5	0
1,0 Masse-% ASg	05.03.12	0	3	0	3	0
1,0 Masse-% AS[1)]	05.03.12	0	3	0	0	0
1,0 Masse-% AS[2)]	06.03.12	0	3	0	0	0

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 14: Bonitur des Häckselgutes ohne bzw. mit Ameisensäurezugabe unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „1 Woche vor HET I" am 13.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	Milchsäure	Ameisensäure	Alkohol	Schimmel	Bräunung
Nullprobe	11.01.12	2	0	2	0	1
Nullprobe	10.02.12	1	0	1	0	0
Nullprobe	12.03.12	2	0	2	0	0
0,5 Masse-% AS	11.01.12	1	0	1	0	0
0,5 Masse-% AS	10.02.12	0	1	0	0	0
0,5 Masse-% AS	12.03.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% AS	11.01.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% AS	10.02.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% AS	12.03.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	11.01.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	10.02.12	0	2-3	0	3	0
1,0 Masse-% AS	12.03.12	0	3	0	7	0
0,5 Masse-% ASg	11.01.12	0	1	0	3	0
0,5 Masse-% ASg	10.02.12	0	1	0	3	0
0,5 Masse-% ASg	12.03.12	0	1	0	0	0
0,75 Masse-% ASg	11.01.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% ASg	10.02.12	0	2	0	0	0
0,75 Masse-% ASg	12.03.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% ASg	11.01.12	0	1	0	0	0
1,0 Masse-% ASg	10.02.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% ASg	12.03.12	0	3	0	3	0
1,0 Masse-% AS[1)]	16.03.12	0	3	0	0	0
1,0 Masse-% AS[2)]	16.03.12	0	3	0	0	0

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 15: Bonitur des Häckselgutes ohne bzw. mit Ameisensäurezugabe unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „HET I" am 20.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	Milchsäure	Ameisensäure	Alkohol	Schimmel	Bräunung
Nullprobe	18.01.12	1	0	1	0	1
Nullprobe	17.02.12	2	0	2	0	0
Nullprobe	19.03.12	2	0	2	0	0
0,5 Masse-% AS	18.01.12	0	0	0	3	0
0,5 Masse-% AS	17.02.12	0	1	0	3	0
0,5 Masse-% AS	19.03.12	0	0	0	5	0
0,75 Masse-% AS	18.01.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% AS	17.02.12	0	2	0	5	0
0,75 Masse-% AS	19.03.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	18.01.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	17.02.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	19.03.12	0	3	0	3	0
0,5 Masse-% ASg	18.01.12	0	0	0	3	0
0,5 Masse-% ASg	17.02.12	0	1	0	0	0
0,5 Masse-% ASg	19.03.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% ASg	18.01.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% ASg	17.02.12	0	2	0	3	0
0,75 Masse-% ASg	19.03.12	0	2	0	4	0
1,0 Masse-% ASg	18.01.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% ASg	17.02.12	0	3	0	0	0
1,0 Masse-% ASg	19.03.12	0	3	0	5	0
1,0 Masse-% AS[1)]	23.03.12	0	3	0	0	0
1,0 Masse-% AS[2)]	23.03.12	0	3	0	0	0

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 16: Bonitur des Häckselgutes ohne bzw. mit Ameisensäurezugabe unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „HET II" am 24.10.2011, Häcksellänge 10 mm)

Variante	Beprobung	Milchsäure	Ameisensäure	Alkohol	Schimmel	Bräunung
Nullprobe	23.01.12	1	0	1	0	0
Nullprobe	21.02.12	2	0	2	0	0
Nullprobe	23.03.12	2	0	2	0	0
0,75 Masse-% AS	23.01.12	0	0	0	3	0
0,75 Masse-% AS	21.02.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% AS	23.03.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	23.01.12	0	1	0	3	0
1,0 Masse-% AS	21.02.12	0	3	0	3	0
1,0 Masse-% AS	23.03.12	0	3	0	3	0
1,0 Masse-% AS[1)]	26.03.12	0	3	0	0	0
1,0 Masse-% AS[2)]	26.03.12	0	3	0	0	0

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 17: Bonitur des Häckselgutes ohne bzw. mit Ameisensäurezugabe unter anaeroben Bedingungen im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „HET III" am 26.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	Milchsäure	Ameisensäure	Alkohol	Schimmel	Bräunung
Nullprobe	25.01.12	2	0	2	0	0
Nullprobe	23.02.12	2	0	2	0	0
Nullprobe	26.03.12	2	0	2	0	0
0,75 Masse-% AS	25.01.12	0	0	0	0	0
0,75 Masse-% AS	23.02.12	0	1	0	3	0
0,75 Masse-% AS	29.03.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	25.01.12	0	2	0	3	0
1,0 Masse-% AS	23.02.12	0	3	0	5	0
1,0 Masse-% AS	26.03.12	0	3	0	3	0
1,0 Masse-% AS[1)]	30.03.12	0	3	0	0	0
1,0 Masse-% AS[2)]	30.03.12	0	3	0	0	0

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 18: Sickersaftanfall bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut unter anaeroben Bedingungen und der Zugabe von Ameisensäure im Versuchsjahr 2010

Erntegutform		Sickersaftanfall bezogen auf FM-Ausgangsgewicht in %		
Häckselgut	TM in %	Beprobung 1	Beprobung 2	Beprobung 3
10 mm	17,5	16,3	17,6	20,1
20 mm	18,2	16,7	18,0	18,8
10 mm, AS[1)] 0,5[2)]	18,1	15,8	19,0	17,7
20 mm, AS[1)] 0,5[2)]	16,4	23,1	23,6	25,0
10 mm, AS[1)] 0,5[2)]	17,5	20,7	19,5	22,6
20 mm, AS[1)] 0,5[2)]	18,2	19,1	22,5	18,2

[1)] Ameisensäure (100 %)
[2)] Beladung mit Ameisensäure (100 %) in Masse-%

Anhang 19: Sickersaftanfall bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut unter anaeroben Bedingungen und der Zugabe von Ameisensäure im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „2 Wochen vor HET I" am 06.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	TM-Gehalt Frischmaterial in %	TM-Gehalt konserviertes Material in %	Anteil Sickersaft am Frischmassegewicht in %
Nullprobe	09.01.12	21,15	17,33	14,6
Nullprobe	03.02.12	20,72	17,96	14,4
Nullprobe	05.03.12	20,85	17,79	15,7
0,5 Masse-% AS	09.01.12	20,17	20,31	18,6
0,5 Masse-% AS	03.02.12	20,54	19,77	21,0
0,5 Masse-% AS	05.03.12	21,23	19,52	21,5
0,75 Masse-% AS	09.01.12	20,62	21,94	21,2
0,75 Masse-% AS	03.02.12	20,31	22,60	22,4
0,75 Masse-% AS	05.03.12	20,89	21,42	21,5
1,0 Masse-% AS	09.01.12	20,84	21,06	19,2
1,0 Masse-% AS	03.02.12	20,85	21,82	20,5
1,0 Masse-% AS	05.03.12	20,68	21,63	20,4
0,5 Masse-% ASg	09.01.12	20,71	18,24	18,8
0,5 Masse-% ASg	03.02.12	20,72	18,13	18,1
0,5 Masse-% ASg	05.03.12	20,80	17,80	19,3
0,75 Masse-% ASg	09.01.12	20,80	21,66	19,9
0,75 Masse-% ASg	03.02.12	20,66	21,60	20,9
0,75 Masse-% ASg	05.03.12	21,30	21,72	21,0
1,0 Masse-% ASg	09.01.12	21,11	22,12	20,7
1,0 Masse-% ASg	03.02.12	20,77	21,33	22,3
1,0 Masse-% ASg	05.03.12	20,79	22,02	23,0
1,0 Masse-% AS[1)]	05.03.12	20,57	20,61	15,3
1,0 Masse-% AS[2)]	06.03.12	20,57	20,37	9,2

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 20: Sickersaftanfall bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut unter anaeroben Bedingungen und der Zugabe von Ameisensäure im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „1 Woche vor HET I" am 13.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	TM-Gehalt Frischmaterial in %	TM-Gehalt konserviertes Material in %	Anteil Sickersaft am Frischmassegewicht in %
Nullprobe	11.01.12	21,22	18,47	16,4
Nullprobe	10.02.12	21,68	19,29	16,9
Nullprobe	12.03.12	21,71	18,48	16,8
0,5 Masse-% AS	11.01.12	20,97	22,46	22,3
0,5 Masse-% AS	10.02.12	21,39	22,00	22,0
0,5 Masse-% AS	12.03.12	21,34	22,22	24,1
0,75 Masse-% AS	11.01.12	21,91	23,67	19,9
0,75 Masse-% AS	10.02.12	21,52	23,34	25,1
0,75 Masse-% AS	12.03.12	21,53	23,76	24,8
1,0 Masse-% AS	11.01.12	21,66	23,48	24,5
1,0 Masse-% AS	10.02.12	21,70	23,55	24,1
1,0 Masse-% AS	12.03.12	21,80	23,05	24,6
0,5 Masse-% ASg	11.01.12	21,79	22,49	20,7
0,5 Masse-% ASg	10.02.12	21,56	21,21	22,3
0,5 Masse-% ASg	12.03.12	21,80	21,60	23,4
0,75 Masse-% ASg	11.01.12	21,84	23,56	23,5
0,75 Masse-% ASg	10.02.12	21,83	22,57	25,0
0,75 Masse-% ASg	12.03.12	21,48	23,48	24,3
1,0 Masse-% ASg	11.01.12	21,82	23,89	23,9
1,0 Masse-% ASg	10.02.12	21,77	23,39	24,3
1,0 Masse-% ASg	12.03.12	21,95	23,06	26,1
1,0 Masse-% AS[1)]	16.03.12	21,67	22,94	15,3
1,0 Masse-% AS[2)]	16.03.12	21,67	22,06	12,9

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 21: Sickersaftanfall bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut unter anaeroben Bedingungen und der Zugabe von Ameisensäure im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „HET I" am 20.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	TM-Gehalt Frischmaterial in %	TM-Gehalt konserviertes Material in %	Anteil Sickersaft am Frischmassegewicht in %
Nullprobe	18.01.12	22,97	19,04	10,3
Nullprobe	17.02.12	23,32	18,85	9,9
Nullprobe	19.03.12	23,42	18,50	10,9
0,5 Masse-% AS	18.01.12	22,79	24,52	17,2
0,5 Masse-% AS	17.02.12	22,68	25,05	17,4
0,5 Masse-% AS	19.03.12	22,93	23,49	17,4
0,75 Masse-% AS	18.01.12	23,22	24,75	16,8
0,75 Masse-% AS	17.02.12	22,91	23,67	16,7
0,75 Masse-% AS	19.03.12	22,60	24,10	18,7
1,0 Masse-% AS	18.01.12	23,41	24,84	17,9
1,0 Masse-% AS	17.02.12	23,35	23,94	18,2
1,0 Masse-% AS	19.03.12	23,20	23,77	18,7
0,5 Masse-% ASg	18.01.12	23,33	23,52	15,4
0,5 Masse-% ASg	17.02.12	23,27	22,76	16,5
0,5 Masse-% ASg	19.03.12	23,36	21,37	15,6
0,75 Masse-% ASg	18.01.12	23,55	25,09	16,4
0,75 Masse-% ASg	17.02.12	22,75	23,60	17,4
0,75 Masse-% ASg	19.03.12	23,62	24,38	18,3
1,0 Masse-% ASg	18.01.12	23,63	24,28	17,5
1,0 Masse-% ASg	17.02.12	23,64	23,68	17,0
1,0 Masse-% ASg	19.03.12	23,99	23,73	18,9
1,0 Masse-% AS[1)]	23.03.12	23,16	23,98	9,8
1,0 Masse-% AS[2)]	23.03.12	23,16	22,65	7,3

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 22: Sickersaftanfall bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut unter anaeroben Bedingungen und der Zugabe von Ameisensäure im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „HET II" am 24.10.2011, Häcksellänge 10 mm)

Variante	Beprobung	TM-Gehalt Frischmaterial in %	TM-Gehalt konserviertes Material in %	Anteil Sickersaft am Frischmassegewicht in %
Nullprobe	23.01.12		20,54	10,6
Nullprobe	21.02.12		20,09	11,9
Nullprobe	23.03.12	22,76	19,71	12,8
0,75 Masse-% AS	23.01.12	22,19	24,50	18,1
0,75 Masse-% AS	21.02.12		23,59	19,4
0,75 Masse-% AS	23.03.12		24,03	18,4
1,0 Masse-% AS	23.01.12	22,63	24,39	19,4
1,0 Masse-% AS	21.02.12	22,46	23,14	20,3
1,0 Masse-% AS	23.03.12	22,50	24,29	20,3
1,0 Masse-% AS[1)]	26.03.12	23,00	23,24	14,1
1,0 Masse-% AS[2)]	26.03.12	23,00	22,06	9,9

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Anhang 23: Sickersaftanfall bei der Lagerung von Zuckerhirsehäckselgut unter anaeroben Bedingungen und der Zugabe von Ameisensäure im Versuchsjahr 2011 (Sorte 'Top 76', Erntetermin „HET III" am 26.10.2011, Häcksellänge 20 mm)

Variante	Beprobung	TM-Gehalt Frischmaterial in %	TM-Gehalt konserviertes Material in %	Anteil Sickersaft am Frischmassegewicht in %
Nullprobe	25.01.12	24,55	20,34	4,15
Nullprobe	23.02.12	24,90	20,04	5,55
Nullprobe	26.03.12	25,20	20,26	6,31
0,75 Masse-% AS	25.01.12	24,39	25,55	13,20
0,75 Masse-% AS	23.02.12	24,74	24,96	14,14
0,75 Masse-% AS	29.03.12	25,21	24,71	14,84
1,0 Masse-% AS	25.01.12	24,90	25,37	13,71
1,0 Masse-% AS	23.02.12	24,63	24,44	14,65
1,0 Masse-% AS	26.03.12	25,00	24,69	15,90
1,0 Masse-% AS[1)]	30.03.12	24,40	23,41	7,09
1,0 Masse-% AS[2)]	30.03.12	24,40	23,65	6,78

[1)] Acrylglasbehälter mit Sickersaftentnahme
[2)] Acrylglasbehälter ohne Sickersaftentnahme während Lagerung, nur unmittelbar vor Beprobung

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöltauglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion - Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen - Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte –
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselkraftstoff betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzscheit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als Nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung

21	Kleine Biomassefeuerungen – Marktbetrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als Nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung

TFZ

ISSN 1614-1008