

4

Brennstoff- eigenschaften und Mengenplanung

4.1 Elementarzusammensetzung

4.1.1 Hauptelemente

Feste pflanzliche Biomasse besteht im Wesentlichen aus Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). Die Komponente biogener Festbrennstoffe, durch deren Oxidation die freigesetzte Energie weitgehend bestimmt wird, ist der Kohlenstoff. Daneben liefert der Wasserstoff bei der Oxidation ebenfalls Energiemengen und bestimmt somit gemeinsam mit dem Kohlenstoff den Heizwert des trockenen Brennstoffs. Der Sauerstoff unterstützt dagegen lediglich den Oxidationsvorgang.

Mit 47 bis 50 % in der Trockenmasse (TM) haben Holzbrennstoffe den höchsten Kohlenstoffgehalt, während die Mehrzahl der Nicht-Holz-Brennstoffe meist einen C-Gehalt von rund 45 % aufweist. Der Sauerstoffgehalt liegt zwischen 40 und 45 % in der TM und der des Wasserstoffs zwischen 5 und 7 % (Tabelle 4.1). Im Vergleich zu den biogenen Kraftstoffen wie Pflanzenöl liegen der Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt bei den Festbrennstoffen deutlich niedriger (vgl. Kapitel 10).

4.1.2 Emissionsrelevante Elemente

Zu den Elementen mit Auswirkung auf den Schadstoffausstoß bei der Verbrennung zählen vor allem der Schwefel-, Stickstoff- und Chlorgehalt sowie der Aschegehalt. Bei diesen Inhaltsstoffen gilt allgemein, dass steigende Gehalte im Brennstoff mit einer Zunahme an Schadstoffen im Abgas verbunden sind.

Die Brennstoffe unterscheiden sich bei den emissionsrelevanten Inhaltsstoffen zum Teil erheblich. Beispielsweise ist der Stickstoffgehalt (N) von Holz mit ca. 0,1 bis 0,2 % und Stroh mit ca. 0,5 % relativ gering, während eiweißreiche Pflanzen deutlich darüber liegen können, vor allem wenn generative Organe

Tabelle 4.1: Gehalt wichtiger Elemente in naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen im Vergleich zu Stein- und Braunkohle (Mittelwerte nach /4-12/, /4-27/) k. A. keine Angabe

Brennstoffart	C	H	O	N	K	S	Cl
	in % der Trockenmasse						
Fichtenholz (mit Rinde)	49,8	6,3	43,2	0,13	0,13	0,015	0,005
Buchenholz (mit Rinde)	47,9	6,2	45,2	0,22	0,22	0,015	0,006
Pappelholz (Kurzumtrieb)	47,5	6,2	44,1	0,42	0,35	0,031	0,004
Weidenholz (Kurzumtrieb)	47,1	6,1	44,3	0,54	0,26	0,045	0,004
Rinde (von Nadelholz)	51,4	5,7	38,7	0,48	0,24	0,085	0,019
Roggenstroh	46,6	6,0	42,1	0,55	1,7	0,085	0,40
Weizenstroh	45,6	5,8	42,4	0,48	1,0	0,082	0,19
Triticalestroh	43,9	5,9	43,8	0,42	1,1	0,056	0,27
Gerstenstroh	47,5	5,8	41,4	0,46	1,4	0,089	0,40
Rapsstroh	47,1	5,9	40,0	0,84	0,8	0,27	0,47
Weizen-Ganzpflanzen	45,2	6,4	42,9	1,41	0,7	0,12	0,09
Triticale-Ganzpflanzen	44,0	6,0	44,6	1,08	0,9	0,18	0,14
Weizenkörner	43,6	6,5	44,9	2,28	0,5	0,12	0,04
Triticalekörner	43,5	6,4	46,4	1,68	0,6	0,11	0,07
Rapskörner	60,5	7,2	23,8	3,94	k. A.	0,10	k. A.
Rapspresskuchen	51,5	7,38	30,1	4,97	1,60	0,55	0,019
Miscanthus	47,5	6,2	41,7	0,73	0,7	0,15	0,22
Landschaftspflegeheu	45,5	6,1	41,5	1,14	1,5	0,16	0,31
Weidelgras	46,1	5,6	38,1	1,34	1,5	0,14	1,39
zum Vergleich:							
Steinkohle	72,5	5,6	11,1	1,3	k. A.	0,94	<0,1
Braunkohle	65,9	4,9	23,0	0,7	k. A.	0,39	<0,1

(Körner) enthalten sind (Tabelle 4.1). Stickstoff wirkt sich direkt auf die Stickstoffoxid(NO_x)-Bildung aus, da er bei der Verbrennung nahezu vollständig in die Gasphase übergeht und sich deshalb nicht in der Asche wiederfindet.

Kalium ist dagegen auf andere Weise von Nachteil. Zum einen senkt es den Ascheerweichungspunkt (vgl. Kapitel 4.2.5), so dass die Bildung von Schlacke im Brennraum begünstigt wird und entsprechende Anbackungen eintreten können, die zu Störungen führen. Zum anderen ist Kalium an der Freisetzung besonders feiner Partikel beteiligt, da im Glutbett unter bestimmten Bedingungen leicht flüchtige Kaliumverbindungen entstehen, die im Abgasweg als Feinstpartikel mit weniger als $0,1 \mu\text{m}$ Durchmesser kondensieren. Diese feinen Partikel lassen sich nur schwer aus dem Abgas entfernen, so dass sie zu einem großen Teil als Staubpartikel mit dem Abgas freigesetzt werden /4-26/. Besondere Nachteile ergeben sich somit für die kaliumreichen Brennstoffe wie Grasaufwuchs und Stroh (Tabelle 4.1).

Der Schwefelgehalt (S) biogener Festbrennstoffe ist im Vergleich zu Kohlebrennstoffen relativ gering. Rapsstroh besitzt mit durchschnittlich ca. 0,3 % in der TM den höchsten Schwefelgehalt, während die meisten Holzbrennstoffe im Bereich von 0,02 bis 0,05 % liegen, Getreidestroh sogar meist unter 0,1 % (Tabelle 4.1). Bei der Verbrennung bestimmt der Schwefelgehalt primär die Schwefeldioxid(SO_2)-Emission. Ein großer Teil des Schwefelgehaltes im Brennstoff (ca. 40 bis 90 %) wird – je nach Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtungen – in die Asche eingebunden.

Auch Chlor (Cl) ist ein bedeutender Begleitstoff in Düngemitteln (insbesondere in Kaliumdüngern /4-12/) und kommt daher in Biomassen aus gedüngten Feldkulturen in deutlich höheren Anteilen vor als im Holz, welches in der Regel von ungedüngten Flächen stammt. Holzbrennstoffe zeigen folglich mit ca. 0,005 bis 0,02 % in der TM sehr niedrige Chlorgehalte, während der Gehalt im Getreidestroh mit ca. 0,2 bis 0,5 % um ein Vielfaches höher liegt (Tabelle 4.1). Die Gehaltsschwankungen sind auf Grund der hohen Mobilität des Chlorids in der Pflanze und im Boden allerdings sehr hoch, es kann zum Beispiel durch Niederschläge während der Bodentrocknung von Stroh oder Gras leicht ausgewaschen werden. Somit ist ausgewaschenes „graues“ Stroh aus verbrennungstechnischer Sicht gegenüber frischem „gelben“ Stroh zu bevorzugen.

Die Bedeutung des Chlors beruht auf dessen Beteiligung an der Bildung von Chlorwasserstoff (HCl) und Dioxinen/Furanen (PCDD/F) /4-16/, /4-22/. Trotz relativ hoher Chloreinbindungsraten in der Asche von 40 bis 95 % /4-22/ können beispielsweise die HCl-Emissionen bei bestimmten chlorreichen Brennstoffen (z. B. Getreidestroh) problematisch werden. Zusätzlich wirkt Chlor im Zusammenspiel mit anderen Elementen korrosiv.

4.1.3 Spurenelemente (Schwermetalle)

Zu den Spurenelementen zählen alle verbleibenden Elemente, bei denen es sich in der Mehrzahl um Schwermetalle handelt. Sie bestimmen vor allem die Eigenschaften der bei der Verbrennung anfallenden Aschen.

Im Allgemeinen sind Holzbrennstoffe aus dem Wald höher mit Schwermetallen belastet als jährlich erntbare Kulturen. Die Rinde von Nadelhölzern nimmt hierbei eine Spitzenstellung ein.

Die Schwermetallgehalte stellen ein wesentliches Merkmal für die Unterscheidung zwischen naturbelassenen und nicht-naturbelassenen Brennstoffen dar. Einige Schwermetalle werden daher auch als Indikatoren für eine nicht-naturbelassene Brennstoffherkunft verwendet. Beispielsweise lassen sich mit Hilfe von Schnelltestverfahren für Zink, Blei und Chlor in der Asche von Kleinf Feuerungsanlagen Anhaltspunkte für eine Verwendung belasteter Brennstoffe ableiten /4-20/. Auch bei Presslingen aus naturbelassenem Holz ist der Nachweis für die Verwendung unbelasteter Rohstoffe dadurch zu erbringen, dass Grenzwerte für bestimmte Schwermetallgehalte und andere Stoffe unterschritten werden müssen. Beispielsweise dürfen Holzbriketts oder -pellets nach DIN 51 731 /4-8/ folgende Schadstoffgehalte in der Trockenmasse nicht überschreiten:

Schwefel (S)	< 0,08 %
Chlor (Cl)	< 0,03 %
Stickstoff (N)	< 0,3 %
Arsen (As)	< 0,8 mg/kg
Cadmium (Cd)	< 0,5 mg/kg
Chrom (Cr)	< 8 mg/kg
Kupfer (Cu)	< 5 mg/kg
Quecksilber (Hg)	< 0,05 mg/kg
Blei (Pb)	< 10 mg/kg
Zink (Zn)	< 100 mg/kg



4.2 Weitere Brennstoffeigenschaften und ihre Bedeutung

4.2.1 Wassergehalt und Brennstoff-Feuchte

Definition. Der Wassergehalt w wird auf die Frischmasse bezogen; er beschreibt damit das in der feuchten Biomasse befindliche Wasser, wobei sich diese feuchte Biomasse aus der trockenen Biomasse (d. h. Trockenmasse) m_B und der darin enthaltenen Wassermasse m_W zusammensetzt (Gleichung (4-1)).

$$w = \frac{m_W}{m_B + m_W} = \frac{u}{1 + u} \quad (4-1)$$

Die Brennstoff-Feuchte u (zum Teil auch als „Feuchtegehalt“ bezeichnet) wird dagegen auf die Trockenmasse bezogen; sie ist folglich definiert als die im Brennstoff gebundene Wassermasse m_W bezogen auf die trockene Biomasse m_B nach Gleichung (4-2). Die Feuchte kann damit in den Wassergehalt umgerechnet bzw. aus ihm berechnet werden. Demnach entspricht z. B. ein Wassergehalt von 50 % einer Brennstoff-Feuchte von 100 %. Bei den Feuchteangaben sind somit auch Werte von über 100 % möglich.

Bei der „Feuchte“ handelt es sich um einen hauptsächlich in der Forst- und Holzwirtschaft gebräuchlichen Begriff. In der Praxis der Energienutzung wird dagegen hauptsächlich mit dem „Wassergehalt“ gerechnet.

$$u = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1 - w} \quad (4-2)$$

Wassergehaltseinfluss auf den Heizwert. Der Wassergehalt ist die wesentliche Einflussgröße, die den Heizwert biogener Festbrennstoffe bestimmt. Da wasserfreie Biomasse in der Natur praktisch nicht vorkommt, müssen stets mehr oder weniger große Mengen Feuchtigkeit während der Verbrennung verdunsten. Die hierfür benötigte Wärme wird der dabei freigesetzten Energie entnommen und mindert dadurch die Nettoenergieausbeute, wenn – und das ist der Regelfall – keine Rückkondensation des entstandenen Wasserdampfes im Abgas durch eine Abgaskondensationsanlage realisiert wird.

Dieser Einfluss des Wassergehaltes auf den Heizwert lässt sich nach Gleichung (4-3) bestimmen. Dabei ist $H_{u(w)}$ der Heizwert des Holzes (in MJ/kg) bei einem bestimmten Wassergehalt w ; $H_{u(wf)}$ ist der Heizwert der Holz trockenmasse im „wasserfreien“ (trockenen) Zustand, und die Konstante 2,44 ist die Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg, bezogen auf 25 °C.

$$H_{u(w)} = \frac{H_{u(wf)} \cdot (100 - w) - 2,44 w}{100} \quad (4-3)$$

Abb. 4.1 zeigt diesen Zusammenhang. Demnach nimmt beispielsweise der Heizwert von Holz (ca. 18,5 MJ/kg) mit zunehmendem Wassergehalt bzw. ansteigender Brennstoff-Feuchte linear ab; er ist bei rund 88 % Wassergehalt bzw. etwa 73 % „Brennstoff-Feuchte“ gleich null.

In der Praxis wird oft irrtümlich angenommen, dass mit der Trocknung des Brennstoffs eine proportional zum Heizwert steigende Netto-Energie-menge zur Verfügung steht. Tatsächlich jedoch ist der Gewinn an Brennstoffenergie relativ gering, da ja mit der Trocknung nicht nur der Heizwert steigt, sondern auch die Gesamtmasse an Brennstoff sinkt. Dieser Zusammenhang wird auch in Abb. 4.4 (in Kapitel 4.4) anhand eines Kubikmeters Brennstoff verdeutlicht.

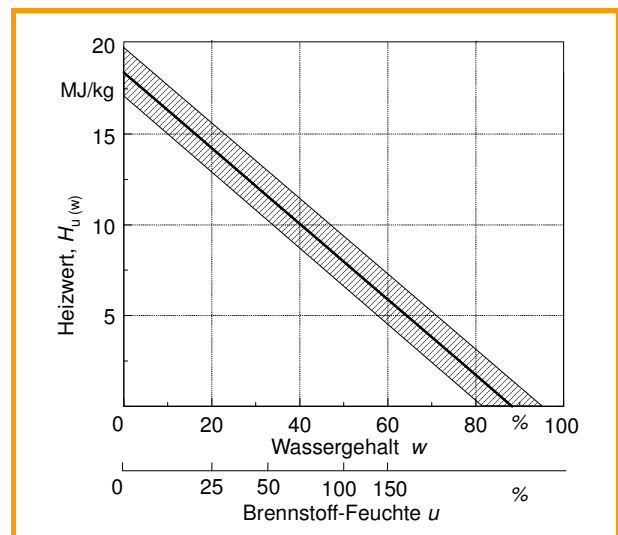


Abb. 4.1: Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt bzw. der Feuchte [4-21]

Typische Wassergehalte von Brennstoffen. Üblicherweise kann bei luftgetrocknetem Holz oder Stroh von Wassergehalten zwischen 12 und 20 % ausgegangen werden; nach Gleichung (4-3) resultiert daraus ein Heizwert zwischen 13 und 16 MJ/kg. Bei waldfischem Holz, Rinde oder Holz aus Kurzumtriebsplantagen kann der Wassergehalt aber auch bei 50 % und mehr liegen; entsprechend geringer ist dann der Heizwert (Abb. 4.1).

Der Wassergehalt der Festbrennstoffe schwankt – bezogen auf die gesamte Masse – zwischen ca. 10 und 65 %. Waldfrisches Holz liegt je nach Baumart, Alter

und Jahreszeit zwischen 45 und 60 %. Im Gleichgewichtszustand schwankt der Wassergehalt von „lufttrockenem“ Holz – je nach Jahreszeit – etwa zwischen 12 und 18 %. Normgerechte Holzpresslinge nach DIN 51 731 /4-8/ haben einen Wassergehalt von maximal 12 % bzw. nach ÖNORM /4-23/ von maximal 10 %. Die neue europäische Klassifizierungs-(Vor-)Norm DIN CEN/TS 14961 unterscheidet bei Holzpellets drei Wassergehaltsklassen W10, W15, W20 (d. h. bis 10, 15 bzw. 20 %), wobei für den häuslichen Bereich lediglich die Klasse W10 in Frage kommt. Bei Holzhackschnitzeln werden dagegen 5 Wassergehaltsklassen unterschieden (M20, M30, M40, M55, M65), während für Scheitholz 4 Klassen genannt werden: M20 (ofenfertiges Scheitholz), M30 (in Lagerräumen abgelagert), M40 (im Wald abgelagert) und M65 (frisch, nach dem Schnitt im Wald) /4-9/. Die Klassennummern sind als Obergrenze für den Wassergehalt anzusehen.

4.2.2 Heizwert

Definition. Der Heizwert ($H_{u,wf}$ früher auch „unterer Heizwert“) beschreibt die Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme (Verdampfungswärme) des im Abgas befindlichen Wasserdampfes freigesetzt wird. Beim Heizwert wird somit unterstellt, dass der bei der Verbrennung freigesetzte Wasserdampf dampfförmig bleibt und dass die Wärmemenge, die bei einer eventuellen Kondensation durch Rauchgasabkühlung frei werden könnte (sogenannte „latente Wärme“: 2,441 Kilojoule je Gramm Wasser) nicht nutzbringend verwendet wird.

Der Wasserdampf im Abgas der Verbrennung stammt aus der chemischen Oxidation des gebundenen Wasserstoffs mit Sauerstoff und vor allem aus der Verdunstung des freien Wassers im (feuchten) Brennstoff. Da für diese Verdunstung eine ebenso große Wärmemenge benötigt wird wie durch Kondensation frei werden würde, sinkt der auf die Gesamtmasse bezogene Heizwert mit zunehmendem Wassergehalt entsprechend (vgl. Kapitel 4.2.1).

Heizwert von Biomasse. Der Heizwert eines biogenen Festbrennstoffs wird wesentlich stärker vom Wassergehalt beeinflusst als von der Art der Biomasse (vgl. Abb. 4.1). Deshalb werden die Heizwerte unterschiedlicher Brennstoffarten stets im absolut trockenen Zustand angegeben und verglichen.

Bei biogenen Festbrennstoffen liegt der Heizwert bezogen auf die wasserfreie Masse ($H_{u(wf)}$) in einer engen Bandbreite zwischen 16,5 und 19,0 MJ/kg

Tabelle 4.2: Verbrennungstechnische Kenndaten von naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen im Vergleich zu Stein- und Braunkohle (nach /3-12/, /3-27/). k. A. keine Angabe

Brennstoff / Biomasseart	Heizwert, $H_{u(wf)}$ MJ/kg	Brennwert, $H_{o(wf)}$ MJ/kg	Aschegehalt (wf) in %	Erweichungspunkt der Asche in °C
Fichtenholz (mit Rinde)	18,8	20,2	0,6	1 426
Buchenholz (mit Rinde)	18,4	19,7	0,5	k. A.
Pappelholz (Kurzumtrieb)	18,5	19,8	1,8	1 335
Weidenholz (Kurzumtrieb)	18,4	19,7	2,0	1 283
Rinde (Nadelholz)	19,2	20,4	3,8	1 440
Roggenstroh	17,4	18,5	4,8	1 002
Weizenstroh	17,2	18,5	5,7	998
Triticalestroh	17,1	18,3	5,9	911
Gerstenstroh	17,5	18,5	4,8	980
Rapsstroh	17,1	18,1	6,2	1 273
Weizenganzpflanzen	17,1	18,7	4,1	977
Triticaleganzpflanzen	17,0	18,4	4,4	833
Weizenkörner	17,0	18,4	2,7	687
Triticalekörner	16,9	18,2	2,1	730
Rapskörner	26,5	k. A.	4,6	k. A.
Rapspresskuchen	21,2	k. A.	6,2	k. A.
Miscanthus	17,6	19,1	3,9	973
Landschaftspflegeheu	17,4	18,9	5,7	1 061
Weidelgras	16,5	18,0	8,8	k. A.
zum Vergleich:				
Steinkohle	29,7	k. A.	8,3	1 250
Braunkohle	20,6	k. A.	5,1	1 050

(Tabelle 4.2). In der Praxis gilt die Faustregel, dass ca. 2,5 kg lufttrockenes Holz etwa einem Liter Heizöl (≈ 10 kWh bzw. ≈ 36 MJ) entsprechen (vgl. Abb. 4.3). Nadelholz liegt beim Heizwert ca. 2 % höher als Laubholz /4-12/. Dieser Unterschied – wie auch der um weitere 2 % höhere Heizwert der Nadelholzhölzer – ist auf den höheren Ligningehalt der Nadelhölzer bzw. zum Teil auch auf den erhöhten Gehalt an Holzextraktstoffen (z. B. Harze, Fette) zurückzuführen. Deren Teilheizwert von Lignin liegt deutlich höher als der für Cellulose oder Polyosen /4-18/.

Holz brennstoffe zeigen insgesamt einen durchschnittlich ca. 9 % höheren Heizwert als Halmgüter; bei denen er zwischen 16,5 und 17,5 MJ/kg schwankt (bezo-



gen auf die Trockenmasse). Nennenswerte Unterschiede zwischen Getreidestroh und -körnern sind dabei nicht erkennbar; das gilt auch für Heu und Gräser. Ölhaltige Brennstoffe (z. B. Rapskörner, Rapspresskuchen) besitzen je nach ihrem Gehalt an Öl, dessen Heizwert bei ca. 36 MJ/kg liegt, einen insgesamt höheren Heizwert.

4.2.3 Brennwert

Definition. Im Unterschied zum Heizwert ist der Brennwert (H_o , früher auch „oberer Heizwert“) definiert als die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs freigesetzte Wärmemenge, die verfügbar wird, wenn auch die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfs nutzbar gemacht wird. Dazu müssen die Abgase so tief abgekühlt werden, dass der gebildete Wasserdampf kondensieren kann, um auch die Kondensationswärme freizusetzen. Das heißt, dass das Wärmenutzungs-system, das den Brennwert des Brennstoffs ausnutzen soll, auf sehr niedrige Temperaturen ausgelegt sein muss, damit im Wärmetauscher eine Absenkung der Abgastemperaturen unter den Taupunkt überhaupt gelingt. Wenn sowohl der Wärmetauscher als auch die Wärmenutzung (z. B. bei Niedertemperaturheizung) hierauf eingerichtet sind spricht man vom „Brennwertkessel“ oder von „Brennwerttechnik“. Derartige technische Lösungen werden inzwischen auch bei Biomassefeuerungen angeboten; dennoch wird der Energieinhalt des Brennstoffs generell – wie auch bei Öl und Gas – weiterhin mit dem Heizwert beschrieben.

Brennwert von Biomasse. Bei biogenen Festbrennstoffen liegt der Brennwert durchschnittlich um ca. 6 % (Rinde), 7 % (Holz) bzw. 7,5 % (Halmgut) über dem Heizwert (vgl. Tabelle 4.2). Das gilt jedoch nur für Festbrennstoffe im absolut trockenen Zustand (d. h. bezogen auf Trockenmasse). Bei feuchter Biomasse vergrößert sich dieser relative Abstand, so dass der durch Rekondensation des entstehenden Wasserdampfes erzielbare Energiegewinn steigt.

4.2.4 Aschegehalt

Von allen biogenen Festbrennstoffen besitzt Holz (einschließlich Rinde) mit ca. 0,5 % der TM den geringsten Aschegehalt. Größere Überschreitungen dieses Wertes sind meist auf Sekundärverunreinigungen (z. B. anhaftende Erde) zurückzuführen. Holzpresslinge nach DIN 51 731 dürfen nur einen Aschegehalt von maximal 1,5 % in der Trockenmasse aufweisen /4-8/,

bei Holzpellets nach ÖNORM M7135 /3-25/ sind sogar nur maximal 0,5 % Aschegehalt zulässig. Bei Fichtenrinde liegt der Aschegehalt dagegen zwischen 2,5 und 5 % (vgl. Tabelle 4.2). Noch höher ist er bei den meisten Halmgutbrennstoffen.

Der Aschegehalt hat sowohl Auswirkungen auf die Umweltbelastungen (d. h. Schadstoffemissionen) als auch auf die technische Auslegung einer Feuerungsanlage. Außerdem erhöhen sich die Aufwendungen für die Verwertung bzw. Entsorgung der anfallenden Verbrennungsrückstände.

In der Asche finden sich viele der in Kapitel 4.1 genannten Elemente wieder. Sie besteht vorwiegend aus Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Phosphor (P) und Natrium (Na). Unter bestimmten Bedingungen kann sie daher auch als Dünger eingesetzt werden.

4.2.5 Ascheerweichungsverhalten

Bei der Verbrennung treten im Glutbett physikalische Veränderungen der Asche auf. Je nach Temperaturniveau kommt es zum Verkleben („Versintern“) bis zum völligen Aufschmelzen der Aschepartikel. Brennstoffe mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen erhöhen somit das Risiko, dass es zu Anbackungen und Ablagerungen im Feuerraum, am Rost und an den Wärmeübertragerflächen kommt. Derartige Anbackungen können u. a. zu Störungen, Betriebsunterbrechungen und Veränderungen bei der Verbrennungsluftzufuhr führen, und sie begünstigen die Hochtemperaturkorrosion. Diese technischen Nachteile müssen bei der Auslegung und Konstruktion der Feuerungsanlage berücksichtigt werden. Sie können durch aufwändige Zusatzeinrichtungen wie z. B. wassergekühlte Rostsysteme oder Brennmulden, Abgasrückführung, Aschebrecher, Brennstoffverwirbelung oder durch Brennstoffadditivierung beherrscht werden.

Das Erweichungsverhalten von Biomasseaschen hängt von der Aschezusammensetzung und somit vor allem vom Brennstoff ab; es zählt deshalb zu den brennstoffspezifischen Merkmalen. Als Messgrößen gelten die Temperaturen des Sinterbeginns, Erweichungspunktes, Halbkugelpunktes und Fließpunktes der Asche (nach DIN 51 730 /4-7/).

Zur Orientierung sind in Tabelle 4.2 nur die Temperaturen des Ascheerweichungspunktes dargestellt. Während Holz und Rinde mit ca. 1.300 bis 1.400 °C aus technischer Sicht für die meisten Einsatzfälle unkritisch sind, liegen die entsprechenden Temperaturen bei halmgutartigen Brennstoffen fast durchweg



unter 1.200 °C. Dadurch kann es bei der Verbrennung zu den beschriebenen Nachteilen kommen. Beim Getreidestroh liegt beispielsweise der häufigste Wert zwischen 900 und 950 °C. Besonders kritisch sind Getreidekörner mit einem Ascheerweichungspunkt von nur ca. 700 °C.

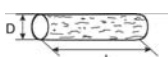
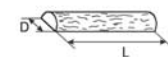

4.3 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Die physikalisch-mechanischen Kenngrößen kennzeichnen die Brennstoffmerkmale, die wesentlich durch die Ernte- und Aufbereitungstechnik bestimmt werden. Sie lassen sich durch Parameter wie Abmessungen, Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie („Stückigkeit“), Größenverteilung der Brennstoffteilchen, Feinanteil, Brückenbildungsneigung, Schütt- und Rohdichte und Abriebfestigkeit beschreiben.

Stückigkeit (Abmessungen, Geometrie). Festbrennstoffe werden auch durch ihre Form beschrieben. Diese wird unter anderem bestimmt durch die Abmessungen (d. h. Länge, Höhe, Breite) bzw. das Volumen.

Bei handbeschickten Feuerungsanlagen für Scheitholz (zum Teil auch für Briketts oder Ballen) werden z. B. spezifische Anforderungen an die maximalen Abmessungen des Brennstoffs gestellt. Je nach Tiefe des Feuerraums haben solche Scheite in der Endnutzungsform eine Länge von maximal einem Meter (für „Meterholzkessel“). Meist kommt aber 1- bis 3-mal geschnittenes und gespaltenes Meterholz mit Stücken von entsprechend 50, 33 bzw. 25 cm Länge zum Einsatz, wobei 33 cm Stücke eindeutig dominieren /4-11/. Je nach Abmessung lässt sich das Scheit-

Tabelle 4.3: Größenklassen für Holzscheite nach DIN CEN/TS 14961 /4-9/

Bezeichnung, Größengruppe	Länge L (mm)	Durchmesser D (mm)	
P200- ^a	bis 200	bis 20	
P200	200 (± 20)	40–150	
P250	250 (± 20)	40–150	
P330	330 (± 20)	40–160	
P500	500 (± 40)	60–250	
P1000	1000 (± 50)	60–350	
P1000+	über 1000 ^b	– ^b	

a. Anzündholz

b. mit Angabe der tatsächlichen Abmessungen L + D

holz größtenteils einer von 7 Größenklassen der neuen europäischen Klassifizierungs-(Vor-)Norm für Biomasse-Festbrennstoffe (DIN CEN/TS 14961 /4-9/) zuordnen. Für die maximalen Abweichungen der Scheitlängen und -durchmesser wurden darin bestimmte Anforderungen festgelegt (Tabelle 4.3).

Auch bei Pellets sind die zulässigen Abmessungen vorgegeben. Hierbei wird die bisher geltende deutsche Norm (DIN 51 731) von der neuen europäischen Klassifizierungsnorm DIN CEN/TS 14961 /4-8/ abgelöst (Tabelle 4.4). Die im häuslichen Bereich eingesetzten Holzpellets sollten demnach nicht länger sein als der 5-fache Durchmesser (Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Größenklassen für Holzpellets nach DIN CEN/TS 14961 /4-9/

Bezeichnung, Größengruppe	Durchmesser D (mm)	Länge L (mm)
D06	≤ 6 (± 0,5)	≤ 5 x D
D08	≤ 8 (± 0,5)	≤ 5 x D
D10	≤ 10 (± 0,5)	≤ 5 x D
D12	≤ 12 (± 1,0)	≤ 4 x D
D25	≤ 25 (± 1,0)	≤ 4 x D

Größenverteilung und Feinanteil. Die Fließ- und Transporteigenschaften von Schüttgütern werden – außer durch Partikelform und -größe – auch durch die Partikelgrößenverteilung sowie den Feinanteil (z. B. Abrieb von Pellets) bestimmt.

Beispielsweise reicht für die zuverlässige Beurteilung einer Brennstoffcharge von Fein-, Mittel- und Grobhackgut (Nennlänge ca. 30, 50 bzw. 100 mm) die Feststellung einer mittleren Teilchenlänge nicht aus. Vielmehr müssen auch die Anteile einzelner Größenklassen und vor allem die Maximallänge der Teilchen bekannt sein. Deshalb werden biogene Festbrennstoffe zunehmend nach der Größenverteilung der Teilchen klassifiziert. Ein solches Klassifizierungssystem aus Österreich zeigt Tabelle 4.5.

Inzwischen wurde auch ein entsprechendes europäisches Klassifizierungssystem erarbeitet, welches das in Deutschland zum Teil noch gebräuchliche österreichische System ablösen soll. Tabelle 4.6 zeigt die hierzu festgelegten 4 Klassen für Holzhackschnittel. Ein ähnliches System wurde auch für das sogenannte „Schredderholz“ erarbeitet, welches – anders als Hackschnittel – nicht mit scharfen Messern, sondern mit stumpfen Werkzeugen zerkleinert wurde /4-24/.



Tabelle 4.5: Anforderungen an die Größenverteilung nach der österreichischen Norm für Holzhackgut (ÖNORM M7133 /4-24/)

	Zulässige Massenanteile und jeweilige Bandbreite für Teilchengröße (nach Siebanalyse)				Zulässige Maximalwerte	
	max. 20 %	60–100 %	max. 20 %	max. 4 %	Querschnitt	Länge
G 30	> 16 mm	16–2,8 mm	< 2,8 mm	< 1 mm	3 cm ²	8,5 cm
G 50	> 31,5 mm	31,5–5,6 mm	< 5,6 mm	< 1 mm	5 cm ²	12 cm
G 100	> 63 mm	63–11,2 mm	< 11,2 mm	< 1 mm	10 cm ²	25 cm

Tabelle 4.6: Anforderungen an die Größenverteilung nach der neuen europäischen Klassifizierungsnorm DIN CEN/TS 14961 /4-9/

Bezeichnung, Größengruppe	Hauptfraktion > 80 % (Masse)	Feinfraktion < 5 %	Grobfraktion < 1 %
P16	3,15 bis 16 mm	1 mm	> 45 mm (alle < 85 mm)
P45	3,15 bis 45 mm	1 mm	> 63 mm
P63	3,15 bis 63 mm	1 mm	> 100 mm
P100	3,15 bis 100 mm	1 mm	> 200 mm

Die Größenverteilung der Brennstoffteilchen hat vielfältige technische Auswirkungen. Besonders stark betroffen von einer ungleichmäßigen Größenverteilung sind die mechanischen Entnahme-, Förder- und Beschickungssysteme von Konversionsanlagen. Zu große oder zu lange Teilchen führen zu Blockaden und auch Schäden an den Förderaggregaten oder senken die Durchsatzleistung. Auch die Riesel- bzw. Fließfähigkeit werden durch die Größenverteilung bestimmt.

Brückenbildungsneigung (Rieselbarkeit). Bei der Entnahme aus Silos oder Tagesvorratsbehältern kann es zur Bildung von Hohlräumen (Brücken) kommen, die dazu führen, dass der Brennstoff nicht mehr in die darunter liegenden Förderaggregate nachrutscht. Die Brückenbildungsneigung biogener Festbrennstoffe nimmt mit dem Wassergehalt, der Schütthöhe und vor allem mit dem Anteil verzweigter oder überlanger Teilchen zu. Gleichmäßige Partikelgrößen und glatte Oberflächen (z. B. Pellets, rindenfreies Hackgut) vermindern dagegen das Brückenbildungsrisiko /4-19/. Eine nachträgliche Sortierung zum Erreichen gleich-

mäßigerer Materialeigenschaften führt somit zu einer deutlichen Verbesserung bei diesem Parameter.

Rohdichte (Einzeldichte). Die Roh- oder Einzeldichte eines Brennstoffs beschreibt die eigentliche Materialdichte (d. h. ohne Berücksichtigung der Hohlräume zwischen den Teilchen). Sie beeinflusst die Schütt- bzw. Stapeldichte und einige feuerungstechnisch relevante Eigenschaften (z. B. spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate) sowie die Eigenschaften bei der pneumatischen Förderung und Beschickung.

Tabelle 4.7 zeigt die Rohdichten verschiedener einheimischer Holzarten im absolut trockenen Zustand. Hierbei handelt es sich um grobe Mittelwerte. Die tatsächlichen Werte können je nach Alter, Standort, Sorte oder Baumteil stark schwanken /4-17/.

Bei Aufsättigung mit Wasser bis zum Fasersättigungspunkt (ca. 19 bis 25 % Wassergehalt) erhöht sich das Volumen um das so genannte Schwindmaß; dies hat auch entsprechende Auswirkungen auf die Dichte des feuchten Brennstoffs. Diese Volumenvergrößerung beträgt bei Buche bzw. Eiche 17,9 bzw. 12,2 % und bei Fichte bzw. Kiefer ca. 11,9 bzw. 12,1 % /4-17/.

Tabelle 4.7: Rohdichte (einschließlich Volumenschwund) von absolut trockenem Holz („Darrdichte“) (/4-23/, /4-17/)

Weichhölzer (bis 0,55 g/cm ³)		Harthölzer (über 0,55 g/cm ³)	
Fichte	0,43 g/cm ³	Eiche	0,66 g/cm ³
Tanne	0,41 g/cm ³	Bergahorn	0,59 g/cm ³
Kiefer	0,49 g/cm ³	Esche	0,65 g/cm ³
Douglasie	0,47 g/cm ³	Buche	0,68 g/cm ³
Lärche	0,55 g/cm ³	Birke	0,61 g/cm ³
Linde	0,49 g/cm ³	Hain-/Weißbuche	0,75 g/cm ³
Pappel ^a	0,41 g/cm ³	Hasel	0,56 g/cm ³
Weide ^a	0,33 g/cm ³	Ulme	0,64 g/cm ³

a. gilt nicht für Holz aus Kurzumtriebsplantagen



Die Rohdichte kann nur bei der Herstellung hochverdichteter Presslinge (d. h. Pellets, Briketts) beeinflusst werden. Daher wird sie vereinfachend auch als Merkmal für die Güte eines derartigen Herstellungsprozesses verwendet. Eine hohe Rohdichte deutet auf eine große Härte des Presslings hin; hier ist dann mit geringen Abriebeffekten und Feinanteilen zu rechnen. Deshalb müssen beispielsweise normgerechte Holzpresslinge nach DIN 51 731 eine Rohdichte von 1,0 bis 1,4 g/cm³ besitzen, wobei der Wassergehalt von maximal 12 % zur Brennstoffmasse gezählt wird /4-8/.

Die Unterschiede zwischen Rohdichte und Schütt- bzw. Stapeldichte führen dazu, dass ein in Volumeneinheiten angegebenes Brennstoffaufkommen häufig in die eine oder andere Bezugsform umgerechnet werden muss. Beispielsweise werden Holz mengen im Rohzustand meist in Festmetern angegeben (d. h. ohne Berücksichtigung von Hohlräumen); bereitgestellte Brennstoffe werden hingegen in Raum- bzw. Schüttraummetern bemessen. Für Scheitholz lassen sich diese Maße mit Hilfe der Umrechnungszahlen in Tabelle 4.9 ineinander umrechnen. Im Einzelfall können die Werte jedoch stark abweichen.

Lagerdichte (Schütt- und Stapeldichte). Insbesondere das erforderliche Lager- und Transportvolumen der Brennstoffe wird von der Schüttdichte bzw. bei nicht-schüttfähigen Brennstoffen von der Stapeldichte bestimmt. Die Schüttdichte ist dabei definiert als der Quotient aus der Masse des in einen Behälter eingefüllten Brennstoffs und dem Volumen dieses Behälters /4-5/. Hohlräume zwischen den Brennstoffteilchen werden also vom Volumen nicht abgezogen; das gilt auch bei der Stapeldichte. Übliche Werte für die bei der Raumbedarfsplanung verwendeten Lagerdichten gibt Tabelle 4.8.

Zum Vergleich von Brennstoffmassen müssen die Dichteangaben gelegentlich auf den jeweiligen Wassergehalt bzw. auf die Trockenmasse umgerechnet werden. Aus praktischen Gründen wird dabei die Volumenänderung durch Quellung und Schrumpfung, die unterhalb des Fasersättigungspunktes eintritt (siehe „Rohdichte“), normalerweise nicht berücksichtigt, so dass die Frischmassedichte (ρ_F) bzw. die Trockenmassedichte (ρ_{TM}) nach Gleichung (4-4) und (4-5) errechnet werden kann, wobei w_N der Wassergehalt bezogen auf die Gesamtmasse ist (angegeben als Dezimalbruch).

$$\rho_F = \frac{\rho_{TM}}{1 - F_N} \tag{4-4}$$

$$\rho_{TM} = \rho_F \cdot (1 - F_N) \tag{4-5}$$

Tabelle 4.8: Typische Schütt- und Stapeldichten biogener Festbrennstoffe bei 15 % Wassergehalt (außer Pellets: 8 %) /4-13/, /4-2/, /4-15/

Schütt-/Stapeldichte		
Holzbrennstoffe:		in kg/m ³ :
Scheitholz (33 cm gestapelt)	Buche	455
	Fichte	304
Hackgut	Weichholz (Fichte)	194
	Hartholz (Buche)	295
Rinde	Nadelholz	180
Sägemehl		160
Hobelspäne		90
Pellets		650
landwirtschaftliche Brennstoffe:		
Quaderballen	Stroh, Miscanthus	140
	Heu	160
	Getreideganzpflanzen	190
Häckselgut	Miscanthus	110
	Getreideganzpflanzen	150
Getreidekörner	(Triticale)	750



Auch bei Holzhackschnitzeln kann mit der Trocknung und Wiederbefeuchtung eine Volumenänderung eintreten. Im Durchschnitt verschiedener Holzarten kann diese Volumenänderung, die normalerweise zwischen 0 % (absolut trocken) und ca. 25 % Wassergehalt eintritt, maximal ca. 18 % betragen. Schüttdichtebestimmungen, die bei Wassergehalten von weniger als 25 % zustande kommen, sollten daher korrigiert werden, wenn sie auf einen einheitlichen Referenzwassergehalt bezogen werden sollen. Für jeden Prozentpunkt Wassergehaltsunterschied kann hierfür der lineare Korrekturfaktor 0,71 % verwendet werden /4-2/, /4-3/, d. h. um beispielsweise eine Messung bei $w = 25\%$ mit einer weiteren Messung bei $w = 15\%$ vergleichen zu können, muss die Schüttdichte der trockeneren Probe um 7,1 % erhöht werden.

4.4 Brennstoffmengenrechnung (Umrechnungszahlen)

Neuere Messungen zeigen, dass ein Raummeter (Rm) Brennholz in Form von geschichteten 33-cm-Scheiten aus durchschnittlich 0,62 Festmetern (Fm) Buchenholz bzw. 0,64 Fm Fichtenholz hervorgeht (Tabelle 4.9). Für einen Raummeter geschichtete 33-er Scheite werden 1,16 Rm Fichten-Meterscheite, aber 1,23 Rm Buchen-meterscheite benötigt. Umgekehrt bedeutet dies, dass ein Brennholzkunde, der beim Brennholzhändler einen Raummeter ofenfertiges Buchenholz bestellt und

Tabelle 4.9: Umrechnungsfaktoren für Raummaße bezogen auf unterschiedliche Grundsортimente (mit Rinde) /4-15/

Holzart	Festmeter (Fm)	Rundlinge geschichtet (Rm)	gespalten 1 m, geschichtet (Rm)	Scheite 33 cm, geschichtet (Rm)	Scheite 33 cm, lose geschüttet (SRm)
<i>bezogen auf einen Festmeter (mit Rinde):</i>					
Buche	1,00	1,70	1,98	1,61	2,38
Fichte	1,00	1,55	1,80	1,55	2,52
<i>bezogen auf einen Raummeter Rundlinge:</i>					
Buche	0,59	1,00	1,17	0,95	1,40
Fichte	0,65	1,00	1,16	1,00	1,63
<i>bezogen auf einen Raummeter gespaltener Meterscheite:</i>					
Buche	0,50	0,86	1,00	0,81	1,20
Fichte	0,56	0,86	1,00	0,86	1,40
<i>bezogen auf einen Raummeter gestapelter 33-er Scheite (gespalten):</i>					
Buche	0,62	1,05	1,23	1,00	1,48
Fichte	0,64	1,00	1,16	1,00	1,62
<i>bezogen auf einen Schüttraummeter 33-er Scheite (gespalten):</i>					
Buche	0,42	0,71	0,83	0,68	1,00
Fichte	0,40	0,62	0,72	0,62	1,00

hierbei die im Handel häufig geltende Bemessungsgrundlage des Meterscheitholzmaßes (gespalten) vereinbart, bei der Auslieferung im aufbereiteten Zustand als 33-er Scheite nur noch 0,81 Rm erhält, während es beim Fichtenholz noch 0,86 Rm sind. Größere Holzartenunterschiede bestehen auch beim lose geschütteten Scheitbrennstoff (Tabelle 4.9).

Zur Bestimmung der Energiemenge, die in einer bestimmten Brennstoffcharge vorliegt (z. B. in MJ oder kWh), muss zunächst ihr Gewicht bekannt sein oder es muss geschätzt werden. Scheitholz wird aber üblicherweise nach Volumen gehandelt, wobei als Bezugsgröße in der Regel der Rauminhalt von einem Kubikmeter gestapeltem Holz verwendet wird („Raummeter“ oder „Ster“). Bei groben Mengenabschätzungen kann überschlägig davon ausgegangen werden, dass ein Kubikmeter gestapeltes Holz etwa 0,65 Festmetern entspricht. Vom Festmeter lässt sich wiederum auf die vorliegende Holzmasse schließen, dazu muss die Holzdicke bekannt sein. Da Holz in der Natur nie im absolut wasserfreien Zustand vorkommt, sollte es sich bei der verwendeten Dichte nicht um die „Darrdicke“ handeln (vgl. Tabelle 4.7), sondern um die Holzdicke beim jeweils vorliegenden Wassergehalt. Für vier verschiedene Holzarten (Buche, Eiche, Fichte und Kiefer) wurden diese Zusammenhänge bei der Berechnung der Raumgewichte bei verschiedenen Wassergehalten in Tabelle 4.10 berücksichtigt. Für Eiche und Kiefer wurden

dabei die in Tabelle 4.9 für Buche bzw. Fichte festgestellten Umrechnungsfaktoren verwendet.

Vereinfachte Planungszahlen wurden auch verwendet, um die Raumgewichte von Holzhackschnitzel in Tabelle 4.9 zu berechnen. Zur Umrechnung vom Festmeter zum Hackschnitzel-Schüttkubikmeter wird allgemein der Faktor 2,43 verwendet /4-4/. Das bedeutet, dass aus einem Festmeter Holz 2,43 Schüttraummeter (m^3) Hackschnitzel produziert werden können.

Brennstoffbedarfsrechnung. In der Regel ist der Wärmebedarf oder die zu ersetzende Menge an konventionellen Energieträgern (Heizöl, Gas, Strom) an einem vorgesehenen Einsatzort bekannt. Mit diesen Angaben und den vorgenannten Umrechnungszahlen lässt sich nun die insgesamt – zum Beispiel für eine Heizperiode – benötigte Biomassemenge ermitteln. Hierzu wird zunächst der Energieinhalt in einem Kubikmeter oder in einem Raummeter der jeweiligen Brennstoffart festgestellt. Er ergibt sich aus der zuvor bestimmten Masse multipliziert mit dem Heizwert der jeweiligen Biomasseart. Da der Heizwert wiederum stark vom Wassergehalt abhängig ist, muss auch hierzu eine gesonderte Berechnung erfolgen. Dazu wird der Heizwert der absolut trockenen Masse (aus Tabelle 4.2) in den Heizwert der Frischmasse (inkl. Wasser) gemäß Gleichung (4-3) umgerechnet. Die Masse eines Raummeters, eines Kubikmeters oder

Tabelle 4.10: Raumgewichte verschiedener Holzarten und Aufbereitungsformen (Festmeter, 33-cm-Scheitholz-Raummeter, Hackschnitzel-Schüttkubikmeter) in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Berechnung für Hackschnitzel: $1 \text{ Fm} = 2,43 \text{ m}^3$

Wassergehalt w (%)	Buche ^a			Eiche ^a			Fichte ^a			Kiefer ^a		
	Fm	SH (Rm)	HS (m ³)	Fm	SH (Rm)	HS (m ³)	Fm	SH (Rm)	HS (m ³)	Fm	SH (Rm)	HS (m ³)
Raumgewichte ^b in kg												
0	680	422	280	660	410	272	430	277	177	490	316	202
10	704	437	290	687	427	283	457	295	188	514	332	212
15	716	445	295	702	436	289	472	304	194	527	340	217
20	730	453	300	724	450	298	488	315	201	541	349	223
30	798	495	328	828	514	341	541	349	223	615	397	253
40	930	578	383	966	600	397	631	407	260	718	463	295
50	1.117	694	459	1.159	720	477	758	489	312	861	556	354



a. Fm Festmeter, SH Scheitholz (33 cm, geschichtet), HS Hackschnitzel, Rm Raummeter

b. mit Berücksichtigung der Tatsache, dass Holz bei der Trocknung um das Schwindmaß schrumpft. Die hier gewählten trockenen Holzdichten (Festmetermasse bei $w = 0\%$) ergeben sich aus den Rohdichten der Tabelle 4.7. Die jeweilige Holzdicke (mit Wasser) wurde korrigiert um das Schwindmaß (Buche 17,9 %, Eiche 12,2 %, Fichte 11,9 %, Kiefer 12,1 %), wobei zwischen Darrdichte und dem jeweiligen Fasersättigungspunkt ($w = 25, 19, 25$ bzw. 21 % bei Bu, Ei, Fi, Ki, nach /4-17/) eine lineare Volumenänderung angenommen wurde.

Tabelle 4.11: Planungszahlen zur Beurteilung des Energiegehaltes einer Brennstoffmenge (bei Scheitholz und Hackschnitzeln wurde die unterhalb 25 % Wassergehalt eintretende Volumenänderung berücksichtigt)

Brennstoff	Menge/ Einheit	Wasser- gehalt w (%)	Masse (inkl. Wasser) (kg)	Heizwert (bei w) (MJ/kg)	Brennstoffmenge		
					in MJ	in kWh	in Heizöl- äquivalent (Liter)
<i>Scheitholz (geschichtet):</i>							
Buche 33 cm, lufttrocken	1 Rm	15	445	15,3	6.797	1.888	189
Buche 33 cm, angetrocknet	1 Rm	30	495	12,1	6.018	1.672	167
Fichte 33 cm, lufttrocken	1 Rm	15	304	15,6	4.753	1.320	132
Fichte 33 cm, angetrocknet	1 Rm	30	349	12,4	4.339	1.205	121
<i>Holz hackschnitzel:</i>							
Buche, trocken	m ³	15	295	15,3	1.503	1.251	125
Buche, beschränkt lagerfähig	m ³	30	328	12,1	3.987	1.107	111
Fichte, trocken	m ³	15	194	15,6	3.032	842	84
Fichte, beschränkt lagerfähig	m ³	30	223	12,4	2.768	769	77
<i>Pellets:</i>							
Holzpellets, nach Volumen	m ³	8	650	17,1	11.115	3.088	309
Holzpellets, nach Gewicht	1 t	8	1 000	17,1	17.101	4.750	475
<i>Brennstoffe nach Gewicht:</i>							
Buche, lufttrocken	1 t	15	1 000	15,3	15.274	4.243	424
Buche, angetrocknet	1 t	30	1 000	12,1	12.148	3.374	337
Fichte, lufttrocken	1 t	15	1 000	15,6	15.614	4.337	434
Fichte, angetrocknet	1 t	30	1 000	12,4	12.428	3.452	345
Halmgut (z. B. Stroh)	1 t	15	1 000	14,3	14.254	3.959	396

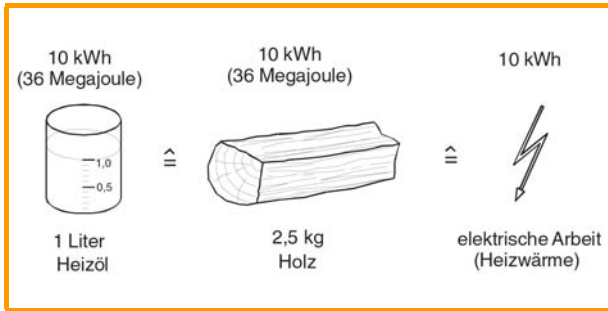


Abb. 4.2: Faustzahlen für den Energiegehalt von trockenem Holz

einer Tonne Brennstoff (in kg) wird nun multipliziert mit dem ermittelten Heizwert des feuchten Brennstoffs (in MJ/kg) und ergibt so die Brennstoffmenge in Megajoule. Diese Brennstoffmenge lässt sich nun leicht in kWh oder Liter Heizöläquivalent umrechnen (Abb. 4.2), und zwar gilt hier:

$$1 \text{ l Heizöl} = 10 \text{ kWh} = 36 \text{ MJ}$$

Die Brennstoffmenge in MJ wird somit durch 36 geteilt, um zur Energiemenge in Litern Heizöläquivalent zu gelangen. Um Kilowattstunden zu erhalten, teilt man durch 3,6. Auf diese Weise errechnen sich auch die Zahlenbeispiele, die für verschiedene Brennstoffe in Tabelle 4.11 zur Vereinfachung zusammengestellt wurden. So entspricht beispielsweise ein Raummeter lufttrockenes geschichtetes Fichtenholz (33 cm) der Energiemenge von 132 l Heizöl, während ein Kubikmeter Holzpellets etwa 309 l Heizöl entspricht.

Die insgesamt benötigte Brennstoffmenge ergibt sich demnach aus dem Gesamtbedarf (in kWh bzw. Litern Heizöl) dividiert durch den Energiegehalt einer Massen- oder Volumeneinheit des jeweiligen Biomassebrennstoffs. Wird beispielsweise eine Heizölmenge von 3.000 l durch trockenes Fichtenscheitholz ersetzt, so sind hierfür mindestens 22,7 Raummeter (als 33-cm-Scheite) erforderlich, da ein Raummeter einem Energieäquivalent von ca. 132 Litern Heizöl entspricht (vgl. Tabelle 4.11). Auf Grund der Wirkungsgradunterschiede bei der Verbrennung müssen jedoch in der Regel noch leichte Zuschläge von ca. 10 % hinzuaddiert werden.

Sollen die Beschaffungskosten je Liter Heizöläquivalent ausgerechnet werden, ist ähnlich vorzugehen. Wenn beispielsweise angetrocknetes Buchenscheitholz (33 cm) mit 30 % Wassergehalt für 70 € pro Raummeter (Rm) frei Haus angeliefert werden soll (vgl. Holzpreise in Kapitel 9), so entspricht das einem Heizöläquivalent von 167 l/Rm und einem Heizölpreis von 41,9 ct/l. Da das Holz aber mit 30 % Wassergehalt noch nicht verbrannt werden kann, muss es weiter gelagert werden, wobei es auf ca. 15 % Wasser-

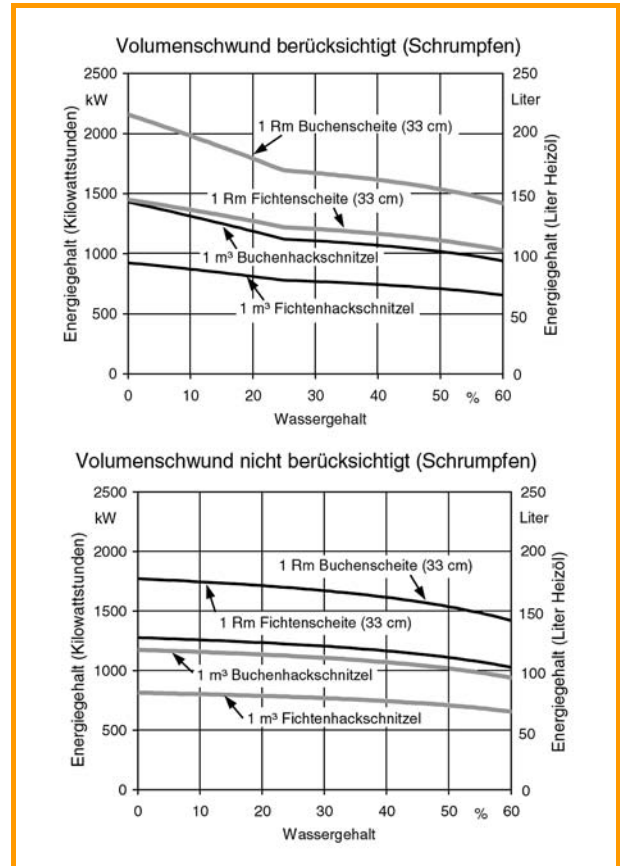


Abb. 4.3: Energieinhalt in einem Raummeter (Rm) Scheitholz bzw. in einem Kubikmeter Holzhackschnittel bei unterschiedlichem Wassergehalt, mit und ohne Berücksichtigung der Volumenänderung durch Quellen und Schrumpfen. Oben: Volumenschwund wird aufgefüllt, unten: Volumenschwund wird nicht aufgefüllt (d. h. gleichbleibende Trockenmasse)

gehalt abtrocknet. Dabei erhöht sich der Energiegehalt aber nur unwesentlich von 167 auf 173 l Heizöl pro Rm (die Trockenmasse bleibt ja gleich). Diesen Anstieg zeigt Abb. 4.3 (unten), darin bleibt die Trockenmasse mit zunehmender Trocknung gleich, da der eingetretene Volumenschwund nicht wieder aufgefüllt wird. Der Heizöläquivalentpreis sinkt durch diese Trocknung nur um 1,4 ct auf 40,5 ct/Liter.

Wenn allerdings bereits ofenfertig getrocknetes Holz bezogen wird, ist die Energiemenge in einem Raummeter höher, da der durch die Trocknung eintretende Volumenschwund noch beim Lieferanten eintritt und dort aufgefüllt werden kann. In diesem Fall ist die Holzmasse in einem Raummeter trockenem Buchenholz höher, dadurch ist der in Tabelle 4.11 genannte Energiegehalt von 189 Litern Heizöläquivalent je Raummeter anzusetzen. Der hier gegebene Zusammenhang zwischen Energiemenge und Was-

sergehalt ist in Abb. 4.3 (oben) dargestellt. Diese Werte sind dann anzuwenden, wenn eine Sofortbewertung einer bereits getrockneten Brennstoffpartie erfolgen soll.

Im Bereich der bei Kleinf Feuerungen üblichen Brennstoffwassergehalte ist der Einfluss der Trocknung auf die Brennstoffmenge vergleichsweise gering, er lässt sich anhand des in Abb. 4.3 (unten) dargestellten Zusammenhangs ablesen. In der Praxis wird der Wassergehaltseinfluss häufig überschätzt, da gelegentlich von einem proportionalen Verlauf wie beim massebezogenen Heizwert ausgegangen wird

(vgl. hierzu Abb. 4.1 in Kapitel 4.2.2.). Generell ist somit festzustellen, dass die Trocknung von Scheitholz brennstoffen nur bei sehr feuchten Brennstoffen mit einer nennenswerten Heizwertsteigerung verbunden ist. Im unteren Wassergehaltsbereich dient sie dagegen hauptsächlich der Qualitätsverbesserung und der Verlustminimierung. Gleichwohl sind Kleinf Feuerungen aber aus technischen Gründen und wegen der Emissionsvermeidung auf trockene Brennstoffe angewiesen.

