



MÖGLICHES POTENTIAL DER ENERGIEPFLANZEN IN ÖSTERREICH

Biogene Festbrennstoffe und deren thermo-chemische Eigenschaften

Diplomarbeit

eingereicht von:
Alex Abfalterer

Betreuer: Ao.Univ.Prof Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Herbert Braun
Mitbetreuer: Ao.Univ.Prof Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Peter Schwarzbauer

Matrikelnummer 0440456

Wien, Oktober 2010

***"Wenn ich wüsste, dass morgen die Welt untergeht,
würde ich heute noch ein Bäumchen pflanzen."***

Martin Luther (* 1483, † 1546)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen, die mir bei der Erstellung der Diplomarbeit geholfen haben, danken.

Spezieller Dank gilt Ao.Univ.Prof Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Herbert Braun und Ao.Univ.Prof Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Peter Schwarzbauer für Ihre unkomplizierte und professionelle Betreuung und Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Peter Liebhard für seine Hilfsbereitschaft.

Der größte Dank gilt natürlich meinen Eltern Theresia und Paul und meinen Schwestern Ruth und Petra. Ohne deren Unterstützung und Vertrauen wären das Studium und diese Diplomarbeit nicht zustande gekommen.

Abstract

The constant rise in the demand for electricity and heat has resulted in increasing importance of biomass and solid biofuels in public policy discussions in recent years.

Here we consider this in the areas of forestry and agriculture and handle the following themes in detail.

The Austrian forest area amounts to ca 3.96 million ha (according to ÖWI 2000/2002). This represents approximately 47.2 % of the national territory. According to ÖWI 2000/2002, however, only roughly two thirds of the annual growth is be used for all purposes.

The agricultural area in Austria which was utilized for the production of energy crops in 2006 is estimated at 50,000 ha. This was mainly devoted to the production of biogas. Oilseeds, vegetable oil and biodiesel were produced in smaller quantities. The cultivation of miscanthus and energy wood as well as the use of straw for energy is still of relatively minor importance.

Harvesting crops from forestry areas (wood) as well as agricultural areas (mown crop) are intermediate products which must be prepared and processed mechanically for the requirements of the specific conversion plants.

Depending on the chemical composition, solid biofuels have significant variations concerning their fuel properties (heating or calorific value, water or ash content, etc.). These properties determine the possibilities and limitations of thermochemical conversion.

Providing final or useful energy from solid biofuels takes place either by complete combustion or by previous conversion to secondary energy carriers. Consequently the thermochemical conversion always leads- whether in several (spatial and temporal) decoupled steps - in combustion (oxidation as completely as possible), whereby in such processes gaseous oxidation products (exhaust fumes) and unburned mineral residuals (ash) arise. The emissions produced during combustion can be reduced by further measures (creation of a combustion as completely as possible and/or an emissions control).

The ash from combustion of untreated biomass includes high nutrients. Therefore returning the ash which is produced by thermochemical conversion to forestry and agricultural areas might contribute in closing the nutrient cycle.

Kurzfassung

Zur Deckung der ständig steigenden Nachfrage an Strom bzw. Wärme haben Biomasse bzw. biogene Festbrennstoffe in der öffentlichen Diskussion zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Österreichs Waldfläche beträgt laut ÖWI 2000/2002 ca. 3,96 Mio. ha, was in etwa 47,2 % der Staatsfläche entspricht. Laut ÖWI 2000/2002 werden jedoch nur ca. zwei Drittel des jährlichen Zuwachses genutzt. Die in Österreich zur Erzeugung von Energiepflanzen genutzten landwirtschaftlichen Flächen wurden im Jahr 2006 auf ca. 50.000 ha geschätzt. Auf dem Großteil dieser Flächen wuchsen Pflanzen zur Produktion von Biogas, gefolgt von Ölsaaten zur Pflanzenöl- bzw. Biodieselproduktion. Der Anbau von Miscanthus und Energieholz sowie die energetische Nutzung von Stroh nehmen derzeit noch eine untergeordnete Rolle ein.

Sowohl bei Erntegut von forstwirtschaftlichen Flächen (Holz) als auch von landwirtschaftlicher Biomasse (Mähgut) handelt es sich im Grunde um ein Zwischenprodukt, das anschließend mechanisch aufbereitet bzw. weiterverarbeitet wird. Diese Verarbeitungsschritte ermöglichen eine Anpassung der Biomassenmerkmale an die Anforderungen der jeweiligen Konversionsanlagen.

Je nach Elementarzusammensetzung weisen biogene Festbrennstoffe erhebliche Schwankungen hinsichtlich ihrer Brennstoffeigenschaften (Heiz- bzw. Brennwert, Wasser- und Aschegehalt etc.) auf. Diese Eigenschaften bestimmen die Möglichkeiten und Grenzen der thermo-chemischen Umwandlung.

Die Bereitstellung von End- bzw. Nutzenergie aus biogenen Festbrennstoffen auf Basis einer thermo-chemischen Umwandlung erfolgt entweder direkt durch eine vollständige Verbrennung oder durch eine vorherige Umwandlung in Sekundärenergieträger. Die thermo-chemische Umwandlung führt also letztlich immer - wenn auch ggf. über mehrere (räumlich und zeitlich) entkoppelte Umwandlungsschritte - in eine möglichst vollständige Verbrennung (Oxidation), wobei gasförmige Oxidationsprodukte (Abgase) sowie unverbrannte mineralische Rückstände (Asche) entstehen. Die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen können durch weitere Maßnahmen (Schaffung eines möglichst vollständigen Ausbrandes und/oder nachgeschaltete Abgasreinigung) gemindert werden.

Da die aus der Verbrennung von unbehandelter Biomasse entstehende Asche hohe Nährstoffgehalte aufweist, könnte eine Rückführung bzw. Ausbringung auf land- und forstwirtschaftliche Flächen zu einer Schließung des Nährstoffkreislaufes beitragen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Abstract	VI
Kurzfassung	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XIV
Gleichungsverzeichnis	XV
1. Einleitung	1
2. Biogene Festbrennstoffe als nachwachsende Energieträger	3
2.1 Definition Biomasse/biogene Festbrennstoffe	3
2.1.1 Hackgut	6
2.1.2 Pellets	6
2.1.3 Briketts (Presslinge)	7
2.2 Biomasseentstehung	8
2.2.1 Pflanzenaufbau	8
2.2.2 Pflanzenzusammensetzung	9
2.2.3 Photosynthese	10
2.2.4 Einflussfaktoren auf die Biomasseentstehung	14
2.3 Versorgungskette Biomasse	18
2.3.1 Definition der Energiebegriffe	18
3. Biomassenpotential in Österreich	21
3.1 Flächenverteilung in der Land- und Forstwirtschaft	21
3.2 Biomasse aus der Forstwirtschaft	23
3.3 Biomasse aus der Landwirtschaft	27
3.4 Forstwirtschaftliche Stoffströme	27
3.5 Landwirtschaftliche Stoffströme	29
4. Produktion biogener Festbrennstoffe	32
4.1 Lignozellulosepflanzen	32
4.1.1 Schnellwachsende Baumarten	33
4.1.2 Miscanthus	37
4.1.3 Futtergräser	40
4.1.4 Getreideganzpflanzen	43
4.2 Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen,	45
4.3 Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle	46
4.3.1 Durchforstungs- und Waldrestholz	46
4.3.2 Industrie- und Sägerestholz	47
4.3.3 Landschaftspflegeholz	49
4.3.4 Stroh	50
5. Ernte	51

5.1	Holz aus dem Wald	51
5.1.1	Fällen	52
5.1.2	Rücken und Vorliefern	55
5.2	Holz aus Kurzumtriebsplantagen	56
5.2.1	Manuelles Ernteverfahren mit Motorsäge	57
5.2.2	Absätzliches maschinelles Verfahren	58
5.2.3	Einphasiges maschinelles Ernteverfahren	58
5.3	Mähgut	59
5.3.1	Mähverfahren	59
5.3.2	Wendeverfahren	59
5.3.3	Schwadverfahren	60
5.3.4	Schwadmähverfahren	60
5.4	Häckselgut	60
5.5	Ballen	61
5.5.1	Hochdruckballenpressen	62
5.5.2	Quaderballenpressen	62
5.5.3	Rundballenpressen	62
5.5.4	Restholz-Ballen und Holzbündel	63
6.	Aufbereitung	64
6.1	Scheitholzbereitung	64
6.1.1	Sägen	64
6.1.2	Spalten	65
6.2	Hackgut- und Schreddergutbereitung	67
6.2.1	Hacker	67
6.2.2	Schredder	69
6.2.3	Zerspaner	69
6.3	Ballenauflöser	70
6.4	Sieben und Sortieren	71
6.5	Pressen	72
6.5.1	Brikettierung	73
6.5.2	Pelletierung	74
7.	Lagerung	77
7.1	Brennstofflagerung	78
7.2	Lagerein- und -austragungssysteme	79
7.2.1	Hackgut	80
7.2.2	Pellets	82
7.2.3	Halmgut	82
7.3	Trocknung	83
7.3.1	Bodentrocknung	83
7.3.2	Trocknung durch Selbsterwärmung	84
7.3.3	Belüftungstrocknung	84
7.3.4	Trocknungseinrichtungen	85
8.	Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften	85
8.1	Elementarzusammensetzung	85
8.1.1	Hauptelemente	86
8.1.2	Emissionsrelevante Elemente	87
8.1.3	Spurenelemente	88
8.2	Brennstofftechnische Eigenschaften	89
8.2.1	Heizwert und Brennwert	89
8.2.2	Wassergehalt und Brennstoff-Feuchte	91

8.2.3	Aschegehalt.....	94
8.2.4	Ascheerweichungsverhalten	95
8.3	Physikalisch-mechanische Eigenschaften.....	96
8.3.1	Größenverteilung und Feinanteil	96
8.3.2	Fließeigenschaften und Brückenbildungsneigung	97
8.3.3	Schütt- und Lagerdichte.....	97
9.	Thermo-chemische Umwandlung biogener Festbrennstoffe	98
9.1	Begriffe.....	98
9.1.1	Luftüberschusszahl (Luftüberschuss, Luftzahl)	99
9.1.2	Verbrennung.....	100
9.1.3	Vergasung	100
9.1.4	Pyrolytische Zersetzung	101
9.1.5	Verflüssigung	101
9.1.6	Verkohlung.....	101
9.1.7	Torrefizierung.....	102
9.2	Phasen der thermo-chemischen Umwandlung	102
9.2.1	Aufheizung und Trocknung.....	103
9.2.2	Pyrolytische Zersetzung	103
9.2.3	Vergasung	104
9.2.4	Oxidation.....	104
9.3	Schadstoffbildung	105
9.3.1	Stoffe aus vollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile.....	105
9.3.2	Stoffe aus unvollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile.....	106
9.3.3	Stoffe aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen	109
9.4	Techniken zur Emissionsminderung	113
9.4.1	Primärmaßnahmen	114
9.4.2	Sekundärmaßnahmen	115
10.	Feste Verbrennungsrückstände.....	118
10.1	Aschefractionen	119
10.2	Aschezusammensetzung.....	120
10.3	Ascheverwertung	121
10.3.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	123
11.	Zusammenfassung und Ausblick	125
12.	Anhang	129
12.1	Abkürzungsverzeichnis.....	129
12.2	Stichwortverzeichnis.....	132
12.3	Vorsätze und Vorzeichen	134
12.4	Umrechnungstabellen	135
	Literaturverzeichnis	136
	Eidesstattliche Erklärung	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Formen biogener Festbrennstoffe	5
Abbildung 2.2: Rhizom am Beispiel von Miscanthus	8
Abbildung 2.3: Bildung und Zusammensetzung der Pflanzensubstanz	10
Abbildung 2.4: Der Photosyntheseprozess	11
Abbildung 2.5: Schematischer Tagesverlauf des CO ₂ -Gaswechsels in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot	12
Abbildung 2.6: Massezuwachs verschiedener Feldfutterpflanzen im Jahresverlauf	12
Abbildung 2.7: Stoffbilanz einer Pflanzengesellschaft am Beispiel eines Heimbuchenwaldes..	13
Abbildung 2.8: Spektrum der Absorption bzw. Reflexion von Licht durch Pappelblätter	14
Abbildung 2.9: Nettophotosynthese verschiedener Pflanzen in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität	15
Abbildung 2.10: Nettoprimärproduktion von Wäldern in Abhängigkeit vom Jahresniederschlag und der mittleren Jahrestemperatur	16
Abbildung 2.11: Energiewandlungskette	19
Abbildung 2.12: Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse.....	20
Abbildung 3.1: Verteilung der Kulturarten nach Bundesländern (2007).....	21
Abbildung 3.2: Prozentuelle Verteilung der Kulturarten in den Bundesländern (2007).....	22
Abbildung 3.3: Verteilung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen in Österreich (Angaben in ha).....	22
Abbildung 3.4: Land- und forstwirtschaftliche Betriebe nach Bundesländern 1951 - 2007.....	23
Abbildung 3.5: Waldflächenzunahme in Österreich (Angaben in ha)	24
Abbildung 3.6: Geschätztes Potential an forstlicher Biomasse bis 2020	25
Abbildung 3.7: Ergebnisse der Österreichischen Waldinventur 2000/2002	26
Abbildung 4.1: Pflanzmaschine für Pappel- und Weidenstecklinge	35
Abbildung 4.2: Materialfluss von Holz durch die Volkswirtschaft	48
Abbildung 4.3: Sägerestholzanfall bei der Rohholzbearbeitung (ÖNORM M 7132)	49
Abbildung 5.1: Genereller Aufbau der Verfahrensketten zur Bereitstellung und Nutzung biogener Festbrennstoffe	51
Abbildung 5.2: Fälltechnik für motormanuelles Fällen mit der Kettensäge	52
Abbildung 5.3: Aufbau und Funktionsweise des Prozessorkopfes eines Holz-Harvesters	53
Abbildung 5.4: Fäller-Bündler mit Raupenketten.....	54
Abbildung 5.5: Forwarder mit Hilfsseilwinde	56
Abbildung 5.6: Bügelmotorsäge	57
Abbildung 5.7: Vollernter im Einsatz	58
Abbildung 5.8: Vorsatzgeräte für selbstfahrende Feldhäcksler	61
Abbildung 5.9: Praxisübliche Ballenpressen für die Halmgutbergung sowie Ballenmaße	61

Abbildung 5.10: Restholzbündler	63
Abbildung 6.1: Keilspalter zur Scheitholzaufbereitung	65
Abbildung 6.2: Spiralkegelspalter	66
Abbildung 6.3: Funktionsweise einer kombinierten Säge- Spaltmaschine (schematisch)	67
Abbildung 6.4: Funktionsweise eines langsam laufenden Zerspaners (schematisch)	70
Abbildung 6.5: Funktionsprinzipien verschiedener Ballenauflöser	71
Abbildung 6.6: Funktionsprinzipien von Scheiben-, Plan- und Trommelsieben (schematisch) ..	72
Abbildung 6.7: Arbeitsweise einer Kolbenstrangpresse mit schwungmasseunterstütztem Antrieb	74
Abbildung 6.8: Arbeitsprinzip von Kollergangpressen (mit Flach- und Ringmatrize).....	76
Abbildung 6.9: Querschnitt durch das Hohlwalzenpaar einer Zahnradpresse.....	76
Abbildung 7.1: Schematische Darstellung verschiedener Systeme zur Lageraustragung	81
Abbildung 7.2: Pelletslager mit Entnahme über Schrägboden und Entnahmeschnecke	82
Abbildung 8.1: Gehalte an Schwermetallen in Aschegemischen in Abhängigkeit vom Brennstoff (Rinde und Hackgut: Fichte; Stroh: Winterweizen; Getreide-Ganzpflanzen: Triticale).....	89
Abbildung 8.2: Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt bzw. der Feuchte.....	93
Abbildung 9.1: Phasen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe	103
Abbildung 9.2: Abbrandverhalten von Holz	105
Abbildung 9.3: CO-Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl bei 11 Vol.-% Sauerstoff im Abgas (CO/Lambda-Diagramm) für verschiedene Feuerungstechniken (a Einfache handbeschickte Holzfeuerung, b Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c Automatisch beschickte Holzfeuerung mit Verbrennungstechnik - Stand 1990, d Automatisch beschickte Holzfeuerung mit optimierter Verbrennungstechnik - heutiger Standard)	108
Abbildung 9.4: NO _x Bildung in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten (Richtwerte)	110
Abbildung 9.5: Einsatzbereich von Staubabscheidern	115
Abbildung 10.1: Aschegehalte verschiedener Biomasse-Brennstoffe (bei Hackgut und Spänen gelten die unteren Werte für Weichholz, die oberen für Hartholz).....	119
Abbildung 10.2: Prinzipien zur nachhaltigen Nutzung von Biomasseaschen	123
Abbildung 12.1: Vorsätze und Vorzeichen.....	134
Abbildung 12.2: Umrechnungsfaktoren für verschiedene Energieeinheiten.....	135
Abbildung 12.3: Umrechnungsfaktoren für Festmeter (fm), Raummeter (rm) und Schüttraummeter (m ³)	135

„Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und Ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir.“

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Vergleich der Jahresdurchschnittspreise und -steuern der wichtigsten Energieträger (2003 und 2007)	2
Tabelle 2.1: Qualitätsparameter und Grenzwerte für Holzpellets (EU-Norm EN 14961)	7
Tabelle 3.1: Verteilung der Kulturarten im Zeitvergleich (Angaben in ha)	23
Tabelle 3.2: Ergebnisse der Österreichischen Waldinventur (1992 - 1996 und 2000 - 2002 im Vergleich)	24
Tabelle 3.3: Angebotspotenziale von Energiepflanzen	32
Tabelle 4.1: Ertragsschätzung für die Hackgutproduktion bei Pappel und Weide im Kurzumtrieb für 6 Umtriebe in 3 verschiedenen Produktionsgebieten Österreichs	36
Tabelle 4.2: Ertragsniveau von Korn und Stroh bei Getreide sowie Korn-Stroh-Verhältnis.....	45
Tabelle 4.3: Durchschnittlicher Kornertrag bzw. Stohaufkommen exemplarisch für Deutschland (Basisjahr 2006, Angaben bei üblichen Wassergehalten)	50
Tabelle 6.1: Verschiedene Bauarten mobiler Hacker und ihre technischen Merkmale	68
Tabelle 7.1: Jährlicher Trockenmasseverlust bei der Holzlagerung in Haufen im Freien (z. T. mehrmonatige Lagerung auf 1 Jahr hochgerechnet).....	78
Tabelle 7.2: Kenndaten und Merkmale ausgewählter automatischer Lageraustragsysteme ...	80
Tabelle 8.1: Gehalt an Hauptelementen in naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen	86
Tabelle 8.2: Verbrennungstechnische Kenndaten von wasserfreier Biomasse ($H_{u(wf)}$).....	90
Tabelle 8.3: Verbrennungstechnische Kenndaten von wasserhaltiger Biomasse ($H_{u(w)}$).....	94
Tabelle 8.4: Anforderungen an die Größenverteilung nach der österreichischen Norm für Holzhackgut (ÖNORM M 7133)	97
Tabelle 8.5: Schütt- und Stapeldichten biogener Brennstoffe (mit 15 % Wassergehalt).....	97
Tabelle 9.1: Luftüberschuss, Temperaturbereich und Produktzusammensetzung für thermochemische Umwandlungsverfahren	100
Tabelle 10.1: Anteile der einzelnen Aschefractionen an der Gesamtasche	120
Tabelle 10.2: Durchschnittliche Nährstoff und Schwermetallgehalte in Aschefractionen von Hackschnitzelfeuerungen	121
Tabelle 10.3: Durchschnittliche Nährstoff und Schwermetallgehalte in Aschefractionen von Strohfeuerungen.....	121
Tabelle 10.4: Grenzwerte für Nährstoff- und Schwermetallgehalte in Biomasseaschen für die Nutzung auf land- und fortwirtschaftlichen Flächen in Deutschland, Österreich, Dänemark, Schweden und Finnland	124

Gleichungsverzeichnis

Gleichung 8.1: Wassergehalt (w)	92
Gleichung 8.2: Brennstoff-Feuchte (u)	92
Gleichung 8.3: Heizwert des Holzes bei einem bestimmten Wassergehalt ($H_{u(w)}$)	93
Gleichung 9.1: Luftüberschusszahl (λ).....	99

1. Einleitung

Biomasse hat in der österreichischen Klimaschutzstrategie einen hohen Stellenwert. Die österreichische Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien auf mindestens 25 % bis Ende 2010 und auf 45 % bis 2020 anzuheben.

Derzeit ist die Energiegewinnung durch Biomasse mit 42 % die Nummer Eins - vor Wasserkraft mit 31 %. Diese Spitzenposition kann und muss weiter ausgebaut werden. Derzeit decken fossile Energieträger den Großteil des Energieeinsatzes in Österreich. Allerdings werden diese zum überwiegenden Teil (72 %) importiert. Das belastet nicht nur die Umwelt, sondern in steigendem Ausmaß auch die österreichische Handelsbilanz. Die aktuelle Entwicklung der fossilen Rohstoffmärkte stellt eine enorme Abhängigkeit dar und unterstreicht gleichzeitig die Wichtigkeit der heimischen Ressourcen.

(vgl. PRÖLL, 2007, s.p.)

„Die Gaskrise und die in dem Zusammenhang entstandenen Diskussionen rund um Atomenergie zeigen uns, dass die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger absolutes Gebot der Stunde ist. Ziel muss es sein, die in den Regionen vorhandenen Ressourcen optimal zu nutzen und zu versuchen, energieautarke Regionen zu schaffen. Für Österreich als eines der walddreichsten Länder liegt im Einsatz von Biomasse eine Riesenchance.

(vgl. BERLAKOVICH, 2009, s.p.)

Die ständig steigenden Preise der fossilen Energieträger (Erdöl, Erdgas, Kohle, etc.) und die Tatsache, dass sie nur begrenzt vorhanden und damit knapp sind, unterstreichen im hohem Maße die Bedeutung von Bioenergie (siehe Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Vergleich der Jahresdurchschnittspreise und -steuern der wichtigsten Energieträger (2003 und 2007)

	Nettopreis		Energieabgabe		MWSt.		Steuern insgesamt		Bruttopreis	
	2003	2007	2003	2007	2003	2007	2003	2007	2003	2007
(Preise in Euro)										
Heizöl schwer/t (Industrie)	162,38	278,98	36,34	67,70	0,00	0,00	36,34	67,70	198,72	346,68
Heizöl schwer/t (Kraftwerke)	121,88	153,14	7,70	7,70	0,00	0,00	7,70	7,70	129,58	160,84
Gasöl/1000 l (Industrie)	228,80	402,61	76,91	108,32	0,00	0,00	76,91	108,32	305,70	510,93
Gasöl/1000 l (Haushalte)	251,28	445,50	76,91	108,32	65,64	110,76	142,54	219,08	393,82	664,58
Diesel/l (komm. Einsatz)	0,28	0,36	0,29	0,36	0,00	0,00	0,29	0,36	0,57	0,72
Diesel/l(l) (privater Einsatz)	0,32	0,50	0,29	0,36	0,12	0,17	0,41	0,53	0,73	1,03
Superbenzin 98 Oktan/l	0,39	0,58	0,41	0,45	0,16	0,21	0,57	0,65	0,96	1,23
Superbenzin 95 Oktan/l	0,32	0,49	0,41	0,45	0,15	0,19	0,56	0,63	0,88	1,12
Normalbenzin/l(l)	0,30	0,47	0,41	0,45	0,14	0,18	0,56	0,63	0,86	1,10
Steinkohle (Industrie)/t	76,34	95,95	0,00	50,00	0,00	0,00	0,00	50,00	76,34	145,95
Steinkohle (Kraftwerke)/t	57,06	70,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,06	70,25
Naturgas/10 ⁷ kcal BW (Industrie)	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
Naturgas/10 ⁷ kcal BW (Haushalte)	389,78	500,37	45,81	69,34	87,12	113,94	132,92	183,28	522,70	683,65
Elektrischer Strom/kWh (Industrie)	n.v.	0,08	n.v.	0,02	n.v.	0,00	n.v.	0,02	n.v.	0,10
Elektrischer Strom/kWh (Haushalte)	0,09	0,11	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,13	0,16
BW = Brennwert 10 ⁷ kcal = 10.000 kcal = 1t Ölequivalent n.v. = nicht verfügbar										

Quelle: Eigene Darstellung nach STATISTIK AUSTRIA, 2009 a und 2009 b, s.p.

Der Bruttoinlandsverbrauch betrug 2006 in Österreich 1.263.941 TJ (Terajoule) im Jahr 2007 ist er um 2,9 % auf 1.421.029 TJ gestiegen. Als Ursache dafür können die Heizgradsummen angesehen werden, die im Vergleich zu 2006 mit - 8,7 % deutlich gesunken sind. Vergleicht man 2007 und 2006 weist der Bruttoinlandsverbrauch von Erdgas den größten Rückgang auf (- 6,4%), gefolgt von Kohle (- 5,0 %), Erdöl (- 4,6 %) und elektrischem Strom (- 3,4 %). Nur der Verbrauch der erneuerbaren Energieträger wies mit einem Plus von 4,2 % eine leichte Steigerung auf.

Österreichs Bruttoinlandsverbrauch stieg von 796.846 TJ im Jahre 1970 auf 1.421.029 TJ im Jahre 2007 an. Der Anteil der Energie aus erneuerbaren Energieträgern (Brennbare Abfälle, Brennholz, biogene Brenn- und Treibstoffe, Umgebungswärme, Wasserkraft, Windenergie und Photovoltaik) belief sich im gleichen Zeitraum auf 123.868 TJ (1970) und 358.910 TJ (2007). Dies bedeutet, dass der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Bruttoinlandsverbrauch innerhalb von 10 Jahren (1970 bis 2007) von 15,55 % auf 25,26 % angestiegen ist.

Somit stellen die erneuerbaren Energieträger mit einem Anteil von 25,3 % nach Erdöl (40,8 %) den zweitbedeutendsten Energieträger dar, gefolgt von Naturgas (20,8 %) und Kohle (11,4 %).

(vgl. STATISTIK AUSTRIA, 2009 c, s.p.)

2. Biogene Festbrennstoffe als nachwachsende Energieträger

Biogene Festbrennstoffe stellen eine viel versprechende Möglichkeit zur Deckung der ständig steigenden Nachfrage nach Strom und Wärme dar. Aus diesem Grund haben sie in den letzten Jahren in der öffentlichen Diskussion zunehmend an Bedeutung gewonnen und stellen in der heutigen Zeit sowohl national als auch international einen der wesentlichen Hoffnungsträger unter den regenerativen Energien dar. Im Vergleich zu einer Wärme- bzw. Stromerzeugung aus Sonnenenergie (mit Solarkollektoren bzw. Photovoltaikanlagen) ist eine Energiebereitstellung aus Biomasse beim momentanen Stand der Technik kostengünstiger und meist auch problemloser. Zudem entfällt die Notwendigkeit der Speicherung, da Biomasse im Gegensatz zu Solarenergie oder Windkraft bereits gespeicherte Sonnenenergie darstellt.

(vgl. FNR, 2000, 14)

2.1 Definition Biomasse/biogene Festbrennstoffe

Biomasse ist eine Form von gespeicherter Sonnenenergie, die von Pflanzen durch Photosynthese in organische Materie umgewandelt wurde und in dieser Form entsprechend energetisch nutzbar ist. Diese Möglichkeit zur Nutzung unterscheidet sie grundsätzlich von anderen Optionen der direkten und indirekten Nutzung der Sonnenenergie (z. B. Solarthermie, Photovoltaik, Windkraft). Im Gegensatz dazu weist Biomasse keine kurzfristigen Angebotsschwankungen auf, weil sie nicht direkt an die von der Sonne eingestrahelte Energie gekoppelt ist.

Unter Biomasse versteht man die Gesamtheit der Stoffe organischer Herkunft (d. h. kohlenstoffhaltige Materie). Biomasse umfasst demnach:

- die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere),
- die daraus entstandenen Rückstände (z. B. tierische Exkremente),
- abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse (z. B. Stroh, Totholz u. ä.)
- alle Stoffe im weiteren Sinne, die etwa durch technische Umwandlung und/oder durch stoffliche Nutzung entstanden bzw. angefallen sind (z. B. Schwarzlauge, Papier und Zellstoff, Schlachtabfälle, organischer Hausmüll, Pflanzenöl, Alkohol, etc.)

(vgl. NEUBARTH UND KALTSCHMITT, 2000, 257)

Laut ÖNORM M 7101 versteht man unter dem Begriff Biomasse alle organischen Stoffe biogener (nicht fossiler) Art. Biomasse umfasst also in der Natur lebende und wachsende Materie und daraus resultierende Abfallstoffe, sowohl von der lebenden als auch schon abgestorbener organischer Masse.

(vgl. LEBENSMINISTERIUM, 2004, s.p.)

Biomasse sind biologisch abbaubare Teile von Erzeugnissen, Abfällen oder Rückständen der Land- und Forstwirtschaft (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe) und damit verbundener Industriezweige sowie der biologisch abbaubare Teil von Abfällen aus Industrie und Haushalten.

(vgl. UMWELTBUNDESAMT, 2004, 1)

Die Grenze zwischen Biomasse und fossilen Energieträgern beginnt beim Torf, dem fossilen Sekundärprodukt der Verrottung. Somit zählt Torf im strengerem Sinn nicht mehr zur Biomasse. Diese Ansicht ist teils umstritten, so zählen einige Länder (wie Schweden und Finnland) Torf durchaus noch zur Biomasse.

Grundsätzlich unterteilt man die Biomasse in so genannte Primär- und Sekundärprodukte:

- Primärprodukte entstanden durch die direkte photosynthetische Ausnutzung der Sonnenenergie. Dazu zählt primär die gesamte Pflanzenmasse wie z. B. Produkte aus der Land- und Forstwirtschaft (Energieholz, Energiegräser, etc.) oder pflanzliche Rückstände bzw. Nebenprodukte aus der Land- und Forstwirtschaft sowie der Weiterverarbeitungsindustrie (Stroh, Wald- und Industrierestholz).
- Sekundärprodukte hingegen beziehen ihre Energie nur indirekt von der Sonne. Hier wird die Energie durch den Ab- bzw. Umbau organischer Substanz in höhere Organismen (wie z. B. Tiere) gebildet. Zu den Sekundärprodukten gehören die gesamte Zoomasse sowie deren Exkremente (Gülle und Festmist) und der Klärschlamm.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2006, 645)

Somit ist Biomasse nichts anderes als chemisch gebundene Sonnenenergie. Bei der Photosynthese wird von der Pflanze das Sonnenlicht und aus der Luft gebundenes CO₂ (Kohlendioxid) in organische Substanz umgewandelt. Bei der Verbrennung von Holz, Pflanzen, organischen Abfällen bzw. deren Folgeprodukten wird diese zuerst gespeicherte Energie

wieder freigesetzt. Dabei entsteht nur so viel CO₂, wie die Pflanze in ihrem Lebenslauf aufgenommen hat. Somit verbrennt Biomasse CO₂-neutral.

Sonne + CO₂ = Biomasse

Biomasse = Energie + CO₂

(vgl. LEBENSMINISTERIUM, 2004, s.p.)

Zu den biogenen Festbrennstoffen zählt man Brennstoffe organischer Herkunft, die zum Zeitpunkt ihrer energetischen Nutzung in fester Form vorliegen.

Die vorkommenden und technisch nutzbaren biogenen Festbrennstoffe unterteilen sich in Rückstände und in speziell angebaute Energiepflanzen. Entsprechend den unterschiedlichen Eigenschaften unterscheidet man zusätzlich zwischen halmgutartigen und holzartigen Brennstoffen.

Energetisch nutzbare Rückstände fallen beispielsweise in der Land- und Forstwirtschaft an. Außerdem ist Altholz, Industrieholz und sonstige holzartige Biomasse zur Energiegewinnung verfügbar. Bei den nutzbaren Energiepflanzen unterscheidet man halmgutartige Biobrennstoffe (Miscanthus, Energiegetreide, Getreidestroh, u. ä.) und holzartigen Brennstoffe aus Kurzumtriebsplantagen (Weiden, Pappeln u. ä.).

(vgl. BKZ MITWEIDA, 2009, s.p.)

In Abbildung 2.1 ist die Unterteilung sowie die Quellen für energetisch nutzbare biogener Festbrennstoffe grafisch verdeutlicht.

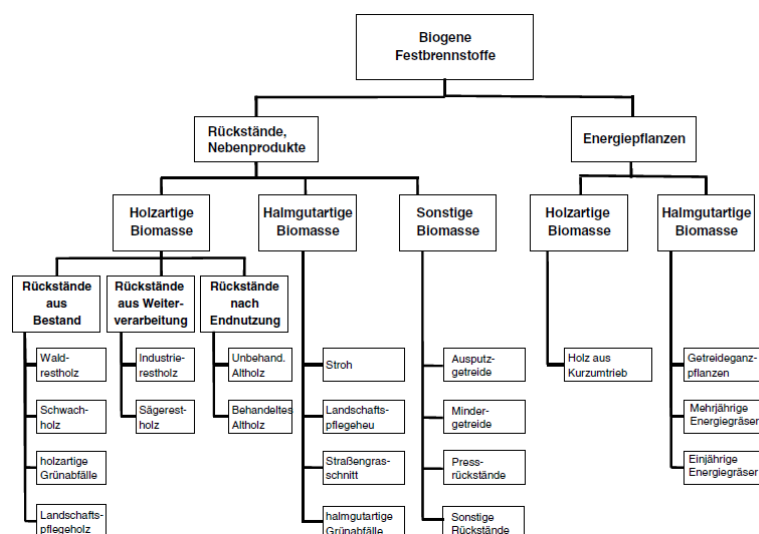


Abbildung 2.1: Formen biogener Festbrennstoffe

Quelle: FNR, 2000, 15

2.1.1 Hackgut

Als Hackgut bzw. Hackschnitzel wird maschinell zerkleinertes Holz (mit und ohne Rinde) einer definierten Stücklänge bezeichnet. Diese Stücklänge wird in die Kategorien Fein-, Mittel- und Grobhackgut unterteilt und weist eine Nennlänge von 30, 50 und 100 mm auf.

Hackgut kann aus Durchforstungs-, Waldrest- oder Landschaftspflegeholz, Industrierestholz, Altholz oder Hölzern aus Kurzumtriebsplantagen erzeugt werden.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 353f)

2.1.2 Pellets

Unter Holzpellets versteht man zylindrische Presslinge aus trockenem, naturbelassenen Holz (z. B. Säge- oder Hobelspäne, Schleifstäube) mit einem Durchmesser von meist 6 mm und einer Länge von 20 bis 30 mm. Pellets werden unter hohem Druck und meist ohne Zugabe von Bindemitteln hergestellt.

Bisher überwiegt die Pelletierung von Holz im Energiesektor, in Zukunft könnte aber auch die Pelletierung anderer biogener Rückstände und Nebenprodukte (z. B. Stroh, Raps- oder Olivenpresskuchen) und von Energiepflanzen (z. B. Miscanthus, Getreideganzpflanzen, Kurzumtriebshölzer) zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Durch den geringen Wassergehalt (unter 12 % entsprechend ÖNORM M 7135 1998) sind Pellets problemlos über lange Zeit lagerfähig. Durch die Möglichkeit, sie als Schüttgut pneumatisch zu fördern, können Pellets in geschlossenen Systemen transportiert, umgeschlagen und auch gelagert werden.

Die Qualitätsanforderungen (u.a. Größe, Feuchtigkeit, Aschegehalt) für den genormten Brennstoff Pellets sind in Österreich in der ÖNORM M 7135 1998 bzw. in der europäischen Vornorm CEN/TS 14 961 festgelegt.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 356f)

Ab 2010 sorgt die EU-Norm EN 14961-2 für europaweit einheitliche Bestimmungen bei Holzpellets. National gültige Normen und die darauf basierenden Zertifikate verlieren im Zuge dessen ihre Gültigkeit. Die Richtlinie stellt neue Anforderungen unter anderem in Bezug auf Länge, Durchmesser, Asche, Wassergehalt und Heizwert. Die bisher geltenden Werte werden nicht nur verschärft, sondern durch neue Kriterien ergänzt.

Die EU-Norm EN 14961-2 unterteilt die Pellets in drei Qualitätsklassen. Den geringsten Aschegehalt und die strengsten Werte fallen in die Klasse A1 gefolgt von der Klasse A2, die

ein breiteres Rohstoffspektrum und höhere Aschegehalte aufweisen darf (siehe Tabelle 2.1). Beide Klassen werden zusätzlich innerhalb des Zertifikates ENplus berücksichtigt. Nicht unter ENplus zu finden sind Industriepellets, diese werden als Klasse B bezeichnet.

(vgl. DEPI, s.a. a, s.p.)

Tabelle 2.1: Qualitätsparameter und Grenzwerte für Holzpellets (EU-Norm EN 14961)

Parameter	Einheit	ENplus A1	ENplus A2	EN B	Prüfung gemäß
Durchmesser	mm	6 (± 1) oder 8 (± 1) ²⁾			⁵⁾
Länge	mm	3,15 $\leq L \leq 40$ ³⁾			⁵⁾
Schüttdichte	kg/m ³	≥ 600			EN 15103
Heizwert	MJ/kg	16,5 $\leq Q \leq 19$	16,3 $\leq Q \leq 19$	16,0 $\leq Q \leq 19$	EN 14918
Wassergehalt	Ma.-%	≤ 10			EN 14774-1
Feinanteil (< 3,15mm)	Ma.-%	≤ 1			EN 15149-2
Mechanische Festigkeit	Ma.-%	$\geq 97,5$ ⁴⁾		$\geq 96,5$	EN 15210-1
Aschegehalt	Ma.-% ¹⁾	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	$\leq 3,0$	EN 14775
Ascheerweichungstemp	(DT) °C	≥ 1200	≥ 1100		EN 15370-1
Chlorgehalt	Ma.-% ¹⁾	$\leq 0,02$		$\leq 0,03$	EN 15289
Schwefelgehalt	Ma.-% ¹⁾	$\leq 0,03$		$\leq 0,04$	EN 15289
Stickstoffgehalt	Ma.-% ¹⁾	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$	EN 15104
Kupfergehalt	mg/kg ¹⁾	≤ 10			EN 15297
Chromgehalt	mg/kg ¹⁾	≤ 10			EN 15297
Arsengehalt	mg/kg ¹⁾	≤ 1			EN 15297
Cadmiumgehalt	mg/kg ¹⁾	$\leq 0,5$			EN 15297
Quecksilbergehalt	mg/kg ¹⁾	$\leq 0,1$			EN 15297
Bleigehalt	mg/kg ¹⁾	≤ 10			EN 15297
Nickelgehalt	mg/kg ¹⁾	≤ 10			EN 15297
Zinkgehalt	mg/kg ¹⁾	≤ 100			EN 15297

¹⁾ im wasserfreien Zustand (wf)
²⁾ Durchmesser muss angegeben werden
³⁾ maximal 1% der Pellets länger als 40 mm, max. Länge 45 mm
⁴⁾ Bei Messungen mit dem Lignotester (interne Kontrolle) gilt der Grenzwert $\geq 97,7$ Ma.-%
⁵⁾ Die entsprechende CEN – Norm wird derzeit ausgearbeitet

Quelle: DEPI, 2010, 33

2.1.3 Briketts (Presslinge)

Außer Pellets können auch Holzbriketts aus dem gleichen Rohmaterial hergestellt werden. Die Produktion dieser Presslinge erfolgt ähnlich wie bei Pellets, sie sind jedoch mit einem Querschnitt von 40 bis 120 mm und einer maximalen Länge von 400 mm deutlich größer (ÖNORM M 7135 1998).

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 357)

2.2 Biomasseentstehung

Phyto- und Pflanzenmasse wird größtenteils von Organismen gebildet, die ihre Energie durch Umwandlung der Sonnenenergie (Photosynthese) gewinnen. Zoomasse hingegen wird mit dem Energiegewinn aus dem Abbau anderer organischer Substanz gebildet.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 35)

2.2.1 Pflanzenaufbau

Die Entwicklung einer Pflanze beginnt mit der Keimung des im Samen enthaltenen Embryos. Die Keimung ist an bestimmte Außenbedingungen wie Temperatur und Licht (bei Lichtkeimern) oder Dunkelheit (bei Dunkelkeimern) gebunden. Die Pflanze selbst besteht aus einem Spross- und einem Wurzelsystem. Wurzeln wachsen nach unten, während der Spross dem Licht entgegen nach oben wächst. Bei mehreren Pflanzenarten können sich so genannte sekundäre Wurzeln auch an Sprossachsen oder an den Blättern bilden. Diese Eigenschaft ist für die Bewurzelung von Spross- und Blattstecklingen bei der vegetativen Vermehrung wichtig.

Mit den in den Boden verankerten Wurzeln wird Wasser und Nährstoffe aufgenommen und Reservestoffe eingelagert. Sprossachse und Blätter bilden gemeinsam den Spross, der in der Regel den oberirdischen Teil der Pflanze bildet. Allerdings können auch unterirdische Sprosssteile, so genannte Rhizome (siehe Abbildung 2.2) auftreten (z. B. bei Gräsern wie *Miscanthus* oder Rohrglanzgras). Sie dienen einerseits als Speicherorgane für Nähr- und Reservestoffe, andererseits sind sie die für die Überwinterung notwendigen Organe, aus deren Knospen sich wieder neue, oberirdische Sprosse bilden. Unterirdische Sprossorgane bilden die so genannten Knollenfrüchte (z. B. Kartoffel, Topinambur). Auch sie dienen zur Einlagerung von Reservestoffen. Aus ihren Knospen (den so genannten Augen) können sich neue, vollständige Pflanzen mit Spross- und Wurzelsystem entwickeln.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 35ff)



Abbildung 2.2: Rhizom am Beispiel von *Miscanthus*

Quelle: SPERR, s.a. a, s.p.

Die Sprossachse dient dazu die Blätter zu tragen und sie von der Wurzel her mit Wasser und Mineralien zu versorgen, außerdem leitet sie die in den Blättern gebildeten organischen Substanzen zur Wurzel. Die Blätter dienen der Absorption des für die Photosynthese notwendigen Sonnenlichts. In den meisten Blattzellen sind Chloroplasten enthalten. Chloroplasten beinhalten die für die Photosynthese notwendigen Enzyme und Farbstoffe, insbesondere Chlorophyll und Carotinoide. Der Gaswechsel von Kohlenstoffdioxid (CO_2), Sauerstoff (O_2) und Wasserdampf (H_2O) bei Photosynthese, Atmung und Transpiration erfolgt in den Blättern. Dafür sind die Blätter insbesondere an ihrer Unterseite mit Spaltöffnungen (Stomata) ausgestattet.

Der Spross bildet zur generativen Vermehrung Blüten, die die Fortpflanzungsorgane tragen (männliche und weibliche). Die Blütenbildung wiederum ist von den Außenfaktoren Licht (vor allem von der Beleuchtungsdauer bzw. der Tageslänge) und der Temperatur abhängig. Durch die spezifischen Ansprüche jeder Pflanze wird gewährleistet, dass die Blüte immer in der gleichen Jahreszeit stattfindet. Dabei unterscheidet man zwischen Langtag- und Kurztagpflanzen. Während Langtagpflanzen erst nach Überschreitung einer so genannten kritischen Tageslänge blühen, wird der Blühbeginn bei Kurztagpflanzen erst nach Unterschreitung der kritischen Tageslänge ausgelöst. Einige Pflanzen (z. B. Wintergetreide) benötigen zum Blühen neben einer bestimmten Tageslänge zusätzlich eine vorangegangene Kälteeinwirkung (Vernalisation).

Im Blüteninneren befinden sich die Staubblätter (Fruchtknoten), die die Pollen (Samenanlage) tragen. Gelangen die Pollen zu den Narben, kommt es zur Befruchtung (Bestäubung). Von Selbstbefruchtung spricht man, wenn die Befruchtung innerhalb einer Pflanze stattfindet; anderenfalls spricht man von Fremdbefruchtung. Dazu muss ein Pollentransport über Wind, Wasser oder Tiere stattfinden.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 35ff)

2.2.2 Pflanzenzusammensetzung

Ca. 90 % der Pflanzentrockenmasse besteht aus dem Elementen Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) sowie zu ca. 6 % aus Wasserstoff (H) (Siehe Abbildung 2.3). Neben diesen Pflanzennährstoffen enthalten die Pflanzen noch verschiedene Elemente, die je nach der benötigten Menge, in Makro- und Mikronährstoffe eingeteilt werden. Die wichtigsten Makronährstoffe (bis zu 5 % der Trockensubstanz) sind Stickstoff (N), Kalium (K), Kalzium (Ca), Phosphor (P), Magnesium (Mg) und Schwefel (S). Eisen (Fe) wird sowohl den Makro- als auch den Mikronährstoffen zugeordnet. Zu den Mikronährstoffen (0,001 bis 0,03 % der

Trockensubstanz) zählen Bor (B), Mangan (Mn), Kupfer (Cu), Zink (Zn) und Molybdän (Mo). Ob Chlor (Cl) mit bis zu 1 %, Silizium (Si) mit bis zu 3 % und Natrium (Na) mit bis zu 0,5 % (jeweils bezogen auf die Trockenmasse) zu den unentbehrlichen Nährstoffen der Pflanzen gehören, ist nach wie vor umstritten.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 43)

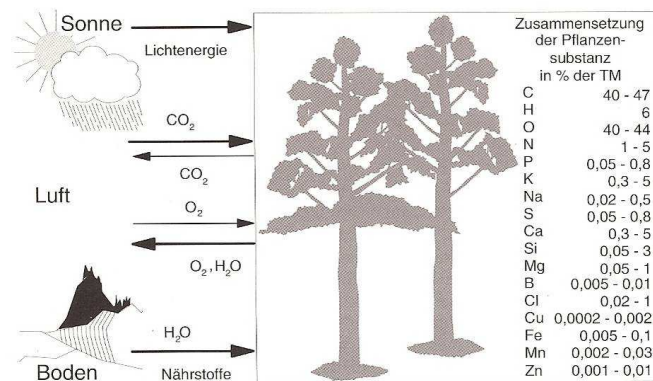


Abbildung 2.3: Bildung und Zusammensetzung der Pflanzensubstanz

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMAN, 2001, 36

2.2.3 Photosynthese

Die Photosynthese ist der wichtigste Prozess bei der Biomassebildung. Man versteht unter Photosynthese die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie der Pflanzensubstanz. Pflanzen beinhalten bestimmte Farbstoffe (u. a. Chlorophyll), mit denen sie in der Lage sind Sonnenlicht zu absorbieren. Durch die dadurch gewonnene Energie können die Pflanzen aus energiearmen Grundbausteinen energiereichere Stoffe (Zucker) aufbauen.

Unterteilt wird die Photosynthese dabei in die Prozesse der Licht- und der Dunkelreaktion. Bei der Lichtreaktion wird durch photochemische Reaktionen die für die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid (CO_2) und den Einbau des Kohlenstoffs in höherenergetische organische Verbindungen notwendige Energie verfügbar (Assimilation). Bei der Dunkelreaktion, die ohne Licht stattfindet, wird ein Teil der im ersten Prozess (Lichtreaktion) gewonnenen Energie aus der Assimilation von CO_2 wieder verbraucht. Dies ist notwendig um die Lebensprozesse der Pflanze aufrechterhalten zu können.

Das Endprodukt der Photosynthese sind Einfachzucker (Glukose = $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Diese Einfachzucker dienen den Pflanzen sowohl als Energiequelle für ihre Stoffwechselprodukte sowie auch als Bausteine für den Aufbau von Pflanzensubstanz (Kohlenhydrate, Eiweiß, Fett).

(vgl. NEUBARTH UND KALTSCHMITT, 2000, 258)

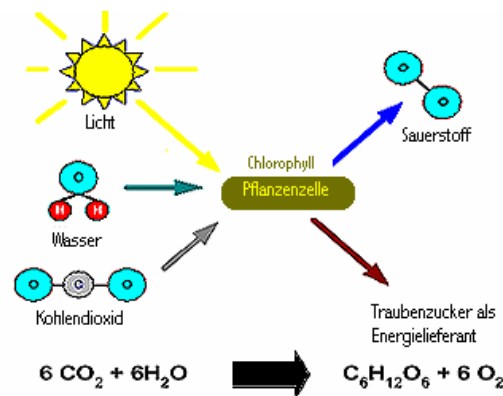


Abbildung 2.4: Der Photosyntheseprozess

Quelle: FREENET-HOMEPAGE, s.a., s.p., verändert

Wie in Abbildung 2.4 ersichtlich werden bei der Photosynthese Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) durch Licht und Chlorophyll in der Pflanzenzelle zu Einfach- bzw. Traubenzucker (C₆H₁₂O₆) und Sauerstoff (O₂) umgesetzt. Ein Teil der in der Photosynthese gebildeten Zucker wird durch die Pflanzenatmung unter Sauerstoffverbrauch (CO₂-Bildung) für Stoffwechselvorgänge und den Aufbau versch. Pflanzenmassenbestandteile (z. B. Proteine, Fette, Zellulose) wieder abgebaut (Dissimilation). In der Regel ist aber der Substanzgewinn durch die Photosynthese (findet nur bei Licht statt) größer als der Substanzverlust durch die Atmung, die sowohl bei Tag (Lichtatmung) als auch nachts (Dunkelatmung) stattfindet. Somit ergibt sich der Netto-Photosynthesewert aus der Bruttphotosynthese abzüglich der Atmungsverluste.

Je nach Ablauf der biochemischen Reaktionen im Verlauf der Photosynthese wird zwischen C₃- und C₄-Pflanzen unterschieden. Die meisten einheimischen Kulturpflanzen sind so genannte C₃-Pflanzen. Sie bilden als erstes Photosyntheseprodukt eine Verbindung, die drei C-Atome enthält. Im Gegensatz dazu bilden die C₄-Pflanzen während der Photosynthese als erstes Kohlenstoffdioxid-Aufnahme-Produkt eine vier C-Atome enthaltende Verbindung.

Die meist aus subtropischen Gebieten stammenden C₄-Pflanzen (z.B. Mais, Zuckerrohr, Miscanthus, etc.) können im Vergleich zu C₃-Pflanzen mehr CO₂ assimilieren und erreichen dadurch einen höheren Nutzeffekt der Photosynthese (siehe Abbildung 2.5). Mit anderen Worten können C₄-Pflanzen, durch ihre Anpassung an sonnige und warme Standorte, bei hoher Temperatur und Lichteinstrahlung innerhalb kürzerer Zeit mehr Biomasse aufbauen als es C₃-Pflanzen in der Lage sind.

(vgl. NEUBARTH UND KALTSCHMITT, 2000, 258f)

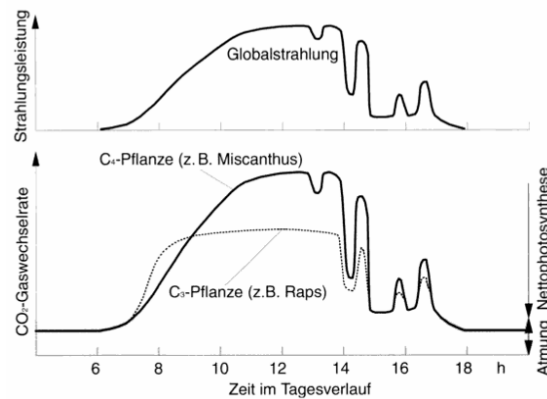


Abbildung 2.5: Schematischer Tagesverlauf des CO_2 -Gaswechsels in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 53

Der Biomassezuwachs ist durch einen tages- und jahreszeitlichen Rhythmus gekennzeichnet. Abbildung 2.5 veranschaulicht, dass der tageszeitlichen Rhythmus der Photosynthese, da sie auf die eingestrahlte Sonnenenergie angewiesen ist, vom Verlauf der Solarstrahlung gesteuert wird. Die photosynthetische Aktivität steigt mit zunehmender Sonneneinstrahlung und erreicht beim Höchststand der Sonne zur Mittagszeit ihren Höhepunkt und nimmt zum Abend hin wieder ab. Auch andere Reduzierungen der Einstrahlung, wie z. B. durch Bewölkung, vermindern die photosynthetische Aktivität. Der jahreszeitliche Verlauf der Biomassebildung wird von der Tageslänge und der Temperaturentwicklung bestimmt. Der Wachstumsverlauf der verschiedenen Kulturpflanzen variiert je nach Saatzeitpunkt und Entwicklung. Die höchsten Nettozuwächse finden aber bei allen Pflanzen zur Zeit des höchsten Strahlungsangebotes (Mai bis Juni) statt (siehe Abbildung 2.6).

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 53)

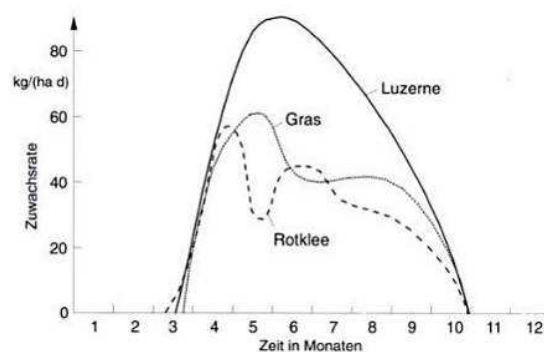


Abbildung 2.6: Massezuwachs verschiedener Feldfutterpflanzen im Jahresverlauf

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 54

Der Nutzeffekt der Photosynthese beschreibt welcher Anteil der Strahlung von den Pflanzen in Form von chemischer Energie gespeichert werden kann. Nur etwa 50 % der Gesamtstrahlungsenergie liegen beispielsweise im photosynthetisch aktiven Wellenlängenbereich (400 bis 700 nm) und sind somit von den Pflanzen für die Photosynthese nutzbar. Von der Energie aus der absorbierten Strahlung gehen außerdem zusätzlich erhebliche Anteile verloren (Rückstrahlung, Energieverluste, Atmung u. ä.).

Durch die Bruttophotosynthese bzw. die daraus entstehende Bruttoprimärproduktion (sie umfasst die gesamte organische Substanz, die durch die Photosynthese erzeugt wird), können deshalb theoretisch maximal 15 % der eingestrahlten Sonnenenergie chemisch gebunden werden. Werden zudem der Substanzverlust durch die Atmung berücksichtigt, können im theoretisch maximal 9 % der eingestrahlten Energie netto in chemische Energie umgewandelt werden. Tatsächlich kann mit landwirtschaftlich genutzten C₄-Pflanzen eine Nettoprimärproduktion (Nutzeffekt) von 3 (Mais) bis 6 % (Hirse) erreicht werden. C₃-Pflanzen hingegen erreichen i. Allg. nur einen Nutzeffekt zwischen 1,5 bis 2 % (Bohnen) und 2 bis 4 % (z. B. Gräser, Getreide, Zuckerrüben).

Selbst die produktivsten Pflanzengesellschaften (z. B. Regenwälder) erreichen über die Vegetationsperiode und den gesamten Pflanzenbestand bezogen im Durchschnitt nur einen Nutzeffekt von 2 %. Im Vergleich dazu liegen die meisten Wälder und Grasgesellschaften bei 1 % und darunter. In weiten Teilen Europas liegt der Nutzeffekt damit durchschnittlich bei 0,8 bis 1,2 %.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 341)

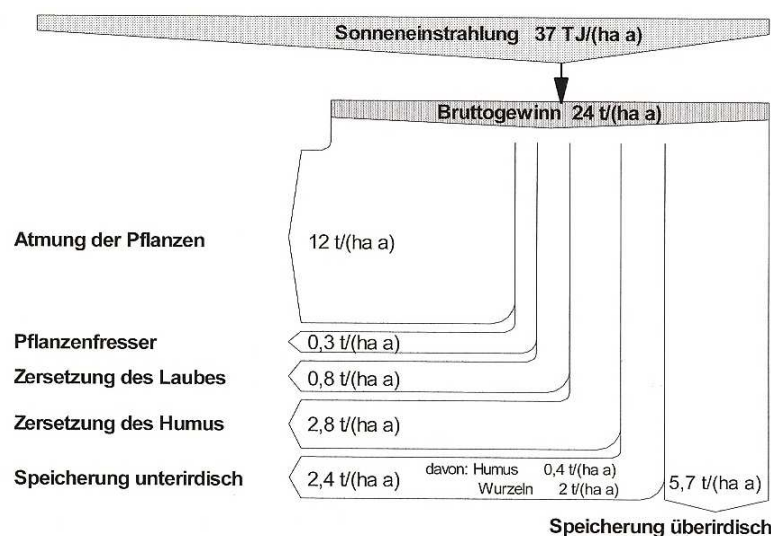


Abbildung 2.7: Stoffbilanz einer Pflanzengesellschaft am Beispiel eines Heimbuchenwaldes
Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 377

In Abbildung 2.7 wird exemplarischer der Netto-Biomassegewinn eines Ökosystems am Beispiel eines Hainbuchenwaldes verdeutlicht. Durch die Ausnutzung der eingestrahnten Sonnenenergie werden jährlich 24 t Biomasse (Trockenmasse) je Hektar gebildet. Durch die Atmung der Pflanzen geht in etwa die Hälfte davon verloren. Ein anderer Teil wird dem Boden als Spreu zugeführt und von Mikroorganismen zersetzt. Die Netto-Speicherung an Biomasse beträgt oberirdisch ca. 5,7 t/a und 2,4 t/a unterirdisch (in Form von Wurzeln und Humus).

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 341)

2.2.4 Einflussfaktoren auf die Biomasseentstehung

Die Bildung von Biomasse wird hauptsächlich von den gegebenen Standortfaktoren wie Sonneneinstrahlung, Wasser, Temperatur, Boden und Nährstoffangebot beeinflusst, außerdem spielen bei der Pflanzenproduktion noch pflanzenbauliche Maßnahmen eine wesentliche Rolle.

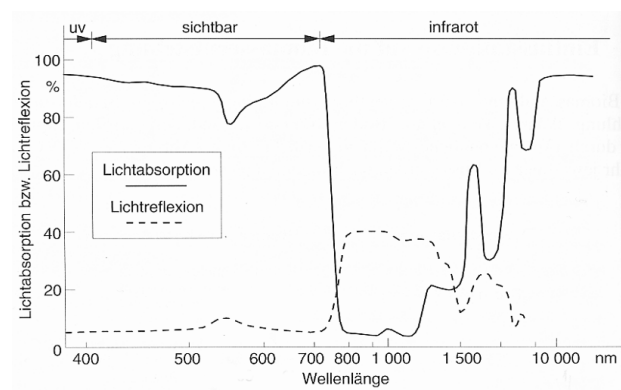


Abbildung 2.8: Spektrum der Absorption bzw. Reflexion von Licht durch Pappelblätter

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 48

Sonneneinstrahlung

Mit zunehmender Strahlungsintensität steigt die Nettophotosynthese bis zu einem Sättigungspunkt an. Bei sehr geringer Einstrahlung übersteigt die Veratmung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) dessen Assimilation. Nur ein Teil der Einstrahlung wird von der Pflanze absorbiert, der Rest wird reflektiert oder durchgelassen. Die Aufnahme von Strahlung erfolgt in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Beispielsweise durchdringt den Pflanzenbestand im Bereich der Infrarotstrahlung (700 bis 1.100 nm) sehr viel Energie, ohne absorbiert zu werden (siehe Abbildung 2.8). Aus der nicht-reflektierten Gesamtstrahlung und der langwelligen Rückstrahlung ergibt sich die Nettoeinstrahlung. Daraus ergibt sich der

Reflexionskoeffizient, d.h. das Verhältnis von reflektierter und eingestrahelter Energie. Der Reflexionskoeffizient ist vor allem vom Einstrahlungswinkel, der Oberflächenbeschaffenheit und von der Farbe abhängig. Bei einem grünen Pflanzenbestand liegt der Reflexionskoeffizient zwischen 0,1 und 0,4.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 47)

Da die Lichtaufnahme von der Größe der gesamten Blattoberfläche abhängt, steigt sie mit zunehmendem Blattflächenindex (d. h. Blattfläche pro Bodenfläche) an. Auch die Blattform und deren Stellung beeinflussen den Anteil der absorbierten Strahlung. Aufgrund ihres effizienteren Photosynthesemechanismus haben C_4 -Pflanzen eine höhere Lichtnutzungseffizienz als C_3 -Pflanzen (siehe Abbildung 2.9). Während bei C_3 -Pflanzen ca. 1 bis 1,4 g Trockenmasse je MJ Strahlung assimiliert werden, liegt dieser Wert für C_4 -Pflanzen bei 1,4 bis 3 g Trockenmasse je MJ. Bei einer Einstrahlung von 250 W/m^2 sind die Blätter von C_3 -Pflanzen lichtgesättigt. Übersteigt die Strahlungsenergie diesen Wert, kann sie nicht mehr genutzt werden.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 47f)

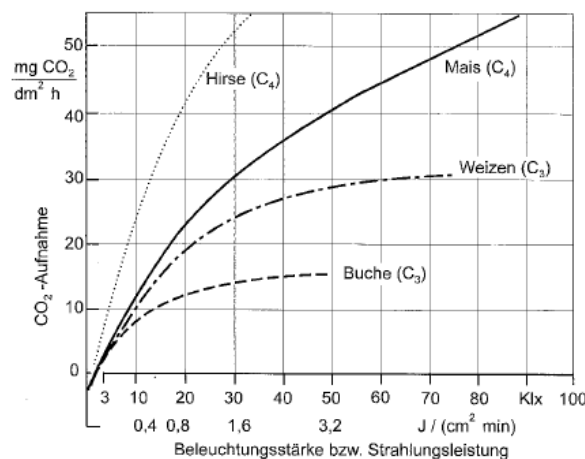


Abbildung 2.9: Nettophotosynthese verschiedener Pflanzen in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität
Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 49

Wasser

Der Wassergehalt ändert sich mit Art und Alter des Pflanzenorgans, in der Regel bestehen grüne Pflanzen aber zu ca. 70 bis 90 % aus Wasser. Wasser ist für wichtige Funktionen in der Pflanze notwendig; u. a. zum Transport gelöster Stoffe und die Aufrechterhaltung des hydrostatischen Drucks (um das Gewebe straff zu halten), für biochemische Reaktionen.

Außerdem kühlt die Verdunstung von Wasser die Pflanze und schützt sie somit vor Überhitzung durch Sonnenstrahlung. Zudem ist Wasser bei allen Stoffwechselvorgängen (z. B. Photosynthese) ein wichtiges Rohmaterial.

Die Biomasseproduktion der Pflanzen hängt direkt von ihrer Wasserversorgung ab, wobei jede Pflanzenart einen spezifischen Wasserverbrauch für die Bildung von Biomasse hat. Dabei beschreibt der Transpirationskoeffizient die Wassermenge, die die Pflanze für die Produktion für 1 kg Trockenmasse verbraucht.

Die effizienteste Wasserausnutzung und damit den niedrigsten Transpirationskoeffizienten mit 220 bis 350 l/kg gebildeter Trockenmasse haben C_4 -Pflanzen (z. B. Mais, Miscanthus). C_3 -Pflanzen (z. B. Getreide) benötigen dagegen 500 bis 650 l/kg und schnellwachsende Baumarten (z. B. Weiden) sogar etwa 800 l/kg. Die Biomasseproduktion eines Standorts ist umso höher, je besser das Wasserangebot (siehe Abbildung 2.10).

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 48f)

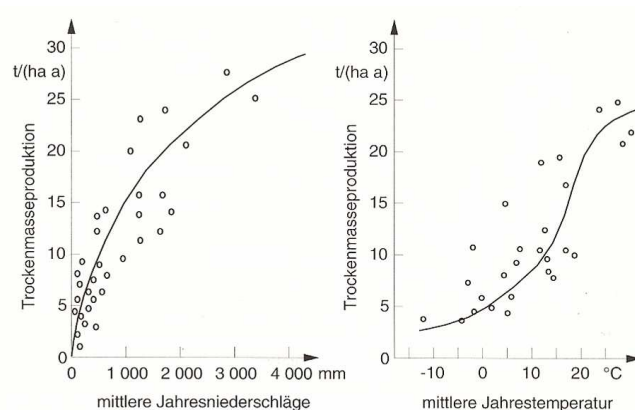


Abbildung 2.10: Nettoprimärproduktion von Wäldern in Abhängigkeit vom Jahresniederschlag und der mittleren Jahrestemperatur

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 50

Temperatur

Wie alle anderen Lebensvorgänge werden auch die Photosynthese, die Atmung und die Transpiration von der Temperatur beeinflusst. Dabei zeigen sich C_4 -Pflanzen durch ein höheres Temperaturoptimum aus (über 30 °C) als C_3 -Pflanzen (ca. 20 °C). Bei Pflanzen der kalten und gemäßigten Klimaregionen liegt die untere Grenze der Photosyntheseaktivität (Temperaturminimum) bei wenigen Grad unter Null.

Mit dem Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur (bis zu 30 °C) und bei gleichzeitig gegebener Wasserversorgung steigt auch das Biomasseertragspotential eines Standorts. Die Zunahme der Trockenmasseproduktion folgt im oberen Temperaturbereich einer

Sättigungskurve (siehe Abbildung 2.10) bis zur Temperaturobergrenze (sie liegt je nach Pflanze zwischen 38 bis 60 °C).

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 49f)

Während die Niederschläge und Temperaturen innerhalb eines begrenzten geografischen Gebiets in der Regel nur relativ wenig variieren, kann sich die Bodengüte in sehr kleinräumigen Dimensionen stark verändern. Gebiete hoher Biomasseproduktivität sind meist durch das Vorkommen von Böden hoher Güte bei ausreichenden Niederschlagsmengen gekennzeichnet. Zu beachten ist dabei, dass die verschiedenen Kulturpflanzen unterschiedliche Ansprüche an Bodenverhältnisse, Temperatur und Niederschläge haben. Ein anderer beeinflussender Faktor ist die Bodennutzung des Menschen

(vgl. NEUBARTH UND KALTSCHMITT, 2000, 259)

Boden und Nährstoffe

Der Boden entsteht durch die Verwitterung der Erdkruste unter Mitwirkung von Mikroorganismen (Biosphäre). Der Boden besteht aus Mineralien unterschiedlichster Art und Größe sowie aus dem aus organischen Stoffen gebildeten Humus. Der Boden enthält außerdem noch Wasser, Luft und verschiedene lebende Organismen. Den Pflanzen bietet der Boden Wurzelraum, Verankerung und Versorgung mit Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff.

Wachstum und Entwicklung (Ertragspotential) der Pflanzen hängt stark von den physikalischen, biologischen und chemischen Eigenschaften des Bodens ab.

Zu den physikalischen Eigenschaften zählt die Mächtigkeit des Bodens (d. h. die Tiefe der oberen, für die Pflanzenwurzeln erschließbaren Schicht), da für ein optimales Pflanzenwachstum ein ausreichend großer Wurzelraum zur Erschließung von Nährstoffen und Wasser wichtig ist. Andere physikalischen Eigenschaften sind die Textur oder Körnergröße, der Anteil luftführender Poren und die Fähigkeit des Bodens, Wasser zu binden sowie Wärme zu speichern bzw. abzugeben. Diese Eigenschaften variieren je nach Standort erheblich.

Zu den chemischen Eigenschaften des Bodens gehören u. a. der Nährstoffgehalt und der pH-Wert. Das Vorkommen und die Aktivität von Bodenmikroorganismen bestimmen die biologischen Eigenschaften des Bodens. Organische Substanzen, die dem Böden über abgestorbene Pflanzen zugeführt wird, bilden die Lebensgrundlage für diese Organismen. Durch mikrobielle Aktivitäten werden Nährstoffe freigesetzt, die von den Pflanzen über ihre Wurzeln aufgenommen werden.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 50f)

2.3 Versorgungskette Biomasse

Die Versorgungs- bzw. Bereitstellungskette (zur Bereitstellung der Energie aus Biomasse) enthält sämtliche Prozesse beginnend mit der Produktion der Energiepflanzen bzw. der Verfügbarmachung von Rückständen, Nebenprodukten oder Abfällen organischer Herkunft bis hin zur Bereitstellung der Energie (z.B. Strom oder Fernwärme). Somit wird der „Lebensweg“ der organischen Stoffe von der Herstellung (Primärenergie) bis hin zur Bereitstellung der jeweiligen Wärme und/oder Kraft, der so genannten End- bzw. Nutzenergie beschrieben.

Jede derartige Bereitstellungskette wird zudem noch in verschiedene Lebenswegabschnitte eingeteilt werden (siehe Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12).

Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen

- Produktion bzw. Verfügbarmachung von Biomasse
- Biomassebereitstellung
- Biomasseaufbereitung
- Umwandlungstechnik
- Nutzung
- Verwertung bzw. Entsorgung anfallender Rückstände und/oder Abfälle

(vgl. FNR, 2000, 18)

2.3.1 Definition der Energiebegriffe

Nach Max Planck versteht man unter Energie die Fähigkeit eines Systems Arbeit zu verrichten. Dabei wird zwischen mechanischer, thermischer, elektrischer, chemischer, Kern- und Strahlungsenergie unterschieden. In der praktischen Energieanwendung wird Energie in erster Linie als Kraft (mechanische Energie), Wärme (thermische Energie) und Licht (Strahlungsenergie) nachgefragt. Je nach Art der Ausgangsenergie sind dazu verschiedene Energieumwandlungen erforderlich.

(vgl. FNR, 2000, 17)

Energieträger

Energieträger sind Stoffe, aus denen direkt oder durch eine oder mehrere Umwandlungen Nutzenergie gewonnen werden kann. Nach dem Grad der Umwandlung werden sie dann in

Primär-, Sekundär- und Endenergieträger unterteilt. Der Energieinhalt dieser Energieträger ist dann die Primär-, die Sekundär- und die Endenergie (siehe Abbildung 2.11).

(vgl. FNR, 2000, 17)

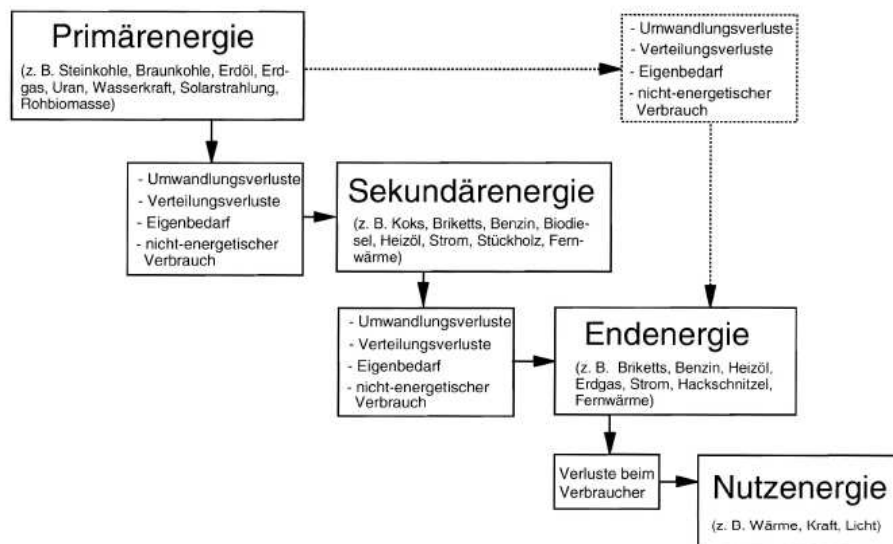


Abbildung 2.11: Energiewandlungskette

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 8

Primärenergieträger

Unter einem Primärenergieträger wird ein Stoff verstanden, der noch keiner technischen Umwandlung unterworfen wurde. Aus Primärenergieträgern (Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Biomasse, Windkraft, Erdwärme, etc.) können direkt oder durch eine bzw. mehrere Umwandlungen Sekundärenergie bzw. Sekundärenergieträger gewonnen werden.

(vgl. FNR, 2000, 17)

Sekundärenergieträger

Sekundärenergieträger (Benzin, Heizöl, Rapsöl, elektrische Energie, etc.) werden aus Primär- oder aus anderen Sekundärenergieträgern hergestellt (entweder direkt oder durch eine oder mehrere Umwandlungen in technischen Anlagen). Dabei fallen Umwandlungs- und Verteilungsverluste an. Sekundärenergie bzw. -träger stehen Verbrauchern zur Umwandlung in andere Sekundär- bzw. Endenergieträger zur Verfügung.

(vgl. FNR, 2000, 17f)

Endenergieträger

Darunter versteht man Stoffe, die der Endverbraucher zur energetischen Nutzung beziehen kann (z. B. Heizöl im Öltank, Hackschnitzel bzw. Pellets vor der Feuerungsanlage). Endenergieträger sind für die Umwandlung in Nutzenergie verfügbar.

(vgl. FNR, 2000, 17f)

Nutzenergie

Nutzenergie ist jene Energie, die nach der letzten Umwandlung in den Geräten des Verbrauchers zur Verfügung steht. Sie wird gewonnen aus der Endenergie, vermindert um die Verluste dieser letzten Umwandlung (z. B. Verluste infolge der Wärmeabgabe einer Glühbirne für die Erzeugung von Licht).

(vgl. FNR, 2000, 17f)

Biomasse gilt als einzige erneuerbare Energie, aus der man alle End- bzw. Nutzenergien (wie Wärme, Strom und Kraftstoffe) gewinnen kann. Die einzelnen Schritte, die zwischen der Gewinnung von Biomasse und der Nutzenergie stehen, werden in Abbildung 2.12 verdeutlicht.

(vgl. ENERGIEAGENTUR, 2009, s.p.)

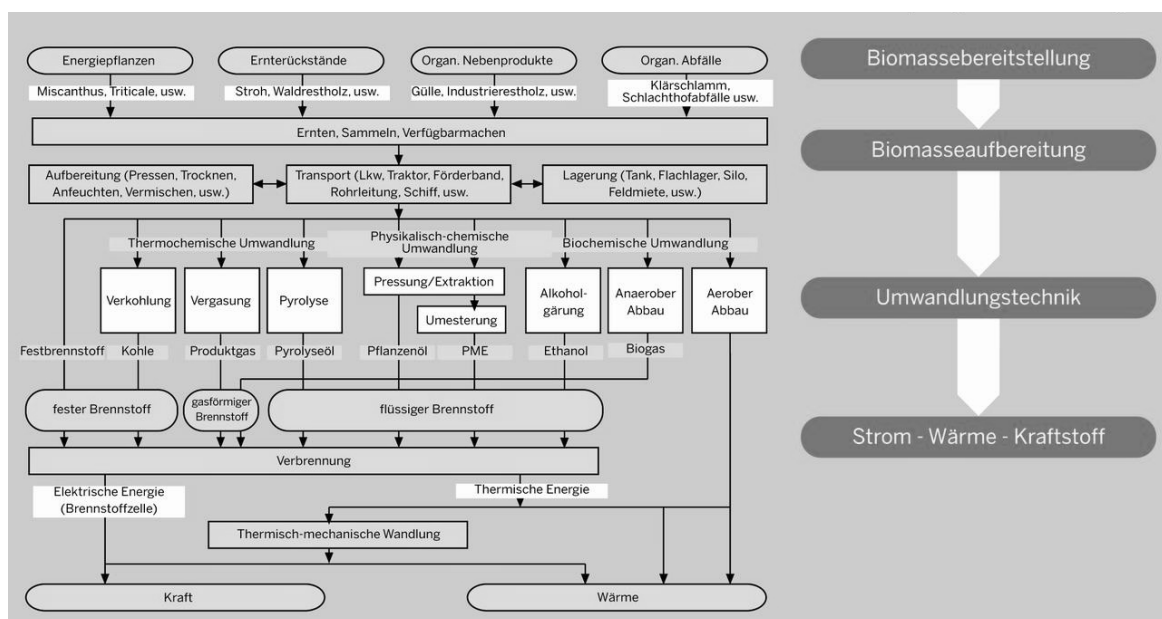


Abbildung 2.12: Schematischer Aufbau typischer Bereitstellungsketten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse

Quelle: ENERGIEAGENTUR NRW, 2009, s.p.

Biomasse kann im Verlauf einer Bereitstellungs- oder Versorgungskette (d.h. den „Weg“ vom Anfallort bis zur gewünschten End- bzw. Nutzenergie) auf verschiedene Arten aufgearbeitet und letztlich in die gewünschte Energieform umgewandelt werden. Im einfachsten Fall wird beispielsweise Lignozellulose-haltige Biomasse wie Holz im Anschluss an eine einfache mechanische Aufbereitung (z. B. Zerkleinerung zu Hackschnitzeln, Verdichtung zu Holzpellets oder Briketts) direkt in Feuerungsanlagen verbrannt. Dabei stellt die Verbrennung, wenn es wie im Regelfall um die Deckung der gegebenen Wärme- und Stromnachfrage geht, das „klassische“ Verfahren zur Nutzung fester Stoffe organischer Herkunft dar. Zwar sind die derzeit auf dem Markt verfügbaren Anlagen primär zur Wärmebereitstellung ausgelegt, aber auch eine Stromerzeugung aus Biomasse ist möglich.

(vgl. FNR, 2000, 18f)

3. Biomassenpotential in Österreich

3.1 Flächenverteilung in der Land- und Forstwirtschaft

Land und forstwirtschaftliche Flächen sind die Grundlage zur Produktion von Biomasse. In Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2 sieht man die sehr unterschiedliche Verteilung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen in den verschiedenen Bundesländern. In Salzburg, Tirol, Vorarlberg und Wien gibt es kaum Ackerflächen. Die Hälfte aller Ackerflächen befindet sich alleine in Niederösterreich. Im Gegensatz dazu ist das Grünland gleichmäßiger verteilt. In Tirol, Salzburg, Kärnten und der Steiermark (gebirgigere Gebiete) ist der Anteil von extensivem Grünland höher als in den anderen Bundesländern.

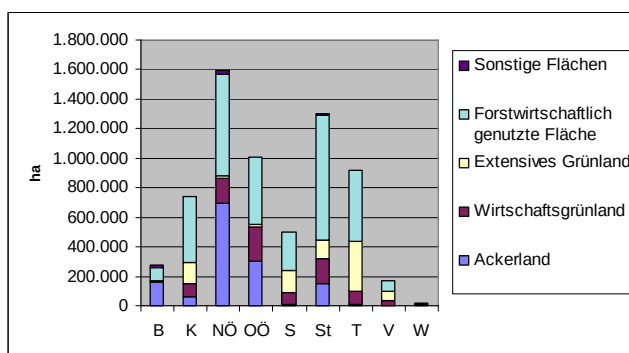


Abbildung 3.1: Verteilung der Kulturarten nach Bundesländern (2007)

Quelle: Eigene Darstellung nach GRÜNER BERICHT, 2009, 208

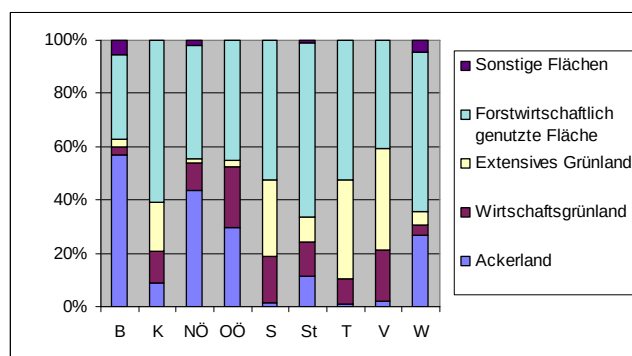


Abbildung 3.2: Prozentuelle Verteilung der Kulturarten in den Bundesländern (2007)

Quelle: Eigene Darstellung nach GRÜNER BERICHT, 2009, 208

Aus der Abbildung 3.2 ist außerdem ersichtlich, dass die landwirtschaftliche Biomasse sehr stark auf die östlichen Bundesländer konzentriert ist. Betrachtet man die Flächenverteilung der forstlichen Biomasse ist kein ausgeprägter Unterschied festzustellen. Die Verteilung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen von 2006 bis 2008 ist in Abbildung 3.3 ersichtlich

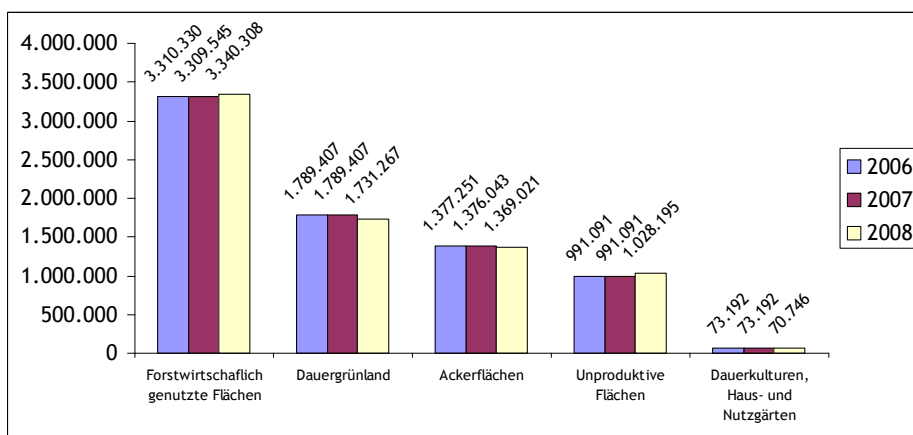


Abbildung 3.3: Verteilung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen in Österreich (Angaben in ha)

Quelle: Eigene Darstellung nach STATISTIK AUSTRIA, 2009 d, s.p.

Betrachtet man historische Daten zur Verteilung von land- bzw. forstwirtschaftlichen Flächen (

Tabelle 3.1) sieht man, dass die Flächenverteilung ständigen Schwankungen unterworfen ist. So ist z. B. bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen (Ackerland und Grünland) seit 1960 ein deutlicher Rückgang festzustellen, bei den forstwirtschaftlich genutzten Flächen hingegen ist ein leichter Anstieg zu beobachten.

Tabelle 3.1: Verteilung der Kulturarten im Zeitvergleich (Angaben in ha)

	1960	1970	1980	1990	1995	1999	2007
Kulturfläche	7.193.636	6.757.443	6.546.245	6.761.005	6.686.268	6.650.206	6.531.062
Landwirtschaftlich genutzte Fläche	4.051.911	3.696.453	3.509.987	3.521.570	3.426.873	3.389.905	3.190.754
Forstwirtschaftlich genutzte Fläche	3.141.725	3.060.990	3.036.258	3.239.435	3.259.395	3.260.301	3.340.308
Sonstige Flächen	1.111.929	969.936	1.104.714	793.811	844.937	868.409	1.028.196
Summe Gesamtfläche	8.305.565	7.727.379	7.650.959	7.554.815	7.531.205	7.518.615	7.559.258

Quelle: Eigene Darstellung nach GRÜNER BERICHT, 2009, 207

Auch die Anzahl der land- und forstwirtschaftlichen Betriebe sinkt stetig, dies ist in Abbildung 3.4 ersichtlich.

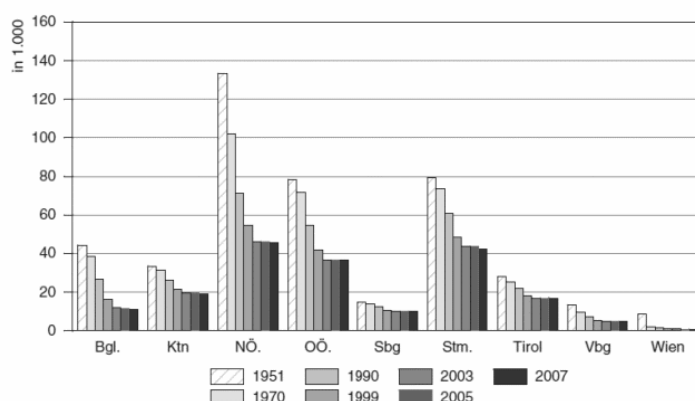


Abbildung 3.4: Land- und forstwirtschaftliche Betriebe nach Bundesländern 1951 - 2007

Quelle: STATISTIK AUSTRIA, 2008, s.p.

3.2 Biomasse aus der Forstwirtschaft

Der Wald ist hinsichtlich seiner Ausdehnung, der räumlichen Verteilung und seiner Zusammensetzung ständigen Veränderungen unterworfen. Die letzte Erhebung der aktuellen Situation sowie der Entwicklung des österreichischen Waldes wurde in den Jahren 2000 bis 2002 von der österreichischen Waldinventur (ÖWI) durchgeführt. Nach Auswertung der ÖWI ist die Flächennachhaltigkeit des österreichischen Waldes gesichert (siehe auch Tabelle 3.2). Nicht nur in den walddreichen Gebieten sondern auch in den traditionell unterbewaldeten Regionen Ostösterreichs wurde eine merkliche Waldflächenzunahme festgestellt. Gemäß ÖWI 2000/2002 beträgt Österreichs Waldfläche 3,96 Mio. ha, was in etwa 47,2 % der gesamten Staatsfläche entspricht. Seit 1961/70 (Beginn der ersten Inventurperiode) kann eine ständige

Flächenzunahme des österreichischen Waldes um insgesamt um fast 270.000 ha beobachtet werden (siehe Abbildung 3.5)

(vgl. ÖSTERREICHISCHER WALDBERICHT, 2008, 13)

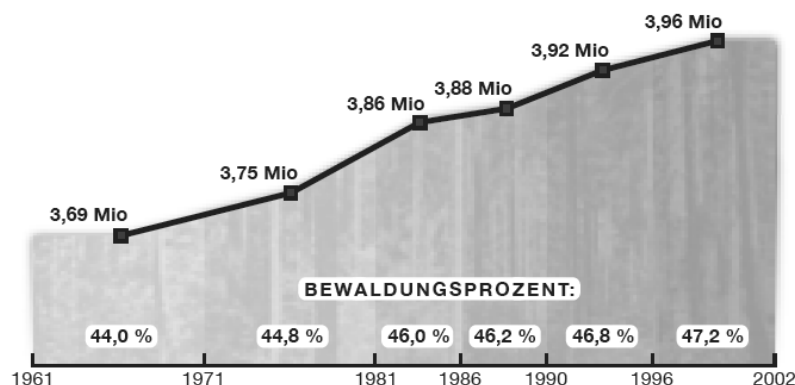


Abbildung 3.5: Waldflächenzunahme in Österreich (Angaben in ha)

Quelle: ÖSTERREICHISCHER WALDBERICHT, 2008, 13

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Österreichischen Waldinventur (1992 - 1996 und 2000 - 2002 im Vergleich)

	Vorrat/ha (Vfm)	Nutzung/ha (Vfm)	Zuwachs (Vfm)	Gesamtfläche (ha)	Waldfläche (ha)	Waldanteil (in %)
ÖWI 1992 - 1996	295	5,9	8,2	8.385.483	3.924.000	46,8
ÖWI 2000 - 2002	325	5,6	9,3	8.385.828	3.960.000	47,2

Quelle: Eigene Darstellung nach BFW, 2006, s.p.

In den Wäldern Österreichs ist um knapp 70 Prozent mehr Biomasse verfügbar als angenommen. Dies geht aus einer vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) am 06.11.07 präsentierten Holz- und Biomasseaufkommensstudie hervor. Der Einsatz von Biomasse sei für Österreich eine besonders sinnvolle Alternative zu Energie aus Erdöl und Erdgas. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 3.6) der Studie gehen von einem jährlichen Mehrpotential an Holz und Biomasse von 7,6 Mio. Erntefestmeter pro bis 2020 aus (dies entspricht einem Mehr an Biomasse von knapp 70 Prozent). Die Mehrnutzung sei sowohl ökonomisch rentabel als auch ökologisch vertretbar. Außerdem zeigen die Ergebnisse der Studie, dass die im nationalen Biomasseaktionsplan aufgezeigten Holzmengen verfügbar seien und die Ziele realistisch angesetzt wurden. Die vom Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) in Zusammenarbeit mit der Universität für Bodenkultur (BOKU) durchgeführte Studie zeigt, dass in Österreich sowohl die Waldfläche als auch der

Holzvorrat trotz steigender Nutzung in den letzten Jahren zugenommen hat. Somit ist trotz Mehrnutzung eine nachhaltige Bewirtschaftung gewährleistet.

(vgl. BFW, 2007, s.p.)

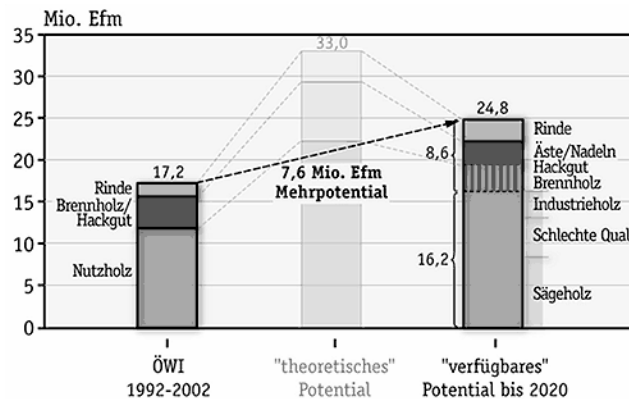


Abbildung 3.6: Geschätztes Potential an forstlicher Biomasse bis 2020

Quelle: BFW, 2007, s.p.

Die forstliche Biomasse (Waldhackgut und Brennholz) stellte im Jahre 2004 die wichtigste Biomassefraktion in Österreich dar (mit einer primärenergetischen Nutzung von ca. 70 PJ/a). Zur industriellen Biomasse zählen so genannte Sägenebenprodukte (Sägespäne, Hackgut, Rinde und sonstiges Restholz der Holz verarbeitenden Industrie) und Ablauge der Papierindustrie, also Abfälle der stofflichen Holzverwertung. Allein im Jahre 2004 wurden ca. 31 PJ an Sägenebenprodukten und 24 PJ an Schwarzlauge energetisch genutzt.

Zwischen der stofflichen und der energetischen Nutzung bestehen diverse Kopplungen:

Beim Holzeinschlag fallen die Sortimente Sägerundholz, Industrieholz und Brennholz an, wobei das Brennholz das minderwertigste Sortiment darstellt. Da die größten Erlöse durch Sägerundholz erzielbar sind, sind die Sortimente Industrie- und Brennholz i. Allg. nur über die Nachfrage der Sägeindustrie mobilisierbar. Sägenebenprodukte (insbesondere Rinde) werden Teils zur Energieerzeugung betriebsintern genutzt. Sägespäne und Hackgut werden größtenteils jedoch stofflich (Papier- und Plattenindustrie) verwertet. Außerdem werden Sägenebenprodukte in zunehmendem Maße zur Herstellung von Pellets und Briketts genutzt bzw. als Hackgut direkt thermisch verwertet. Somit nimmt die Sägeindustrie eine bedeutende Rolle sowohl für die Rohstoffversorgung von Papier- und Plattenindustrie, als auch für die Bereitstellung biogener Brennstoffe ein.

(vgl. KRANZL, et al., 2008, 88f)

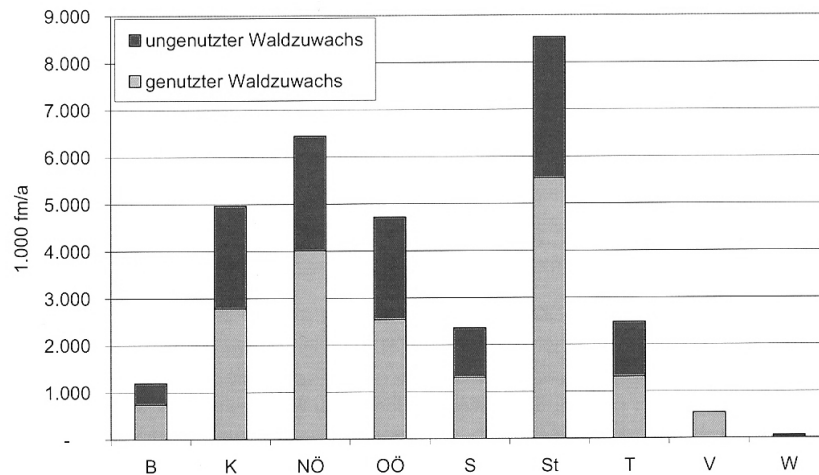


Abbildung 3.7: Ergebnisse der Österreichischen Waldinventur 2000/2002

Quelle: KRANZL, 2008, 96

Laut ÖWI 2000/2002 betrug die jährliche Waldnutzung im Beobachtungszeitraum nur ca. zwei Drittel des Zuwachses (siehe Abbildung 3.7). Somit würde zusätzlich eine nachhaltig nutzbare Holzmenge von ca. 12,5 Mio. fm zur Verfügung stehen. Um die tatsächlich realisierbaren Potentiale abschätzen zu können müssen allerdings einige Tatsachen berücksichtigt werden:

Seit Ende des letzten Beobachtungszeitraumes (2002) ist der Holzeinschlag deutlich angestiegen. Somit lag der durchschnittliche Einschlag der Jahre 2003 bis 2005 bereits bei fast 3 Mio. fm über dem der Jahre 2000 bis 2002.

Zu beachten ist auch, dass ein nicht unwesentlicher Anteil des Zuwachses sich auf nicht nutzbaren Hanglagen befindet. Dazu kommen noch Schutz- und Bannwälder außer Ertrag. Daher können maximal 85 % des jährlichen Zuwachses als nutzbar betrachtet werden.

Der größte Teil des ungenutzten Zuwachses befindet sich in privaten Kleinwäldern und die Bereitschaft der Waldbewirtschaftung vieler Waldbesitzer ist zurzeit sehr begrenzt.

Eine Holzmobilisierung ist, wie bereits erwähnt, nur bei entsprechender Nachfrage der Sägeindustrie zu bewerkstelligen, da mit Sägerundholz die weitaus höchsten Erträge zu erzielen sind.

Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen wurde der zusätzlich nutzbare jährliche Waldzuwachs in Österreich auf ca. 5 bis maximal 6 Mio. fm geschätzt. Damit würde man etwa 80 % des gesamten jährlichen Zuwachses nutzen.

(vgl. KRANZL, et al., 2008, 95)

3.3 Biomasse aus der Landwirtschaft

Zur landwirtschaftlichen Biomasse gehören sowohl alle zur Energieerzeugung auf landwirtschaftlichen Flächen (Acker- und Grünlandflächen) gewachsenen Pflanzen als auch energetisch nutzbare Abfälle- und Nebenprodukte aus der Landwirtschaft (Stroh, Gülle, ...). Die Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse war im Vergleich zu forstlicher und industrieller Biomasse in der Vergangenheit eher gering. Die Tendenz zeigt jedoch, dass landwirtschaftliche Biomasse in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird und das nicht nur in Österreich sondern auch global. Bereits in den letzten Jahren gab es starke Zuwächse bei der Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse. Der Hauptgrund dafür ist in erster Linie der steigende Bedarf an Energiepflanzen zur Produktion von Biokraftstoffen, ein weiterer Grund sind die Entwicklungen in den Bereichen alternativer Brennstoffe (Miscanthus, Energiekorn, Kurzumtriebsholz usw.) und der Biogaserzeugung bzw. -nutzung. Landwirtschaftliche Ressourcen stellen in Österreich das größte ungenutzte Biomassenpotenzial dar.

(vgl. KRANZL, et al., 2008, 100f)

Daten über die gegenwärtige Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse sind nur beschränkt verfügbar. Zwar gibt es Daten über geförderte Energiepflanzenflächen und für die Produktion von NAWAROS genutzte Stilllegungsflächen, man kann jedoch davon ausgehen, dass die für die Erzeugung von Energiepflanzen genutzten Flächen deutlich höher liegen. Im Jahr 2006 wurden diese Flächen auf ca. 50.000 ha geschätzt. Auf den größten Teil dieser Flächen wuchsen Pflanzen zur Produktion von Biogas. (hauptsächlich Maissilage), gefolgt von Ölsaaten zur Produktion von Pflanzenöl und Biodiesel. Der Anbau von Miscanthus und Energieholz sowie die energetische Nutzung von Stroh nehmen derzeit noch eine untergeordnete Rolle ein.

(vgl. KRANZL, et al., 2008, 103f)

3.4 Forstwirtschaftliche Stoffströme

Österreichs Waldfläche beträgt rund 3,96 Mio. ha (siehe Abbildung 3.5). Davon sind etwa 0,5, bzw. 0,1 Mio. ha Schutz- und Bannwald bzw. Holzboden (u. a. Forststraßen) außer Ertrag, diese Flächen können daher nicht für eine Bereitstellung von energetisch nutzbarem Holz herangezogen werden. Vom auf den verbleibenden Flächen nutzbaren jährlichen Holzzuwachs von 38,5 Mio. Vorratsfestmeter (Vfm)) werden derzeit im Durchschnitt rund 16,8 Mio. Erntefestmeter (Efm) ohne Rinde (5-Jahresmittel) als Nutzholz eingeschlagen (2007 waren es konjunkturbedingt 21,3 Mio. Efm). Zusätzlich können noch ca. 0,8 Mio. Festmeter (Fm) in Form von Waldhackgut genutzt werden. Die ergibt zusammengerechnet etwa 150 PJ.

Der energetischen Verwertung dieser Holzmenge steht allerdings die stoffliche Verwertung (z. B. als Bau- und Möbelholz oder in der Papier- und Zellstoffindustrie sowie der Span- und Faserplattenindustrie gegenüber. Außerdem verbleibt ein Teil des Schlagabraums im Wald (ca. 0,8 Mio. FM).

Nach Statistik Austria wurden im Jahre 2006 rund 126 PJ/a u. a. in Form von Brennholz, Sägenebenprodukten, Rinde und Restholz energetisch genutzt. Darin sind jedoch auch importiertes Brennholz, bei der Verarbeitung von importiertem Holz anfallende Rückstände sowie recyceltes Holz (z. B. Altholz, Abbruchholz) enthalten. Aus diesem Grund wurden von den in Österreich geernteten Holzmengen in etwa knapp. 105 PJ (Basis 2006) energetisch genutzt. Zusätzlich könnte noch ein Teil von dem im Wald verbleibenden Schlagabraum und vom derzeit nicht genutzten Zuwachs energetisch genutzt werden. Dadurch ließen sich rund 0,8 Mio. Fm Schlagabraum sowie 9,7 Mio. Fm durch ein verändertes Waldmanagement (Holzeinschlag und Durchforstung) an Holz für eine energetische Nutzung gewinnen. Dies würde ein zusätzliches Angebotspotenzial von 6,7 bzw. 77,7 PJ/a bedeuten. Dabei wird jedoch vereinfacht unterstellt, dass das bei der verstärkten Waldnutzung gewonnene Holz primär stofflich verwendet würde und nur die bei der Verarbeitung anfallenden Restholzsortimente (Sägenebenprodukte, Rinde, Waldrestholz, etc.) sowie die durch die Walderschließung ermöglichte verstärkte Gewinnung von Brennholz für eine thermische Nutzung zur Verfügung stehen. Somit könnten insgesamt knapp 190 PJ/a an Brennholz, Rinde, Waldhackgut und Sägenebenprodukte zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehen.

Neben diesen unbehandelten Holzfraktionen kann zusätzlich noch ein gewisser Teil des Altholzaufkommens (Bau- und Abbruchholz, Holzanteile im Rest- und Sperrmüll, Baustellenabfälle, ölpräparierte Hölzer usw.) von ca. 0,8 Mio. t/a energetisch genutzt werden. Zu beachten ist hier allerdings die Konkurrenz durch eine stoffliche Verwertung und die durch technisch-ökonomische Restriktionen nicht vollständig mögliche Erfassung unter anderem bei Bau- und Abbruchholz.

Da in Österreich seit dem 01.01.04 keine unbehandelten Abfälle mehr deponiert werden dürfen (BGBL., 2008, 9), wird hier unterstellt, dass 80 % des Altholzanfalls energetisch verwertet werden kann. Dies würde einem Heizwert (H_u) von 17,5 MJ/kg und somit rund 11,8 PJ/a entsprechen. Somit liegt das Brennstoffaufkommen aus unbehandeltem Holz sowie Altholz damit bei rund 201 PJ/a.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 511f)

3.5 Landwirtschaftliche Stoffströme

Bei dieser Stoffgruppe unterscheidet man zwischen Stroh, Grünlandaufwuchs, Landschaftspflegeholz und Energiepflanzen.

Da die Flächen wo Energieholz im Kurzumtrieb angebaut werden (§1a Abs. 5 Forstgesetz 1975) nicht als Wald sondern als landwirtschaftliche Nutzfläche gelten (FORSTGESETZ, 2007, 2), ist die Holzproduktion im Kurzumtrieb der Landwirtschaft zuzuteilen.

Stroh

Im Jahre 2006 wurde in Österreich Getreide auf einer Fläche von ca. 590.000 ha angepflanzt (STATISTIK AUSTRIA, 2009 d, s.p.). Die sich daraus ergebende Gesamtmenge an Getreidestroh, die sich aus den jeweiligen Getreideerträgen und dem entsprechenden Korn-Stroh-Verhältnis ermitteln lässt, liegt bei ca. 2,0 Mio. t. Im Gegensatz zur energetischen Verwertung wird Getreidestroh bereits vielfach stofflich verwertet (Einstreu in der Nutztierhaltung, Einsatz in Gärtnereien, als Strukturmaterial, etc.) Deshalb stehen als Energieträger nach Abzug des für eine stoffliche Nutzung benötigten Strohs nur ca. 20 % des Gesamtstrohaufkommens (0,4 Mio. t_{FM}/a) zur Verfügung. Bei einem Heizwert (H_u) von 14,5 MJ/kg_{FM} (15 % Wassergehalt) berechnet sich daraus ein technisches Energieträgerpotenzial von 5,8 PJ/a. Dadurch, dass der mittlere Umwandlungswirkungsgrad bei Strohfeuerungen bei 90% liegt, ergibt sich ein technisches Angebotspotenzial einer alleinigen Wärmebereitstellung aus Stroh von ca. 5,2 PJ/a.

Das technische Angebotspotenzial an in KWK erzeugter elektrischer Energie bestimmt sich aus dem für eine Strom- und Wärmeerzeugung verfügbaren Strom (4,8 PJ/a da heute bereits ca. 1 PJ/a zur reinen Wärmebereitstellung eingesetzt wird) und dem Umwandlungsnutzungsgrad von 30 % mit 1,4 PJ/a (ca. 0,4 TWh/a). Die in Koppelproduktion zusätzlich bereitgestellte Wärme liegt bei einem Nutzungsgrad von 60 % bei ca. 2,9 PJ/a. Mit der derzeit schon realisierten Nutzung ergibt sich daraus ein technisches Angebotspotenzial an Wärme aus Stroh bei einer Kraft-Wärme-Kopplung von ca. 3,9 PJ/a.

Die Vergasung von Halmgütern ist derzeit in vorhandenen Anlagen noch nicht ohne weiteres möglich und entspricht (noch) nicht dem Stand der Technik. Neben der thermo-chemischen Umwandlung kann Getreidestroh auch vergoren und somit in den Sekundärenergieträger umgewandelt werden, was in dieser Betrachtung aber keine Berücksichtigung findet.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 513)

Grünlandaufwuchs

Die Dauergrünlandfläche Österreichs beträgt ca. 1,8 Mio. ha (STATISTIK AUSTRIA, 2009 d, s.p.). Diese Flächen setzen sich aus extensiven Grünland, Wirtschaftsgrünland sowie Almen und Bergmähder zusammen. Die auf diesen Flächen anfallende Biomasse ist aber nur teilweise energetisch nutzbar da die Grünlanderträge von Almen und Bergmähder aufgrund der i. Allg. gegebenen Nutzung als Weiden bzw. den exponierten Lagen und geringen Erträgen keiner technisch sinnvollen energetischen Nutzung zugeführt werden. Deshalb wird der Grünlandaufwuchs auch nicht weiter behandelt.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 514)

Landschaftspflegeholz

Unter diesem Begriff versteht man Holz, welches bei Pflegearbeiten, Baumschnittaktivitäten in der Land- und Gartenbauwirtschaft (Obstplantagen, Weinberge, ...) und/oder anderen landschaftspflegerischen Maßnahmen anfällt. Der hier berücksichtigte Baumschnitt aus Obstplantagen und Streuobstwiesen sowie aus Weinreblflächen ergibt ein technisches Energieträgerpotenzial von 0,5 PJ/a. Dieses Potenzial ergibt sich aus der technisch nutzbaren Abfallmenge von rund 63.000 t_{FM} unter Beachtung der gegebenen Restriktionen einer stofflichen Nutzung sowie mit einem durchschnittlichen Heizwert (H_u) von 8 MJ/kg_{FM}. Daraus ergibt sich ein technisches Angebotspotenzial (an Wärme) von rund 0,5 PJ/a. Für eine auf Verbrennung basierende kombinierte Strom- und Wärmebereitstellung liegt das Potenzial bei 0,2 PJ/a (40 GWh/a) an elektrischer Energie sowie 0,3 PJ/a an Wärme bzw. vergasungsbasiert bei 0,2 PJ/a (50 GWh) elektrisch und 0,3 PJ/a thermisch.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 519)

Energiepflanzen

Der stetig ansteigende Bedarf an Hackgut (von jährlich ca. 2 %) zur energetischen und stofflichen Verwertung erfordert neben einer höheren Aufbringungsmenge aus der Forstwirtschaft zusätzlich eine Ausweitung der Kurzumtriebsanlagen auf landwirtschaftliche Flächen.

(vgl. DEIM, et al., 2008, 1)

Um das Flächenpotenzial für den Anbau von Energiepflanzen in Österreich abschätzen zu können und um kurzfristige Schwankungen auszugleichen, wird ein 5-Jahres-Durchschnitt

(2002 bis 2006) herangezogen. Ausgehend davon können die maximal zur Verfügung stehenden Energiepflanzenanbauflächen unter Berücksichtigung der Eigenversorgung mit Nahrungs- und Futtermitteln ermittelt werden. Außerdem wird angenommen, dass vorhandene Nutzungen nicht substituiert werden. Damit würden derzeit rund 97.000 ha Brachfläche für den Biomasseanbau zur Verfügung stehen (Grün- und Schwarzbrache). Zusätzlich dazu werden für den Energiepflanzenanbau hier auch Agrarflächen, auf denen Marktordnungsprodukte (z. B. Getreide, Zucker, Milch, Rindfleisch, etc.) als Überschüsse produziert werden, als potenzielle Flächen bedacht. Mit diesen zusätzlich freisetzbaren Flächen würden demnach insgesamt. ca. 176.400 ha Ackerfläche zur Energiepflanzenproduktion zur Verfügung stehen (die bereits existierende Energiepflanzenproduktion ist dabei nicht berücksichtigt).

Um die Potenziale eines Anbaus von Energiepflanzen zur Bereitstellung biogener Festbrennstoffe abschätzen zu können wird ein Anbau von Kurzumtriebsholz (d. h. Pappel und Weide), von Getreideganzpflanzen (d. h. Korn und Strohnutzung) und Chinaschilf (*Miscanthus*) als ein Beispiel für eine ertragstarke Schilfart unterstellt. Zudem wird angenommen, dass diese Pflanzen auf der gesamten für den Energiepflanzenanbau freigesetzten Fläche (176.400 ha) angebaut werden. Bei einem durchschnittlichen Hektarertrag von $8t_{TM}/(ha\ a)$ für Pappel-Kurzumtriebsanlagen, $10t_{TM}/(ha\ a)$ für Getreideganzpflanzen bzw. $12t_{TM}/(ha\ a)$ für *Miscanthus* sowie einem Heizwert (H_u) von 18,5 MJ/kg_{TM} (Kurzumtriebsholz), 17,0 MJ/kg_{TM} (Getreideganzpflanzen) und 17,6 MJ/kg_{TM} (*Miscanthus*) ergibt sich ein technisches Brennstoffpotenzial mit rund 26,1 PJ/a (Kurzumtriebsholz), 30 PJ/a (Getreideganzpflanzen) bzw. 37,3 PJ/a (Chinaschilf).

Wird für die ausschließliche Wärmeengewinnung ein Umwandlungsnutzungsgrad von 90 % unterstellt können daraus in etwa 24 PJ/a (Kurzumtriebsholz), 27 PJ/a (Getreideganzpflanzen) sowie 34 PJ/a (*Miscanthus*) an Energie bereitgestellt werden. Bei einer kombinierten verbrennungsbasierten Bereitstellung von Strom- und Wärme lassen sich aus Kurzumtriebsholz rund 7,8 PJ/a (2,2 TWh/a) Strom und rund 15,7 PJ/a Wärme bzw. vergasungsbasiert ca. 9,1 PJ/a (2,5 TWh/a) elektrische und etwa 14,4 PJ/a thermische Energie bereitstellen. Für Getreideganzpflanzen ergeben sich verbrennungsbasierte Endenergiepotenziale von 9 PJ/a (2,5 TWh/a) an Strom und ca. 18 PJ/a an Wärme bzw. vergasungsbasiert elektrisch von 10,5 PJ/a (2,9 TWh/a) und thermisch von 1,5 PJ/a. Beim Chinaschilf (*Miscanthus*) kann bei einer verbrennungsorientierten KWK-Nutzung eine potenzielle Stromerzeugung von 11,2 PJ/a (3,1 TWh/a) und eine Wärmeerzeugung von 22,4 PJ/a bzw. vergasungsbasiert von rund 13 PJ/a (3,6 TWh/a) an elektrischer und 20,5 PJ/a an thermischer Energie bereitgestellt werden (siehe Tabelle 3.3).

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 519ff)

Tabelle 3.3: Angebotspotenziale von Energiepflanzen

	Energiebereit- stellungspfad	Wärme in PJ/a	Kraft-Wärme-Kopplung			Kraft- stoffe in PJ/a
			Strom in PJ/a	Wärme in TWh/a	Wärme in PJ/a	
Festbrennstoffe						
Kurzumtriebsholz (Pappel)	TC	23,5	7,8 ^a 9,1 ^b	2,2 ^a 2,5 ^b	15,7 ^a 14,4 ^b	
Getreideganzpflanzen	TC	27,0	9,0 ^a 10,5 ^b	2,5 ^a 2,9 ^b	18,0 ^a 16,5 ^b	
Chinaschilf (Miscanthus)	TC	33,5	11,2 ^a 13,0 ^b	3,1 ^a 3,6 ^b	22,4 ^a 20,5 ^b	
Kraftstoffe						
Rapsöl	PC		2,7	0,8	5,4	9,0
Biodiesel (Rapsölbasis)	PC					8,9
Rapsschrot	TC	5,1	1,7 ^a	0,5 ^a	3,4 ^a	
Rapsstroh	TC	7,8	2,6 ^a	0,7 ^a	5,2 ^a	
Bioethanol (Zuckerrüben)	BC					23,2
Zuckerrübenblätter	BC		3,6	1,0	4,0	
Bioethanol (Winterweizen)	BC					10,3
Winterweizenstroh	TC	13,4	4,5 ^a	1,2 ^a	8,9 ^a	
Biogas (Silomais)	BC		9,1	2,5	10,1	

^b thermo-chemisch; BC bio-chemisch; PC physikalisch-chemisch; ^a verbrennungsbasierte KWK-Nutzung;
^b vergasungsbasierte KWK-Nutzung

TC thermo-chemisch; BC bio-chemisch; PC physikalisch-chemisch; ^a verbrennungsbasierte KWK-Nutzung;
^b vergasungsbasierte KWK-Nutzung

Quelle: KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 524

4. Produktion biogener Festbrennstoffe

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, unterscheidet man bei den biogenen Festbrennstoffen für die energetische Nutzung zwischen holz- und halmgutartigen Brennstoffen.

Energiepflanzen hingegen unterteilt man anhand ihrer verschiedenen Nutzungseigenschaften, und zwar in Lignozellulosepflanzen und in Öl- bzw. Zucker- und Stärkepflanzen. Lignozellulosepflanzen dienen als Ganzpflanzen der Festbrennstoffbereitstellung. Öl- bzw. Zucker- und Stärkepflanzen sind erst nach der technischen Gewinnung des Öls bzw. Ethanol aus bestimmten Pflanzenkomponenten (meist sind es spezielle Ertragsorgane wie Körner oder Knollen) zum Einsatz als Energieträger geeignet.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 57)

4.1 Lignozellulosepflanzen

Die für die Nutzung als Festbrennstoff geeigneten Pflanzen werden deshalb als Lignozellulosepflanzen bezeichnet, weil ein wesentlicher Anteil der von ihnen gebildeten (und

als biogener Festbrennstoff nutzbaren) Biomasse aus unterschiedlichen Anteilen von Zellulose, Lignin und Hemizellulose besteht.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 57)

4.1.1 Schnellwachsende Baumarten

Typische Vertreter von in Mitteleuropas Kurzumtriebsplantagen angebauten, schnellwachsenden Baumarten sind Pappel und die Weide. Beide gehören sie zur Familie der Weidengewächse (Salicaceae) mit den beiden Hauptgattungen *Populus* (Pappel) und *Salix* (Weide). An den im ersten Jahr eintriebigen Stämmen bilden sich ab dem zweiten Jahr Verzweigungen.

(vgl. FNR, 2000, 57)

Für Kurzumtriebsflächen (short-rotation-farming, kurz SRF) sind Pappeln, Weiden, Robinien, Erlen und Birken gesetzlich anerkannt. Insbesondere Pappeln, Weiden und Robinien haben ein sehr hohes Ausschlagsvermögen. Je nach Umtriebszeit und Baumart sind 4-8 Ernten möglich und die Anlagen können 15-30 Jahre genutzt werden.

Basis für eine erfolgreiche Energieholzbewirtschaftung ist jedoch eine dem Standort angepasste Baumartenwahl. Aufgrund ihrer Genügsamkeit und hohem Brennwert ist die Robinie eine sinnvolle Alternative, doch liegen aktuell die größten Erfahrungen bei Pappel und Weide vor. Gerade auf Grenzertragsböden ist ein Kurzumtrieb möglich, da die verwendeten Baumarten auf feuchten oder trockenen Böden deutlich besser gedeihen als die meisten Ackerkulturen.

(vgl. SCHWEINBERGER UND GÖTTTRIED, 2008, 72)

Zur Lignozelluloseproduktion in Kurzumtriebsplantagen werden hauptsächlich leistungsfähige Klone von Korbweide (*Salix viminalis*), Kätzchenweide (*Salix smithiana*) und Filzastweide (*Salix dasyclados*) sowie die Sektionen Balsampappel (*Tacamahaca*), Schwarzpappel (*Aigeiros*) und Zitterpappel (*Leuce*) verwendet.

(vgl. LIEBHARD, 2007, 17ff)

Energieträgerrelevante Eigenschaften

Unabhängig vom Erntezeitpunkt enthält die Biomasse schnellwachsender Baumarten ca. 50 % Wasser in der Rohsubstanz. Je nach Alter der Bestände bzw. dem daraus resultierenden Rindenanteil schwankt der Aschegehalt zwischen 1,0 und 2,2 %.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 57f)

Standortansprüche und Anbau

Pappeln und Weiden können auf Böden ab einer Bodenpunktzahl 30 (von maximal 100 möglichen) angebaut werden. Besonders wichtig ist eine ausreichende Wasserversorgung, deshalb sind sandige Böden weniger geeignet. Voraussetzung für hohe Biomasseerträge ist eine tiefgründige Durchwurzelbarkeit des Bodens (mindestens 60 cm). Beide Arten haben durch ihren hohen Transpirationskoeffizienten (ca. 800 l Wasser je kg gebildeter Trockenmasse) einen vergleichsweise hohen Wasserverbrauch, deshalb werden die erzielten Erträge auch wesentlich von der Wasserversorgung der Pflanze beeinflusst (u. a. Niederschläge, Wasserhaltekapazität des Bodens, Durchwurzelbarkeit des Bodens, um Wasser aus tieferen Schichten zu nutzen).

Bei der Sortenwahl ist neben dem Massebildungsvermögen auch die Resistenz gegen Blattrost und Gallmücken sowie die Anfälligkeit für Wildverbiss und die Frostverträglichkeit zu beachten. Sortenmischungen können die Resistenzeigenschaften des Gesamtbestandes verbessern und dadurch die Ertragssicherheit erhöhen. Ausgangsmaterial für den Bestand sind 20 cm lange Stecklinge, die im Winter von einjährigen Trieben gewonnen und bei -2 bis -4 °C aufbewahrt werden. Vor dem Setzen ist eine gründliche Bodenvorbereitung (Pflugfurche und Pflanzbettbereitung) notwendig. Vor dem Auspflanzen (Mitte März bis spätestens Ende April) sollten die Triebe einen Tag lang bei +1 °C im Wasser stehen.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 58)

Der Einzelreihen-Pflanzverband ist für Baumarten mit mittellanger und langer Umtriebszeit empfehlenswert, bei einer kurzen Umtriebszeit sind jedoch Doppelreihen vorteilhaft. Der Doppelreihenabstand für eine maschinelle Ernte soll 70 bis 75 cm aufweisen. Der Pflanzabstand in der Reihe muss bei mindestens 50 cm beginnen und ermöglicht bereits einen ausreichend frühen Kronenschluss. Ein Fahrgassenabstand unter 2,5 m ist im gemäßigten Klimagebiet zu eng und erschwert sowohl die Pflege und die Ernte als auch das Abführen des Erntegutes (die Folge sind Rindenbeschädigungen am Stock).

(vgl. LIEBHARD, 2007, 40)



Abbildung 4.1: Pflanzmaschine für Pappel- und Weidenstecklinge

Quelle: SPERR, s.a. b, s.p.

Für die Pflanzung der ca. 18.000 Stecklinge/ha stehen verschiedene Maschinen und Geräte zur Verfügung (siehe Abbildung 4.1). Die Stecklinge sind im ersten Jahr sehr konkurrenzschwach, deshalb muss eine intensive Unkrautbekämpfung (chemisch und/oder mechanisch) durchgeführt werden. In den nachfolgenden Jahren ist in der Regel keine weitere Unkrautbekämpfung mehr erforderlich.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 58)

Nutzung und Ertragspotenzial

Der Bestand wird im ersten Jahr ca. 1,5 m und im vierten Jahr ca. 7 m hoch. Im Winter des Anpflanzjahres kann zur Bestandshomogenisierung und zur Erhöhung der Triebzahl pro Pflanze ein Rückschnitt (Schröpschnitt) des einjährigen Aufwuchses erfolgen. Der Schnitt und damit die Ernte (siehe Kapitel 5.2) der aufgewachsenen Biomasse kann alle drei bis vier Jahre im Januar und Februar erfolgen, wenn der Boden gefroren ist. Die Stöcke treiben im Folgejahr erneut aus und der Bestand kann nach weiteren drei bis vier Jahren wieder geerntet werden.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 59)

Das Ertragspotenzial ist sehr stark standortabhängig (siehe Tabelle 4.1). Die Umtriebszeit liegt zwischen zwei (einem) und maximal 15 Jahren (in Deutschland zehn Jahre). Die Nutzung einer Feldholzanlage im Kurzumtrieb muss spätestens nach 30 Jahren beendet werden (siehe (FORSTGESETZ, 2007, 2). Für eine thermisch energetische Nutzung sind zur Erreichung der erforderlichen Qualität kurze Umtriebszeiten ausreichend.

(vgl. LIEBHARD, 2007, 62)

Tabelle 4.1: Ertragsschätzung für die Hackgutproduktion bei Pappel und Weide im Kurzumtrieb für 6 Umtriebe in 3 verschiedenen Produktionsgebieten Österreichs

Umtrieb	Standort - Produktionsraum		
	auf Grenzertragsböden ca. Ertrag t TM/ha, Jahr	Für semiaride oder kühle Lagen ca. Ertrag t TM/ha, Jahr	Für semihumide oder günstige Lagen ca. Ertrag t TM/ha, Jahr
1. Umtrieb	8,00	11,00	14,00
2. Umtrieb	8,00	11,00	14,00
3. Umtrieb	8,00	11,00	14,00
4. Umtrieb	7,20 - 10 % zu 1. bis 3. Ernte	9,90 - 10 % zu 1. bis 3. Ernte	12,60 - 10 % zu 1. bis 3. Ernte
5. Umtrieb	6,40 - 20 % zu 1. bis 3. Ernte	8,80 - 20 % zu 1. bis 3. Ernte	11,20 - 20 % zu 1. bis 3. Ernte
6. Umtrieb	6,00 - 25 % zu 1. bis 3. Ernte	8,25 - 25 % zu 1. bis 3. Ernte	10,50 - 25 % zu 1. bis 3. Ernte
Ø	ca. 7,30 t TM/ha, Jahr	ca. 10,0 t TM/ha, Jahr	ca. 12,70 t TM/ha, Jahr

Quelle: LIEBHARD, 2007, 67, verändert

Folgende Umtriebszeiten werden unterschieden:

- Kurze Umtriebszeit (kurze Rotation): Rotationsdauer ein bis 4 Jahre
- Mittellange Umtriebszeit (mittellange Rotation): Rotationsdauer 4 bis 7 (maximal bis 10 Jahre)
- Lange Umtriebszeit (lange Rotation): Rotationsdauer 7 bis 15 (maximal 20 Jahre)

(vgl. LIEBHARD, 2007, 64)

Rekultivierung

Ist das Ende der Nutzungsdauer (15 bis 30 Jahre) erreicht, wird ein Umbruch der nach der letzten Ernte zurückbleibenden Stockreihen erforderlich. Für solche Rekultivierungsmaßnahmen eignen sich Mulch- und Rodefräsen, wie sie als konventionelle Schlepperanbaugeräte in der Forst- und Umwelttechnik eingesetzt werden.

Beim Mulchen wird das oberirdische Stockmaterial in einem Arbeitsgang zerkleinert. Die zertrümmerten Holzteile werden dabei normalerweise nicht wieder in den Boden eingearbeitet, so wird eine erneute Bewurzelung verhindert.

Im Unterschied dazu kann beim Einsatz einer Rodefräse ein solches Einarbeiten kaum verhindert werden. Daher ist hierbei ein hohes Maß an Zerkleinerung und Zersplitterung aller Stockteile anzustreben. Ein einfacher Mulchgang an der Bodenoberfläche ist in der Regel weder bei Pappel- noch bei Weidenkulturen ausreichend, da hierbei lediglich 35 bis 40 % der Stöcke abgetötet werden. Im Gegensatz dazu wird durch den Arbeitsgang mit einer Rodefräse mit 40 cm Bearbeitungstiefe bereits eine ca. 80 %ige Abtötung erreicht. Noch effektiver ist

allerdings die Kombination aus Mulchen und Fräsen, die den Wiederaustrieb nahezu vollständig unterdrückt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 91f)

4.1.2 Miscanthus

Miscanthus (*Miscanthus x giganteus*), auch Chinaschilf genannt ist ein mehrjähriges Gras, das aus dem ostasiatischen Raum stammt. Ab dem dritten Bestandsjahr kann die Kultur eine Höhe von bis zu 4 m erreichen.

Da es ein triploider Artbastard ist, kann es keine fruchtbaren Samen bilden. Das Pflanzgut muss deshalb über Klonung vermehrt werden, entweder durch Teilung der unterirdisch angelegten Rhizome oder über Mikrovermehrungsverfahren. Die Bildung der sprossbürtigen Rhizome beginnt schon im Anpflanzjahr (Mitte April bis Mitte Mai), wenn die Bodentemperaturen über 9 °C liegen. Im Herbst findet dann eine Rückverlagerung der Nährstoffe aus dem oberirdischen Sprossen in das Rhizom statt, von wo sie im Frühjahr wieder in die neuen Sprossen eingelagert werden. Blütenstände bildet die Pflanze nur in langen, warmen Vegetationsperioden oder wenn sie unter Wasserstress zu leiden hat.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 92)

Energieträgerrelevante Eigenschaften

Der Wassergehalt der geernteten Biomasse ist sehr stark vom Erntezeitpunkt, den Standortbedingungen sowie von der Witterung und den Erntekonzept- bzw. dem -verfahren abhängig und kann zwischen 15 und 45 % schwanken. Bei der Ernte im Februar/März schwankt der Aschegehalt zwischen 1,5 und 4 %. Dabei ist der Asche- und Mineralstoffanteil in den Blättern höher als in den Stängeln. Vor allem auf windigen Standorten fallen im Laufe des Winters viele Blätter ab, so dass der Blattanteil an der Gesamtmasse zum Erntezeitpunkt (Februar/März) nur noch 10 bis 30 % beträgt. Dies verursacht große Schwankungen in der Brennstoffqualität.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 93)

Der Heizwert der wasserfreien Biomasse ist bei *Miscanthus* um ca. 10 % geringer als bei Pappelholz aus Kurzumtrieb. Der Vorteil von *Miscanthus* ist jedoch, dass es zum Erntezeitpunkt einen TS-Gehalt von 70-80% aufweist. Bei Kurzumtriebshölzern liegt dieser Wert bei ca. 45-50 %. Bei diesen geringen Feuchten hat *Miscanthus* zum Erntezeitpunkt

bezogen auf die Trockenmasse einen deutlich höheren Heizwert als Kurzumtriebshölzer zum Erntezeitpunkt. *Miscanthus* ist direkt lagerfähig (Witterungsschutz z. B. durch Folie ist notwendig) und kann sofort verfeuert werden.

(vgl. MASTEL, 2009, 88)

Standortansprüche und Anbau

Miscanthus gedeiht, sofern sie nicht zu Staunässe eignen, auf den meisten Böden. Jungpflanzen können sich im Anpflanzjahr besser auf leichten Böden etablieren, wohingegen auf schweren Böden in den Folgejahren aufgrund der besseren Wasserversorgung das höhere Massenwachstum stattfindet. *Miscanthus* verträgt zwar kurze Trockenperioden, doch wirkt eine gleichmäßige Wasserversorgung während der Vegetationsperiode stark ertragsfördernd. Der Transpirationskoeffizient liegt bei 300 l Wasser je kg gebildeter Trockenmasse.

Wie alle C₄-Pflanzen ist auch *Miscanthus* Wärme liebend, bringt aber auch in Gebieten mit Durchschnittstemperaturen von 7,5 °C gute Massenerträge, sofern die Wasserversorgung gleichmäßig ist. Je wärmer der Standort ist, umso früher kommt es zum Austrieb und desto vollständiger findet die Nährstoffrückverlagerung im Herbst aus den oberirdischen Sprosssteilen in das Rhizom statt. Je früher die Fröste im Herbst beginnen, desto unvollständiger findet die Rückverlagerung von Nährstoffen in das Rhizom statt. Neben einem höheren Nährstoffentzug hat dies auch eine Verminderung der Brennstoffqualität (d. h. höherer Mineralstoff und Aschegehalt) zur Folge.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 93)

Die optimale Bodentemperatur für die Auspflanzung liegt bei ca. 10 °C (Mitte April bis Mitte Mai). Bei spätem Pflanztermin ist die Gefahr der Frühjahrstrockenheit größer, bei sehr frühen Pflanzterminen sind Spätfroste eine Gefahr für die jungen Triebe.

Eine Pflanzdichte von etwa einer Pflanze je m² (10.000 Pflanzen/ha) hat sich heute allgemein durchgesetzt. Höhere Pflanzdichten führen in den Folgejahren durch zunehmende Konkurrenz zu frühzeitigen Ertragseinbußen. Die Rhizome werden auf eine Tiefe von ca. 8 cm abgelegt.

(vgl. FRÜHWIRTH, et al., 2008, 14f)

Die Anpflanzung erfolgt im Mai bevorzugt in gepflügten Böden, um den Unkrautdruck so gering wie möglich zu halten und den Jungpflanzen einen leicht durchwurzelbaren Boden mit guten Entwicklungsmöglichkeiten für das Rhizom zu bieten. Der Boden muss bis zur Pflanztiefe

homogen gelockert und anschließend rückverfestigt werden. Dies kann mit teilautomatischen Pflanzmaschinen aus dem Gemüsebau (z. B. umgebaute Kartoffelsetzmaschinen) durchgeführt werden. In Gebieten mit gleichmäßiger Wasserversorgung und geringer Auswinterungsgefahr beträgt die Pflanzdichte etwa eine Pflanze/m². Zur Risikominderung ist jedoch eine Pflanzdichte von zwei Pflanzen/m² zu empfehlen.

Die Jungpflanzen sind im Anpflanzjahr noch konkurrenzschwach und durch die Verunkrautung gefährdet. Eine mechanische oder chemische Unkrautbekämpfung ist deshalb im ersten Jahr unerlässlich. Bei schwach entwickelten Beständen kann eine Unkrautbekämpfung auch im zweiten Jahr empfehlenswert sein, spätestens ab dem dritten Standjahr ist sie dann nicht mehr erforderlich. Hierfür werden anfangs mechanische Verfahren (z. B. Striegeln) angewendet. Später eignen sich auch mechanisch-chemische Kombinationen (z. B. Hacken zwischen und Herbizidbehandlung in der Reihe).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 93f)

Nutzung und Ertragspotenzial

Die im ersten Jahr gebildete Masse ist meist nicht nennenswert und wird nicht geerntet (sie sollte im Frühjahr gemäht oder geschlägelt werden). Je nach Klimalage wird der Aufwuchs des zweiten Jahres 1,5 bis 2,5 Meter hoch und wird im Frühjahr des 3. Jahres geerntet. Die volle Ertragsleistung wächst erstmals im 4. Jahr heran, die Bestände werden jetzt 3 bis 4 Meter hoch. Bis zum 6. Jahr steigt die Ertragsleistung weiter leicht an und erreicht hier erfahrungsgemäß ihren Höhepunkt. Nach den bisherigen Erfahrungen pendelt sich der Ertrag ab dem 7. Jahr auf ein konstantes Niveau ein.

In der Praxis hat sich eine Ernte im Zeitraum Ende April bis Anfang Mai durchgesetzt. Unter oberösterreichischen Bedingungen weist Miscanthus Mitte Februar noch einen Wassergehalt von ca. 50 % auf. Mitte April werden erstmals 20 % Wassergehalt unterschritten. Als kritischer Wassergehalt gelten 20 % Feuchte. Ab hier ist mit Erhitzung und Schimmelbildung im Häckselgut zu rechnen. Geerntet wird Miscanthus mit Feldhäckslern, die Schnitthöhe beträgt wie beim Mais 10 bis 15 cm.

Die Biomassebildung und Ertragsleistung von Miscanthus weist in den europäischen Anbaugebieten eine große Streubreite auf. Je nach Aufwuchsjahr und Standort werden zwischen 3,5 (Etablierungsphase - erste Vegetationsperiode) und bis ca. 25 t Trockenmasse/ha (Hauptnutzungsphase) erreicht. Die ältesten für Heizzwecke genutzten und auf landwirtschaftlichen Flächen stehenden Miscanthusbestände in Oberösterreich befinden sich 2006 im 16. Nutzungsjahre. Diese lieferten in den letzten sechs bis neun Jahren relativ

konstante Erträge. Erschöpfungszustände sind derzeit keine zu erkennen. Somit scheint eine Nutzungsdauer von 20 bis 25 Jahren unter Praxisbedingungen aus heutiger Sicht realistisch.

(vgl. FRÜHWIRTH, et al., 2008, 21ff)

Rekultivierung

Ist nach 10 bis 25 Jahren das Ende der Nutzungsdauer einer Miscanthuskultur erreicht ist, wird nach der letzten Ernte ein Umbruch notwendig. Durch diese Rekultivierungsmaßnahme soll ein Wiederaustrieb verhindert und die Möglichkeit geschaffen werden, dass auf der Fläche ein Wechsel der Kulturart stattfinden kann. Da der unerwünschte Wiederaufwuchs ausschließlich aus vegetativen Pflanzenteilen erfolgt, kommt es bei der Rekultivierung auf eine vollständige Zerstörung der Rhizommasse an, die sich hauptsächlich in einer Bodentiefe von maximal 20 cm befindet. Das kann durch mechanische oder chemische Verfahren erreicht werden, wobei jeweils die unterstützende physiologische Wirkung einer Folgekultur eingeplant werden sollte. Bei deren Auswahl ist daher auf eine möglichst hohe Konkurrenzkraft gegenüber den noch nicht abgetöteten Miscanthustrieben zu achten.

Bei den mechanischen Verfahren ist eine möglichst feine Zerkleinerung der Rhizome anzustreben (Teilchen unter 2 g führen zu dem geringsten Wiederaustrieb). Günstige Ergebnisse wurden auch durch die Aufnahme der unzerkleinerten Rhizome mit Hilfe eines Steinsammlers und der anschließenden Abfuhr erzielt. Der Einsatz einer Tieffräse (30 cm) ist dagegen etwas weniger wirksam. Die Anwendung chemischer Verfahren ist zur Unterstützung einer vorhergehenden mechanischen Maßnahme (Pflügen, Grubbern, Fräsen) möglich.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 95)

4.1.3 Futtergräser

Unter Futtergräser versteht man mehrjährige, massenwüchsige C₃-Gräser (z. B. Weidelgras, Knautgras oder Glatthafer) die meist für die Ernährung von Wiederkäuern angebaut werden. Sollen solche Gräser als Energiegräser produziert werden, muss das Produktionsverfahren erheblich geändert werden. Beispielsweise sollten mit dem Ziel eines möglichst geringen Stickstoff- und hohen Rohfasergehaltes für eine Energiegrasproduktion eine Verringerung der Stickstoffgaben und die Reduzierung auf einen späten Schnitt erfolgen.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 65)

Geeignete Arten

Eine Reihe verschiedener C₃-Gräser scheinen für eine Biomasseproduktion geeignet. Die vielversprechendsten werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Das **Deutsche** und auch das **Welsche Weidelgras** (*Lolium perenne*, *Lolium multiflorum*) sind auf Grund ihrer Massenwüchsigkeit und Dauerhaftigkeit für den Energiegrasanbau geeignet, jedoch kann das Welsche Weidelgras i. Allg. nur zweijährig genutzt werden. Beide Gräser bilden einen dichten Bestand und werden bis zu 90 cm hoch. Auf Grund seines hohen Wasserbedarfs bevorzugt Weidelgras ein luftfeuchtes und niederschlagsreiches Klima. Sommertrockene Lagen sind ungeeignet. Weidelgras hat auch relativ hohe Ansprüche an die Nährstoffversorgung.

Knaulgras (*Dactylis glomerata*) ist ein ausdauerndes Gras mit dickem Horst, das bis zu 150 cm erreicht. Sein Vorteil für die Energiegrasproduktion liegt in der schnellen Lignifizierung. Knaulgras ist winterfest und trockenheitsverträglich und daher besonders geeignet für Standorte mit geringen Niederschlägen. Seine Bodenansprüche sind gering.

Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) ist ein ausdauerndes Gras mit lockerem Horst, das bis zu 150 cm hoch wird. Glatthafer ist trockenheitsverträglich und hat mittlere Ansprüche an die Bodenqualität. Er ist ein sehr schnellwüchsiges Gras und lieb warme, trockene, lockere, kalkhaltige Böden.

Rohrschwingel (*Festuca arundinacea*) ist ein mehrjähriges, bis 150 cm hohes Gras. Es bevorzugt schwere, nährstoffreiche Böden, ist aber relativ anspruchslos und kann sowohl Überschwemmungs- als auch Trockenperioden überstehen. Außerdem zeichnet sich Rohrschwingel durch gute Winterhärte und hohe Konkurrenzkraft aus.

Rohrgranzgras (*Phalaris arundinacea*) ist ein bis zu 2m hohes ausdauerndes Gras, das unterirdische, kriechende Ausläufer bildet. Es liebt feuchte Standorte und ist meist an Flussumfern, Gräben und Seen zu finden. Auf Grund seiner guten Bewurzelung kann es aber auch auf trockeneren Standorten stehen. Für den Anbau sind nährstoffreiche, mittlere bis gute Böden geeignet.

(vgl. FNR, 2000, 67)

Energieträgerrelevante Eigenschaften

Der Wassergehalt bei den Futtergräsern beträgt zum Zeitpunkt des höchsten Biomasseaufwuchses in der Blüte 65 bis 80 %. Damit ist eine Feldtrocknung nach der Ernte notwendig. Ein verspäteter Erntetermin zur Samenreife der Gräser verringert den Wassergehalt um ca. 5 %. Dadurch kommt es jedoch zu Ertragsverlusten von rund 10 % (z. B.

durch Ausfallen von Samen; dies kann außerdem zu Problemen mit Verunkrautung in den Folgekulturen führen). Je nach Grasart, Standorteinflüssen und Erntezeitpunkt liegen die Aschengehalte der Futtergräser bei 5 bis 10 %.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 66)

Standortansprüche und Anbau

Mehrjährige Futtergräser lassen sich gut in die Fruchtfolge eingliedern, da sie geringe Vorfruchtansprüche haben und ihr Vorfruchtwert auf Grund ihrer guten Durchwurzelungsfähigkeit hoch ist. Wichtig ist ein rechtzeitiger Umbruch der Gräser, damit sich die organischen Rückstände vor Einsaat der Folgefrucht noch genügend zersetzen können. Rohrglanzgras bildet unterirdische Ausläufer, daher müssen evt. spezielle Maßnahmen zur Beseitigung dieser Rhizome bzw. des Durchwuchses in der Folgefrucht getroffen werden. Da energetisch genutzte Gräser sehr spät geerntet werden, kann es zu Aussamung und damit zu einer unkontrollierten Ausbreitung in Folgebeständen kommen. Die Grassaat erfordert eine mitteltiefe Pflugfurche und ein feines Saatbett mit gutem Bodenschluss. Die Aussaat kann im Herbst bis Anfang September (in wärmeren Lagen bis Mitte September) erfolgen. Rohrglanzgras sollte schon bis Ende August gesät werden. Auch eine Frühjahrsansaat ist möglich, jedoch kommt es dann im ersten Jahr zu geringerer Ertragsbildung. Je nach Bodenzustand kann es vorteilhaft sein, nach der Saat zu walzen. Um bei einschnittiger Nutzung einen hohen Massenaufwuchs zu erreichen, scheinen spätreifende Sorten geeignet. Geringe Protein- bzw. Stickstoffgehalte sind außerdem verbrennungstechnisch von Vorteil.

(vgl. FNR, 2000, 67)

Nutzung und Ertragspotenzial

Bei einer Stickstoffgabe von 80 kg/(ha a) können im Durchschnitt 7 bis 12 t/ha Trockenmasse von Welschem Weidelgras, 7 bis 13 t/ha von Deutschem Weidelgras und 11 bis 13 t/ha von Rohrschwingel geerntet werden. Davon sind die durch die Feldtrocknung und Bergung entstehenden Verluste abzuziehen. Die Futtergräser können zwei bis drei Jahre lang genutzt werden. Bei Weidelgras, Rohrschwingel, Knautgras und Glatthafer beträgt der Wassergehalt zum Zeitpunkt des höchsten Biomasseaufwuchses während der Blüte 65 bis 80 %. Hier ist eine Feldtrocknung notwendig, auch wenn bei der Heuwerbung Massenverluste von 10 bis 25 % auftreten können. Da sich mit zunehmender Abreife der Gräser ihr Stickstoffgehalt verringert und der Rohfaser- und Trockensubstanzgehalt erhöht, ist ein möglichst später Schnitt

anzustreben, wobei es aber nicht zum Lagern des Bestandes oder zum Ausfallen der Samen kommen darf.

Die geschätzte Nutzungsdauer von Rohrglanzgrasbeständen beträgt rund 10 Jahre. In Versuchen auf kühl-feuchten Standorten (Deutschland) wurden bei einer Stickstoffdüngung von 70 und 140 kg/(ha a) 11 bis 13 t Trockenmasse pro Hektar und Jahr im November geerntet. Eine Verzögerung der Ernte bis Februar/März ist auch hier möglich, hierbei sind dann jedoch Ertragseinbußen von 20 bis 25 % zu erwarten.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 65ff)

4.1.4 Getreideganzpflanzen

Die Getreidearten Weizen, Roggen und Triticale gehören in die Familie der Süßgräser (*Gramineae*) und haben jeweils endständige Ähren als Blütenstände. Bei Weizen, Roggen und Triticale werden die Körner beim Drusch von der Spelze getrennt (nackttreschend). Die Winterformen der Getreidearten werden im Herbst gesät, sie benötigen einen Kältereiz (Vernalisation) um in die generative Phase übergehen zu können. Die Sommergetreideformen hingegen werden möglichst früh (meist im März) im Frühjahr gesät.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 68)

Geeignete Arten

Von den zur Verfügung stehenden Wintergetreidearten eignen sich auf Grund ihres hohen

Weizen (*Triticum aestivum* L.) hat unter den genannten Getreidearten die höchsten Ansprüche hinsichtlich des Nährstoff-, Wärme- und Wasserbedarfs. Winterweizen kann Temperaturen bis -20 °C überdauern, ist jedoch besonders frostempfindlich im 3- bis 5-Blatt Stadium und reagiert empfindlich auf plötzliche Kälteeinbrüche. Nach der Winterperiode beginnt das Wachstum bei Temperaturen von 5 bis 6 °C.

Roggen (*Secale cereale* L.) ist dagegen bezüglich Klima und Boden die anspruchsloseste Getreideart. Der Roggenanbau ist auch noch auf armen Standorten mit einem schwachen Nährstoffangebot, geringem Wasserhaltevermögen und pH-Werten bis 5 möglich. Die Winterfestigkeit von Roggen kann über -25 °C hinausgehen.

Triticale (*Triticosecale* Wittmack) entstand durch die Kombination der Gattungen *Triticum* (Weizen) und *Secale* (Roggen). Triticale wurde mit dem Ziel gezüchtet, die hohe Leistungsfähigkeit von Weizen mit der Anspruchslosigkeit von Roggen zu kombinieren. Triticale bringt daher auch noch auf Grenzertragsstandorten des Weizens (z. B. in Vor- und

Mittelgebirgslagen) gute Erträge, erreicht aber nicht ganz die Winterfestigkeit von Roggen. Der Getreideanbau stellt konventionelle landwirtschaftliche Praxis dar und wird hier deshalb nicht ausführlicher beschrieben. Anschließend werden noch die für eine Energiepflanzennutzung relevanten Fragen behandelt.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 68f)

Anbau

Die Sortenwahl für den Energiegetreideanbau richtet sich nach dem Gesamtbiomasseertrag, der Standfestigkeit, der Krankheitsresistenz und den Inhaltsstoffen, die bei der Verbrennung stören. Während bei der Brot- und Futtergetreideproduktion ein hoher Protein- und damit Stickstoff-Gehalt des Korns angestrebt wird, soll Energiegetreide einen möglichst niedrigen Stickstoff-Gehalt aufweisen. Daher sollte ein geringeres Stickstoffdüngungsniveau angestrebt werden.

Da im Energiegetreideanbau andere Anforderungen an die Kornqualität bestehen wie in der Nahrungsmittelproduktion, kann die Fungizidbehandlung deutlich reduziert werden, sofern nicht die Gefahr einer starken Ertragsdepression besteht. Auf den Einsatz von halmverkürzenden Mitteln kann ebenfalls verzichtet werden, wenn die Gefahr des Lagerns durch die Wahl standfester Sorten, durch angepasste Bestandesdichten und durch angemessene Stickstoffdüngung vorgebeugt wird.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 70f)

Nutzung und Ertragspotenzial

In Abhängigkeit von der Standortgüte sowie von der Intensität des Produktionsverfahrens (d. h. Stickstoffdüngung und Pflanzenschutzmaßnahmen) variieren die Erträge sehr stark

Zum Erntezeitpunkt ist das Stroh meist schon abgestorben und hat einen Restwassergehalt von 10 bis 40 % (je nach Witterung und Getreideart). Der Restwassergehalt des Korns liegt bei 9 bis 20 %. Bei der Totreife lässt sich das Korn nicht mehr brechen und hat einen Wassergehalt von 14 bis 16 %. Zu diesem Zeitpunkt ist die optimale Mähdruschreife für Energiegetreide erreicht. In warmen, trockenen Gebieten ist die Erntereife teilweise schon Anfang Juli erreicht, wobei Roggen noch vor Triticale und Weizen abreift. In feucht-kühlen Gebieten wird die Ernte häufig erst Mitte September beendet.

Der Flächenspezifische Strohanfall ist an den jeweiligen Kornertrag gekoppelt. Tabelle 4.2: Ertragsniveau von Korn und Stroh bei Getreide sowie Korn-Stroh-Verhältnis zeigt am Beispiel

wichtiger in Deutschland angebauter Getreidearten das jeweilige mittlere Korn-Stroh-Verhältnis, mit dem das durchschnittliche technisch gewinnbare Stohaufkommen abgeschätzt werden kann.

(vgl. FNR, 2000, 65ff)

Tabelle 4.2: Ertragsniveau von Korn und Stroh bei Getreide sowie Korn-Stroh-Verhältnis

	gering	Kornerträge mittel in t/(ha a)	hoch	Korn-Stroh- Verhältnis	gering	Stroherträge mittel in t/(ha a)	hoch
Winterweizen	4,0–6,0	6,0–7,5	7,5–9,5	1 : 1,1–1,4	4,4–8,4	6,6–10,5	8,3–13,3
Sommerweizen	3,0–5,0	5,0–6,0	6,0–8,5	1 : 1,1–1,4	3,3–7,0	5,5–8,4	6,6–11,9
Winterroggen	3,0–4,5	4,5–5,5	5,5–8,5	1 : 1,3–1,5	3,9–6,8	5,9–8,3	7,2–12,8
Wintertriticale	3,5–5,0	5,0–6,0	6,0–9,0	1 : 1,2–1,4	4,2–7,0	6,0–8,4	7,2–12,6

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 72

Stroh und Korn unterscheiden sich in ihrem Gehalt an mineralischen Inhaltsstoffen erheblich. Das Korn weist hohe Stickstoff-, das Stroh vor allem hohe Kalium- und Chlorgehalte auf.

(vgl. FNR, 2000, 65)

4.2 Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen,

Ölpflanzen zeichnen sich dadurch aus, dass sie Speicher- und Reservestoffe als Öl in ihren Früchten und Samen einlagern. Diese Speicherorgane stellen die Rohmaterialien für die Produktion pflanzlicher Öle dar. Für die energetische Nutzung wird ein möglichst hoher Ölertrag angestrebt. Aufgrund ihres hohen Ölertragspotenzials kommen als Energiepflanzen vor allem Winterraps und Sonnenblumen in Betracht. Bei einer Doppelnutzung von Öl und Stroh könnte zukünftig eventuell auch der Hanf interessant werden.

Zucker und Stärke finden unter anderem als Ausgangsstoffe für die Gewinnung von Ethanol Verwendung. Grundsätzlich ist dies auch aus zellulosehaltigen Pflanzen möglich (hier muss die Zellulose erst durch Hydrolyse unter Zusatz von Säure aufgeschlossen werden), dabei kann aber nur ca. 40 % der eingesetzten Trockenmasse verzuckert werden.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 72ff)

Da aus dieser Gruppe der Energiepflanzen jedoch hauptsächlich flüssige Brennstoffe (Biodiesel bzw. Bioethanol) erzeugt werden, wird darauf nicht genauer eingegangen.

4.3 Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle

Unter Rückständen und Nebenprodukten versteht man Stoffe organischer Herkunft, die bei der Herstellung bestimmter (Haupt-)Produkte aus land- und/oder forstwirtschaftlichen Ausgangsmaterialien anfallen und als Energieträger nutzbar sind. Grundsätzlich können diese im Verlauf der gesamten Bereitstellungskette von der Produktion über die Bereitstellung und Nutzung bis zur Entsorgung entstehen.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 95)

Auf die forstwirtschaftliche Holzgewinnung wird im Anschluss nicht genauer eingegangen, es werden lediglich einige für die Biomassegewinnung relevante Punkte angesprochen.

4.3.1 Durchforstungs- und Waldrestholz

Das Hauptziel der Waldbewirtschaftung ist die Produktion von möglichst hochwertigem Stammholz für die stoffliche Nutzung. Dabei fällt eine Vielzahl von minderwertigen Sortimenten und Rückständen an, die unter anderem als Brennstoff genutzt werden können.

Die Durchforstung wird in bestimmten Zeitabständen durchgeführt, um den Holzzuwachs auf bestimmte wüchsige und qualitativ hochwertige Bäume zu konzentrieren, indem man konkurrierende minderwertige Bäume selektiv entfernt. Bei Nadelholz erfolgt die Erstdurchforstung in der Regel dann, wenn in einer Höhe von 4 m keine Grünäste mehr vorhanden sind. Weitere Durchforstungen folgen in einem mehr oder weniger großen zeitlichen Abstand je nach Zuwachs (meist nicht häufiger als alle 10 Jahre).

(vgl. FNR, 2000, 53ff)

Die bei Durchforstungen vorhandener Jung- und Altbestände anfallende Biomasse ist in der Regel für eine energetische Nutzung gut geeignet. Bei jeder Durchforstung kann bei einem durchschnittlichen flächenspezifischen Aufkommen von rund 70 Srm/ha Hackschnitzel ausgegangen werden. Dies entspricht einem Aufkommen von rund 0,3 bis 0,4 Srm/(ha a).

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 95)

Endnutzung

Rückstände bei der Endnutzung (d. h. bei der Stammholzgewinnung) sind vor allem Reisholz und Kronenderbholz.

Unter Reisholz versteht man alle oberirdischen verholzten Teile des Baumes mit einem Durchmesser unter 7 cm (kleinere Äste). Durch den großen Bereitstellungsaufwand wird Reisholz in der Praxis nur selten wirtschaftlich genutzt.

Derbholz ist die gesamte oberirdische Holzmasse (inklusive Astholz und Rinde) deren Durchmesser 7 cm überschreitet. Unter dem Kronenderbholz wird das Derbholz aus dem Kronenbereich des Baumes zwischen der Derbholzgrenze von 7 cm und der Aufarbeitungsgrenze (je nach Marktlage 12 bis 15 cm). In Abhängigkeit von der jeweiligen Marktsituation liegt der Anfall bei 2 % (Fichte) bis 8 % (Eiche). Erfolgt nach der Ernte eine Neuanpflanzung, muss das anfallende Kronenderb- und Reisholz meist beseitigt werden. Derzeit geschieht das durch Abbrennen im Wald, Mulchen oder Einfräsen. Allerdings kommt auch eine Verwendung des Kronenderbholzes als Brennstoff in Frage

(vgl. FNR, 2000, 55)

Rindenanfall

Der Rindenanfall am aufbereiteten Derbholz beträgt bei Fichte 10 %, bei Kiefer und Eiche 12 % und 8 % bei Buche. Die Entrindung kann durch spezialisierte Forstserviceunternehmen schon im Wald durchgeführt werden. Heute ist allerdings eine Werksentrindung in den Sägewerken üblich. Als Faustzahl kann man sagen, dass bei der Entrindung von 5 Festmetern Holz jeweils ein Schüttraummeter Rinde anfällt. Bei der Werksentrindung wird die anfallende Rinde entweder zu Rindenkompost weiterverarbeitet oder zunehmend auch als Energieträger genutzt.

(vgl. FNR, 2000, 56)

4.3.2 Industrie- und Sägerestholz

In der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie fallen neben dem eigentlich gewünschten (Haupt-) Produkt (z. B. Möbel) bzw. den für stoffliche Nutzung bestimmten Nebenprodukten (z. B. Spanplatten) meist weitere Nebenprodukte, Rückstände und/oder Abfälle an, die zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehen können.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 141f)

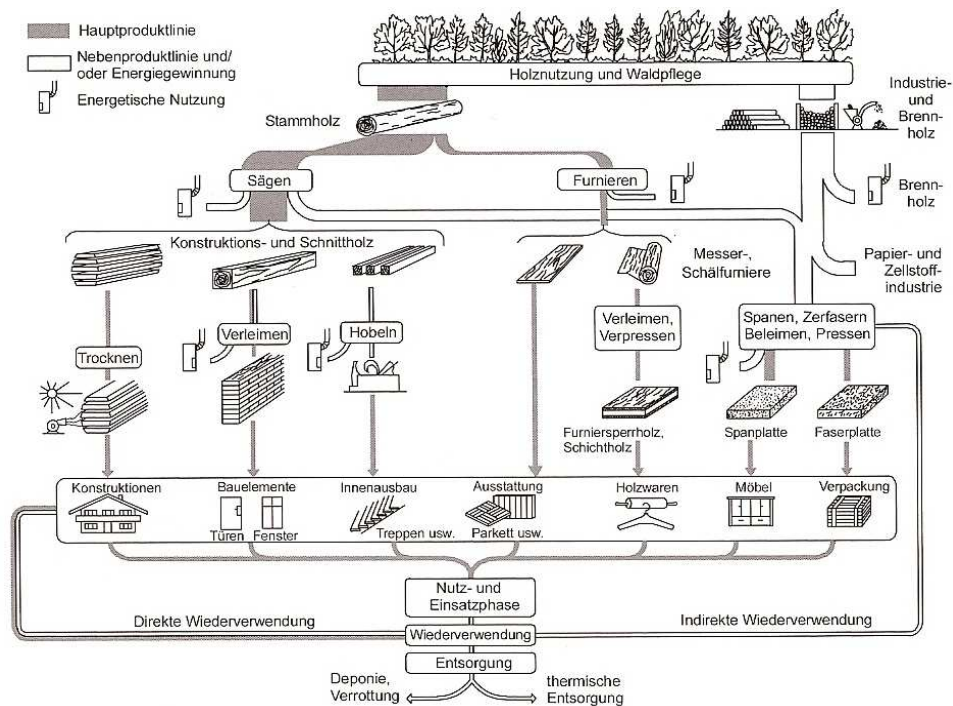


Abbildung 4.2: Materialfluss von Holz durch die Volkswirtschaft

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 142

In Abbildung 4.2 sind die wesentlichen Bearbeitungsstufen sowie die typischen Nutzungsmöglichkeiten von Holz im Verlauf des gesamten Lebensweges symbolisch dargestellt. Bei vielen darin aufgezeigten Teilprozesse und Bearbeitungsstufen fallen energetisch nutzbare Rückstände, Nebenprodukte und/oder Abfälle an. Zu beachten ist hierbei, dass für viele dieser Stoffströme eine stoffliche Nutzung mit einer - im Vergleich zu einem Einsatz als Energieträger - größeren Wertschöpfung verbunden ist. Deshalb werden zur energetischen Holznutzung häufig entweder nur die geringerwertigen Zwischen- und Nebenprodukte (sowie Rückstände und Abfälle) oder die am Ende der Nutzung anfallenden Stoffe eingesetzt. Bei diesem bei der industriellen Weiterverarbeitung anfallenden Holzaufkommen handelt es sich um Holz in Form von Hackschnitzeln, Abschnitten, Schwarten, Spreißeln, Rinde (bei Werksentrindung), Spänen, Stäuben usw. (siehe Abbildung 4.3). Diese Industrierestholzsortimente können einen Anteil von bis zu 50 % am gesamten verarbeiteten Stammholz einnehmen. So beträgt beispielsweise die durchschnittliche Ausbeute der Sägewerke (d. h. zur Herstellung von Halbfertigprodukten bzw. Nutzholz aus Stammholz) in etwa 65 bis 70 %. Der verbleibende Rest ist Industrierestholz, dieses geht jedoch zum Teil in die stoffliche Nutzung (z. B. Spanplattenindustrie).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 141f)

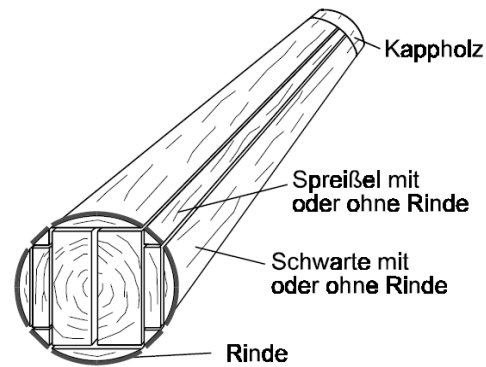


Abbildung 4.3: Sägerestholzanfall bei der Rohholzbearbeitung (ÖNORM M 7132)

Quelle: FNR, 2000, 56

Rindenfreies Hackgut („weiße Hackschnitzel“), das z. B. bei der Bearbeitung von vorentrindetem Stammholz anfällt, erzielt in der Papier- und Faserindustrie hohe Preise. Deshalb wird für die energetische Nutzung primär Hackgut mit Rinde („schwarze Hackschnitzel“) verwendet. Das ebenfalls anfallende Sägemehl bzw. Schleifstaub und die Hobelspäne sind aufgrund ihrer geringen Dichte mit hohen Transport- und Lagerkosten verbunden. Deshalb wird diese Ware häufig zu Briketts oder Pellets gepresst (siehe Kapitel 6.5), zumal der Markt und damit die Absatzchancen in den letzten Jahren stark gestiegen sind.

(vgl. FNR, 2000, 56)

4.3.3 Landschaftspflegeholz

Unter diesem Begriff versteht man jenes Holz, das bei Pflegearbeiten, Baumschnittaktivitäten in der Land- und Gartenbauwirtschaft (z. B. Weinberge, Obstplantagen, ...) und/oder sonstigen landschaftspflegerischen oder gärtnerischen Maßnahmen anfällt. Unter diesem Begriff fallen neben dem Landschaftspflegeholz zusätzlich noch die bei der Landschaftspflege anfallenden halmgutartigen Biomassen. Landschaftspflegeholz ist i. Allg. gut als Energieträger geeignet, sofern Fremd- und Störstoffe wie Blattwerk, Sand und Steine ausreichend ausgesiebt bzw. abgetrennt werden.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 351f)

4.3.4 Stroh

Darunter versteht man die bei der landwirtschaftlichen Produktion von mähdruschauglichen körnerliefernden Kulturen wie Getreide, Ölsaaten, Körnerleguminosen und Körnermais anfallenden Ernterückstände.

Grundsätzlich ist das gesamte anfallende Stroh als Energieträger einsetzbar. Tatsächlich wird (bis auf bestimmte Anteile des Getreidestrohs) zur Schließung der Nährstoffkreisläufe in der Landwirtschaft und aufgrund der ungünstigen Brennstoffeigenschaften (u. a. hoher Chlorgehalt) das anfallende Stroh meist in die Ackerkrume eingearbeitet. In diesem Fall ist dieses Biomasseaufkommen als Energieträger nicht mehr verfügbar.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 351)

Tabelle 4.3: Durchschnittlicher Kornertrag bzw. Stohaufkommen exemplarisch für Deutschland (Basisjahr 2006, Angaben bei üblichen Wassergehalten)

	Mittlerer Kornertrag	Mittleres Stohaufkommen in t/(ha a)	Korn- Stroh- Verhältnis
Winterweizen	6,5	5,2	1 : 0,8
Sommerweizen	6,5	5,2	1 : 0,8
Roggen	5,0	4,5	1 : 0,9
Wintergerste	6,0	4,2	1 : 0,7
Sommerfuttergerste	5,0	4,0	1 : 0,8
Hafer	5,0	5,5	1 : 1,1

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 152

Der mittlere flächenspezifische Stohanfall kann auf der Basis des jeweiligen Kornertrags und des mittleren Korn-Stroh-Verhältnisses abgeschätzt werden. In Tabelle 4.3 sind deshalb die Durchschnittserträge wichtiger Getreidearten aufgezeigt. Aufgrund unterschiedlicher Standortbedingungen (u. a. Boden, Klima) kann der vor Ort erzielte Kornertrag innerhalb einer relativ großen Bandbreite im Vergleich zu den dargestellten Mittelwerten variieren.

Bisher erfolgt die energetische Nutzung von Getreidestroh nur in ausgewählten europäischen Ländern mit klaren politischen Zielvorhaben (z. B. Dänemark, Großbritannien, Spanien). Diese energetische Nutzung wird einerseits in Stohkesseln im landwirtschaftlichen Bereich und andererseits in Heiz- und Kraftwerken (vielfach auch als Mischfeuerung mit Hausmüll, Hackschnitzeln oder fossilen Energieträgern) realisiert. In dieser Weise wird rund 1 % des europäischen Stohaufkommens energetisch verwertet. In Deutschland und Österreich hat die energetische Strohnutzung bisher jedoch noch keine nennenswerte Bedeutung.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 152)

5. Ernte

Mit dem Beginn der Ernte ist die erste Phase der Energiebereitstellung (Pflanzenproduktion) abgeschlossen. Was nun folgt ist die Bereitstellung, durch die die organische Masse am Standort der Konversionsanlage verfügbar gemacht wird. Während vor der Ernte hauptsächlich die durch die Pflanzenart vorgegebenen chemisch-stofflichen Biomassemerkmale ausgeprägt werden, findet im Verlauf der Bereitstellungsphase (siehe Abbildung 5.1) die Beeinflussung und Veränderung der physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften statt (das gilt vor allem bei den Festbrennstoffen).

Im Anschluss werden typische Verfahren beschrieben, die für die energetisch genutzte Biomasse charakteristisch sind. Konventionelle, bei der Nahrungsmittelbereitstellung gängige Techniken (z. B. Getreide- oder Rapskornreinigung, u. ä.) werden nicht behandelt.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 155)

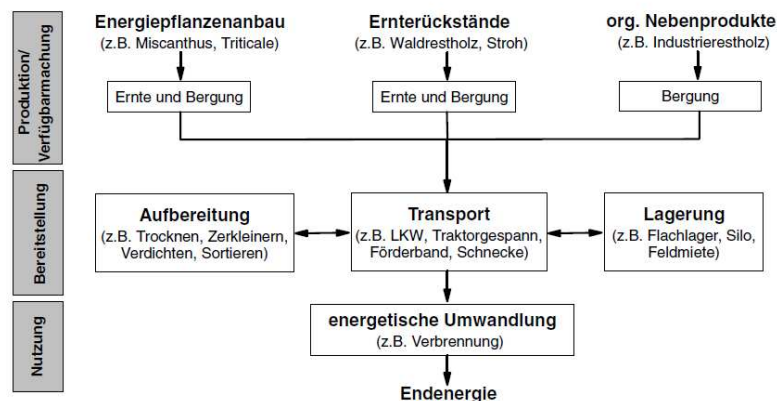


Abbildung 5.1: Genereller Aufbau der Verfahrensketten zur Bereitstellung und Nutzung biogener Festbrennstoffe

Quelle: FNR, 2000, 52

5.1 Holz aus dem Wald

Um bei geeigneten geographischen Bedingungen (z. B. im Flachland) eine maschinelle Bewirtschaftung des Waldbestandes zu ermöglichen und das Befahren großer Teile des Bestandes zu verhindern, legt man im Zuge der Erstdurchforstung meist so genannte Rückegassen an. Sie dienen dazu um einen etwa 3 bis 4 m breiten Fahrweg für Erntefahrzeuge zu schaffen. Der Abstand solcher (im Idealfalle parallel) angelegter Rückegassen beträgt maximal ca. 40 m und kann beim Einsatz vollmechanischer Verfahren auf ca. 20 m sinken (das entspricht in etwa der doppelten Reichweite der Kranausleger bei Vollerntern). Die

Befahrbarkeit solcher Rückegassen steigt, wenn (mit Hilfe von Harvestern) das bei der Entastung herabgefallene Astmaterial eine Reisigmatzratze bildet. Dadurch werden die Bodenschäden, die durch den Einsatz schwerer Rückefahrzeuge entstehen, vermindert. Diese Rückegassen münden entweder auf Lkw-taugliche Waldstraßen oder auf traktorbefahrbare Maschinenwege.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 156)

5.1.1 Fällen

Je nach Mechanisierungsgrad wird zwischen motormanuellen, teilmechanischen und vollmechanisierten Fällen unterschieden.

Motormanuelle Verfahren

Beim motormanuellen Fällen werden die Bäume mit der Kettensäge durch einen Trennschnitt mit oder ohne Fällkerbe vom Stock getrennt. Sie werden anschließend mit Hilfe einer Fällhilfe (Fällkeil) umgelegt (siehe Abbildung 5.2). Bis zu einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von ca. 13 cm kommen auch Freischneidegeräte (mit Kreissägeblatt) zum Einsatz.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 156f)

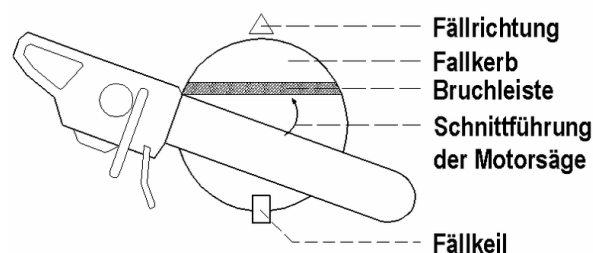


Abbildung 5.2: Fälltechnik für motormanuelles Fällen mit der Kettensäge

Quelle: WIKIPEDIA, 2006, s.p.

Teilmechanisierte Verfahren

Beim teilmechanisierten Fällen wird dieser Vorgang durch eine traktormontierte, funkgesteuerte Seilwinde unterstützt. Das Seil wird vor oder gleich nach dem Fällen am Fuß des Baumes befestigt. Die bereits angeschnittenen Bäume können mit Fällkeilen oder auch durch Zug am Seil zu Fall gebracht werden um sie anschließend am Boden motormanuell zu

entasten. Jeweils 4 - 6 Bäume könne auf diese Weise schließlich gemeinsam zur Rückegasse transportiert werden. Dieser Vorgang wird auch als Vorliefern bezeichnet.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 157)

Vollmechanisierte Verfahren

Beim vollmechanischen Fällen kommen Vollerntemaschinen („Harvester“) zum Einsatz. Hier handelt es sich um 2- bis 4-achsige Fahrzeuge mit Kranausleger (mit ca. 10 m Reichweite), an deren Ende ein Vollernteaggregat (Prozessorkopf) angebracht ist (Abbildung 5.3). Damit können die Teilarbeitsschritte Fällen, Entasten, Vorliefern, Vermessen und Einschneiden kombiniert erledigt werden. Als letzter Schritt wird der Wipfel des Baumes („Zopf“) abgetrennt (d. h. die Krone unterhalb eines Stammdurchmessers von ca. 7 cm).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 224)

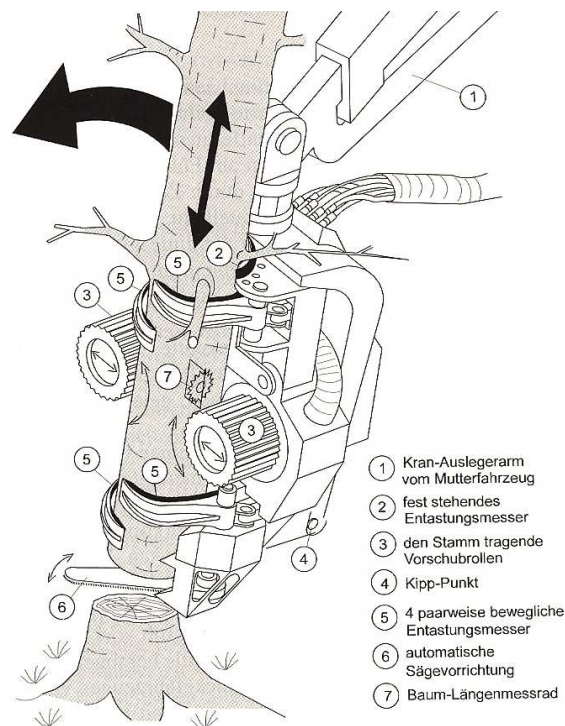


Abbildung 5.3: Aufbau und Funktionsweise des Prozessorkopfes eines Holz-Harvesters

Quelle: KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 158

Als Schneidaggregat werden schwenkbare Kettenschwerter, Ketten auf kreisrunden Scheiben oder hydraulische Scheren (bei kleineren Durchmesser) eingesetzt. Neben den Entastungsmessern kann ein Harvester auch mit zusätzlichen Greifzangen ausgestattet sein, diese ermöglichen ein nachträgliches Bündeln und Laden von abgelegtem Holz.

Nach dem Schnitt werden die Stammabschnitte grob vorkonzentriert und am Rande der Rückegasse abgelegt. Das herabgefallene und abgeschnittene Astmaterial bildet dort eine Reisigmatratze, so wird die Befahrbarkeit mit Rückefahrzeugen verbessert.

Harvester können in allen Nadelholzbeständen eingesetzt werden. Aufgrund von Schaftkrümmungen und verzweigten Wuchsformen kommen in Laubholzbeständen ihre arbeitswirtschaftlichen Vorteile (gleichzeitige Entastung) jedoch kaum zum Tragen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 224)

Vollmechanisiertes Fällen kann auch mit so genannten Fäll-Bündel-Maschinen (auch „Fällersammler“, engl.: „Feller-Buncher“) erfolgen (siehe Abbildung 5.4). Hierbei handelt es sich um einen geländegängigen Knickschlepper bzw. um ein Raupenfahrzeug mit einem Ausleger in Knick- oder Teleskop-Form (auf dem sich das Fällbündelaggregat befindet) mit einer Reichweite bis zu 15 m.

Zunächst wird der Baum mit einem Greifzangensatz erfasst. Nach dem Trennschnitt wird der Baum über den Auslegerarm kontrolliert am Boden als Ganzbaum (mit Ästen) abgelegt. Bei kleineren Baumdurchmessern können auch mehrere Bäume nacheinander geschnitten und mittels des Mehrzangensystems stehend gebündelt werden, bevor der Auslegerarm zu der Ablagestelle schwenkt. Die Aufarbeitung (Entastung) erfolgt in einem separaten Arbeitsgang. Die Entastung kann aber auch völlig unterbleiben, wenn anschließend (z. B. nach einer Abtrocknungsphase) eine Hackschnitzelerzeugung aus Ganzbäumen vorgesehen ist.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 225)



Abbildung 5.4: Fäll-Bündler mit Raupenkette

Quelle: FORDAQ, 2008, s.p.

Fällersammler findet man bisher vorwiegend in Nordamerika. Wegen der in Europa zunehmenden Holzernte (auch für energetische Nutzung), bei der eine Zwischentrocknung als

Ganzbaum oft sinnvoll ist (z. B. bei Mittel- Umtriebsplantagen), nimmt jedoch ihr Einsatz auch in Europa zu.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 225)

5.1.2 Rücken und Vorliefern

Unter dem Begriff „Rücken“ versteht man den Transport des Holzes von der Rückegasse zu den Lager- und Stapelplätzen („Polterplatz“) an der Waldstraße. Dieser Teilschritt wird oft mit der Vorlieferung (Vorkonzentration) kombiniert. Bereits abgelängtes Holz wird meist mit Hebehaken bzw. Seilwinden an den Forstweg gezogen.

Bei Langholz bzw. Vollbäumen kommen beim Rücken meist Seil-, Zangen- oder Klemmbankschlepper zum Einsatz.

Der Seilschlepper kommt auch beim teilmechanisierten Fällen zum Einsatz. Hier werden mehrere Stämme bzw. Bäume angehängt und, um den Boden zu schonen, in leicht angehobenen Zustand zum „Polterplatz“ geschleppt.

Grundsätzlich gilt dies auch für den Zangenschlepper, der besonders bei vorkonzentriertem Holz eingesetzt wird. Das Heck des Fahrzeugs ist hier mit einem schwenk- und teleskopierbaren Ausleger versehen, an dessen Ende sich eine Greiferzange befindet.

Im Gegensatz dazu besitzen Klemmbankschlepper einen Ladekran. Dieser hebt mehrere Stammenden in die Klemmbank hinein. Diese Klemmbank, es handelt sich dabei um eine zangenähnliche Konstruktion, ist fest auf dem hinteren Fahrzeugteil eines 2- bis 4-achsigen Spezialschleppers (mit Knicklenkung) montiert. Im Vergleich zu Seil- und Zangenschleppern können Klemmbankschlepper pro Fahrt die größten Lasten bewältigen, unter anderem lassen sich damit auch Vollbäume rücken. Jedoch werden sie, ähnlich wie Zangenschlepper, üblicherweise nicht zur Schwachholzernte eingesetzt.

Rohholz, das als Kurzholz (2 bis 5 m) aufbereitet wurde (z. B. mit Harvestern), wird meist mit Tragrückeschleppern („Forwardern“) (siehe Abbildung 5.5) gerückt. Durch ihre Rahmenknicklenkung sind sie besonders wendig. Forwarder besitzen einen Ladekran mit Greifzange, damit werden die in der Rückegasse liegenden Stammabschnitte aufgesammelt und auf einer Ladefläche mit Rungenaufbau (im hinteren Fahrzeugteil) gestapelt. Die gleiche Funktion können auch Kurzholzrückewagen mit Kranaufbau, die auf forsttauglichen Traktoren angehängt werden können, erfüllen. Anstelle des Rungenaufbaus können Forwarder auch mit kippbaren kastenförmigen Aufbauten für das Rücken von Hackschnitzeln ausgerüstet werden.

An alle Fahrzeuge, die sich im Wald einsetzen lassen, werden deutlich höhere Anforderungen als bei landwirtschaftlichen Produktionsverfahren gestellt. Unter anderem müssen sie hohe

Bodenfreiheit und Kippsicherheit aufweisen sowie mit besonderen Schutzvorrichtungen und mit spezieller forsttauglicher Bereifung ausgestattet sein. Zur Vermeidung von Bodenschäden bzw. zur Erhöhung der Standfestigkeit der Maschinen im steilen Gelände, kommen vielfach auch Raupenkettenausführungen zum Einsatz.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 225f)



Abbildung 5.5: Forwarder mit Hilfsseilwinde

Quelle: WEGMANN, 2009, s.p.

5.2 Holz aus Kurzumtriebsplantagen

Die Ernte von Kurzumtriebsholz muss im laublosen Zustand, wenn möglich, noch bei vollkommener Vegetationsruhe und damit vor Beginn des neuerlichen Wurzel- und Triebwachstums erfolgen. Bei Weide ist dies spätestens bei Winterende, bei Pappel bis Ende März möglich. Bei der Ernte wird die Bestockung (Haupt- und Nebentriebe, Stämme, Schösslinge) bodennah mit möglichst glatter und nicht fransender Schnittfläche gefällt. Zu dem praxisüblichen Erntezeitpunkt hat das Erntegut einen Wassergehalt von 50 bis 55 %. Die Ernte selbst erfolgt nach verschiedenen Verfahren (bzw. Modellen).

(vgl. LIEBHARD, 2007, 70)

Prinzipiell muss man beim Ernteverfahren für Kurzumtriebsplantagen die gleichen Arbeitsschritte wie bei der konventionellen Waldbaumernte erledigen. Dazu zählen das Fällen (d. h. Trennen der Stämme vom Stock durch eine Schneidvorrichtung), Vorkonzentrieren (d. h. Zusammenfassen bzw. Sammeln der Holzmasse), Rücken (d. h. Transportieren des Holzes vom Fällort zum Feldrand) und ggf. Hacken (d. h. Zerkleinern des Holzes zu Hackgut).

Diese Teilaufgaben können entweder kombiniert (Vollernteverfahren) oder in mehreren Arbeitsgängen getrennt erledigt werden (absätziges Verfahren). Absätziges Verfahren sind beispielsweise bei der Ganzbaumernte der Fall, bei der das Hacken auf einem feldnahen Aufarbeitungsplatz oder beim Endabnehmer stattfindet.

(vgl. KALTSCHMITT UND HARTMANN, 2001, 159f)

5.2.1 Manuelles Ernteverfahren mit Motorsäge

Dieses Ernteverfahren wird hauptsächlich bei kleinstflächiger Nutzung eingesetzt. Häufig wird auch die Bezeichnung „Modell Landwirt“ verwendet. Das Erntegut verbleibt meist am Betrieb.

Im Einmannbetrieb werden die Schösslinge (Stämme) mit einer Leichtmotorsäge oder einem Freischneidegerät bodennah geschnitten.

(vgl. LIEBHARD, 2007, 71)

Bei der Ernte im Modell „Zweiertrupp mit der Bügelmotorsäge“ kann das Fällen in aufrechter Haltung durchgeführt werden. Der Motorsägenführer macht mit der Bügelmotorsäge (siehe Abbildung 5.6) den Fällschnitt und der Helfer führt mit Hilfe einer Fällgabel (Länge 2 m) den Stamm in die gewünschte Fällrichtung, meist wird so eine parallele Ablage der Bäume erreicht. Das Erntegut wird anschließend gebündelt und zum Feldrand gerückt, zwischengelagert und danach mit einem mobilen oder stationären Hacker zerkleinert.

(vgl. LIEBHARD, 2007, 71f)



Abbildung 5.6: Bügelmotorsäge

Quelle: HEIß, 2007, s.p.

5.2.2 Absätziges maschinelles Verfahren

Die Ernte im „absätzigen maschinellen Verfahren“ erfolgt mit einem Fäller-Bündler (siehe Abbildung 5.4). Der Fäller-Bündler schneidet die Schösslinge (mittels gegenläufigen Kreissägen, Kettensägen oder Guillotine Schneiden) in gewünschter Höhe (etwa 10 cm über dem Boden) ab. Das Erntegut wird nach dem Fällen gebündelt und in vorgegebene Richtung gelegt. Die abgelegten Bündel werden anschließend zum Feldrand gerückt und werden dort nach einer bestimmten Lagerzeit (zwei bis sechs Monate) mit einem mobilen oder stationären Großhäcksler gehäckselt.

(vgl. LIEBHARD, 2007, 72f)

5.2.3 Einphasiges maschinelles Ernteverfahren

Das „einphasig maschinelle Ernteverfahren“ mit Hackgutvollerntern zeichnet sich durch einen einphasigen Arbeitsgang aus, d. h. Fällen, Hacken und Laden erfolgt in einem Arbeitsgang.

Mit nur einer Maschine (Vollernter) werden die Schösslinge vom Stock geschnitten und direkt zu Hackgut zerkleinert. Die Schösslinge werden mit einer Schneidevorrichtung (Kreissäge, Messerscheiben, Hackscheiben) in ca. 10 cm Höhe vom Stock abgetrennt und fallen auf eine Einzugswalze, mit der sie zum Hacker transportiert werden. Nach dem werden sie in einen Kippcontainer oder Anhänger geblasen (siehe Abbildung 5.7). Die einphasigen maschinellen Ernteverfahren werden für eine großflächige Nutzung (meist für eine handarbeitsfreie Ernte) eingesetzt.

(vgl. LIEBHARD, 2007, 73)



Abbildung 5.7: Vollernter im Einsatz

Quelle: KRÖNIGSBERGER, 2008, s.p.

5.3 Mähgut

Im Grunde stellt Mähgut keine endgültige Ernteform dar, da es im Regelfall zu Ballen, Silage oder Pellets weiterverarbeitet wird. Demnach handelt es sich bei Mähgut um ein Zwischenprodukt, das bei dem unverzichtbaren Verfahrensschritt des Mähens anfällt. Vielfach ist die Schneideinrichtung zusätzlich mit anderen Erntefunktionen kombiniert, so dass der Schnitt in einem Arbeitsgang mit einer Zerkleinerung (zu Häckselgut) bzw. zu einer Verdichtung zu Ballen oder Pellets erfolgen kann („Vollerntemaschinen“). Nur bei absätzigen Verfahren stellt das Mähen einen eigenen Arbeitsschritt dar.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 233)

5.3.1 Mähverfahren

Bei den Mähverfahren unterscheidet man zwischen Scherenschnitt (Balkenmähwerke) und freiem Schnitt (rotierende Mähwerke).

Mähbalken sind entweder als Fingermäherwerke mit oszillierenden Messern ausgeführt (hier wirken die fest stehenden Finger als Gegenschneide) oder sie besitzen als Doppelmessermähwerke eine weitere Messerschneide (diese bewegt sich gegensinnig und dient als Gegenschneide).

Im Gegensatz dazu mähen rotierende Mähbalken das Material im freien Schnitt. Hier wirkt die Masseträgheit bzw. der Biege Widerstand der Pflanze als Gegenschneide. Hier ist der Kraftbedarf wesentlich höher als bei Balkenmähwerken, da die aufgebrachte Schnittkraft nur durch eine hohe Messergeschwindigkeit erreicht werden kann.

Da das höhere Gewicht die Arbeitsbreite begrenzt, werden Vollerntemaschinen bevorzugt mit Balkenmähwerken ausgestattet.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 233)

5.3.2 Wendeverfahren

Mit dem oben beschriebenen Mähverfahren können u. a. frische Wiesenkräuter (Kapitel 4.1.3) geerntet werden.

Die Lagerfähigkeit ist bei der Heubereitung erst nach einer meist mehrtägigen Bodentrocknung erreicht, wobei der Wassergehalt auf maximal 15 % reduziert wird. Dazu wird das gemähte Erntegut auf dem Feld ausgebreitet und ggf. mehrmals gewendet. Hierfür

kommen hauptsächlich Kreiselzettwender aber auch Band- Rechwender und Sternrad-Rechwender zum Einsatz. Durch die Knick- und Quetschvorgänge (Zetten) beim wenden wird das Material aufbereitet, um so die Trocknung zu beschleunigen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 233f)

5.3.3 Schwadverfahren

Vor dem Einsammeln der Biomasse muss das Halmgut geschwadet werden. Auch dafür kommen zapfwellengetriebene Kreisel- oder Rotorschwader zum Einsatz, sie werden im Front- oder Heckanbau eines Schleppers verwendet.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 234)

5.3.4 Schwadmähverfahren

Die zwei Arbeitsschritte Mähen und Schwaden können mit so genannten Schwadmähern kombiniert werden. So kommen beispielsweise der der Ernte von Getreideganzpflanzen selbstfahrende Schwadmäher zum Einsatz, die mit Halmteilern und Ährenhebern zur besseren Gutaufnahme bei liegendem Getreide ausgerüstet sind.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 234)

5.4 Häckselgut

Häckselgut wird i. Allg. mit so genannten Feldhäckslern gewonnen. Je nach Verwendung lassen sich „schlepperverbundene“ Häcksler (d. h. gezogene Feldhäcksler, Seitenwagenfeldhäcksler, Front- oder Heckanbau-Feldhäcksler) und selbstfahrende Feldhäcksler unterscheiden. Sie können mit verschiedenen, auf die jeweilige Gutart abgestimmten Aufnahmeverrichtungen und Zusatzeinrichtungen (z. B. Pick-up, verschiedene Schneidvorsätze) ausgestattet werden (siehe Abbildung 5.8).

Bei allen Häckslertypen gelangt das Material nach der Zerkleinerung in den Auswurfkanal, um den sicheren Weitertransport des Gutstromes auf ein parallel neben der Erntemaschine (siehe Abbildung 5.7) oder ein gezogenes Transportfahrzeug zu gewährleisten.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 234f)

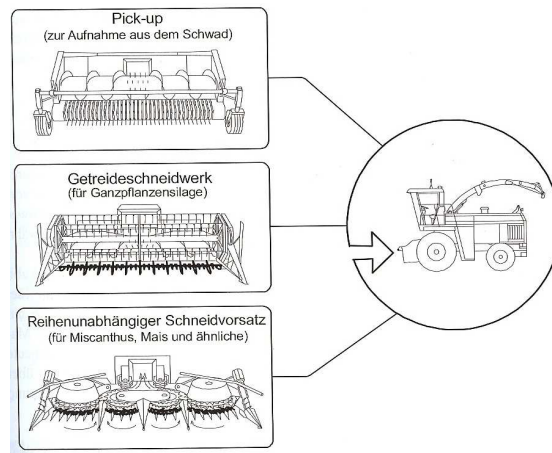


Abbildung 5.8: Vorsatzgeräte für selbstfahrende Feldhäcksler

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 235

5.5 Ballen

Auch bei der Ballenernte sind sowohl absätzig als auch Vollernte-Verfahren üblich. Hauptsächlich kommen jedoch Aufsammelpressen zum Einsatz, die das vorher vom Mähdrescher oder Schwadmäher abgelegte oder vom Schwader geformte Schwad aufnehmen. Unter den Aufsammelpressen kommen heute vor allem Quaderballenpressen für kubische Großballen und Rundballenpressen. Hochdruckballenpressen, mit denen leichte (von Hand umschlagbare) Kleinballen hergestellt werden, sind dagegen nur noch von untergeordneter Bedeutung. Die Pressen sind meist als gezogene Maschinen ausgeführt selbstfahrende Pressen (für Quaderballen) sind indessen seltener geworden. Die derzeit gebräuchlichen Ballenpressen und die entsprechenden Ballenmaße zeigt Abbildung 5.9.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 236)

	gezogene Aufsammelpressen			selbstfahrende Quaderballenpressen
	Kleinballenpressen ("Hochdruckpressen")	Großballenpressen		
		Rundballen	Quaderballen	
Pressenbauart				
Ballenform (Maße in cm)				
Dichte bei Stroh (kg/m³)	< 130	< 120	< 160	< 160

Abbildung 5.9: Praxisübliche Ballenpressen für die Halmgutbergung sowie Ballenmaße

Quelle: FNR, 2000, 72

5.5.1 Hochdruckballenpressen

Im Prinzip entspricht das Pressprinzip dem einer vereinfachten Quaderballenpresse. Jedoch ist der Presskanal deutlich kleiner. Durch Regulierung des Pressdrucks und durch Einstellung der Ballenlänge kann das Ballengewicht (je nach Materialart) zwischen 8 und 40 kg eingestellt werden. Mit Hochdruckballenpressen wird handliches Stückgut gewonnen, das eine gute Raumausnutzung beim Transport und im Lager ermöglicht. Nachteilig sind die schwierige Mechanisierung des Ballenumschlags und -transports sowie die hohen Pressverluste bei Getreideganzpflanzen von 6 bis 10 % der Gesamtmasse. Durch die begrenzte Schlagkraft und wegen des hohen manuellen Arbeitsanfalls haben Hochdruckballenpressen in den letzten Jahrzehnten stark an Bedeutung verloren.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 236f)

5.5.2 Quaderballenpressen

In der Ausführung als Aufsammlerpresse wird das Halmgut mittels Pick-up aufgenommen und durch Vorförderelemente vorverdichtet. Die Hauptverdichtung übernimmt ein Presskolben, mit dem das zugeführte Halmgut gegen die Stirnfläche eines bereits verdichteten Pakets presst. Bei nach dem Strangpressverfahren arbeitenden Quaderballenpressen sind die Ballenlängen innerhalb weiter Grenzen (ca. 1,0 bis 2,8 m) einstellbar. Dadurch sind problemlose Anpassungen an die Abmessungen vorhandener Transportanhänger möglich. Sobald die erwünschte Länge erreicht ist, wird der Ballen abgebunden und wird über die Auswurffrutsche auf dem Feld abgelegt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 237f)

5.5.3 Rundballenpressen

Im Unterschied zu den Quaderballenpressen, die nach dem Normaldruckverfahren arbeiten, erfolgt die Verdichtung bei den Rundballenpressen nach dem Radialdruckprinzip (Wickelverfahren). Das mit einem Pick-up aufgenommene Halmgut wird in eine Presskammer gefördert, die durch rotierende Presswalzen oder umlaufende Riemen bzw. Stabketten gebildet wird. Das Material wird darin aufgerollt (ähnlich wie ein Teppich) und durch die kontinuierliche Gutzufuhr von außen nach innen „radial“ verdichtet. Sobald die endgültige Ballendichte erreicht ist, wird die Zufuhr unterbrochen, um die fertigen Ballen mit Netz- oder Bindegarn (auch kombiniert) abzubinden.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 238)

5.5.4 Restholz-Ballen und Holzbündel

Waldrestholz (das entweder im Wald vorkonzentriert bzw. an den Rückegassen auf Häufen aufgeschichtet wurde) kann auch mit speziellen Restholzbündlern unzerkleinert zur Rundballen oder Langbündeln verpresst werden.

Meist sind es Forwarder bzw. Rückezüge die (an Stelle einer Ladefläche) mit solchen Bündelaggregaten ausgestattet sind (siehe Abbildung 5.10), es können jedoch auch auf LKW's damit ausgestattet werden. Das Material wird mit Hilfe des aufgebauten Krans zugeführt und zunächst zu einem Endlosstrang gepresst, anschließend wird dieser mit einer integrierten Kettensäge auf die gewünschte Länge abgeschnitten. Ballen werden in der Regel mit einem Netzbindegarn stabil umwickelt während bei gepressten Bündeln meist Bindegarn verwendet wird.

Durch die Ballen- bzw. Bündelform wird der Transport erheblich erleichtert, außerdem ist eine sehr flexible Zwischen- und Endlagerung möglich. Die Bündelkette wird hauptsächlich in frisch geernteten Beständen eingesetzt, da für ein stabiles Bündel die Äste sehr elastisch sein müssen. Ist das Astwerk zu trocken, bricht es leicht und führt zu lockeren Bündeln oder Ballen.

Die Ballen bzw. Bündel werden entweder sofort oder nach einer Zwischenlagerung (Abtrocknung) abtransportiert. Hierfür werden Forwarder bzw. Holzlade-Lkw's verwendet. Bevor die Ballen bzw. Bündel in Hackern oder Schreddern zerkleinert werden (Kapitel 6.2), wird das Netz bzw. der Bindegarn zertrennt und entfernt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 197)



Abbildung 5.10: Restholzbündler

Quelle: JOHN DEERE, s.a., s.p.

6. Aufbereitung

Nach der Ernte muss die Biomasse mechanisch aufbereitet werden, dies ermöglicht eine Anpassung der Biomassemerkmale an die Anforderungen der jeweiligen Konversionsverfahren. In den meisten Fällen kommt es dadurch zu Qualitätsverbesserungen. Vor allem die physikalischen bzw. mechanischen Eigenschaften der Biomasse (Abmessungen, Schüttdichte, Feinanteil, Größenverteilung und Abriebfestigkeit) werden während der Aufbereitung beeinflusst.

(vgl. FNR, 2000, 75)

Bei der mechanischen Aufbereitung unterscheidet man zwischen Verfahren für die Zerkleinerung, das Sieben (bzw. Sortieren) und die Verdichtung (Pressen).

Ist für weitere Aufbereitungsschritte oder für die Umwandlung in Nutz- bzw. Endenergie oder in Sekundärenergieträger eine vorgegebene Materialstruktur vorgegeben, ist eine Zerkleinerung des Holz oder Halmguts erforderlich. Je nach Anforderungen der Beschickungs- und Verwertungstechnik wird dabei mehr oder weniger stark zerkleinertes Stück- oder Schüttgut verlangt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 245)

6.1 Scheitholzbereitung

Der Einsatz von Wald(rest)holz (Brennholz) in handbeschickten Kleinf Feuerungsanlagen macht eine Zerkleinerung bzw. Spaltung des gerückten Holzes (zu ofengängigen Holzstücken) erforderlich.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 245)

6.1.1 Sägen

Vor oder nach dem Spalten werden die Holzabschnitte auf die geeignete Länge („ofenfertig“) zugeschnitten. Dazu kommen Handsägen, benzinbetriebene Motorsägen, elektrische Kettensägen, Kreissägen oder Bandsägen zum Einsatz.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 246)

6.1.2 Spalten

Holz wird weltweit immer noch zu einem großen Teil per Hand gespalten (mit Spaltäxten, Spalthämmern und ggf. dazugehörenden Keilen). Mittlerweile kommen aber zunehmend rationellere Verfahren zum Einsatz.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 247)

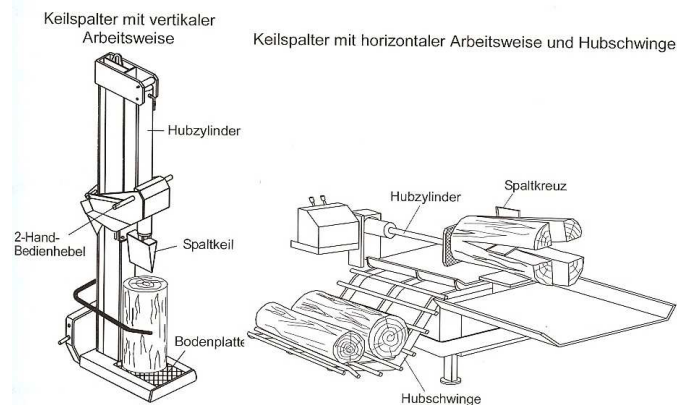


Abbildung 6.1: Keilspalter zur Scheitholzaufbereitung

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 247

Mechanische Keilspalter

Für die rationellere Zerkleinerung (Spaltung) von gerücktem Holz zu ofengängigen Holzstücken werden hauptsächlich Keilspalter verwendet. Sie können entweder elektrisch oder auch über Zapfwellenantrieb (als Schlepperanbaugerät) betrieben werden.

Beim Keilspalter wird ein Spaltkeil hydraulisch (über einen Hubkolben) in das eingeklemmte Holz getrieben. Der Rohling kann auch mittels einer Druckplatte gegen einen feststehenden Keil oder eine Klinge gedrückt werden, wobei Spaltdrücke von 5 bis 30 t aufgewendet werden. Beide Bauarten findet man sowohl bei vertikal als auch bei horizontal arbeitenden Geräten (siehe Abbildung 6.1). Manchmal ist der Spaltkeil auch als Spaltkreuz oder Mehrfachspaltklinge ausgeführt, wodurch sich mit einer einzigen Hubbewegung mehrere Scheite gleichzeitig erzeugen lassen. Solche Mehrfachspaltklingen werden hauptsächlich bei größeren Holzdurchmessern verwendet, wobei hier die horizontale Arbeitsweise überwiegt. Bei Spaltern mit liegender Zerkleinerung werden oft auch Beschickungshilfen (Hubschwingen) eingesetzt. Die Holzrollen werden dabei auf die Schwinge geladen und anschließend hydraulisch angehoben um sie anschließend leicht in den Spalter hineinrollen zu lassen, dadurch wird die Arbeit sehr erleichtert.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 248)

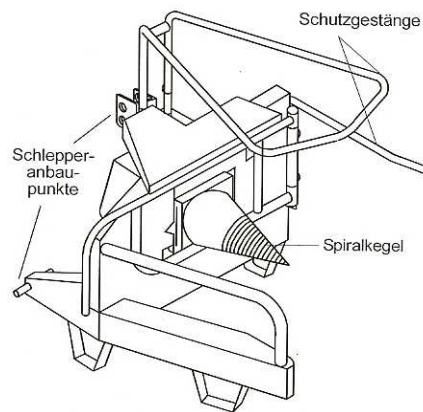


Abbildung 6.2: Spiralkegelspalter

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 248

Spiralkegelspalter

Neben den Keilspaltern (sie sind die am häufigsten eingesetzte Spalterbauart) findet man auch immer noch Spiralkegelspalter (siehe Abbildung 6.2). Ihre Anzahl ist jedoch rückläufig, da sie durch das vergleichsweise hohe Unfallrisiko nicht mehr verkauft werden dürfen.

Bei diesen Geräten wird das zu spaltende Holz manuell an einen sich drehenden Spiralkegel gedrückt, dieser wird entweder von einer Zapfwelle oder von einem Elektromotor angetrieben. Dieser Kegel besteht aus spiralförmig angebrachten Windungen und bohrt sich selbsttätig in das Holzstück hinein und spaltet dieses entlang seiner Fasern auf.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 248)

Kombinierte Säge-Spalmmaschinen

Mittlerweile sind auch kombinierte Systeme (so genannte „Brennholzmaschinen“) auf dem Markt, hier wird das Holz in zwei aufeinander folgenden Arbeitsgängen gesägt und gespalten.

Nachdem das Rohholz bei der gewünschten Länge abgetrennt wurde fällt der Holzblock in eine Spaltrinne, wo der Spaltvorgang (manuell bzw. automatisch) ausgelöst wird. Die fertigen Scheite werden dann meist mit einem Förderband weitertransportiert (siehe Abbildung 6.3).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 252f)

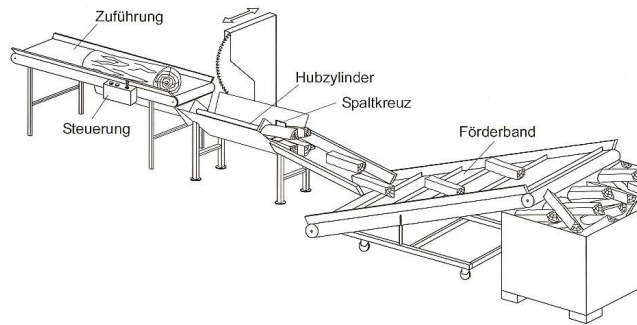


Abbildung 6.3: Funktionsweise einer kombinierten Säge- Spaltmaschine (schematisch)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 250

6.2 Hackgut- und Schreddergutbereitung

Zur Herstellung von groben bzw. feinen Schüttgut aus Holz kommen entweder schnell laufende Hacker und Schredder oder langsam laufende Zerspaner („Trommelreißer“) zum Einsatz.

6.2.1 Hacker

Die Lager- Transport- und Verwertungseigenschaften werden vielfach durch die Hackschnitzelgröße (und -form) beeinflusst, deshalb werden an die Hackertechnik verschiedene Anforderungen gestellt. Diese wären u. a.

- gleichmäßige Kantenlängen zur Verbesserung der Fließ- und Fördereigenschaften
- Vermeidung von Überlängen zur Reduzierung der Brückenbildungsneigung im Lager
- saubere Schnittstellen und geringe Faser- oder Rindenbeschädigung zur Verringerung der spezifischen Oberfläche des Hackguts. Dies erhöht die Lagerfähigkeit des feuchten Holzes (durch verringerte mikrobielle Aktivität)
- Vermeidung von Fremdstoffeinträgen

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 253)

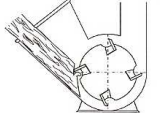
Scheibenhacker

Scheibenhacker (auch „Scheibenradhacker“ genannt) arbeiten nach dem Prinzip der schneidenden Zerkleinerung. Hier besteht das Hackorgan aus mehreren Messern, die radial auf einer Schwungscheibe angeordnet sind. Das Holz wird über eine oder mehrere Einzugwalzen zugeführt (siehe Tabelle 6.1). Dabei ist die Zuführrichtung in einem Winkel von

45° zur Scheibenebene orientiert, dadurch senkt sich der Kraftbedarf beim Schnitt. Die abgetrennten Schnitzel werden anschließend auf die Rückseite der Scheibe über Wurfschaufeln („Windschaufeln“) in den Auswurfkanal geschleudert.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 254)

Tabelle 6.1: Verschiedene Bauarten mobiler Hacker und ihre technischen Merkmale

Bauart	Schneid- werkzeug	Einzugsart	max. Holzstärke in mm	Hack- länge in mm	Kraft- bedarf in kW	max. Leistung in m³/h
Scheibenhacker 	1–4 Messer	- ohne Zwangs- einzug - 1–3 Walzen	100–300	4–80 (meist ein- stellbar)	8–105	2–60
Trommelhacker 	2–8 durch- gehende oder 3–20 Ein- zelmesser	- 2 Walzen - Walze und Stahlglieder- band - 2 Stahlglie- derbänder	180–450	5–80 (meist ein- stellbar)	45–325	15–100
Schneckenhacker 	Schnecken- win- dung	selbstein- ziehend	160–270	20–80 (je nach Schnecke)	30–130	5–40

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 254

Trommelhacker

Beim Trommelhacker sind 2 bis 8 (durchgehende) oder 3 bis 20 (versetzt angeordnete) Einzelmesser auf einer rotierenden Trommel befestigt (siehe Tabelle 6.1). Das Holz wird rechtwinklig zur Trommelachse zugeführt, in der ein Winkel von ca. 25 bis 35° zum Gegenmesser vorliegt. Wie bei den Scheibenhackern auch kann die Hackgutlänge durch Vor- bzw. Zurücksetzen der Messer verändert werden. Bei Trommelhackern wird der Hackgutaustrag meist durch ein Gebläse unterstützt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 254f)

Schneckenhacker

Kernelement dieser Häckslerbauform ist eine konisch geformte Hackschnecke, deren spiralförmige Windungen an den Außenseiten angeschärft sind. Das Holz wird über den Zuführtrichter der Länge nach axial zur Häckselrotorwelle der Hackschnecke zugeführt und (abhängig vom Stammdurchmesser) ab einem gewissen Punkt zwischen Schneckenwindung und Zuführboden eingeklemmt bzw. eingeschnitten. Da das System selbsteinziehend ist, kann in der Regel auf Zuführorgane verzichtet werden. Je weiter das Holz hineingezogen wird, umso tiefer „schraubt“ sich die Schneckenschneide durch den sich vergrößernden Radius der

Hackschnecke in das Holz, bis am Ende das Holz komplett durchtrennt ist (Tabelle 6.1). Beim Schneckenhäcksler wird die Länge der Hackschnitzel hauptsächlich durch den Abstand der Schneckenwindungen voneinander bestimmt und kann nur verändert werden, wenn die komplette Hackschnecke ausgewechselt wird.

(vgl. UNI-GÖTTINGEN, s.a., s.p.)

Einsatzbereiche

Die verschiedenen Hacker können sowohl mobil als auch stationär eingesetzt werden, wobei in stationären Anlagen meist Trommel- und gelegentlich auch Scheibenhacker zum Einsatz kommen. Im Normalfall werden sie mit einem Elektromotor angetrieben, alternativ ist der Antrieb auch mit einem Dieselmotor möglich. Zur Beschickung der Hacker werden Mobilkräne und Förderbänder verwendet.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 257)

6.2.2 Schredder

Bei Schreddern erfolgt die Zerkleinerung nicht durch schneidende Werkzeuge (wie es bei Hackern der Fall ist), sondern durch eine Prallzerkleinerung. Die Funktionsweise beruht damit auf dem Brechen und Zertrümmern des Materials zwischen umlaufenden Schlagwerkzeugen und einer feststehenden glatten oder kammartig ausgebildeten Brechplatte. Werden keine schneidenden Klingen verwendet, kann ein hoher Anteil an Fremdkörpern (Steine, Metalle usw.) toleriert werden. Dann werden meist keine feststehenden Werkzeuge sondern bewegliche Schlegel bzw. Schlaghämmer verwendet, diese können ausweichen und fangen dadurch die Stöße etwas ab.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 258)

6.2.3 Zerspaner

Zerspaner sind Zerkleinerer die im Vergleich zu den anderen eher langsam laufen. Die schneidenden oder brechenden Werkzeuge befinden sich auf gegensinnig drehenden Ringelwalzen, die über Zahnräder, Ketten oder hydraulisch angetrieben werden. Als Arbeitswerkzeuge dienen gekrümmte fingerförmige Meißel oder Reißhaken. Sind mehrere gegensinnig arbeitende Rotoren vorhanden wird zwischen den Walzen je eine Schneidfurche ausgebildet, in der das Material zersplittert wird (siehe Abbildung 6.4). Zur Kalibrierung der erzeugten Partikelgrößen werden auswechselbare Lochsiebe verwendet.

Zerspaner werden u. a. zum Brechen sperriger Abfallhölzer (z. B. Paletten, Fensterrahmen, Türstöcke, Altmöbel) und von grobem Müll aller Art verwendet. Auch hier kann meist ein hoher Anteil an Störmaterialien (Steine, Metalle usw.) toleriert werden.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 258f)

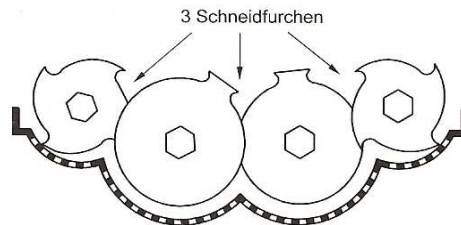


Abbildung 6.4: Funktionsweise eines langsam laufenden Zerspaners (schematisch)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 259

6.3 Ballenauflöser

Das Auflösen von Halmgutballen dient dazu, den Zusammenhalt des Materials und die ursprüngliche Dichte wieder rückgängig zu machen. Somit wird der Brennstoff in eine dosierfähige Form überführt. Das Material wird dabei aus seinem ursprünglichen Verband gelöst und meist weiter zerkleinert mit dem Ziel, einen kontinuierlichen Gutfluss zu erzeugen. Abbildung 6.5 zeigt die unterschiedlichen Funktionsprinzipien verschiedener Ballenauflöser.

Um Betriebsstörungen durch das Aufwickeln an rotierenden Bauteilen zu vermeiden müssen die Bindschnüre, Netze, Folien u. ä. zuvor entfernt werden. Als Werkzeuge kommen Reißwalzen, Reißtrommeln, liegende Schlegelwellen oder Kratzböden zum Einsatz.

Häcksler für Rund- und Quaderballen (so genannte „Tub-Grinder“) werden auch für die Zerkleinerung von sperrigen Hölzern (z. B. Altholz), Reisholz, Astmaterial und zur Zerkleinerung vor einer Kompostierung verwendet. Zur Auflösung von Quaderballen sind vollautomatische Zerkleinerungsstraßen möglich. Bei Rundballen ist das nicht möglich, da diese einzeln zugeführt werden müssen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 258f)

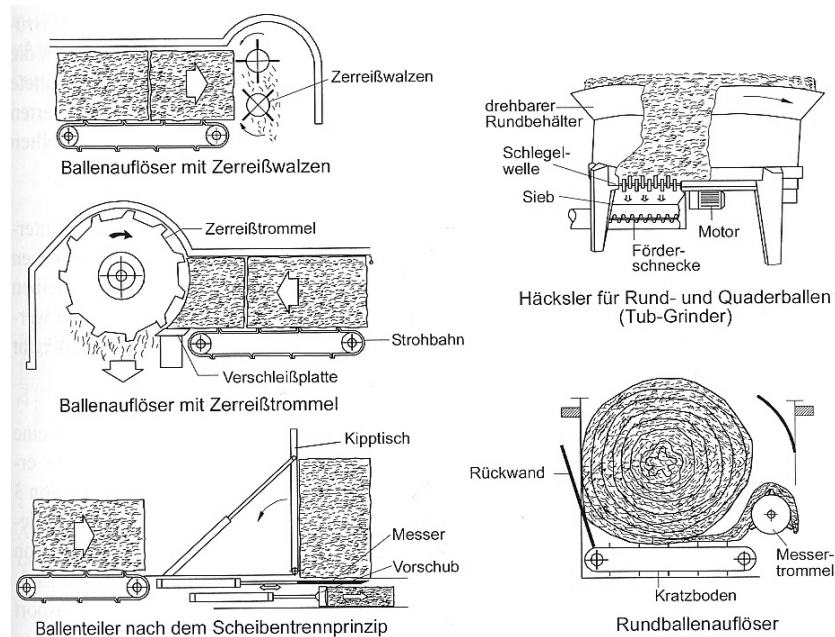


Abbildung 6.5: Funktionsprinzipien verschiedener Ballenauflöser

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 261

6.4 Sieben und Sortieren

Weisen schüttfähige Biomassen nicht das nötige Korngrößenspektrum auf, müssen diese aufbereitet werden. Dies ist dann notwendig, wenn beispielsweise durch zu große Teilchenlängen die Gefahr des Materialstaus oder der Brückenbildung besteht oder wenn Fremdstoffe abgeschieden werden sollen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 262)

Scheiben und Sternsiebe

Sie bestehen aus vielen waagrecht hintereinander angeordneten Wellen. Diese sind mit nebeneinander liegenden unrunder, flachen oder sternförmigen Scheiben besetzt. Feinteile fallen zwischen den Scheiben (oder Sternen) hindurch. Größere Partikel und Steine werden durch die Drehbewegung der Wellen bis zum Ende der Strecke weitertransportiert (siehe Abbildung 6.6).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 262)

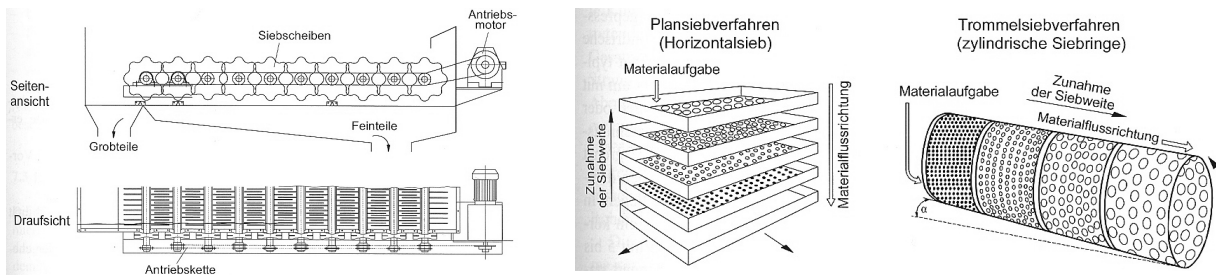


Abbildung 6.6: Funktionsprinzipien von Scheiben-, Plan- und Trommelsieben (schematisch)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 263

Plansiebe

Bei Plansieben werden geneigte Siebkästen in eine Kreisschwingung versetzt. Durch auswechselbare Siebelemente kann man die Korngrößenabscheidung abändern (siehe Abbildung 6.6). Dieses Abscheidungsprinzip kann auch in so genannte „Vibro-Rinnen“ integriert werden (diese dienen vor allem dem innerbetrieblichen Weitertransport von Schüttgut).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 262)

Trommelsiebe

Trommelsiebe bestehen aus einem leicht geneigten, um die Längsachse rotierenden und in Richtung des Gutflusses leicht geneigten Zylinder. Das Schüttgut wandert aufgrund des Gefälles in Richtung Trommelende. Durch den perforierten Mantel des Zylinders können kleinere Partikel durchfallen, während der Siebrückstand am Ende der Trommel ausgeschieden wird.

Durch zunehmende Lochgrößen entlang der Trommelachse können auch verschiedene Fraktionen abgeschieden und getrennt gewonnen werden (siehe Abbildung 6.6).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 263)

6.5 Pressen

Durch die Pressung zu Pellets bzw. durch die Brikettierung der biogenen Festbrennstoffe ist ein Höchstmaß an Homogenität bezüglich der physikalisch-mechanischen Merkmale erreichbar. Die Vorteile sind u. a.

- hohe Energiedichte (bezogen auf das Volumen) und die damit verbundenen logistischen Vorteile

- günstige Fließ- und Dosiereigenschaften
- geringer Wassergehalt im Brennstoff und deshalb hohe Lagerstabilität (kein biologischer Abbau)
- geringe Staubentwicklung beim Umschlagprozess
- hohe Brennstoffhomogenität (Standardisierung möglich)

Durch die zunehmend günstigeren Rahmenbedingungen im Energiemarkt (u. a. hohe Preise für fossile Energieträger, große Nachfrage nach Biogenen Brennstoffen) ist eine deutlich steigende Tendenz der Aufbereitung zu Briketts oder Pellets zu verzeichnen (trotz des hohen damit verbundenen Aufwandes).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 264)

6.5.1 Brikettierung

Durch die Komprimierung des zerkleinerten Rohmaterials unter hohem Druck und die dabei entstehende Reibung wird Wärme freigesetzt und die Bindungskräfte zwischen den Teilchen werden aktiviert. Eine Zugabe von zusätzlichen Bindemitteln ist deshalb bei der Brikettierung meist nicht notwendig.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 265)

Strangpressverfahren

Bei diesem Verfahren kommen hauptsächlich Kolbenstangenpressen zum Einsatz (siehe Abbildung 6.7). Das zu verpressende Material wird zum Teil vorverdichtet und in den zylindrischen Presskanal eingeführt. In diesem Kanal bewegt sich ein Kolben der gegen das bereits verdichtete Material drückt. Dadurch entsteht ein Materialstrang, der im Rhythmus der Kolbenstöße aus dem Pressraum austritt.

Der benötigte Gegendruck wird durch Reibung im Presskanal aufgebaut. Durch Druck (bis ca. 1.200 bar) und Reibung kommt es zu einer starken Aufheizung des Presslingsstranges. Deshalb ist es notwendig den austretenden Brikettstrang zu kühlen (z. B. durch Kühlung des Austrittskopfs und/oder eine nachgeschaltete Auskühlschiene). Am Ende der Schiene wird der Strang auf die gewünschte Länge gebrochen bzw. abgeschnitten.

Um eine möglichst hohe Dichte und Abriebfestigkeit zu erreichen ist eine ausreichende Vorzerkleinerung (unter 10 mm) und Trocknung (unter 15 % Wassergehalt) des Ausgangsmaterials notwendig. Unter diesen Bedingungen werden Rohdichten einzelner

Presslinge zwischen $1,0$ und $1,25 \text{ g/cm}^3$ erzielt. Der spezifische Energiebedarf liegt bei 50 bis 70 kWh/t (ohne Zerkleinern und Trocknen).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 265)

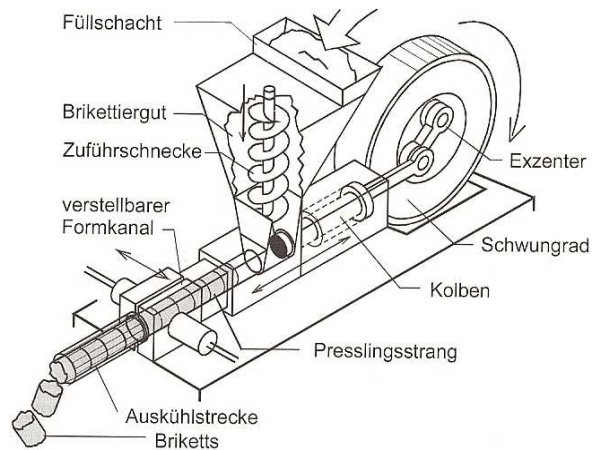


Abbildung 6.7: Arbeitsweise einer Kolbenstrangpresse mit schwingmasseunterstütztem Antrieb

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 266

Presskammerverfahren

Beim Presskammerverfahren erfolgt die Verdichtung diskontinuierlich. Auch hier wird das zu verpressende Material zunächst vorverdichtet und anschließend der eigentlichen Presskammer zugeführt. Das Material wird (meist hydraulisch) gepresst. Anschließend wird das Brikett ausgestoßen und der Vorgang wiederholt sich. In der Regel sind diese Presslinge Ziegelförmig und sind deshalb stapelbar und somit Platz sparend lagerbar.

Presskammerverfahren haben geringere Reibungskräfte zu überwinden als Strangpressen, deshalb ist der spezifische Energiebedarf deutlich geringer (20 kWh/t). Durch die geringere Aufheizung kann außerdem auf eine aufwendige Kühleinrichtung verzichtet werden. Ein Nachteil ist jedoch die geringere Durchsatzleistung und die geringere Abriebfestigkeit der Presslinge.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 267)

6.5.2 Pelletierung

Die Pelletiertechnik, die ursprünglich in Kanada entwickelt wurde, erfolgt derzeit vor allem zur Herstellung von Holzpellets. Biomassepellets werden inzwischen aus den verschiedensten Rohstoffen und für viele Einsatzbereiche von Einzelfeuerstätten über Zentralheizungsanlagen

bis hin zum Einsatz in Kraftwerken produziert. Zur Pelletierung kommen hauptsächlich Kollergangpressen mit Flach- oder Ringmatrizen zum Einsatz. Daneben ist allerdings auch das Pressverfahren mittels Zahnradpresse bekannt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 267)

Zur Herstellung von Biomassepellets sind folgende Produktionsschritte von wesentlicher Bedeutung:

- Auswahl und Analyse des Rohmaterials zur Abstimmung auf die gewünschte Brennstoffqualität
- Trocknung des feuchten Rohmaterials auf einen bestimmten Wassergehalt (10 bis 14 %)
- Zerkleinerung des Rohmaterials mit dem Zweck gleichmäßiger Korngrößenverteilung
- Konditionierung bzw. Aktivierung des im Holz enthaltenen Lignins (durch Dampfzugabe) und ggf. Zugabe von Presshilfsmitteln (Stärke, pflanzliches Paraffin oder Melasse) zur Verbesserung der Bindungseigenschaften im biogenen Material und zur Verbesserung der Festigkeit der Pellets
- Pelletierung des Rohmaterials durch Pressung des Materials durch Lochmatrizen
- Kühlung der erzeugten Pellets zur besseren Formstabilität und Lagerbeständigkeit
- Abtrennung locker anhaftender Partikel durch Siebung
- Abfüllung, Lagerung und Transport der Pellets in Sackware (zu je 15 oder 25 kg), BigBags (ca. 500, 750 oder 1.000 kg) oder Silofahrzeugen zur direkten Auslieferung an den Kunden.

Der spezifische Energieaufwand bei der Pelletierung hängt von der Vorbehandlung (Zerkleinerung, Trocknung, Vorwärmung usw.). Er beträgt ohne die Energieaufwendungen für das Zerkleinern, Fördern, Konditionieren, Beschicken und Kühlen (diese liegen in der Summe meist höher als die des eigentlichen Pelletierprozesses) in etwa 40 kWh/t. Das entspricht in etwa 1 % der im Brennstoff enthaltenen Energie. Der Energieaufwand für den gesamten Pelletierprozess liegt insgesamt bei ca. 4 bis 6 % der Brennstoffenergie.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 356)

Kollergangpressen

Bei der Flachmatrizenpresse fahren zwei oder mehrere Rollen („Koller“) berührungslos über eine Matrizenoberfläche. Dadurch wird die Biomasse über die Matrizenoberfläche gerieben

und teilweise weiter zerkleinert. Das aufgeriebene Feinmaterial wird dann unter Druck in die Bohrungen der Matrize hineingepresst und dort verdichtet. Die am anderen Ende der Matrize austretenden Presslinge werden anschließend auf die gewünschte Länge abgeschert (siehe Abbildung 6.8).

(vgl. FNR, 2000, 78f)

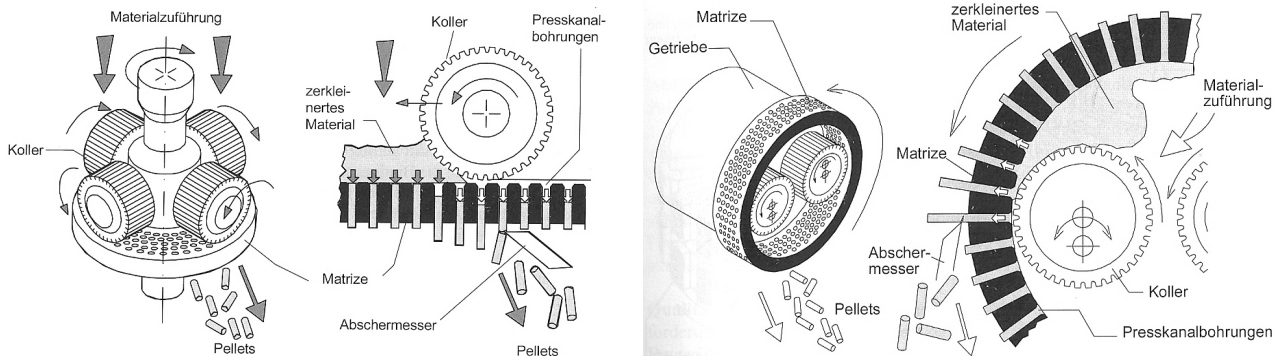


Abbildung 6.8: Arbeitsprinzip von Kollergangpressen (mit Flach- und Ringmatrize)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 272f

Das Ringmatrizenprinzip (siehe Abbildung 6.8) ist das weltweit am meist verwendete Verfahren zur Pelleterzeugung. Bei der Ringmatrizenpresse dreht sich die Matrize um die in starrer Position bleibenden Koller. Auch hier wird das Material durch die Bohrungen der Matrize gepresst und mit einem Abschermesser bei der gewünschten Länge abgebrochen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 271f)

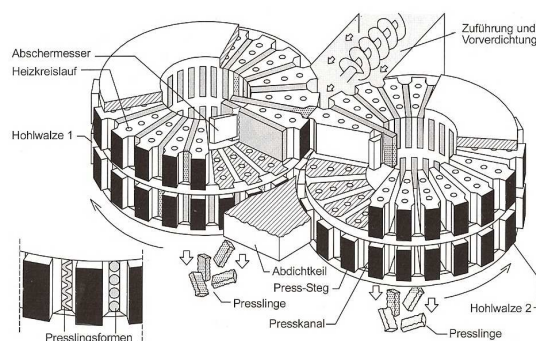


Abbildung 6.9: Querschnitt durch das Hohlwalzenpaar einer Zahnradpresse

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 274

Hohlwalzen- oder Zahnradpressen

Im Unterschied zu den Kollergangpressen wird bei den Zahnradpressen das Material zuerst vorverdichtet, bevor es von den Stegen der zwei sich gegensinnig rotierenden Zahnräder erfasst wird (siehe Abbildung 6.9). Als Pressorgan dienen hier Hohlwalzen in deren Mantel sich die Presskanäle befinden. Je nach Querschnittsform des Presskanals können zylindrische, platten- oder wellplattenförmige Presslinge erzeugt werden. Die Abschermesser befinden sich bei diesem Verfahren an der Innenseite der Hohlwalzen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 271f)

7. Lagerung

Die Lagerung ist notwendig um die Zeitspanne zwischen dem Anfall der Biomasse und ihrer energetischen Nutzung zu überbrücken. Außerdem dient die Lagerung auch der Absicherung der Brennstoffversorgung und wird entweder vom Brennstoffproduzenten, vom Zwischenhandel oder vom Verwerter durchgeführt.

Die Lagerung biogener Materialien (vor allem für Schüttgutbrennstoffe) ist jedoch mit einer Reihe von Risiken verbunden.

- Substanzverlust durch biologische Prozesse - Verlustrisiko
- Selbstentzündung - Gefährdungsrisiko
- Pilzwachstum und Pilzsporenbildung - Gesundheitsrisiko
- Geruchsbelästigung - Umweltrisiko
- Wiederbefeuchtung bzw. Umverteilung des Wassergehaltes - Qualitätsrisiko

Die größten Probleme bei der Lagerung sind der Substanzabbau und die Pilzsporenbildung. Wie bei den meisten anderen Risiken auch, ist die Hauptursache ein zu hoher Wassergehalt des gelagerten Gutes.

Um die oben genannten Lagerrisiken zu minimieren müssen die biologischen Aktivitäten möglichst unterbunden werden.

(vgl. FNR, 2000, 79)

7.1 Brennstofflagerung

Wie bereits erwähnt ist die Lagerung von Pellets, aufgrund ihres geringen Wassergehalts von 12% (ÖNORM M 7135 198) problemlos auch über längere Zeiträume möglich.

Auch die Lagerung von Holzhackgut ist bis zu einem Wassergehalt von etwa 30 Gew.-% unproblematisch. Bei höherem Wassergehalt kann es zur verstärkten Bildung von Mikroorganismen kommen. Damit kommt es zu einer Zunahme der biologischen Abbauprozesse, was unter anderem zu einer vermehrten Bildung von Pilzsporen führt. Diese können speziell beim Umschlag zu einer Gesundheitsgefährdung führen. Durch diese Abbauprozesse kann es auch zur Selbsterwärmung des Materials, die unter ungünstigen Bedingungen zu einer Selbstentzündung führen kann, kommen. Deshalb sollte die Lagerung so erfolgen, dass das Schüttgut möglichst frei durchströmt werden kann.

Je nach Holzart, Korngröße und Wassergehalt kommt es durch solche biologischen Abbauprozesse zu Masseverlusten. Bei erntefrischem Hackgut liegt dieser Substanzabbau monatlich bei rund 1 bis 5 % der Trockenmasse (vgl. Tabelle 7.1). Der Verlust sinkt mit dem Alter des Materials bzw. steigt mit zunehmendem Wassergehalt, abnehmender Korngröße sowie mit dem Anteil an Nadeln und Rinde. Deshalb kann es bei längeren Lagerzeiten sinnvoll sein, das Material erst später zu hacken bzw. entsprechend zu trocknen.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 355)

Tabelle 7.1: Jährlicher Trockenmasseverlust bei der Holzlagerung in Haufen im Freien (z. T. mehrmonatige Lagerung auf 1 Jahr hochgerechnet)

Material / Lagerart	Verlust (% TM/a)
feines Waldhackgut, frisch, unabgedeckt	20 bis >35
feines Waldhackgut, getrocknet, abgedeckt	2 bis 4
grobstückiges Waldhackgut (7 bis 15 cm), frisch, abgedeckt	ca. 4
Rinde, frisch, unabgedeckt	15 bis 22
Holzstangen (Fichte, Kiefer), frisch, unabgedeckt	1 bis 3
junge Ganzbäume (Pappel, Weiden) frisch, unabgedeckt	6 bis 15

Quelle: FNR, 2000, 80

Wenn die Langzeitlagerung der Brennstoffe bei den Biomasseerzeugern bzw. -lieferanten erfolgt ist zur Sicherung der Brennstoffversorgung eine Kurzzeitlagerung (direkt bei der

Verbrennungsanlage) notwendig. Im Vergleich zu fossilen Brennstoffen ist bei Biomasse aufgrund der geringeren Energiedichte und -dichte ein größerer Platzbedarf erforderlich.

(vgl. FNR, 2000, 104)

Im Wesentlichen wird die Lagerung von Hackgut von dessen Größe bzw. Struktur, dem Wassergehalt sowie von der Zeitspanne zwischen der Einlagerung und der Verwertung bestimmt. Bei größeren Anlagen (über 1 MW Feuerungswärmeleistung) kommen vor allem Rundsilos sowie Lagerhallen (offene oder geschlossene) zum Einsatz. Bei kleineren Anlagen hingegen haben sich unterirdische Lagerräume (meist im Keller neben dem Kesselraum) bewährt.

Holzpellets können in geschlossenen Behältern (externer Silo, Heizöltank, ...) oder in einem vom Kesselraum getrennten Kellerraum gelagert werden. Um den Wassergehalt der Pellets dauerhaft unter 10 % halten zu können sollte der Lagerraum staubdicht, ausreichend ins Freie belüftet und trocken sein. Wenn die Pellets in BigBags angeliefert werden, kann die Lagerung und Brennstoffentnahme auch direkt in und aus diesen erfolgen.

Aufgrund des benötigten Lagervolumens und der Notwendigkeit einer weitergehenden Trocknung wird Scheitholz fast immer außerhalb des Gebäudes (z. B. unter einem Vordach) gelagert.

Halmgutballen werden meist in einfachen Hallen gelagert. Die Beförderung der Ballen und der Brennstoffzufuhr zum Kessel geschieht hauptsächlich mittels Gabelstapler oder Kran

(vgl. NEUBARTH UND KALTSCHMITT, 2000, 282)

7.2 Lagerein- und -austragungssysteme

Die Zuführung des Brennstoffs ins Lager sowie vom Lager in die Feuerungsanlage ist je nach Aufbereitungsform des Brennstoffs und der Lagerausführung unterschiedlich. Ab einer bestimmten Anlagenleistung (meist über 100 kW) geschieht der Lagerein- bzw. -austrag automatisch. Neben händischen oder teilmechanisierten Beschickungen kommen aber auch bei kleineren Anlagen zunehmend vollautomatische Systeme (für Hackschnitzel und Pellets) zum Einsatz.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 359)

7.2.1 Hackgut

Bei unterirdischen Lagern, wo eine direkte Befüllung durch Transportfahrzeuge möglich ist, können Lagereintragungssysteme entfallen. Befindet sich das Lager oberirdisch, muss der Brennstoff halbmechanisch bzw. mechanisch in das Lager befördert werden. Bei kleineren Anlagen (bis ca. 1 MW) geschieht das mit Radladern, bei größeren hingegen kommen automatische Befüllungen zum Einsatz. Hier werden die Hackschnitzel zuerst in eine Abladegrube bzw. -mulde gekippt von der sie dann über Schnecken oder Trog- bzw. Kratzkettenförderer in das Lager befördert und dort verteilt werden.

Lageraustragesysteme (Querförderschnecken bzw. Trog- oder Kratzkettenförderer) befördern das Gut vom Lager zur Fördereinrichtung, die dem Brennstoff zur eigentlichen Kesselbeschickung dienen. In Tabelle 7.2 sind verschiedene Systeme zur Lageraustragung und ihre Merkmale aufgelistet

(vgl. FNR, 2000, 111)

Tabelle 7.2: Kenndaten und Merkmale ausgewählter automatischer Lageraustragsysteme

		Schrägboden/ Trichterauslauf	Blattfederrühr- werk	Konusschnecke	Dreh- oder Aus- tragsschnecke	Schubboden
Lagergrundriss		rund, eckig	rund, eckig	rund (eckig)	rund (eckig)	rechteckig, länglich
Lagergröße		Ø bis ca. 4 m	Ø 1,5 bis ca. 4 m	Pendelwirkdurch- messer 2 bis 5 m	Ø 4 bis ca. 10 m	keine Begren- zung (parallele Schubböden)
Art des Lager- gutes		Pellets, Kör- ner-Brennstoffe (gute Fließeigen- schaften)	feine/mittlere Hackschnitzel (rieselfähig)	trockene, feine bis mittlere Hack- schnittel, bis ca. 50 mm Länge	feine bis mittlere Hackschnitzel bis 100 mm Länge	leichte bis schwerste Güter, auch sehr grob
Max. Lagerhöhe	in m	> 20	6	10	20	10
Leistung	in m ³ /h		3	5	50	20

Quelle: FNR, 2000, 113

Dreh- und Konusschnecken

Dreh- oder Konusschnecken (siehe Abbildung 7.1) erfüllen im Grunde die gleiche Funktion wie Blattfederrührwerke, wie diese eignen sie sich am besten für runde Silos. Neben der Lockerungsarbeit (Rührwerksfunktion) erfolgt der radiale Transport zum zentralen Entnahmepunkt. Bei rechteckigen Siloquerschnitten haben diese Austragungssysteme jedoch den Nachteil, dass der Lagerraum nie vollständig entleert werden kann.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 303f)

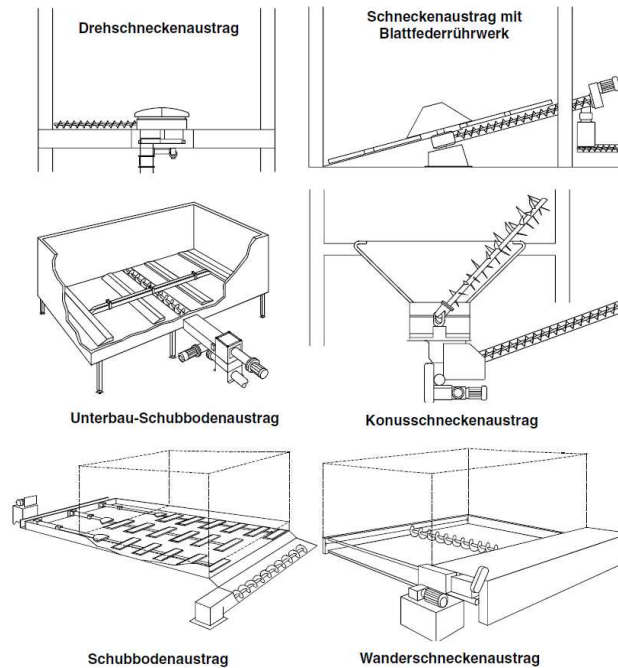


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung verschiedener Systeme zur Lageraustragung

Quelle: FNR, 2000, 112

Schubböden

Schubböden kommen überwiegend bei langen Bunkern (z. B. Betonbunker, Wechselcontainer) zum Einsatz. Im Gegensatz zu den oben genannten Austragungssystemen decken Schubbodenausträge den gesamten (rechteckigen Lagerbodenbereich) ab. Je nach Lagerbreite bestehen sie aus zwei oder mehreren Schubstangen mit Mitnehmern, die über Hydraulikzylinder angetrieben werden (siehe Abbildung 7.1). Durch die spezielle Form der Mitnehmer wird der Brennstoff in Richtung einer mittig oder stirnseitig verlaufenden Querrinne (Austragungsöffnung) geschoben, in der sich z. B. ein Schnecken oder Kettenförderer befindet.

(vgl. FNR, 2000, 111)

Wanderschnecken

Auch Wanderschnecken sind für den Einsatz bei großflächigen rechteckigen Lagern vorgesehen, da sie den Lagerboden vollständig abdecken (siehe Abbildung 7.1). Die Schnecke (oder ein gekoppeltes Schneckenpaar) wandert horizontal hin und her, wobei die Vorschubbewegung meist über eine Zugkette bzw. Zahnstange erfolgt. Durch einen hydraulischen Antrieb werden die Schnecken in Rotation versetzt. Durch diese

Austragsbewegung gelangt der Brennstoff in einen quer verlaufenden Schneckentrog, von wo aus er (wie beim Schubbodensystem) zur Konversionsanlage transportiert wird.

(vgl. FNR, 2000, 112)

7.2.2 Pellets

Im Grunde können Pellets wie Hackgut in das Brennstofflager gefördert werden. Vorwiegend werden Pellets jedoch in Tankwagen (Silo-LkW) geliefert und pneumatisch in das Lager eingetragen. Der Lageraustrag kann wahlweise auch über ein Bodenrührwerk und eine Förderschnecke erfolgen.

Bei einer entsprechenden Form des Lagerbodens (z. B. trichterförmig) kann das Rührwerk auch entfallen, da die rieselfähigen Pellets allein infolge der Schwerkraft zur Förderschnecke transportiert werden (siehe Abbildung 7.2). Pellets können natürlich auch mittels Saugsystem gefördert werden, durch die Flexibilität des Förderschlauches (Länge max. 20 m) ist es möglich auch bauliche Hindernisse zwischen Heiz- und Lagerraum zu überwinden. Bei geringen Brennstoffverbrauch bzw. sehr kleinen Anlagen ist auch eine manuelle Beschickung des Vorratsbehälters mit abgesackten Pellets möglich.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 361)



Abbildung 7.2: Pelletslager mit Entnahme über Schrägboden und Entnahmeschnecke

Quelle: WALDHAUSER, s.a., s.p.

7.2.3 Halmgut

Bei Halmgutballen erfolgt das Abladen und die Einlagerung ins Lager meist mit Gabelstaplern oder Radladern bzw. durch Kran (bei sehr großen Anlagen ab ca. 10 MW). Die Auslagerung wird schon bei Anlagen ab etwa 1 MW automatisch mit einem Hallenkran ausgeführt. Bei kleineren Anlagen kommen auch hier Gabelstapler zum Einsatz. Bei automatisch befüllten

Anlagen gibt es meist eine Vorlagestrecke, auf der die Ballen automatisch zur und in die Feuerung bzw. zu einem Ballenauflöser direkt vor der Feuerung befördert werden.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 361)

7.3 Trocknung

Durch Trocknung wird die Lagerfähigkeit von Brennstoffen wesentlich erhöht. Weitere Vorteile sind beispielsweise Heizwertsteigerung (Hu), Gewichtsreduzierung und Qualitätssteigerung des Brenngutes.

(vgl. FNR, 2000, 81)

Die Trocknung kann mit und ohne technische Hilfsmittel zur Belüftung bzw. Beheizung erfolgen. Somit unterscheidet man zwischen einer natürlichen Trocknung (ohne technische Hilfe) und einer Belüftungstrocknung (mit entsprechenden technischen Verfahren).

Organische Stoffe können ohne trocknungstechnische Einrichtungen durch Bodentrocknung, natürliche Konvektionstrocknung oder durch Selbsterwärmung getrocknet werden. Oft werden diese verschiedenen Verfahren auch miteinander kombiniert.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 320)

7.3.1 Bodentrocknung

Das Überstreichen von Trocknungsluft über das am Boden ausgebreitete Trockengut ist das häufigste natürliche Trocknungsprinzip überhaupt. Es ist vor allem in der Halmgutverfahrenstechnik weit verbreitet (z. B. Bodenheutrocknung). Auch Waldrestholz wird hauptsächlich auf diese Weise getrocknet. Frisches Waldholz hat einen durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 45 % (Buche) bis 55 % (Fichte). Wird das Holz im belaubten Zustand gefällt („Sauerfällung“), erfolgt die Austrocknung schneller als nach dem Blattabwurf, da ein großer Teil des Wassers über die Blattmasse abgegeben wird. Im Freien gelagertes Rohholz kann innerhalb eines Jahres auf Wassergehaltswerte von unter 30 % abtrocknen. Unaufbereitetes Nadelholz sollte aber aus forsthygienischen Gründen nicht während der Sommermonate im Wald gelagert werden, da das zur Vermehrung von Borkenkäfern beitragen kann.

Auch Holzhackgut kann per Bodentrocknung getrocknet werden. Bei günstiger Sonneneinstrahlung und sehr geringer Schütthöhe kann bereits innerhalb eines Tages eine Abtrocknung auf Wassergehalte von ca. 30 % erfolgen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 320f)

7.3.2 Trocknung durch Selbsterwärmung

Aufgrund der biologischen Aktivitäten kommt es bei feuchten (frischen) Brennstoffen zu einer Erwärmung im inneren der Schüttung. Durch diese Selbsterwärmung im Brennstoff erhöht sich das Wasseraufnahmevermögen der Luft. Die dadurch entstandene Wärme erzeugt in der Schüttung eine Luftbewegung, so dass kühlere Luft von unten (bei luftdurchlässigen Lagerböden) oder von der Seite nachströmt. Generell ist aber die Trocknung durch Selbsterwärmung ohne aktive Belüftung mit erheblichen Risiken (siehe Kapitel 7.1) verbunden, besonders bei mittel- und feinkörnigen Schüttgut.

Aus diesem Grund kann auf eine aktive Belüftung kaum verzichtet werden. Hierbei wird die feuchte Luft im Brennstoff mit der zugeführten Gebläseluft (kalte Außenluft) abgeführt, wodurch sich der Brennstoff abkühlt und gleichzeitig trocknet.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 322f)

7.3.3 Belüftungstrocknung

Mit steigenden Lufttemperaturen steigt auch die Trocknungsfähigkeit der Außenluft, somit kann eine kontinuierliche Belüftung zur gezielten Trocknung sinnvoll sein. In Witterungsperioden mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit wird die Belüftung unterbrochen, um die Wiederaufeuchtung des Brennstoffs zu verhindern. Um eine optimalen Luftführung in der Schüttung zu erreichen, sollte die Oberfläche möglichst eben sein. Somit werden Unterschiede im Strömungswiderstand minimiert. Die empfohlene Mindestschütthöhe liegt für Hackgut bei ca. 1 m. Die Luftmenge (Belüftungsrate) sollte mindestens $40 \text{ m}^3/\text{h}$ je Kubikmeter Hackgut betragen (ca. $0,1 \text{ m/s}$).

Soll die Trocknung stark beschleunigt werden ist es sinnvoll die Luft vorzuwärmen (z. B. Abwärmenutzung) Hier kommen z. B. Niedertemperaturwärme aus Feuerungsanlagen oder Lüftungswärme aus der Raum- oder Stallbelüftung in Frage.

(vgl. FNR, 2000, 81)

7.3.4 Trocknungseinrichtungen

Meist erfolgt die Trocknung der biogenen Rohstoffe in Kombination mit der Lagerung und Bevorratung. Als ein zeitlich und räumlich von der Lagerung getrennter Verfahrensschritt erfolgt die Trocknung nur in Ausnahmefällen. Solche Verfahren kommen dann in Anwendung, wenn der Brennstoff unmittelbar nach der Trocknung noch weiter aufbereitet wird (z. B. Vermahlen oder Pelletieren).

Die eingesetzten technischen Belüftungs- und Trocknungseinrichtungen arbeiten meist nach dem Durchströmprinzip. Hier wird die Feuchtigkeit aus dem zu trocknenden Gut von der durchströmenden Trocknungsluft, entweder über einen Belüftungsboden oder über spezielle Luftkanäle, aufgenommen und abtransportiert (Konvektion). Man unterscheidet hierbei Systeme mit oder ohne Gutförderung.

(vgl. FNR, 2000, 82)

8. Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften

Biogene Festbrennstoffe werden in sehr unterschiedlicher Qualität und somit mit stark schwankenden Brennstoffeigenschaften angeboten. Durch die ständig steigenden Umwelt- und Technikstandards wird die Sicherung und Verbesserung der Brennstoffqualität in Zukunft immer bedeutender. Qualitätssichernde Maßnahmen werden zugleich durch eine breit angelegte Europäische Normungsaktivität im Bereich der biogenen Festbrennstoffe unterstützt.

(vgl. FNR, 2000, 82)

8.1 Elementarzusammensetzung

Bei der Elementarzusammensetzung unterscheidet man zwischen Hauptelementen, emissionsrelevanten Elementen und Spurenelementen.

8.1.1 Hauptelemente

Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O)

C, H und O sind die Hauptbestandteile von biogenen Festbrennstoffen. Während der Verbrennung oxidiert C und H exotherm und bildet CO_2 und H_2O . Der Gehalt an C und H beeinflusst den Brennwert positiv, der O-Gehalt negativ.

Holzbrennstoffe haben einen höheren Kohlenstoffgehalt als halmgutartige Brennstoffe, was den leicht höheren Brennwert erklärt (siehe Tabelle 8.1).

(vgl. OBERNBERGER, et al. 2006, 975)

Tabelle 8.1: Gehalt an Hauptelementen in naturbelassenen Biomasse-Festbrennstoffen

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

Quelle: FNR, 2000, 83

Die Komponente, durch deren Oxidation die freigesetzte Energie weitgehend bestimmt wird, ist der Kohlenstoff. Weiters liefert der Wasserstoff bei der Oxidation ebenfalls Energie, wobei der Sauerstoff lediglich den Oxidationsvorgang unterstützt.

Kohle-Brennstoffe wie z. B. Stein-, Braun- oder Holzkohle sind ein Ergebnis eines natürlichen oder technischen Inkohlungsprozesses. Im Gegensatz dazu beinhalten biogene Festbrennstoffe den (organischen) Kohlenstoff in teiloxidiert Form mit einem entsprechend hohen

Sauerstoffgehalt, was auch den geringeren Heizwert im Vergleich zu trockener Braun- bzw. Steinkohle (siehe Tabelle 8.2).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 339)

8.1.2 Emissionsrelevante Elemente

Zu den Elementen mit Auswirkung auf den Schadstoffausstoß bei der Verbrennung zählen vor allem der Schwefel-, Stickstoff- und Chlorgehalt sowie der Aschegehalt. Hier kann man verallgemeinernd sagen, dass steigende Gehalte im Brennstoff mit einer Zunahme an Schadstoffen im Abgas verbunden sind. Teilweise unterscheiden sich die emissionsrelevanten Inhaltsstoffe der Brennstoffe erheblich.

(vgl. FNR, 2000, 84)

Stickstoff

Im Vergleich zu anderen Brennstoffen (siehe Tabelle 8.1) haben Nadel- gefolgt von Laubholz die geringsten Stickstoffgehalte (ca. 0,1 bis 0,5 %). Höhere N-Konzentrationen findet man in Rinde, Schlagabraum, Holz aus Kurzumtrieb (Weide und Pappel) und Stroh (Weizen, Roggen und Gerste). Von allen Stroharten hat Raps (gefolgt von Roggen, Weizen und Gerste) den höchsten N-Gehalt. Körner und Gräser haben deutlich höhere N-Gehalte als Holz oder Stroh (Lignozellulose). Stickstoff geht bei der Verbrennung fast vollständig in die Gasphase über und wird deshalb kaum in die Asche eingebunden, deshalb wirkt sich der N-Gehalt im Brennstoff direkt auf die Stickoxid(NO_x)-Bildung aus.

(vgl. OBERNBERGER, et al. 2006, 975)

Schwefel

Da Schwefel ein häufiger Begleitstoff in Düngemitteln ist, ist der Schwefelgehalt bei Feldkulturen deutlich höher als bei ungedüngten Waldflächen bzw. kaum gedüngten schnellwachsenden Hölzern (Kurzumtriebsplantagen). Mit durchschnittlich ca. 0,3 % in der Trockenmasse besitzt Rapsstroh den höchsten Schwefelgehalt, während die meisten Holzbrennstoffe im Bereich von 0,02 bis 0,05 % und Getreidestroh meist unter 0,1 % liegen. Insgesamt weist Biomasse aber eher geringe Schwefelgehalte auf. 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.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 343f)

Chlor

Auch Chlor (Cl), ein bedeutender Begleitstoff in Kalium-Düngemitteln, kommt in Biomassen aus gedüngten Feldkulturen in deutlich höheren Konzentrationen vor als im Holz. So haben Holzbrennstoffe mit ca. 0,005 bis 0,02 % in der TM sehr niedrige Chlorgehalte während der Gehalt im Getreidestroh um ein Vielfaches höher liegt. Durch Niederschläge während der Bodentrocknung kann das Chlor jedoch ausgewaschen werden (von 60 bis 80 %). Aus verbrennungstechnischer Sicht ist deshalb ausgewaschenes „graues“ Stroh gegenüber frischem „gelbem“ Stroh zu bevorzugen. Die Bedeutung des Chlors beruht unter anderem auf dessen Beteiligung an der Bildung von Chlorwasserstoffen (HCl) und Dioxinen/Furanen (PCDD/F). Trotz der hohen Chloreinbindungsraten in die Asche (40 bis 95 %) können die HCl-Emissionen bei bestimmten chlorreichen Brennstoffen (z. B. Getreidestroh) problematisch werden. Außerdem wirkt Chlor im Zusammenspiel von Alkali und Erdalkalimetallen und Schwefeldioxid (SO₂) z. B. an Wärmeübertragerbauteilen stark korrosiv.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 344)

8.1.3 Spurenelemente

Dazu zählen alle verbleibenden Elemente, bei denen es sich hauptsächlich um Schwermetalle handelt. Sie bestimmen im Wesentlichen die Eigenschaften und Nutzungsmöglichkeiten der bei der Verbrennung anfallenden Aschen. Im Allgemeinen sind Holzbrennstoffe aus dem Wald meist höher mit Schwermetallen belastet als jährlich erntbare Kulturen. So nimmt beispielsweise die Rinde von Nadelhölzern bei den meisten Schwermetallgehalten eine Spitzenstellung ein (siehe Abbildung 8.1).

Einige Schwermetalle werden auch als Indikatoren für eine nicht-naturbelassene Brennstoffherkunft verwendet. So lassen sich beispielsweise mit Hilfe von Schnelltestverfahren für Zink und Blei sowie für das Element Chlor in der Asche von Feuerungsanlagen Anhaltspunkte für eine Verwendung nicht-naturbelassener Brennstoffe ableiten. Auch bei Presslingen aus naturbelassenen Holz ist der Nachweis für die Verwendung unbelasteter Rohstoffe dadurch zu erbringen, dass bestimmte Grenzwerte (bei Schwermetallen und anderen Stoffen) nicht überschritten werden dürfen

Schwermetalle beeinflussen primär die Aschequalität, da sie größtenteils in Verbrennungsrückständen zurückbleiben und dadurch deren Verwendbarkeit z. B. als Düngemittel bestimmen. Durch eine getrennte Verwertung bzw. Entsorgung der Bett-, Zyklon-

und Feinstflugaschen können deshalb die Sachstoffeintragsrisiken einer Ascheverwendung als Düngemittel minimiert werden.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 345f)

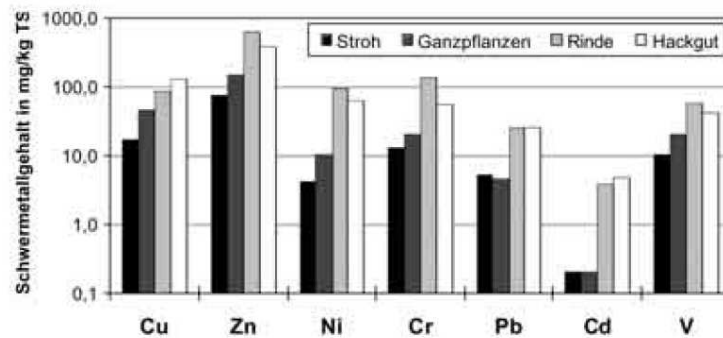


Abbildung 8.1: Gehalte an Schwermetallen in Aschegemischen in Abhängigkeit vom Brennstoff (Rinde und Hackgut: Fichte; Stroh: Winterweizen; Getreide-Ganzpflanzen: Triticale)

Quelle: FNR, 2000, 168

8.2 Brennstofftechnische Eigenschaften

Bei den brennstofftechnischen Eigenschaften handelt es sich um Kenngrößen, welche die Möglichkeiten und Grenzen der thermo-chemischen Umwandlung bestimmen oder dabei eine wichtige Rolle spielen. Neben dem Heiz- und Brennwert zählen hierzu der Wasser- und Aschegehalt sowie das Ascheerweichungsverhalten.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 348)

8.2.1 Heizwert und Brennwert

Heizwert

Der Heizwert (H_u) ist die Wärmemenge, die bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffs ohne Berücksichtigung der Kondensationswärme (Verdampfungswärme) des im Abgas befindlichen Wasserdampfes freigesetzt wird. Es 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 (so genannte „latente Wärme“: 2.44 Kilojoule je Gramm Wasser) nicht genutzt 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 die Kondensation frei werden würde, sinkt der Heizwert mit

zunehmendem Wassergehalt. Würde man die Verdampfungswärme des Wasserdampfes durch Kondensation gewinnen, wäre die abgegebene Wärmemenge etwas höher. Deshalb wurde der Heizwert früher auch als „unterer“ Heizwert (H_u) bezeichnet.

(vgl. FNR, 2000, 86f)

Brennwert

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 Wasserdampfes nutzbar gemacht wird. Dazu müssen die Abgase abgekühlt werden, damit der Wasserdampf kondensieren kann. In der Regel wird der Energieinhalt von Brennstoffen jedoch mit dem Heizwert angegeben.

(vgl. FNR, 2000, 87)

Tabelle 8.2: Verbrennungstechnische Kenndaten von wasserfreier Biomasse ($H_{u(wf)}$)

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.
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

k. A.: keine Angabe

Quelle: FNR, 2000, 86

Heizwert von Biomasse

Der Heizwert eines biogenen Festbrennstoffs wird vom Wassergehalt wesentlich stärker beeinflusst als von der Art der Biomasse. Deshalb wird der Heizwert verschiedener Brennstoffarten stets für absolut trockene Biomasse angegeben und verglichen.

Der Heizwert biogener Brennstoffe bezogen auf die wasserfreie Masse ($H_{u(wf)}$) liegt zwischen 16,5 und 19,0 MJ/kg (siehe Tabelle 8.2). Als Faustregel gilt, dass ca. 2,5 kg luftgetrocknetes Holz in etwa einem Liter Heizöl (ca. 10 kWh bzw. ca. 36 MJ) entsprechen. Nadelholz hat einen ca. 2 % höheren Heizwert als Laubholz. Dieser Unterschied - wie auch der um 2 % höhere Heizwert der Nadelholzrinde - ist auf den höheren Ligningehalt der Nadelhölzer bzw. zum Teil auch auf den erhöhten Gehalt an Holzextraktstoffen (z. B. Harze und Fette) zurückzuführen. Insgesamt haben Holzbrennstoffe gegenüber Halmgütern einen um ca. 9 % höheren Heizwert.

(vgl. FNR, 2000, 86f)

Brennwert von Biomasse

Der Brennwert biogener Festbrennstoffe liegt im Schnitt um ca. 6 % (bei Rinde), 7 % (bei Holz) bzw. 7,5 % (bei Halmgut) über dem Heizwert (siehe Tabelle 8.2). Dies gilt allerdings nur für Festbrennstoffe im absolut trockenen Zustand (d. h. bezogen auf die Trockenmasse). Dieser relative Abstand erhöht sich bei feuchter Biomasse, so dass der durch Rekondensation des entstehenden Wasserdampfes erzielbare Energiegewinn steigt.

(vgl. FNR, 2000, 87)

8.2.2 Wassergehalt und Brennstoff-Feuchte

Der Wassergehalt w wird auf die Frischmasse bezogen und beschreibt das in der feuchten Biomasse enthaltene Wasser. Die feuchte Biomasse wiederum setzt sich aus der trockenen Biomasse (Trockenmasse) m_B und der darin enthaltenen Wassermasse m_W zusammen (siehe Gleichung 8.1).

(vgl. FNR, 2000, 85)

$$w = \frac{m_W}{m_B + m_W} = \frac{u}{1 + u}$$

w ... Wassergehalt, [%]

m_W ... Wassermasse, [kg]

m_B ... trockene Biomasse, [kg]

u ... Brennstoff-Feuchte, [%]

Gleichung 8.1: Wassergehalt (w)

Quelle: FNR, 2000, 85

Im Gegensatz dazu wird die Brennstoff-Feuchte u (oft auch „Feuchtegehalt“ genannt) auf die Trockenmasse bezogen. Sie ist definiert als die im Brennstoff gebundene Wassermasse m_W bezogen auf die trockene Biomasse m_B nach Gleichung 8.2. Hiermit kann die Feuchte in den Wassergehalt umgerechnet bzw. aus ihm berechnet werden. So entspricht z. B. ein Wassergehalt von 50 % ($w = 0,5$) einer Brennstoff-Feuchte von 100 % ($u = 1$).

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

(vgl. FNR, 2000, 85)

$$u = \frac{m_W}{m_B} = \frac{w}{1 - w}$$

u ... Brennstoff-Feuchte, [%]

m_W ... Wassermasse, [kg]

m_B ... trockene Biomasse, [kg]

w ... Wassergehalt, [%]

Gleichung 8.2: Brennstoff-Feuchte (u)

Quelle: FNR, 2000, 85

Wassergehaltseinfluss auf den Heizwert

Wie bereits erwähnt ist der Heizwert stark vom Wassergehalt des Brennstoffes abhängig. Dieser Einfluss des Wassergehaltes auf den Heizwert lässt sich mit Gleichung 8.3 bestimmen. Dabei ist $H_{u(w)}$ der Heizwert der Biomasse in (MJ/kg) bei einem bestimmten Wassergehalt w (in %). $H_{u(wf)}$ ist der Heizwert der biogenen Trockenmasse im „wasserfreien“ (absolut

trockenen) Zustand, und die Konstante 2,443 resultiert aus der Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg (bezogen auf 25 °C).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 352)

$$H_{u(w)} = \frac{H_{u(wf)}(100 - w) - 2,443w}{100}$$

$H_{u(w)}$... Heizwert der Biomasse bei einem bestimmten Wassergehalt w , [MJ/kg]

$H_{u(wf)}$... Heizwert der Biomasse im „wasserfreien“ (absolut trockenen) Zustand, [MJ/kg]

2,443 ... Konstante, resultierend aus der Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg, bezogen auf 25 °C

w ... Wassergehalt, [%]

Gleichung 8.3: Heizwert des Holzes bei einem bestimmten Wassergehalt ($H_{u(w)}$)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 352

Abbildung 8.2 zeigt den Zusammenhang von Wassergehalt bzw. Feuchte und dem Heizwert der Biomasse. So nimmt beispielsweise der Heizwert von Holz (ca. 18,5 MJ/kg) mit zunehmendem Wassergehalt bzw. Brennstoff-Feuchte linear ab. Bei rund 88 % Wassergehalt (ca. 730 % Brennstoff Feuchte) beträgt der Heizwert gleich null.

(vgl. FNR, 2000, 85)

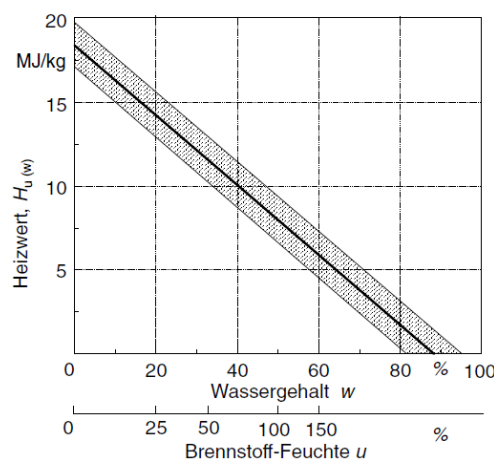


Abbildung 8.2: Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt bzw. der Feuchte

Quelle: FNR, 2000, 85

Typische Wassergehalte von Brennstoffen

Bei luftgetrocknetem Holz oder Stroh wird normalerweise von Wassergehalten zwischen 12 und 20 % ausgegangen (siehe auch Tabelle 8.3). Nach Gleichung 8.3 ergäbe das einen Heizwert zwischen 13 und 16 MJ/kg. Bei waldfrischem Holz, Rinde oder Holz aus Kurzumtrieb

kann der Wassergehalt auch 50 % und mehr erreichen (dementsprechend geringer ist dann der Heizwert).

Bezogen auf die gesamte Masse schwankt der Wassergehalt der Festbrennstoffe zwischen ca. 10 und 65 %. Waldfrisches Holz liegt je nach Baumart, Alter und Jahreszeit zwischen 45 und 60 %. „Luftgetrocknetes“ Holz hat, je nach Jahreszeit, einen Wassergehalt zwischen 12 und 20 %. Normgerechte Holzpresslinge haben einen Wassergehalt von maximal 12 % (DIN-51731) bzw. maximal 10 % (ÖNORM M 7135).

(vgl. FNR, 2000, 85f)

Tabelle 8.3: Verbrennungstechnische Kenndaten von wasserhaltiger Biomasse ($H_{u(w)}$)

	Typ. Wassergehalt	Heizwert ^a		Energiedichte	
	in %	in MJ/kg	in kWh/kg	in MJ/Sm	in kWh/Sm
Waldhackgut (Weichholz ^b)	30	12,4	3,43	3 100	860
Waldhackgut (Hartholz ^c)	30	12,4	3,43	3 960	1 100
Hackgut (Kurzumtriebsplantage ^d)	50	7,1	1,96	2 520	700
Rinde	50	8,1	2,25	2 590	720
Holzpellets	10	16,6	4,60	9 110	2 530
Stroh (Quaderballen)	15	14,4	4,00	2 160	600
Stroh (Häckselgut)	15	14,4	4,00	940	260
Getreideganzpflanze (Quaderballen)	15	14,4	4,00	2 950	820
Wiesenheu (Quaderballen)	15	14,1	4,92	2 720	760
Wiesenheu (Rundballen)	15	14,1	4,92	1 700	470
Heizöl extra leicht	0	42,7	11,86	36 000	10 000
Steinkohle	6	29,7	8,25	25 640	7 120

^a bezogen auf wasserhaltige Biomasse; ^b u. a. Fichte, Tanne; ^c u. a. Buche, Eiche; ^d Pappel, Weide

Quelle: Kaltschmitt und Streicher, 2009, 524

8.2.3 Aschegehalt

Holz (einschließlich Rinde) besitzt mit ca. 0,5 % der Trockenmasse den geringsten Aschegehalt, bei Halmgutbrennstoffen ist er wesentlich höher (siehe Tabelle 8.2). Größere Überschreitungen dieser Werte sind meist auf Sekundärverunreinigungen (z. B. Sand, Erde, Steine u. ä.) zurückzuführen.

(vgl. FNR, 2000, 87)

Bei der Verbrennung von Getreide fallen ca. 2-5 % der Getreidemasse als Asche an, was einem 2- bis 5-fachen Anfall im Vergleich zu naturbelassenen Holz entspricht.

(vgl. HARTMANN, et al., 2007, 12)

Holzpresslinge nach DIN 51731 dürfen einen Aschegehalt von maximal 1,5 % in der Trockenmasse aufweisen. Bei Holzpellets nach ÖNORM M 7135 sind sogar nur maximal 0,5 %

(in Ausnahmefällen bis 0,8 %) Aschegehalt erlaubt. Den höchsten Aschegehalt findet man bei den meisten Halmgutbrennstoffen.

Der Aschegehalt hat sowohl auf die Umweltbelastungen (Schadstoffemissionen) als auch auf die technische Auslegung der Feuerungsanlagen Auswirkungen. Außerdem erhöht sich der Aufwand für die Verwertung bzw. Entsorgung der Verbrennungsrückstände.

Asche besteht hauptsächlich aus Kalzium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K), Phosphor (P) und Natrium (Na). Unter bestimmten Bedingungen kann sie deshalb auch als Dünger eingesetzt werden (siehe Kapitel 10.3).

(vgl. FNR, 2000, 87)

8.2.4 Ascheerweichungsverhalten

Durch die wärmereduzierenden Prozesse bei der thermo-chemischen Umwandlung kann es im Glutbett zu physikalischen Veränderungen der Asche kommen. Je nach Temperaturniveau und Ascheerweichungstemperatur ist ein Verkleben („Versintern“) bis zum völligen Aufschmelzen der Aschepartikel möglich.

Bei Brennstoffen mit niedrigen Ascheerweichungstemperaturen besteht ein hohes Risiko von Anbackungen und Ablagerungen in der Konversionsanlage (z. B. im Feuerraum, am Rost, an den Wärmeübertragungsflächen). Solche Anbackungen (Verschlackung) können u.a. zu Störungen und Betriebsunterbrechungen führen, außerdem begünstigen sie die Hochtemperaturkollision.

Während Holz und Rinde mit ca. 1.300 bis über 1.400 °C Erweichungstemperatur aus technischer Sicht unkritisch sind, liegt die Erweichungstemperatur bei halmgutartigen Brennstoffen fast durchweg unter 1.200 °C. So kommt es bei der Verbrennung zu den beschriebenen Nachteilen. So liegt beispielsweise beim Getreidestroh der häufigste Wert zwischen 900 und 950 °C. Besonders kritisch sind Getreidekörner, deren Ascheerweichungspunkt nur bei ca. 700 °C liegt (siehe Tabelle 8.2).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 362)

Mit dem Einsatz von Zuschlagstoffen kann die Verschlackung verhindert werden. Da die Ascheerweichungstemperatur vom Kalzium-/Kalium-Verhältnis abhängig ist, steigt mit zunehmenden Ca-Gehalten im Brennstoff die Ascheerweichungstemperatur, wodurch die Gefahr der Verschlackung sinkt. Als Zuschlagstoffe kommen Branntkalk, Kalksteinmehl oder andere Alkalien bindende Hilfsstoffe wie Kaolin oder Tonmehl zum Einsatz.

Mineralische Zuschlagstoffe sind nicht brennbar, deshalb erhöht sich die auszutragende Aschemenge entsprechend. Bei üblichen Zuschlagmengen von ca. 0,5-2 Gew.-% ist mit Aschemengensteigerungen von ca. 30-60 % zu rechnen.

(vgl. HARTMANN, 2007, 22f)

8.3 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Die physikalisch-mechanischen Kenngrößen kennzeichnen die Merkmale, die wesentlich durch die Ernte- und Aufbereitungstechnik bestimmt werden. Sie lassen sich durch Parameter wie Größenverteilung der Brennstoffteilchen, Feinanteil, Fließeigenschaften und Brückenbildungsneigung, Schütt- und Lagerdichte beschreiben.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 362)

8.3.1 Größenverteilung und Feinanteil

Neben Partikelform und -größe werden die Fließ-, Transport und Lagereigenschaften von Schüttgütern auch durch die Korngrößenverteilung sowie den Feinanteil (z. B. Abrieb von Pellets) bestimmt. So reicht für die zuverlässige Beurteilung einer Brennstoffcharge von Fein-, Mittel- und Grobhackgut (Nennlänge maximal 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. Tabelle 8.4 zeigt ein solches Klassifizierungssystem.

Auf europäischer Ebene werden derzeit ebenfalls entsprechende Vorschläge erarbeitet, die zu Anforderungsnormen für Holzhackgut gemäß dem in Tabelle 8.4 gezeigten Beispiel führen sollen.

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

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 365f)

Tabelle 8.4: Anforderungen an die Größenverteilung nach der österreichischen Norm für Holzhackgut (ÖNORM M 7133)

	Zulässige Massenanteile und jeweilige Bandbreite für Teilchengröße (nach Siebanalyse)				Zulässige Extremwerte für Teilchen	
	max. 20 %	60–100 %	max. 20 %	max. 4 %	max. Querschnitt in cm ²	max. Länge in cm
		in mm				
G30	> 16	16–2,8	< 2,8	< 1	3	8,5
G50	> 31,5	31,5–5,6	< 5,6	< 1	5	12
G100	> 63	63–11,2	< 11,2	< 1	10	25

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 365

8.3.2 Fließeigenschaften und Brückenbildungsneigung

Bei der Entnahme von Schüttgut (z. B. aus Silos) kann es zum einen zur Bildung von Hohlräumen (Brücken oder Gewölbe) und zum anderen zu einer Schachtbildung kommen. Diese technischen Probleme hängen mit der Fließ- oder Rieselfähigkeit des Brennstoffes zusammen und führen dazu, dass der Brennstoff früher oder später nicht mehr oder nur noch ungleichmäßig in die darunter liegenden Förderaggregate nachrutscht. Diese durch ungünstige Fließeigenschaften hervorgerufenen Probleme nehmen mit dem Wassergehalt, der Schütthöhe und vor allem mit dem Anteil verzweigter oder überlappender Teilchen zu. Gleichmäßige Partikelgrößen und glatte Oberflächen (z. B. Pellets, rindenfreies Hackgut) vermindern dagegen das Brückenbildungsrisiko.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 367)

Tabelle 8.5: Schütt- und Stapeldichten biogener Brennstoffe (mit 15 % Wassergehalt)

Holzbrennstoffe			Dichte in kg/m ³		Halmgutbrennstoffe		Dichte in kg/m ³	
Scheitholz	Buche	445			Rundballen	Stroh	85	
(gestapelt)	Fichte	305				Heu	100	
Hackgut	Weichholz	200			Quaderballen	Stroh, Miscanthus	140	
	Hartholz	280				Heu	160	
						Getreideganzpflanzen	190	
Rinde	Nadelholz	175			Häckselgut	Miscanthus	110	
Sägemehl		160				Getreideganzpflanzen	150	
Hobelspäne		90			Getreidekörner		750	
Pellets		650			Pellets		550	

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 368

8.3.3 Schütt- und Lagerdichte

Insbesondere das erforderliche Lager- und Transportvolumen von Brennstoffen wird von der Schüttdichte bzw. der Stapeldichte (bei stückigen Brennstoffen) bestimmt. Tabelle 8.5 zeigt einige Werte für die bei der Raumbedarfsplanung verwendeten Lagerdichten.

(vgl. FNR, 2000, 89)

9. Thermo-chemische Umwandlung biogener Festbrennstoffe

Die Bereitstellung von End- bzw. Nutzenergie aus biogenen Festbrennstoffen auf Basis einer thermo-chemischen Umwandlung kann entweder direkt durch eine vollständige Verbrennung (z. B. in KLEINFEUERUNGSANLAGEN zur Wärmebereitstellung) oder durch eine vorherige Umwandlung in Sekundärenergieträger, diese werden dann in einem zweiten Schritt (an einem anderen Ort und zu einer anderen Zeit) in End- bzw. Nutzenergie umgewandelt (z. B. Biomethan, Biodiesel), erfolgen.

Ziel einer thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe ist damit die chemische Veränderung der eingesetzten Brennstoffe unter Wärmeeinwirkung zur Bereitstellung von thermischer Energie und/oder veredelten festen, flüssigen oder gasförmigen biogenen Energieträgern. Somit führt die thermo-chemische Wandlung letztendlich immer - wenn auch ggf. über mehrere räumliche und zeitlich entkoppelte Umwandlungsschritte - in eine möglichst vollständige Verbrennung (Oxidation), wobei gasförmige Oxidationsprodukte (Abgase) sowie unverbrennbare mineralische Rückstände (Asche) entstehen.

Diese Umwandlung kann auch nach der Bildung bestimmter (energiehaltiger) Zwischenprodukte, die unter Energieabgabe noch weiter aufoxidiert werden können, unterbrochen werden. Diese Zwischenprodukte bzw. Sekundärenergieträger (z. B. Brenngas, Synthesegas, Pyrolyseöl) können dann - nach einer Reinigung/Stabilisierung - gespeichert, transportiert und zeitlich entkoppelt „weiterverarbeitet“ werden. Was bedeuten soll, dass sie später an einem anderen Ort unter Energieabgabe thermo-chemisch umgewandelt und damit vollständig aufoxidiert werden. Typische Beispiele hierfür sind die Vergasung von Biomasse und die Pyrolyse.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 376)

9.1 Begriffe

Bevor die einzelnen Phasen der thermo-chemischen Umwandlung (Trocknung, pyrolytische Zersetzung, Vergasung und Oxydation) kurz erklärt werden, ist es wichtig einige Begriffe zu definieren.

9.1.1 Luftüberschusszahl (Luftüberschuss, Luftzahl)

Um einen Brennstoff vollständig oxidieren zu können, wird dem Verbrennungsprozess in der Regel Verbrennungsluft im Überschuss zugeführt. Es wird somit mehr Sauerstoff zugeführt, als zur vollständigen Oxidation aller im Brennstoff organischen Bestandteile notwendig wäre.

Diesen Grad des Luftüberschusses beschreibt die Luftüberschusszahl λ (siehe Gleichung 9.1). Sie ist das Verhältnis zwischen der einem Oxydationsvorgang insgesamt zugeführten Luftmenge ($m_{\text{Luft, ges}}$) zu der für die vollständige Oxidation minimal benötigten Luftmenge ($m_{\text{Luft, min}}$).

$$\lambda = \frac{m_{\text{Luft, ges}}}{m_{\text{Luft, min}}}$$

λ ... Luftüberschusszahl,

$m_{\text{Luft, ges}}$... die einem Oxidationsvorgang insgesamt zugeführte Luftmenge, [kg]

$m_{\text{Luft, min}}$... für eine vollständige Oxidation stöchiometrisch erforderliche Mindestluftmenge, [kg]

Gleichung 9.1: Luftüberschusszahl (λ)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 376

Für eine vollständige Oxidation muss die Luftüberschusszahl mindestens eins betragen. Bei einigen Holzfeuerungen liegt sie zwischen 1,5 und 2,5. Wird ein Brennstoff bei Luftüberschusszahlen von weniger eins oxidiert, zur Maximierung der Motorleistung war dieser Zustand früher teils erwünscht (maximale Leistung von Otto-Motoren bei Luftunterschuss), spricht man von einer unterstöchiometrische Verbrennung. Durch die damit entstehenden Emissionen an unverbrannten Bestandteilen ist diese unvollständige Oxidation aus Umweltschutzgründen heute unerwünscht.

Es gibt auch thermo-chemische Prozesse, bei denen die Luftüberschusszahl deutlich kleiner als eins, aber größer als null ist. Bei Festbrennstoffen spricht man dann von Vergasung. Derselbe Begriff wird auch für das Verfahren zur thermo-chemischen Umwandlung eines festen Energieträgers (z. B. Kohle, Biomasse) in einen gasförmigen Brennstoff verwendet.

Bei einer Luftüberschusszahl gleich null (d. h. es wird kein Sauerstoff von außen zugeführt), spricht man von einer pyrolytischen Zersetzung des eingesetzten Festbrennstoffs. Hierbei wird der Brennstoff unter Einwirkung von Wärmeenergie in gasförmige, flüssige und feste Sekundärenergieträger aufgespaltet.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 376f)

Tabelle 9.1: Luftüberschuss, Temperaturbereich und Produktzusammensetzung für thermo-chemische Umwandlungsverfahren

Technischer Prozess	Thermo-chemische Umwandlung	Sauerstoffangebot	Temperatur in °C	Produkte
Verbrennung	A&T, PZ, Vg, Ox	$\lambda \geq 1$	800 – 1 300	heißes Abgas
Vergasung	A&T, PZ, Vg	$0 < \lambda < 1^a$	700 – 900	brennbares Gas
Hydrothermale Vergasung	A&T, PZ, Vg	$0 < \lambda < 1^b$	400 – 700 (200 – 300 bar)	brennbares Gas flüssiger Rückstand
Pyrolyse	A&T, PZ	$\lambda = 0$	450 – 600	brennbares Gas, Pyrolyseöl und -koks
Verkohlung	A&T, PZ	$\lambda = 0$	>500	Holzkohle
Torrefizierung	A&T, PZ	$\lambda = 0$	250 – 300	torrefizierte Biomasse

A&T Aufheizung und Trocknung, PZ pyrolytische Zersetzung, Vg Vergasung, Ox Oxidation
^a Oxidationsmittel ist meist Luft, Sauerstoff (O₂) oder Wasserdampf (H₂O); ^b Oxidationsmittel ist Wasserdampf (H₂O) bei überkritischen Bedingungen

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 377

9.1.2 Verbrennung

Bei der Verbrennung wird Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) unter Energiefreisetzung zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) oxidiert.

Kommt es zu einer vollständigen Oxidation aller oxidierbaren organischen Bestandteile, spricht man von einer vollständigen Verbrennung. Die Luftüberschusszahl muss dabei immer gleich oder größer als eins sein (siehe Tabelle 9.1).

Ist die Luftüberschusszahl jedoch kleiner als eins und größer als null, verbleiben nach Ablauf der Reaktionen noch un- bzw. teiloxidierte Brennstoffmengen wie z. B. Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (C_mH_n) übrig. Diese Stoffe können anschließend (unter Zugabe von Sauerstoff) unter Energieabgabe weiter oxidiert werden. Diese Art der unvollständigen Verbrennung ist beispielsweise bei der Vergasung erwünscht.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 377f)

9.1.3 Vergasung

Wird ein Brennstoff (z. B. Kohlenstoff (C)) unter Zugabe eines Oxidationsmittels (z. B. Luft, Sauerstoff oder Wasserdampf) nicht zu Kohlenstoffdioxid (CO₂), sondern zu Kohlenstoffmonoxid (CO) oxidiert und damit teilverbrannt, spricht man von Vergasung. Bei der Vergasung (auch Teilverbrennung genannt) ist die Luftüberschusszahl kleiner als eins und größer als null (siehe Tabelle 9.1). Mit diesem Verfahren können feste Brennstoffe in einen gasförmigen Sekundärenergieträger umgewandelt werden. Dieses so gewonnene Brenngas kann anschließend unter Energieabgabe weiter oxidiert werden.

Eine Sonderform der Vergasung ist die so genannte hydrothermische Vergasung. Bei diesem Verfahren wird nasse Biomasse zu Wasserstoff (H_2) und/oder Methan (CH_4) umgewandelt. Hier reagieren die organischen Bestandteile der Biomasse mit überkritischem Wasser bei ca. 400 bis 700 °C und Drücken von etwa 200 bis 300 bar, wobei eine vollständige thermo-chemische Umsetzung der organischen Stoffe erreicht wird.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 378)

9.1.4 Pyrolytische Zersetzung

Im Unterschied zur Verbrennung und Vergasung findet bei der pyrolytischen Zersetzung der thermo-chemische Umwandlungsprozess ausschließlich unter Wärmeeinwirkung und ohne zusätzlich zugeführten Sauerstoff (Luftüberschusszahl ist null, siehe Tabelle 9.1) statt.

Bei der pyrolytischen Zersetzung (früher auch Entgasung genannt) werden infolge der dem Brennstoff zugeführten Energie die langkettigen organischen Verbindungen (aus denen z. B. lignozellulosehaltige Biomassen bestehen) in kürzerkettige (normalerweise meist flüssige und/oder gasförmige) Verbindungen aufgespaltet, wobei zusätzlich auch ein fester Rückstand (z. B. Biomassekoks) anfällt. Diese Produkte der pyrolytischen Zersetzung können dann (ähnlich wie die Produkte aus der Vergasung) räumlich und zeitlich entkoppelt ggf. effizienter im Vergleich zu dem ursprünglichen Festbrennstoff energetisch genutzt werden.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 378f)

9.1.5 Verflüssigung

Die Überführung von festen Biobrennstoffen in flüssige Sekundärenergieträger wird im Regelfall mit Hilfe thermo-chemischer Prozesse realisiert (d. h. Kombination aus pyrolytischer Zersetzung, Vergasung und Oxidation) mit dem Ziel einer möglichst großen Ausbeute an flüssigen Sekundärenergieträgern (z. B. Pyrolyseöle, Fischer-Tropsch-Treibstoff, Methanol). Eine solche Verflüssigung kann dabei in einem einzelnen verfahrenstechnischen Schritt (z. B. Flash-Pyrolyse) oder in mehreren Schritten (z. B. Fischer Tropsch-Synthese oder Methanol-Synthese aus Vergasungsprodukten) geschehen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 379)

9.1.6 Verkohlung

Bei dieser thermo-chemischen Umwandlung wird durch eine entsprechende Prozesssteuerung eine vorrangige Bereitstellung fester Produkte (z. B. Holzkohle) angestrebt. Auch bei der

Verkohlung laufen im Grunde die gleichen wärmeinduzierten Vorgänge, insbesondere der pyrolytischen Zersetzung, der Vergasung (in geringem Ausmaß) und der Oxidation, ab.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 379)

9.1.7 Torrefizierung

Die Torrefizierung ist eine „sanfte“ thermische Behandlung biogener Festbrennstoffe, die unter Luftabschluss bei Temperaturen von 250 bis 300 °C und Verweilzeiten zwischen 15 und 30 min geschieht. Die feste Biomasse durchläuft hier zunächst einen Trocknungs- und Aufheizungsschritt. Im Anschluss laufen bestimmte pyrolytische Zersetzungsreaktionen (entsprechend den vergleichsweise geringen Prozesstemperaturen) ab.

Die Torrefizierung dient mehreren Zielen, zum einen wird die Masse der Festbrennstoffe reduziert, ohne dass der Energieinhalt im gleichen Ausmaß vermindert wird. Somit steigt der Heizwert. Möglich ist dies, da neben Wasser zunächst vermehrt sauerstoffhaltige Verbindungen (u. a. CO₂, CO, organische Säuren) mit einem niedrigen Heizwert entweichen.

Andererseits wird der Energieaufwand zur Zerkleinerung der Biomasse stark reduziert. Dies ist beispielsweise bei der Zufeuerung von Kohlestaubfeuerungen maßgebend, wo die Biomasse fein aufgemahlen werden muss. Dies gilt auch bei der Produktion von Pellets, da hier ebenfalls ein feinkörniges Ausgangsmaterial benötigt wird.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 379f)

9.2 Phasen der thermo-chemischen Umwandlung

Wie in Abbildung 9.1 ersichtlich wird der Ablauf der thermo-chemischen Umwandlung in vier Phasen unterteilt. Diese können je nach Umwandlungsprozess sowohl unabhängig voneinander als auch parallel umgesetzt werden. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale dieser Phasen sind die physikalischen und chemischen Reaktionen, das Temperaturniveau und der Anteil des zugeführten Sauerstoffs (Luftüberschusszahl).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 379f)

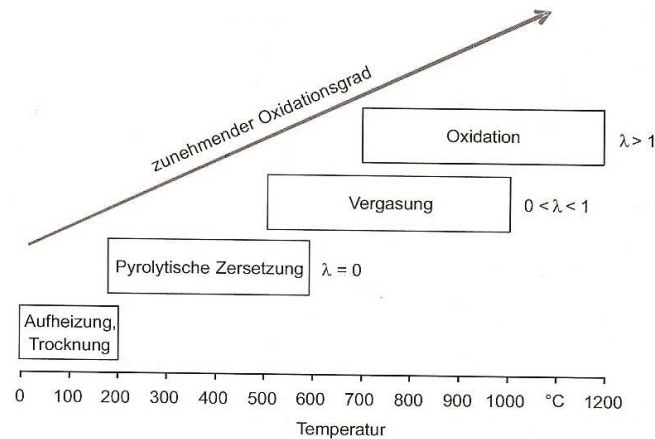


Abbildung 9.1: Phasen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 380

9.2.1 Aufheizung und Trocknung

Während dieser Phase verdampft das in der porösen Struktur der biogenen Festbrennstoffe vorhandene freie und in der organischen Masse gebundene Wasser. Dieser Prozess verläuft endotherm (d. h. er benötigt Energie).

Der Temperaturanstieg des Festbrennstoffes wird durch die hohe Verdampfungsenthalpie des Wassers bis zur vollständigen Trocknung stark gebremst. Die organische Masse wird bei diesen Temperaturen (bis zu ca. 200 °C) kaum zersetzt und bleibt weitgehend erhalten.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 381)

9.2.2 Pyrolytische Zersetzung

Während der pyrolytischen Zersetzung werden die Makromoleküle der Biomasse durch die Wärmeeinwirkung aufgebrochen und irreversibel zerstört. Die pyrolytische Zersetzung der Biomasse, die fast immer unter Ausschluss von Sauerstoff stattfindet (d. h. Luftüberschusszahl gleich null), beginnt bei etwa 200 °C mit der Bildung von Wasser (H₂O), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Methanol (CH₃OH). Im Temperaturbereich von 320 bis 340 °C sind etwa 30 % der Holzsubstanz abgebaut. Hier entstehen weitere Dämpfe an Kohlenstoffverbindungen, die bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck auskondensieren und dann als Pyrolyseöl anfallen. Die organischen Makromoleküle sind ab etwa 500 bis 600 °C aufgespalten, somit entstehen auch bei einer weiteren Erwärmung keine flüssigen und/oder gasförmigen Komponenten.

Durch den Sauerstoffgehalt der Biomasse kann es jedoch zu Sekundärreaktionen der freigesetzten Komponenten untereinander kommen, wodurch weiteres Gas gebildet werden kann.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 382ff)

9.2.3 Vergasung

Die Vergasung ist (wie die pyrolytische Zersetzung) einerseits ein Zwischenschritt, gleichzeitig dient sie zur Erzeugung von Brenn- bzw. Synthesegasen. Diese können räumlich und zeitlich entkoppelt (unter Energiefreisetzung) weiter aufoxidiert werden. Die bei der pyrolytischen Zersetzung entstandenen gasförmigen, flüssigen und festen Produkte werden bei der Vergasung durch weitere Wärmeeinwirkung zur Reaktion gebracht. Dies geschieht bei deutlich höheren Temperaturen in Gegenwart von einem zusätzlich der Reaktion zugeführten Vergasungsmittel (Luft), wobei die Luftüberschusszahl größer als null und kleiner als eins ist.

Hauptaugenmerk bei der Vergasung ist das möglichst vollständige Umwandeln des bei der pyrolytischen Zersetzung zurückbleibenden Restkohlenstoffes (d. h. Pyrolysekoks) in brennbares Gas. Benötigt wird dazu ein sauerstoffhaltiges Vergasungsmittel (z. B. Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid) mit diesem wird der feste Kohlenstoff (C) u. a. zu Kohlenstoffmonoxid (CO) umgewandelt.

Somit liefert die Phase der Vergasung u. a. Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasserstoff (H₂), Methan (CH₄) sowie bei der Vergasung mit Luft auch Stickstoff (N₂).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 382ff)

9.2.4 Oxidation

Die durch die pyrolytische Zersetzung und bei der Vergasung gebildeten Produkte werden bei der Oxidation mit Sauerstoff unter Wärmefreisetzung u. a. zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O) vollständig aufoxidiert. Für eine vollständige Oxidation muss allerdings ausreichend Sauerstoff vorhanden sein (Luftüberschusszahl größer als eins, siehe Abbildung 9.1). Außerdem muss die Temperatur hoch genug sein, die Verbrennungsgase mit der Verbrennungsluft gut vermischt werden und genügend Zeit für den vollständigen Ablauf der Oxidationsreaktionen vorhanden sein.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 397ff)

9.3 Schadstoffbildung

Wird Biomasse verbrannt entstehen luftgetragene Stofffreisetzungen (siehe Abbildung 9.2). Diese werden unterschieden in Stoffe aus vollständiger bzw. unvollständiger Oxydation der Hauptbrennstoffbestandteile und Stoffe aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 407f)

Abbildung 9.2 zeigt das Abbrandverhalten von Holz über Trocknung, Vergasung mit Primärluft und Oxidation der Gase mit Sekundärluft.

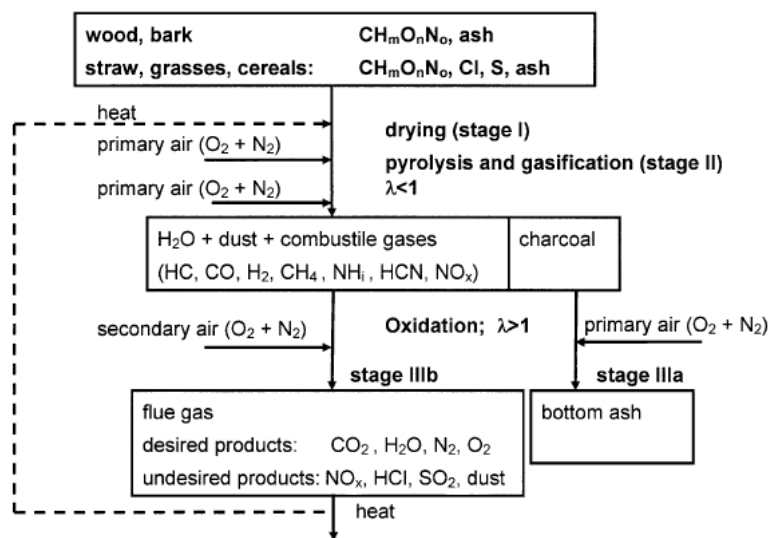


Abbildung 9.2: Abbrandverhalten von Holz

Quelle: OBERNBERGER, et al., 2006, 974

9.3.1 Stoffe aus vollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile

Zu den luftgetragenen Verbrennungsprodukten aus vollständiger Verbrennung der Hauptbrennstoffbestandteile (C, H und O - siehe Kapitel 8.1.1) handelt es sich um Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 407f)

Kohlendioxid (CO₂)

Das eigentliche Ziel der Verbrennung ist die Bildung von CO₂ aus dem in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoff. Somit ist die Freisetzung von CO₂ proportional zur umgesetzten Brennstoffmenge bzw. dem darin enthaltenen Kohlenstoff und damit direkt von der bereitzustellenden Nutzenergie und dem Anlagennutzungsgrad abhängig. Die CO₂-Emissionen können demnach nur durch einen verbesserten Nutzungs- bzw. Wirkungsgrad der

Konversionsanlage verringert werden (bei gleich bleibender Energienachfrage und vorgegebenen Brennstoff).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 408f)

Wasserdampf (H_2O)

Wasserdampf entsteht, wenn der in der Biomasse erhaltene Wasserstoff oxidiert. Zusätzlich verdampft noch das in der organischen Substanz freie und gebundene Wasser.

Wasserdampf ist kein Schadstoff, seine Emissionen sind daher harmlos. Allerdings führt Wasserdampf zu starken Energieverlusten (Verdampfungswärme). Zusätzlich können Energieverluste durch Unterkühlung der Flamme (die Folge sind unvollständige Verbrennungen) bei zu hohem Wassergehalt des Brennstoffes entstehen.

Werden Brennstoffe mit hohen Wassergehalten eingesetzt, empfiehlt es sich die Anlage mit Abgaskondensation auszurüsten. In solchen Anlagen ist es zusätzlich möglich, weitere Abgaskomponenten auszuscheiden. Will man aus der Abgaskondensation Energie gewinnen ist es allerdings Voraussetzung, dass die gewonnene Nutzwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau verwertet werden kann.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 409)

9.3.2 Stoffe aus unvollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile

Bei den Stoffen aus unvollständiger Verbrennung handelt es sich hauptsächlich um Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (C_nH_m , Teere, Ruß), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und unverbrannte Kohlenstoffpartikel (brennbarer Teil der Staubemissionen). Da diese Art von Schadstoffen durch eine entsprechende Verbrennungsführung weitgehend vermieden werden kann ist eine ausreichend hohe Temperatur im Verbrennungsraum, genügend Sauerstoff und eine gute Vermischung der Brenngase mit der Verbrennungsluft sehr wichtig.

(vgl. ACT, s.a., s.p.)

Asche

Der Austrag von un- bzw. teilverbrannten Bestandteilen mit der Asche bzw. Abgas führt zu verminderten Wirkungs- bzw. Nutzungsgraden und zu unerwünschten Schadstoffemissionen. Unverbrannte Stoffe im Abgas bzw. in der Asche sind deshalb durch eine gute Verbrennungsführung so weit wie möglich zu minimieren.

Auch bei einer vollständigen Umsetzung des Brennstoffes (im Glutbett) können hohe Emissionen an Kohlenstoffmonoxid und Kohlewasserstoffen entstehen. Dazu kommt es, wenn beispielsweise die abgegebenen Gase nur ungenügend mit Sekundärluft vermischt oder wenn die benötigten Verbrennungstemperaturen nicht erreicht werden. Ist dies der Fall steigt sowohl der Anteil an Ruß und unverbrannten Kohlenstoff, als auch die Flugaschemenge und deren Kohlenstoffgehalt. Nicht vollständig umgesetzter Brennstoff kann auch mit der Asche ausgetragen werden, dies wäre z. B. bei zu hohen Rostgeschwindigkeiten der Fall. Durch ausreichende Aufenthaltszeit des Brennstoffs im Glutbett, hohe Temperaturen und gute Verteilung der Verbrennungsluft kann im Regelfall ein Ausbrand der Rostasche auf einen Kohlenstoffgehalt von unter als 1 % der Asche erreicht werden. Kommen jedoch Brennstoffe zum Einsatz die zu Versinterung und Verschlackung neigen, wird der Sauerstoffzutritt durch die Bildung einer kompakten Schicht verhindert und die Umsetzung des darunter liegenden Brennstoffes erschwert.

Andere Gründe für erhöhte Kohlenstoffgehalte der Rostasche können ein zu kurzer Rost bzw. zu schnelle bzw. häufige Rostvorschubbewegung oder eine schlechte Durchmischung des Brennstoffes mit Luft in der Ausbrandzone sein. Der Kohlenstoffgehalt in der Flugasche dagegen wird dadurch erhöht, dass die Brennstoffpartikel durch die Primärluft aufgewirbelt und anschließend unverbrannt mit den Abgasen mitgerissen werden.

Im Unterschied zu einer Rost- oder Unterschubfeuerung ist die Verweilzeit der Brennstoffpartikel bei Einblasfeuerungen (bei staubförmigen Brennstoffen) wesentlich kürzer, wodurch ein Großteil der Asche durch die Verbrennung im Flug als Flugasche anfällt. Diese Asche muss mit Abscheidern zurückgehalten werden. Weisen die Brennstoffe zusätzlich ein breites Korngrößenspektrum auf (was oft der Fall ist) kommt es zu unterschiedlich langen Abbrandzeiten was zur Folge hat, dass ein gewisser Anteil der Partikel nicht vollständig ausbrennen kann.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 409ff)

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Ruß

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen bei der Pyrolyse von organischem (ligninhaltigen) Material in den brennstoffreichen Zonen der Flamme. Verbrennen diese aromatischen Kohlenwasserstoffe nicht in der Feuerung (z. B. durch zu niedrige Flammentemperatur) können sie als feinste Partikel im Abgas freigesetzt werden. Diese Partikel, die durch Agglomeration in ihrer Größe immer weiter wachsen können, bezeichnet man als Ruß. Diese Rußpartikel dienen im Abgas als Kondensationskerne für weitere hoch siedende (schwer flüchtige) aromatische Kohlenwasserstoffe. So besteht der

sichtbare Rauch (der beispielsweise bei schlechter Verbrennung von Holz auftreten kann) aus Teilchen von Ruß und darauf kondensierten Teeren (d. h. langkettigen organischen Verbindungen).

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 413ff)

Kohlenmonoxid

Der Luftüberschuss (λ , siehe Kapitel 9.1.1) ist eine wichtige Betriebsgröße, die die Emissionen und den Wirkungsgrad beeinflusst. Für eine vollständige Verbrennung muss die Luftüberschusszahl größer als eins sein, da sonst örtlich nicht genug Sauerstoff für den Ausbrand zur Verfügung steht. Ist die Luftüberschusszahl jedoch zu hoch (über zwei bis drei), so kann es zu einer Kühlung der Flamme durch unnötig zugeführte Luft kommen, wodurch die Verbrennung infolge zu tiefer Temperaturen unvollständig ist.

(vgl. NUSSBAUMER, 2000, 5)

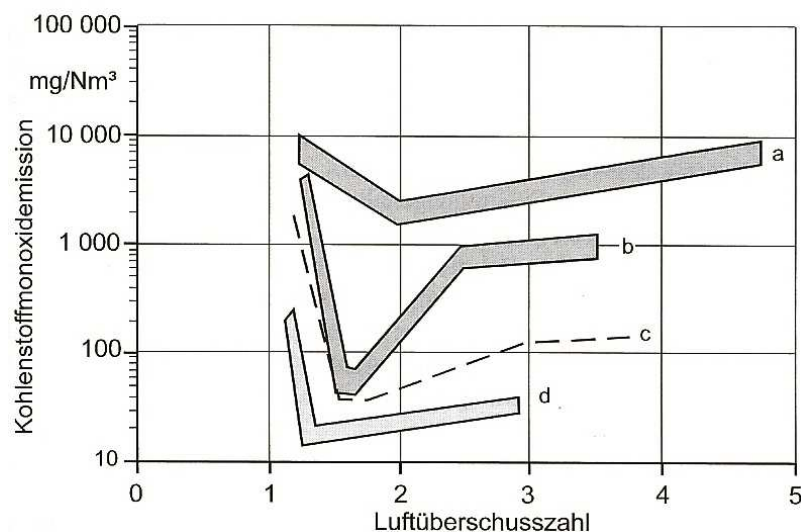


Abbildung 9.3: CO-Emissionen in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl bei 11 Vol.-% Sauerstoff im Abgas (CO/Lambda-Diagramm) für verschiedene Feuerungstechniken (a Einfache handbesockte Holzfeuerung, b Stückholzkessel mit unterem Abbrand, c Automatisch besockte Holzfeuerung mit Verbrennungstechnik - Stand 1990, d Automatisch besockte Holzfeuerung mit optimierter Verbrennungstechnik - heutiger Standard)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 415

Da sich die meisten unvollständig verbrannten Produkte ähnlich verhalten wie Kohlenstoffmonoxid wird CO oft als Indikator der Ausbrandqualität verwendet. Deshalb kann das Verbrennungsverhalten von Feuerungsanlagen auch durch das CO/Lambda-Diagramm

beschrieben werden. Im CO/Lambda-Diagramm (siehe Abbildung 9.3) kann man drei Bereiche am Beispiel eines Stückholzkessels (Kurve b) unterscheiden:

- Ein Bereich mit unvollständiger Verbrennung bei großem Luftüberschuss und tiefer Verbrennungstemperatur ($\lambda > 2,5$).
- Mit sinkendem Luftüberschuss steigt die Verbrennungstemperatur. Die Ausbrandqualität ist jetzt deutlich besser, da Luft und Gase noch ausreichend vermischt werden und Sauerstoff immer noch im Überfluss vorhanden ist. Der CO-Gehalt nimmt in diesem Bereich mit steigender Temperatur ab (infolge der durch die hohe Temperatur begünstigten Verbrennungsreaktionen (bei $1,5 < \lambda < 2,5$)).
- Mit weiter sinkendem Luftüberschuss ($\lambda < 1,5$) treten Zonen mit lokalem Sauerstoffmangel auf, deshalb wird die Verbrennungsqualität drastisch schlechter. Die theoretische Verbrennungstemperatur steigt bis zu einer Luftüberschusszahl von eins weiter an. Der Anstieg der CO-Emissionen in diesem Bereich ist nicht die Folge der unzureichenden Temperatur, sondern der nicht ausreichenden Vermischung der brennbaren Gase mit der Verbrennungsluft.

(vgl. NUSSBAUMER, 2000, 5)

In Abbildung 9.3 ist auch ersichtlich, dass bei kontinuierlich betriebenen Feuerungen der Ausbrand besser beherrscht wird als bei handbeschickten Feuerungen. Außerdem liegt im Vergleich zu handbeschickten Anlagen das Optimum (Minimum) des CO-Wertes bei kontinuierlich betriebenen Feuerungen bei kleineren Luftüberschusszahlen.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 407)

9.3.3 Stoffe aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen

Zu den Stoffen aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen zählen luftgetragene Staub- und Aschepartikel (d. h. nicht-brennbarer Teil der Staubemissionen) sowie Schwermetalle (z. B. Cu, Pb, Zn, Cd), Stickstoffverbindungen (NO, NO₂, HCN, NH₃, N₂O), Schwefel-, Chlor- und Kaliumverbindungen (SO₂, HCl, KCl) sowie Dioxine und Furane.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 407)

Stickstoffoxide

Stickstoffoxide wie NO , NO_2 und N_2O (sie werden als NO_x zusammengefasst und oft auch Stickoxide genannt) bilden sich bei der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen aus dem molekularen Stickstoff der Verbrennungsluft sowie aus dem im Brennstoff gebundenen Stickstoff. Stickstoffoxide tragen zur Bildung von bodennahem Ozon und saurem Regen bei.

NO_x kann grundsätzlich auf drei Arten gebildet werden:

- Thermisches NO_x entsteht bei hohen Temperaturen aus molekularem Luftstickstoff und dem Sauerstoff der Verbrennungsluft. Da thermisches NO_x nur bei sehr hohen Temperaturen (oberhalb von 1.300 bis 1.400 °C, siehe Abbildung 9.4) gebildet wird, läuft dieser Prozess in biomassegefeuerten Anlagen nur in Ausnahmefällen ab.
- Promptes NO_x bildet sich bei Reaktionen von Kohlenwasserstoffradikalen ebenfalls aus Luftstickstoff und Luftsauerstoff. Promptes NO_x wird (wie thermisches NO_x) nur bei sehr hohen Temperaturen gebildet (siehe Abbildung 9.4) und ist deshalb bei Biomassefeuerungen kaum von Bedeutung.
- Brennstoff NO_x entsteht aus dem im Brennstoff (in Form von Aminen und Proteinen) chemisch gebundenen Stickstoff.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 417ff)

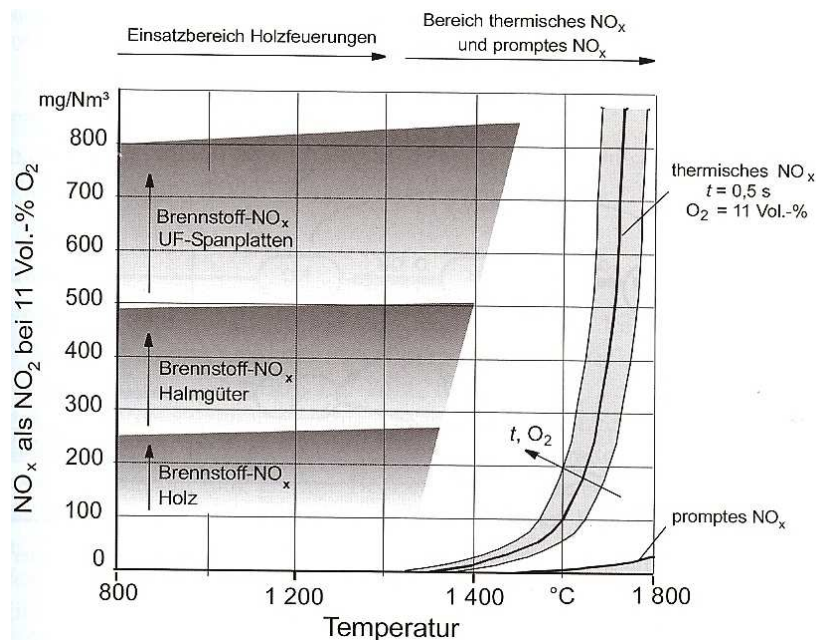


Abbildung 9.4: NO_x Bildung in Abhängigkeit der Feuerraumtemperatur mit typischen Bereichen für Holz, Halmgüter und UF-Spanplatten (Richtwerte)

Quelle: KALTSCHMITT, et al., 2009, 419

Schwefel

Untersuchungen haben ergeben, dass bei der Verbrennung von Hackgut 40 bis 70 % und bei Rinde 60 bis 90 % des Schwefels in die Asche eingebunden werden, bei der Verbrennung von Stroh oder Getreide sind es in etwa 40 bis 55 %. Die Höhe der Schwefeleinbindung in die Asche ist stark abhängig von den Alkali- und Erdalkalimetallkonzentrationen (insbesondere Kalzium) im Brennstoff. Brennstoffe wie Hackgut oder Rinde haben hohe Ca-Gehalte und demzufolge eine hohe Schwefeleinbindung in die Asche.

(vgl. OBERNBERGER, et al. 2006, 978)

Der im Brennstoff enthaltene Schwefel kann nach der Verbrennung entweder in die Asche eingebunden werden (z. B. als CaSO_4 , K_2SO_4) oder mit den Abgasen (als SO_2/SO_3 und als H_2S bei unvollständiger Verbrennung) ausgetragen werden. Durch die geringen Schwefelgehalte biogener Festbrennstoffe (siehe Tabelle 8.1), sind diese Emissionen nur von untergeordneter Bedeutung.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 427)

Chlor

Das besonders in Halmgütern enthaltene Chlor (siehe Tabelle 8.1) liegt nach der Verbrennung hauptsächlich in der Asche in Form von Salzen vor (d. h. Kaliumchlorid (KCl), Natriumchlorid (NaCl). Geringe Anteile können auch als Chlorwasserstoff (HCl) und noch kleinere Mengen als polychlorierte Dioxine und Furane (PCDD/F) und Organochlor-Verbindungen freigesetzt werden. Um Organochlor-Verbindungen weitgehend zu vermeiden ist ein guter Ausbrand und eine gute Vermischung von Luft und Brennstoff sehr wichtig.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 427)

Die Ascheeinbindung von Chlor hängt hauptsächlich von der Konzentration von Alkali- und Erdalkalimetallen sowie Silizium im Brennstoff ab. So haben Untersuchungen ergeben, dass bei Rinde- bzw. Hackgutverbrennungen 40 bis 80 % und bei Stroh- bzw. Getreide (Ganzpflanzen) 80 bis 85 % des Chlors in die Asche eingebunden wird.

(vgl. OBERNBERGER, et al. 2006, 978)

Kalium

Kalium ist ein wesentlicher Bestandteil im Zusammenhang mit der Verschlackung und der Bildung von Ablagerungen und Korrosion bei Feststofffeuerungen. Kalium findet man in Abgasen hauptsächlich in Form von Salzen (KCl , K_2SO_4), wodurch sich eine Nutzung der Asche als Kaliumdünger anbietet.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 427f)

Staubemissionen und Aerosole

Die Verbrennungsabgase von biogenen Festbrennstoffen bestehen nicht nur aus gasförmigen Komponenten, sie enthalten auch flüssige und feste Bestandteile (Aerosole). Die Konsistenz und Größe (von 1 nm bis 100 μm) ist abhängig von der Temperatur, den Partialdrücken der Inhaltsstoffe und dem Alter des Aerosols. Solche Emissionen bilden sich bei vollständiger und unvollständiger Verbrennung, sie entstehen aber auch durch Mitreißen von Partikeln aus dem Brennstoff bzw. der Asche aus dem Brennstoff. Unterschieden wird hier zwischen primären und sekundären Partikeln und Tröpfchen. Während primäre direkt aus Prozessen freigesetzt werden, bilden sich sekundäre erst aus freigesetzten Vorläufersubstanzen (wie SO_2 oder NO_x) durch chemische Reaktionen und/bzw. physikalische Vorgängen in der Atmosphäre

Aerosole aus dem Brennstoff treten auf wenn Teile des Brennstoffs mit dem Gasstrom mitgerissen werden, unverbrannt den Kessel verlassen und in die Atmosphäre gelangen. Die Größe dieser Partikel reicht von 1 μm bis mehrere Millimeter.

Bei Aerosolen aus unvollständiger Verbrennung handelt es sich um bei der pyrolytischen Zersetzung freigesetzte und anschließend nicht vollständig ausgebrannte Kohlenstoffverbindungen. Dazu zählen Fragmente der polymeren Holzbestandteile (Zellulose, Hemizellulose und Lignin) und organische Verbindungen (PAK)

Aerosole aus vollständiger Verbrennung sind anorganische Brennstoffbestandteile, bei Biomassefeuerungen lassen sich folgende Teilchenklassen unterscheiden:

- schwerflüchtige, mineralische Aschebestandteile (z. B. CaO , Al_2O_3 , SiO_2),
- durch Verdampfung und Kondensation oder Neubildung in der Feuerung entstandene Ascheverbindungen (z. B. KCl , K_2SO_4 , Nitrate) und
- Schwermetalle aus der Assimilation der Biomasse oder aus Verunreinigungen (z. B. aus Beschichtungen oder Farben).

Aerosole aus mitgerissenen Aschepartikeln. Das Mitreißen von Aschepartikeln aus dem Glutbett hängt u. a. von der Feuerraum- und insbesondere der Glutzonengestaltung sowie von

den Strömungsverhältnissen in der Glutzone und den eingesetzten Brennstoffen (z. B. Anteil an schwerflüchtigen Bestandteilen wie Sand oder Erde) ab.

Die im Brennstoff enthaltenen Aerosolbildner (u. a. K, S, Cl, Na, Zn, Si und P) werden zu relativ festen Anteilen freigesetzt und tragen wesentlich zu Aerosolbildung bei

Bei der Partikelbildung im heißen Feuerraum liegen zunächst Siliziumoxid (SiO_2), Kalziumoxid (CaO) und Zinkoxid (ZnO) vor, die teilweise direkt (als Feststoffe) aus dem Glutbett herausgerissen werden. Bei ca. 1.050°C kommt es zur Nukleation von Kaliumsulfat (K_2SO_4), das sich an die bereits vorhandenen Partikel anlagert. Bei niedrigeren Temperaturen (ca. 605°C) kondensiert dann Kaliumchlorid (KCl).

Zusammen mit K_2SO_4 macht KCl in etwa 80 bis 90 % der Aerosolanteile aus. Das Verhältnis zwischen KCl und SO_2 ist deshalb von Bedeutung, da es zur Freisetzung von HCl bei der Umwandlung von KCl und SO_2 zu K_2SO_4 kommt. HCl ist stark toxisch und fördert die Hochtemperaturchlorkorrosion.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 430ff)

Dioxine und Furane

Dioxine und Furane sind chlorierte organische Verbindungen mit hauptsächlich anthropogenem Ursprung. Die wichtigsten Quellen für Dioxine und Furane sind Verbrennungsprozesse (insbesondere Abfallverbrennung) sowie die metallverarbeitende Industrie und der Verkehr. Eine gleichzeitige Anwesenheit von Chlor und festem Kohlenstoff in der Verbrennung gilt als eine Voraussetzung zur Bildung chlorierter Dioxine und Furane. Da die Chloranteile in biogenen Festbrennstoffen gering sind (siehe Tabelle 8.1) fallen bei deren Verbrennung nur sehr geringe Mengen von Dioxinen an (zwischen $0,01$ bis $0,2 \text{ ng TE/m}^3_n$ bei 11 Vol.-% O_2). Bei Altholz oder gehärteten Spanplatten (mit Ammoniumchlorid) können auch bei guten Verbrennungsbedingungen merklich höhere Dioxinwerte auftreten. Belastbare Messungen bei anderen chlorhaltigen Brennstoffen liegen nicht vor.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 437ff)

9.4 Techniken zur Emissionsminderung

Wie bereits erwähnt entstehen bei der Verbrennung von Holz drei Gruppen von Emissionen: Emissionen aus vollständiger Oxidation, Emissionen aus unvollständiger Oxidation und Emissionen aufgrund von eingetragenen Substanzen (Spurenelemente bzw. Verunreinigungen).

Zur Minderung dieser Emissionen unterscheidet man zwischen Primär- und Sekundärmaßnahmen. Diese werden im Anschluss kurz betrachtet.

9.4.1 Primärmaßnahmen

Ziel von Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung ist vor allem, einen möglichst vollständigen Ausbrand zu schaffen. Dies kann durch Optimierung der Feuerraumtemperatur ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$), Sicherung einer ausreichenden Verweilzeit der Rauchgase im hohen Temperaturbereich (mindestens zwei Sekunden bei $800\text{ }^{\circ}\text{C}$) und die optimale Vermischung von Verbrennungsluft und Rauchgas erfolgen. Durch die vergleichsweise niedrigen Verbrennungstemperaturen werden bei Holzfeuerungen die Stickstoffoxide vorwiegend aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff gebildet (siehe Stickstoffoxide auf Seite 110). Die wichtigsten Parameter für die Bildung von NO_x sind dabei der Stickstoffgehalt (des Brennstoffes), die Sauerstoffkonzentration im Brennraum und in der Ausbrandzone sowie die Ausbrandqualität der Rauchgase.

Das größte Reduktionspotential liegt hierbei beim Einsatz einer gestuften Zufuhr von Verbrennungsluft, bei der im Brennraum leicht unterstöchiometrisch gefahren wird, um in der Ausbrandzone mittels Sekundärluft überstöchiometrisch einen optimalen Ausbrand zu erhalten. So kann bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz eine Reduktion der Emissionen von bis zu 50 % und bei Altholz bis zu 75 % erreicht werden. Eine Temperaturabsenkung durch Abgasrezirkulation hingegen hat bei gleicher Qualität des Ausbrandes nur einen Einfluss auf die NO_x -Emissionen, hier liegt das Minderungspotenzial bei ca. 10 %.

Das Ziel von Primärmaßnahmen zur Minderung von Dioxin- bzw. Furan-Emissionen (PCDD/F) ist es, die zur Synthese dieser Substanzen nötigen Bedingungen zu vermeiden. Auch können die zur Bildung von PCDD/F nötigen Temperaturen ($250\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) vermieden werden, indem das heiße Rauchgas durch Quenchen diesen Temperaturbereich sehr schnell durchläuft und die Elektroabscheider bei unter $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrieben werden. Die PCDD/F-Synthese kann zudem verhindert werden, wenn man die Mengen der Vorläufersubstanzen reduziert. Die zur Synthese erforderlichen Mengen an Chlor und organischen Verbindungen minimiert man durch einen möglichst geringen Anteil an Chlorverbindungen im Brennstoff und einen möglichst guten Ausbrand.

(vgl. RENTZ, et al., 2002, 255f)

9.4.2 Sekundärmaßnahmen

Bei automatisch beschickten Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung ist die Einhaltung der jeweiligen Emissionsgrenzwerte bisher auch ohne Sekundärmaßnahmen möglich. Bei größeren Anlagen (über 1 MW) sind jedoch oft aufwändigere Abgasreinigungsverfahren erforderlich (strengere Abgasgrenzwerte). Dies gilt besonders für die Verbrennung von Halmgutbrennstoffen, bei denen es aufgrund erhöhter Partikel- bzw. Feinstaubemissionen oft zum Einsatz von Gewebe- oder Elektrofiltern kommt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 437ff)

Partikel- bzw. Staubabscheider

Partikelemissionen können durch Zyklone, Elektrofilter, Gewebefilter oder Rauchgaswäscher aus dem Rauchgas abgeschieden werden.

Die Aufwendungen zur Rauchgasentstaubung sind vom Feuerungstyp und insbesondere von der Brennstoffart abhängig. Entstaubungseinrichtungen, die nach einer Staubfeuerung installiert sind, werden mit beinahe der gesamten im Brennstoff enthaltenen Asche beaufschlagt. Im Unterschied dazu wird bei einer Rost- oder Unterschubfeuerung der grobe Ascheanteil direkt aus der Feuerung ausgeschleust und nur die feinen Partikel (Flugasche) gelangen in den Staubabscheider. Der im Vergleich zu fossilen Brennstoffen hohe Anteil an Alkali- und Chlorverbindungen in biogenen Festbrennstoffen (insbesondere bei Halmgut) führt zur Entstehung von Salzen (K-, Ca-Salze), die feinste Flugaschepartikel ($<1\ \mu\text{m}$) bilden.

(vgl. RENTZ, et al., 2002, 257)

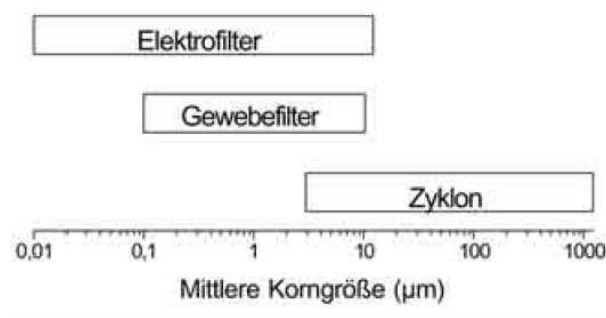


Abbildung 9.5: Einsatzbereich von Staubabscheidern

Quelle: FNR, 2000, 155

Bei Holzfeuerungen liegen rund 95 % der Staubmasse im Bereich der Feinpartikelfractionen (bis $0,4\ \mu\text{m}$ Mobilitätsdurchmesser). Während mit Zyklonabscheidern nur gröbere Partikel

(zwischen 2 μm und $>1.000\ \mu\text{m}$) abgeschieden werden, können Gewebefilter schon Teilchen ab 0,1 μm bis 10 μm und Elektrofilter Partikel zwischen 0,01 μm und 10 μm aus dem Abgas entfernen (siehe Abbildung 9.5).

Der Entstaubungsgrad des Zyklons hängt im Wesentlichen von der Korngröße, der Partikeldichte, der Zyklongeometrie und dem Volumenstrom (mit dem sich die Gasgeschwindigkeit und der Druckverlust des Zyklons ändern) ab. Hinter Zyklonen lassen sich bei Holzfeuerungen Reingasstaubgehalte von zwischen 100 und 150 mg/Nm^3 erreichen.

Einen hohen Abscheidegrad weisen Elektrofilter (auch Elektroabscheider genannt) auf, mit ihnen sind Reingaskonzentrationen zwischen 10 und 50 mg/Nm^3 erreichbar. Bei Holzfeuerungen kommen in der Regel Trockenelektroabscheider zum Einsatz, Nass-Elektroabscheider werden nur in speziellen Fällen eingesetzt. Bei kleineren Anlagen liegt der Nachteil von Elektrofiltern in ihrem enormen Platzangebot (Bauhöhen um die 10 m).

Auch bei Gewebefiltern liegt der Grad der Abscheidung sehr hoch (zwischen 5 und 20 mg/Nm^3) und ist hier im Unterschied zu den Elektrofiltern unabhängig vom Lastzustand der Anlage (Volumenstrom). Als Filtermaterialien kommen bei Holzfeuerungen Polyamide, Polyphenylensulfide, Glasfasern oder PTFE (Teflon) zum Einsatz, was Temperaturen von 150 bis 250 $^{\circ}\text{C}$ erlaubt. Die untere Temperaturgrenze muss eingehalten werden, da es sonst zu Taupunktsunterschreitungen und folglich zum Verstopfen des Filters kommt.

(vgl. RENTZ, et al., 2002, 257f)

Bei der Biomasseverbrennung kommen auch nasse Reinigungsverfahren zur Anwendung. Bei dieser Art der Staubabscheidung wird das Rauchgas durch einen Wäscher geleitet, in dem fein zerstäubtes Wasser im Gegenstrom eingedüst wird. Im Wäscher werden die Staubpartikel mit einer Tröpfchen einer Waschflüssigkeit (die etwa um den Faktor 100 bis 1.000 größer sind) in Kontakt gebracht, an ihnen angelagert und anschließend in einem Tropfenabscheider vom Gasstrom getrennt.

(vgl. FNR, 2000, 158)

Durch Sorptionsmittelzugabe besteht außerdem die Möglichkeit saure Rauchgasbestandteile, Schwermetalle, PAK und PCDD/F auszuscheiden. Dazu werden Sorptionsmittel in den Rauchgasstrom eingedüst, die bereits in der Flugphase (vor allem aber nach Abscheidung an den Gewebefiltern) mit den Rauchgasbestandteilen reagieren. Für die Adsorption saurer Abgasbestandteile (SO_2 , HCl) kommen z. B. Kalziumhydroxid oder Kalziumsilikat und für die Adsorption von Schwermetallen, PAK oder PCDD/F kommt z. B. Aktivkohle zum Einsatz.

Die zur Wärmerückgewinnung eingesetzten Rauchgaskondensationsanlagen können bei feuchten Brennstoffen, evtl. in Kombination mit einer nassen Entstaubung, auch zur Partikelabscheidung gewonnen werden. Hierbei werden die Rauchgase in einem Mulizyklon vorgereinigt, anschließend wird der Wasserdampf (durch Einspritzung einer geringen Wassermenge) zur Wärmeengewinnung kondensiert. Die Staubpartikel wirken hier als Kondensationskeime und werden mit dem Kondensat abgeschieden. Mit diesem Verfahren können Reingasstaubgehalte von 40 mg/Nm^3 erreicht werden. Dieses relativ aufwändige Verfahren sollte nur bei sehr feuchten Biomassen eingesetzt werden, deshalb ist es eher für Hackschnitzelfeuerungen wirtschaftlich. Für einen wirtschaftlichen Einsatz ist außerdem eine sehr niedrige Rücklauftemperatur (ca. 30°C) im Fern- oder Nahwärmesystem Voraussetzung, nur so kann eine möglichst vollständige Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wasser stattfinden.

(vgl. RENTZ, et al., 2002, 258)

NO_x-Minderung

Derartige Maßnahmen funktionieren auf der Zugabe eines stickstoffhaltigen Reduktionsmittels (Ammoniak, Harnstoff, o. ä.), das mit Stickstoffmonoxid zu molekularem Stickstoff (N₂) entweder bei hoher Temperatur oder im Kontakt mit einem Katalysator reagiert.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 543)

Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung können notwendig werden, wenn durch den Einsatz von Span- oder Faserplatten besonders hohe Stickstoffeinträge mit dem Brennstoff zu erwarten sind (was bei manchen größeren Holzfeuerungen zutrifft). Solche Sekundärmaßnahmen sind für Holzfeuerungen derzeit nur bei Großfeuerungsanlagen ($>50 \text{ MW}_{\text{th}}$) Stand der Technik und bei kleinen bzw. mittleren Holzfeuerungen noch nicht ausgereift.

(vgl. RENTZ, et al., 2002, 258)

Da biogene Festbrennstoffe zudem im Verhältnis geringe Stickstoffgehalte haben wird auf die Stickstoffoxidminderung nicht näher eingegangen.

HCl-Minderung

Maßnahmen zur HCl-Reduzierung haben vor allem bei der Verfeuerung von halmgutartigen Brennstoffen (höherer Chlorgehalt) Bedeutung. Chlor findet sich, abzüglich des in der Asche eingebundenen Anteils von 40 bis 80 % bei Hackschnitzel- und Rindenfeuerung und 80 bis 85 % bei Stroh und Ganzpflanzen, in Form von Chlorwasserstoff (HCl) im Abgas wieder. Gängige Verfahren zur HCl-Reduzierung sind die mit Trockensorption kombinierten Feinstaubabscheider oder die Nasswäsche.

Die Trockensorption ist im Vergleich zur Nasswäsche die anlagentechnisch einfachere Methode um HCl-Verbindungen aus dem Rauchgas zu filtern. Hierbei wird dem Rauchgas ein Sorptionsmittel wie Kalziumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) beigemischt. Dieses reagiert mit dem Chlor zu Kalziumchlorid (CaCl_2) und wird anschließend im Filter ausgeschieden. Der Abscheidegrad von HCl bei der Trockensorption beträgt ca. 90 %.

Chlorverbindungen in Form von HCl können auch durch einfache Wäscher aus dem Rauchgas entfernt werden. Hierbei das Abgas im Gegenstrom zum Waschwasser von unten nach oben geführt. Eine Abscheidung von sauren Schadgasen ist ohne Zusatzstoffe möglich, sie kann jedoch durch alkalische Zusätze noch gesteigert werden. In einem Wäscher sind Abscheidegrade bis zu 80 % möglich. Die Reinigung der dabei anfallenden Abwässer beschränkt sich meist auf eine Neutralisation.

Bei einer Kombination von Filter und einem nachgeschalteten Wäscher, in dem nur noch die sauren Rauchgasbestandteile abgefangen werden, ist auch ein Betrieb ohne Abwasser möglich. Das salzhaltige Abwasser wird dabei in einem Sprühtrockner vor dem Filter verdampft wobei die gelösten Salze als Feststoff anfallen und abgeschieden werden.

(vgl. FNR, 2000, 159f)

10. Feste Verbrennungsrückstände

Der Aschegehalt biogener Festbrennstoffe liegt zwischen 0,5 Gew.-% der TM für Weichholz und 5 bis 8 Gew.-% der TM für Rinde (siehe Abbildung 10.1). Altholz und Halmgüter haben wesentlich höhere Werte mit 5 bis 12 Gew.-%. Zusätzlich zu den mineralischen Bestandteilen kann die Asche aus Biomassefeuerungen noch am Brennstoff anhaftende Verunreinigungen (z. B. Steine, Sand u. ä.) und organische Bestandteile (z. B. unvollständig verbranntes Holz

und Ruß) sowie bei der Verbrennung von Altholz evt. auch Metallteile und andere Verunreinigungen enthalten.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 382)

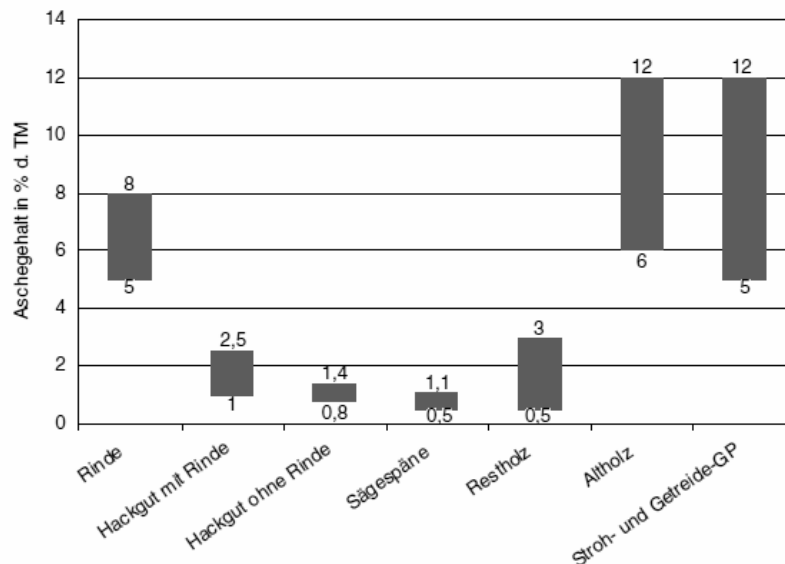


Abbildung 10.1: Aschegehalte verschiedener Biomasse-Brennstoffe (bei Hackgut und Spänen gelten die unteren Werte für Weichholz, die oberen für Hartholz)

Quelle: FNR, 2000, 163, verändert

10.1 Aschefraktionen

Bei Kleinanlagen (ohne Entstaubungseinrichtungen) setzt sich die Asche i. Allg. aus einer, in größeren Biomassefeuerungen normalerweise drei verschiedenen Fraktionen zusammen:

- Grob- oder Rostasche (Bottom ash) fällt im Verbrennungsteil überwiegend als mineralischer Rückstand der eingesetzten Biomasse an. Sie besteht meist aus der in der Biomasse enthaltenen Verunreinigungen (z. B. Sand, Steine, Erde) sowie bei Wirbelschichtfeuerungen aus Teilen des Bettmaterials (z. B. Quarzsand). Zusätzlich können, speziell beim Einsatz von Rinde und Stroh, gesinterte Ascheteile und Schlackebrocken in der Grobasche enthalten sein.
- Zyklonasche (Coarse fly ash) besteht aus in den Abgasen mitgeführten feinen Partikeln. Diese festen (überwiegend anorganischen) Brennstoffbestandteile fallen als Stäube im Wendekammer- und Wärmeübertragerbereich der Feuerung sowie in dem Kessel nachgeschalteten Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) an.

- Feinstflugasche (Fine fly ash) ist die in den Gewebe- oder Elektrofiltern (bzw. als Kondensatschlamm in Abgaskondensationsanlagen) anfallende Aschefraktion.

(vgl. KALTSCHMITT UND STREICHER, 2009, 382)

Tabelle 10.1: Anteile der einzelnen Aschefraktionen an der Gesamtasche

Fuel/Ash fraction	Bark	Wood chips % w/w, d.b.	Straw
Bottom ash	65 – 85	60 – 90	80 – 90
Coarse fly ash	10 – 25	10 – 30	2 – 5
Fine fly ash	2 – 10	2 – 10	5 – 15

Quelle: OBERNBERGER UND SUPANCIC, 2009, s.p.

Tabelle 10.1 zeigt die Anteile (in % der Trockenmasse) der verschiedenen Aschefraktionen an der Gesamtasche. Die Angaben für Rinde und Hackgut gelten dabei für Rost- bzw. Unterschubfeuerungen und die Angaben für Stroh gelten für Zigarrenbrenner, wobei alle Anlagen mit nachgeschaltetem Zyklon- und Feinstaubabscheider ausgestattet sind.

10.2 Aschezusammensetzung

Die aus der Verbrennung unbehandelter Biomasse entstehende Asche weist hohe Nährstoffgehalte auf (vor allem an K, P, Mg und Ca). Die Rückführung bzw. Ausbringung von Asche auf land- und forstwirtschaftliche Flächen kann deshalb wesentlich zu einer Schließung der Mineralienkreisläufe beitragen. Allerdings enthält Asche aus Biomasse auch hohe Konzentrationen an Schwermetallen. Tabelle 10.2 und Tabelle 10.3 zeigen die durchschnittlichen Nährstoff- und Schwermetallkonzentrationen in den einzelnen Aschefraktionen (Festbettfeuerung) bei Hackgut- und Strohfeuerungen. Die Ausbringung als Dünger ist daher nur unter bestimmten Bedingungen erlaubt (siehe Kapitel 10.3.1).

(vgl. OBERNBERGER UND SUPANCIC, 2009, s. p.)

Tabelle 10.2: Durchschnittliche Nährstoff und Schwermetallgehalte in Aschefractionen von Hackschnitzelfeuerungen

<u>Explanations: BA... bottom ash, CFA coarse fly-ash, FFA ... fine fly ash</u>			
Parameter	BA	CFA	FFA
CaO [% TS]	46.0	46.8	18.1
MgO [% TS]	7.6	7.1	2.8
K ₂ O [% TS]	6.1	6.2	22.0
P ₂ O ₅ [% TS]	2.2	2.5	0.4
Cu [mg/kg]	147.7	195.4	174.6
Zn [mg/kg]	452.9	2,464.3	5,849.8
As [mg/kg]	5.8	9.2	31.5
Ni [mg/kg]	56.6	89.1	67.8
Cr [mg/kg]	168.3	140.7	116.0
Pb [mg/kg]	15.4	70.5	258.8
Cd [mg/kg]	2.0	20.9	32.9

Tabelle 10.3: Durchschnittliche Nährstoff und Schwermetallgehalte in Aschefractionen von Strohfeuerungen

<u>Explanations: BA... bottom ash, CFA coarse fly-ash, FFA ... fine fly ash</u>			
Parameter	BA	CFA	FFA
CaO [% TS]	7.9	3.7	1.2
MgO [% TS]	4.4	1.9	0.7
K ₂ O [% TS]	14.3	10.1	48.2
P ₂ O ₅ [% TS]	2.2	1.4	1.2
Cu [mg/kg]	17.0	13.6	44.0
Zn [mg/kg]	75.0	77.0	520.0
As [mg/kg]	<5.0	27.9	22.0
Ni [mg/kg]	4.0	11.9	<2.5
Cr [mg/kg]	13.5	9.1	6.8
Pb [mg/kg]	5.1	11.4	80.0
Cd [mg/kg]	0.2	0.8	5.2

Quelle: OBERNBERGER UND SUPANCIC, 2009, s.p.

Deutlich ersichtlich sind hier die signifikanten Unterschiede der Nährstoff- bzw. Schwermetallgehalte in den einzelnen Fraktionen. Es zeigt sich auch, dass der Gehalt an flüchtigen Schwermetallen (insbesondere Zn, Pb und Cd) von der Grob- bis zur Feinstflugasche deutlich zunimmt. Cadmium gefolgt von Zink sind die problematischsten Schwermetalle in Biomassefeuerungen. Nach dem jetzigen Stand der Technik werden in der Feinstflugasche, sie macht in etwa 2 bis 15 % der Gesamtasche aus (siehe Tabelle 10.1), ca. 25 bis 65 % des im Brennstoff enthaltenen Cadmiums gebunden, bei Zink sind es ca. 55 bis 55 %.

(vgl. OBERNBERGER UND SUPANCIC, 2009, s. p.)

10.3 Ascheverwertung

Wie bereits erwähnt können Aschen aus Biomassefeuerungen aufgrund ihrer hohen Nährstoffgehalte zur Düngung bzw. Bodenverbesserung in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt werden. Andere Möglichkeiten der Verwertung bzw. Entsorgung sind:

- Verwendung im Straßenbau (z. B. Rostasche als Kiesersatz)
- Verwendung im Landschaftsbau, hier macht man sich den hohen CaO-Gehalt und somit den hohen pH-Wert zu Nutze (z. B. als Kalkersatz/Bindemittel zur Bodenverdichtung oder zu Rekultivierungsmaßnahmen)
- Industrielle Nutzung (z. B. als Substitute bzw. Additive in der Zement bzw. Baustoffindustrie)
- Deponierung

Zusammenfassend lassen sich für Österreich folgende Grundsätze zur Verwertung von Pflanzenaschen aus unbehandelter Biomasse auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen ableiten:

- Zur Schließung des Mineralstoff- bzw. Nährstoffkreislaufes sollte Grobasche oder eine Mischung aus Grob- und Zyklonasche auf land- bzw. forstwirtschaftliche Flächen zurückgeführt werden (siehe Abbildung 10.2).
- Die Feinflugasche (die kleinste und die am höchsten mit Schwermetallen belastete Aschefraktion) sollte, wenn möglich, industriell verwertet werden. Ist dies nicht möglich ist die Feinflugasche zu deponieren.
- Die ökonomisch und ökologisch effizienteste Trennung ist jene zwischen Zyklon- und Feinstflugasche. Dazu sollten Biomasseheizwerke einem dem Multizyklon nachgeschalteten Feinstaubabscheider ausgestattet sein um eine getrennte Sammlung der einzelnen Aschefraktionen zu ermöglichen.
- Nur Asche aus der Verbrennung von naturbelassenen biogenen Brennstoffen darf zur Düngung- bzw. Bodenverbesserung verwendet werden. Asche aus der Verbrennung von Altholz oder chemisch behandeltem Holz dürfen aufgrund ihrer hohen Schwermetallgehalte nicht ausgebracht werden.
- In den späten 1990er Jahren erließ der Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz (Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) auf Basis von 4-jährigen Ausbringungsversuchen Richtlinien für den fachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen auf land- und forstwirtschaftliche Flächen. Diese Richtlinien enthalten Grenzwerte für Schwermetallkonzentrationen, maximale Aufbringungsmengen (in Abhängigkeit vom Schwermetallgehalt der Asche), allgemeine Rahmenbedingungen sowie Empfehlungen für eine sachgerechte Nutzung von Pflanzenaschen.

(vgl. OBERNBERGER UND SUPANCIC, 2009, s. p.)

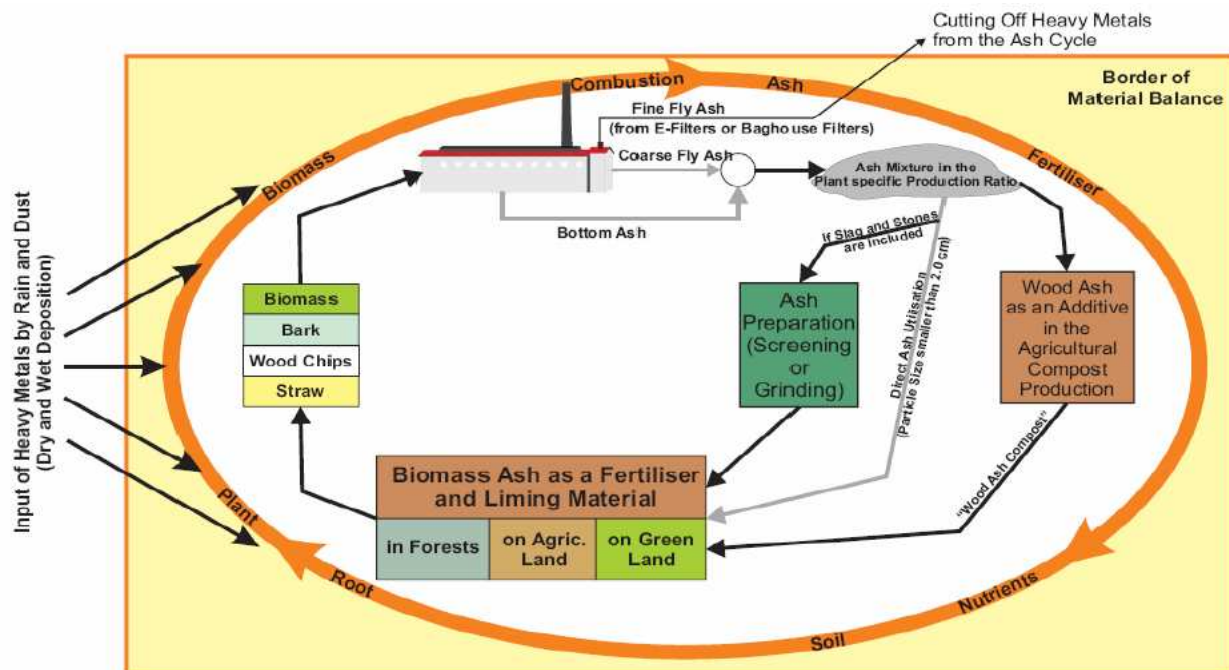


Abbildung 10.2: Prinzipien zur nachhaltigen Nutzung von Biomasseaschen

Quelle: Obernberger und Supancic, 2009, s.p.

10.3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Deutschland

In Deutschland können Holzaschen entweder als selbständige Düngemittel oder als Zuschlag zu anderen Düngemitteln bzw. deren Ausgangsstoff verwendet werden. Düngemittel aus Holzaschen bzw. teilweise aus Holzaschen hergestellte Düngemittel dürfen allerdings bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten (siehe Tabelle 10.4).

Ausgenommen von dieser Regelung sind ausschließlich auf forstliche Flächen ausgebrachte und entsprechend gekennzeichnete Holzaschen, hier müssen keine Grenzwerte eingehalten werden. Eine Rückführung von Zyklon- und Feinstflugaschen ist nicht erlaubt. Der Nährstoffkreislauf aus dem Wald soll so geschlossen und durch das Verbot der Rückführung von Zyklon- und Feinstflugasche (schadstoffreichere Aschefractionen) eine Entnahme der Schadstoffe aus dem Kreislauf erreicht werden.

Neben der Düngemittelverordnung (DüMV) müssen abhängig von der geplanten Verwertung auch das Forstrecht (Aufbringung von Holzasche im Wald) oder das Düngemittelrecht und die Düngeverordnung (bei Holzascheverwertung in der Landwirtschaft) beachtet werden. Auch ist eine Zugabe von Holzasche zu Bioabfällen laut Bioabfallverordnung (BioAbfV) prinzipiell zulässig, solange sie einem nach Düngemittelverordnung (DüMV) zugelassenen Düngemittel

entsprechen. Allerdings sind Holzaschen nicht ausdrücklich in der Bioabfallverordnung (BioAbfV) angeführt.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 459)

Tabelle 10.4: Grenzwerte für Nährstoff- und Schwermetallgehalte in Biomasseaschen für die Nutzung auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen in Deutschland, Österreich, Dänemark, Schweden und Finnland

Explanations: Germany: only bottom ash may be used as a fertiliser; limits are not relevant for wood ash which is solely recycled to forest land. Denmark: left Cd limit for straw ash/right Cd limit for wood ash; the limit for Ni is 30 mg/kg, between 30 and 60mg/kg a reduced ash quantity can be applied. Sweden: limits only valid for the application on forest soils. Finland: left values for application on agricultural soils/right values for application on forest soils

	Germany	Austria in g/kg (nutrients) and mg/kg (heavy metals)	Denmark	Sweden	Finland
Nutrients (min.)					
Ca				125	80/60
K				30	K+P 20/10
Mg				15	
P				7	K+P 20/10
Zn				0.5	
Heavy Metals (max.)					
As	40	20		30	25/30
B				800	
Cd	1.5	8	5/15	30	1.5/17.5
Cr _(tot.)		250	100	100	300
Cu	70	250		400	600/700
Hg	1.0		0.8	3.0	1.0
Ni	80	100	30/60	70	100/150
Pb	150	100	120	300	100/150
Tl	1.0				
V		100		70	
Zn	1.000	1.500		7.000	4.500

Quelle: Obernberger und Supancic, 2009, s.p.

Österreich

Die Verwertung von Holzasche ist in Österreich nur in der Kompostverordnung gesetzlich geregelt. Die Zuschlagsmenge darf dabei aber 2 Gew.-% nicht übersteigen. Auch in Österreich ist eine Rückführung von Feinstflugasche auf Böden nicht erlaubt.

Als Düngemittel sind Holzaschen in Österreich nicht zugelassen, da ihre Zusammensetzung je nach eingesetztem Brennstoff relativ starken Schwankungen unterworfen ist. Aus diesem Grund wurden Richtlinien für den sachgerechten Einsatz von Biomasseaschen auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen erarbeitet, die bestimmte Grenzwerte für Holzaschen enthalten (siehe Tabelle 10.4). Bei Einhaltung dieser Grenzwerte ist ein Einsatz von Grobaschen sowie Gemische aus Grob- und Zyklonasche zur Düngung und Bodenverbesserung (z. B. zur Anhebung des pH-Wertes saurer Böden) zulässig. Die Richtlinien beinhalten auch Ausbringungsverbote und -beschränkungen für sensible Gebiete (z. B. Natur- und Wasserschutzgebiete), sowie Richtlinien und Empfehlungen für die korrekte Art der Ascheausbringung.

(vgl. KALTSCHMITT, et al., 2009, 459f)

11. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Deckung der ständig steigenden Nachfrage an Strom bzw. Wärme haben Biomasse bzw. biogene Festbrennstoffe in der öffentlichen Diskussion zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie stellen sowohl national als auch international einen der wesentlichen Hoffnungsträger unter den regenerativen Energien dar.

Unter dem Begriff Biomasse versteht man laut ÖNORM M 7101 alle organischen Stoffe biogener (nicht fossiler) Art. Demnach ist Biomasse im Grunde chemisch gebundene Sonnenenergie. Die Pflanzen wandeln bei der Photosynthese das Sonnenlicht und das aus der Luft gebundene CO₂ in organische Substanz um. Diese gespeicherte Energie wird bei der Verbrennung wieder freigesetzt. Biomasse verbrennt CO₂-neutral, da nur so viel Kohlenstoffdioxid entsteht, wie die Pflanze während ihres Wachstums aufgenommen hat.

Haupteinflussfaktoren zur Bildung von Biomasse sind die gegebenen Standortfaktoren wie Sonneneinstrahlung, Wasserangebot, Temperatur, Bodenbeschaffenheit und Nährstoffangebot, zusätzlich spielen bei der Pflanzenproduktion noch pflanzenbauliche Maßnahmen eine wesentliche Rolle.

Land- und forstwirtschaftliche Flächen sind die Grundlage zur Biomasseproduktion. Die Grünlandflächen sind in Österreich ziemlich gleichmäßig verteilt, wobei in den gebirgigeren Bundesländern wie Tirol, Salzburg, Kärnten und der Steiermark der Anteil von extensivem Grünland im Verhältnis höher ist als in den anderen Bundesländern. Im Gegensatz dazu sind die Ackerflächen sehr ungleichmäßig verteilt. Die Hälfte aller Ackerflächen Österreichs liegt alleine in Niederösterreich, während es in Salzburg, Tirol, Vorarlberg und Wien kaum Ackerflächen gibt. Im Großen und Ganzen lässt sich feststellen, dass die landwirtschaftliche Biomasse sehr stark auf die östlichen Bundesländer konzentriert ist, während bei der Flächenverteilung der forstlichen Biomasse keine ausgeprägten Unterschiede festzustellen sind. Die historischen Daten zur Flächenverteilung zeigen, dass bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen seit 1960 ein deutlicher Rückgang festzustellen ist, während bei den forstwirtschaftlich genutzten Flächen ein leichter Anstieg zu beobachten ist.

Laut ÖWI 2000/2002 beträgt Österreichs Waldfläche 3,96 Mio. ha, das entspricht etwa 47,2 % der Staatsfläche. Die jährliche Waldnutzung beträgt laut ÖWI 2000/2002 nur ca. zwei Drittel des Zuwachses. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass maximal 85 % des jährlichen Zuwachses als nutzbar betrachtet werden können. Berücksichtigt man zusätzlich diverse Restriktionen, könnte man etwa 80 % des gesamten jährlichen Zuwachses nutzen.

Die zur Erzeugung von Energiepflanzen genutzten Flächen wurden im Jahr 2006 auf ca. 50.000 ha geschätzt. Auf dem Großteil dieser Flächen wuchsen Pflanzen zur Produktion von Biogas

(hauptsächlich Maissilage), gefolgt von Ölsaaten zur Produktion von Pflanzenöl und Biodiesel. Derzeit nehmen der Anbau von Miscanthus und Energieholz sowie die energetische Nutzung von Stroh noch eine untergeordnete Rolle ein.

Die Unterteilung der Energiepflanzen erfolgt anhand ihrer verschiedenen Nutzungseigenschaften, und zwar in Lignozellulose-, Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen. Während Lignozellulosepflanzen als Ganzpflanzen (und deren bei der Ver- und Bearbeitung anfallenden Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle) zur Festbrennstoffbereitstellung dienen, sind Öl-, Zucker- und Stärkepflanzen erst nach der technischen Gewinnung des Öls bzw. des Ethanol zum Einsatz als Energieträger geeignet. Zu den Lignocellulosepflanzen gehören schnellwachsende Baumarten (Pappel, Weide, Robinie etc.), Miscanthus, Futtergräser (Weidelgras, Knautgras, Glatthafer etc.) und Getreideganzpflanzen (Weizen, Roggen, Triticale). Unter Nebenprodukten, Rückständen und Abfällen versteht man jene Stoffe organischer Herkunft, die bei der Herstellung bestimmter (Haupt-)Produkte aus land und/oder forstwirtschaftlichen Ausgangsmaterialien anfallen und als Energieträger nutzbar sind. Dazu zählen Durchforstungs- und Waldrestholz, Industrie- und Sägerestholz, Landschaftspflegeholz und Stroh.

Bei der Holzernte fallen sowohl im Wald als auch auf den Kurzumtriebsplantagen die gleichen Arbeitsschritte an. Dazu zählen das Fällen (d. h. Trennen der Stämme vom Stock), Vorkonzentrieren (d. h. Zusammenfassen bzw. Sammeln der Holzmasse), Rücken (d. h. Transportieren des Holzes vom Fällort zum Feldrand) und ggf. Hacken (d. h. Zerkleinern des Holzes zu Hackgut. Diese Teilaufgaben können entweder kombiniert (Vollernteverfahren) oder in mehreren getrennten Arbeitsgängen erledigt werden.

Sowohl bei Erntegut von forstwirtschaftlichen Flächen (Holz) als auch von landwirtschaftlicher Biomasse (Mähgut) handelt es sich um ein Zwischenprodukt, das in der Regel anschließend mechanisch aufbereitet bzw. weiterverarbeitet wird (zu Stückgut, Hackgut, Briketts, Pellets, Ballen, etc.). Dies ermöglicht eine Anpassung der Biomassenmerkmale an die Anforderungen der jeweiligen Konversionsanlagen. Bei der mechanischen Aufbereitung werden die physikalischen bzw. mechanischen Eigenschaften der Biomasse (Abmessungen, Schüttdichte, Feinanteil, Größenverteilung und Abriebfestigkeit) beeinflusst und es kommt dadurch zu Qualitätsverbesserungen des Brennstoffes. Bei der Aufbereitung unterscheidet man zwischen Scheitholzbereitung (für handbeschickte Kleinfeuerungsanlagen - „ofenfertig“), Hackgut- und Schreddergutbereitung (zur Herstellung von groben bzw. feinen Schüttgut), Ballenauflöser (um den Brennstoff in eine dosierfähige Form zu überführen), Sieben und Sortieren (zur Vereinheitlichung der Korngröße und der Ausscheidung von Fremdstoffen) und Pressen (durch die Pressung zu Pellets bzw. Briketts wird ein Höchstmaß an Homogenität bezüglich der physikalisch-mechanischen Merkmale erreicht).

Die größten Probleme bei der Lagerung von Biomasse sind der Substanzabbau und die Pilzsporenbildung, hervorgerufen durch einen zu hohen Wassergehalt des gelagerten Gutes. Werden die biologischen Aktivitäten (Substanzabbau, Pilzsporenbildung, etc.) beispielsweise durch Trocknung unterbunden, ist es möglich Biomasse auch über längere Zeit ohne nennenswerte Qualitäts- bzw. Substanzverluste zu lagern. So sind beispielsweise Pellets (durch den geringen Wassergehalt von unter 12 % entsprechend ÖNORM M 7135 1998) problemlos über lange Zeit lagerfähig.

Je nach Elementarzusammensetzung, bei der man zwischen Hauptelementen (C, H und O), emissionsrelevanten Elementen (N, S, und Cl) und Spurenelementen (hauptsächlich Schwermetalle) unterscheidet, weisen biogene Festbrennstoffe große Schwankungen hinsichtlich ihrer Brennstoffeigenschaften (Heiz- bzw. Brennwert, Wasser- und Aschegehalt, Ascheerweichungsverhalten etc.) auf. Diese brennstofftechnischen Eigenschaften bestimmen die Möglichkeiten und Grenzen der thermo-chemischen Umwandlung. Im Gegensatz dazu kennzeichnen die physikalisch-mechanischen Kenngrößen (Größenverteilung der Brennstoffteilchen, Feinanteil, Fließeigenschaften, Schütt- und Lagerdichte) die Merkmale, die wesentlich durch die Ernte- und Aufbereitungstechnik bestimmt werden.

Die Bereitstellung von End- bzw. Nutzenergie aus biogenen Festbrennstoffen auf Basis einer thermo-chemischen Umwandlung kann entweder direkt durch eine vollständige Verbrennung oder durch eine vorherige Umwandlung in Sekundärenergieträger erfolgen. Ziel ist dabei die chemische Veränderung der eingesetzten Brennstoffe unter Wärmeeinwirkung zur Bereitstellung von thermischer Energie und/oder veredelten festen, flüssigen oder gasförmigen biogenen Energieträgern. Die thermo-chemische Umwandlung führt also letztlich immer - wenn auch ggf. über mehrere räumlich und zeitlich entkoppelte Umwandlungsschritte - in eine möglichst vollständige Verbrennung (Oxidation), wobei gasförmige Oxidationsprodukte (Abgase) sowie unverbrannte mineralische Rückstände (Asche) entstehen.

Bei der Verbrennung von Biomasse, die in vier Phasen (Aufheizung/Trocknung, pyrolytische Zersetzung, Vergasung und Oxydation) abläuft, entstehen luftgetragene Stofffreisetzungen. Diese werden unterteilt in Stoffe aus vollständiger bzw. unvollständiger Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile und in Stoffe aus Spurenelementen bzw. Verunreinigungen. Mit Hilfe von Primär- (Schaffung eines möglichst vollständigen Ausbrandes) und/oder Sekundärmaßnahmen (nachgeschaltete Abgasreinigung durch Partikel- bzw. Staubabscheider oder Zugabe von Sorptions- bzw. Reduktionsmitteln) ist es möglich diese Emissionen zu mindern.

Die aus der Verbrennung unbehandelter Biomasse entstehende Asche weist hohe Nährstoffgehalte auf (vor allem K, P, Mg und Ca). Die Rückführung bzw. Ausbringung auf land-

und forstwirtschaftlichen Flächen kann deshalb zu einer Schließung der Nährstoffkreisläufe beitragen. Da Asche jedoch auch hohe Konzentrationen an Schwermetallen enthalten kann, ist die Ausbringung nur unter bestimmten Bedingungen erlaubt. Ist die Verwendung als Dünger bzw. zur Bodenverbesserung (Düngemittel- bzw. Kompostverordnung) nicht zulässig, gibt es für die Asche noch andere Verwertungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten (z. B. Verwendung im Straßen- und Landschaftsbau, industrielle Nutzung, Deponierung etc.).

Biomasse bzw. biogene Festbrennstoffe haben - wie bereits in der Arbeit erwähnt - stark an Bedeutung gewonnen. Hauptgrund dafür sind wohl die ständigen Preissteigerungen der immer knapper werdenden fossilen Energieträger (Erdöl, Kohle, Erdgas).

Zusätzlich oder gerade deshalb bieten biogene Festbrennstoffe eine Riesenchance den Energiebedarf mit den landeseigenen Ressourcen zu nutzen und somit energieautark zu werden.

Besonders für Österreich bieten sich hier große Chancen sowohl für die Land- als auch für die Forstwirtschaft. Durch die Tatsache, dass in etwa 47,2 % der Staatsfläche (Tendenz steigend) mit Wald bedeckt und jährlich nur knapp zwei Drittel des Zuwachses genutzt werden, wäre die forstliche Biomassegewinnung stark ausbaufähig und durch die ständig steigende Nachfrage auch immer lukrativer.

Auch für die Landwirtschaft würden sich weitere Ausbaumöglichkeiten ergeben. Da bei den landwirtschaftlich genutzten Flächen (Acker- und Grünland) in den letzten Jahrzehnten ein deutlicher Rückgang zu beobachten ist, würde sich ein alternativer Anbau von beispielsweise Miscanthus oder Energieholz im Kurzumtrieb auf stillgelegten Flächen anbieten.

Trotz Energieeinsparungen hat der Energieverbrauch ständig zugenommen (und er wird wohl noch weiter ansteigen), die Nachfrage nach erneuerbaren Energieträgern wäre somit auch für die Zukunft gesichert.

Da Biomasse die einzige regenerativ erzeugbare Substanz ist die Kohlenstoff enthält und CO₂-neutral verbrennt (es entsteht nur so viel Kohlenstoffdioxid, wie die Pflanze während ihres Wachstums gebunden hat), stellt sich hinsichtlich des Umstiegs auf Energiegewinnung von Biomasse (regenerative Energie) schon lange nicht mehr die Frage des „ob“, sondern lediglich des „wie und wann“.

12. Anhang

12.1 Abkürzungsverzeichnis

Al_2O_3 - Aluminiumoxid
Efm - Erntefestmeter
BHD - Brusthöhendurchmesser
bzw. - beziehungsweise
C - Kohlenstoff
Ca - Kalzium
 CaCl_2 - Kalziumchlorid
CaO - Kalziumoxid
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Kalziumhydroxid, Kalkhydrat (gelöschter Kalk)
 CaSO_4 - Kalziumsulfat
Cd - Cadmium
 CH_4 - Methan
Cl - Chlor
cm - Zentimeter
 C_nH_m - Kohlenwasserstoffe
CO - Kohlenstoffmonoxid
 CO_2 - Kohlenstoffdioxid
Cr - Chrom
Cu - Kupfer
d. h. - das heißt
engl. - englisch
fm - Festmeter
FM - Frischmasse
ggf. - gegebenenfalls
GP - Getreideganzpflanzen
H - Wasserstoff
 H_2 - molekularer Wasserstoff
 H_2O - Wasser (bzw. Wasserdampf)
 H_2S - Schwefelwasserstoff
ha - Hektar
HCN - Cyanwasserstoff (Blausäure)

HC - Kohlenwasserstoffe (engl. Hydrocarbons)

HCl - Chlorwasserstoff (auch Wasserstoffchlorid oder Hydrogenchlorid genannt) bildet Salzsäure (Chlorwasserstoffsäure), wenn es in Wasser gelöst wird

H_u - Heizwert

H_o - Brennwert

i. Allg. - im Allgemeinen

J - Joule

K - Kalium

K₂SO₄ - Kaliumsulfat (= das Kaliumsalz der Schwefelsäure)

KCl - Kaliumchlorid

kg - Kilogramm

kWh - Kilowattstunde

KWK - Kraft-Wärme-Kopplung

λ - Lambda (Luftüberschusszahl)

l - Liter

m - Meter

max. - maximal

Mg - Magnesium

mm - Millimeter

MJ - Megajoule

MPa - Megapascal

MW - Megawatt

N - Stickstoff

N₂O - Distickstoffmonoxid (Lachgas)

Na - Natrium

NaCl - Natriumchlorid

NAWAROS - Nachwachsende Rohstoffe

NH₃ - Ammoniak

NH₄ - Ammonium

Ni - Nickel

Nm³ - Normkubikmeter

NO_x - Stickstoffoxid

O - Sauerstoff

O₂ - elementarer Sauerstoff

P - Phosphor

PAK - polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Pb - Blei

PCDD/PCDF - chlorierte organische Verbindungen (Dioxine und Furane)

rm - Raummeter

S - Schwefel

Si - Silizium

SiO₂ - Siliziumoxid

SO₂ - Schwefeldioxid

SO₃ - Schwefeltrioxid

Srm - Schüttraummeter

t - Tonne

TE - Toxicity Equivalent (Toxizitätsäquivalente - TEQ)

th - thermisch

TM - Trockenmasse

TS - Trockensubstanz

u a. - unter anderem

usw. - und so weiter

V - Vanadium

W - Watt

vgl. - vergleiche

z. B. - zum Beispiel

Zn - Zink

z. T. - zum Teil

12.2 Stichwortverzeichnis

Bodenpunktzahl: Die Bodenpunktzahl (auch Bodenwertzahl genannt) ist ein Vergleichswert zur Bodenbewertung. Sie reicht von 0 (sehr niedrig) bis 100 (sehr hoch).

Bestand: Als Bestand bezeichnet man in der Forstwirtschaft einen Waldteil, der sich in Form, Alter und Baumart bzw. Baumartenmischung gleicht und sich normalerweise von benachbarten Beständen unterscheidet

Brache: Als Brache bezeichnet man aus wirtschaftlichen oder regenerativen Gründen unbestelltes Grundstück (Acker oder Wiese).

Brache: Als Brache bezeichnet man ein Grundstück (Acker oder Wiese) das aus wirtschaftlichen oder regenerativen Gründen für kurze Zeit (Rotationsbrache), längere Zeit (Dauerbrache), mit Bewuchs (Grünbrache) oder ohne Bewuchs (Schwarzbrache) unbestellt wird bzw. aus dem landwirtschaftlichen Prozess ausgegliedert wird.

Brusthöhendurchmesser: Der Brusthöhendurchmesser (BHD) bezeichnet den Durchmesser eines stehenden Baumes in Brusthöhe (130 cm). Bei am Hang stehenden Bäumen wird der BHD auf der Hang-Oberseite gemessen.

Brennwert: Siehe Kapitel 8.2.1

Derbholz: Derbholz wird auch als Rundholz und in Österreich als Bloch(holz) bezeichnet. Dazu zählt man die Stammstücke eines stehenden oder eines gefällten, unverarbeiteten Baumes (starkes Astholz eingeschlossen).

Energiepflanzen: Unter diesem Begriff versteht man land- und forstwirtschaftlich produzierte Pflanzen, die allein und ausschließlich einer energetischen Nutzung dienen

Ertrag: Unter Ertrag versteht man in der Landwirtschaft die Ernteeinfuhr je Hektar.

exotherm: Bei einem exothermen Vorgang (chemische Reaktion) wird Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Der Gegensatz dazu bildet die endotherme Reaktion.

Festmeter: Der Festmeter (fm) ist ein Raummaß für Holz und entspricht einem Kubikmeter (m³) fester Holzmasse ohne Zwischenräume in der Schichtung (siehe Abbildung 12.3).

Forwarder: Siehe Kapitel 5.1.2

Frischmasse: Die Frischmasse (FM) ist eine Einheit für Erzeugnisse aus der Land- und Forstwirtschaft und bezeichnet die Masse des gewogenen Ertrags pro Hektar. Frischmasse (100 Prozent) = Trockenmasse + Wassergehalt

Grubber: Der Grubber ist ein landwirtschaftliches Gerät das die Ackerkrume so tief wie ein Pflug lockert (bis 30 cm) ohne diese zu wenden.

Harvester: Siehe Kapitel 5.1.1

Heizgradsumme: Darunter versteht man die Summe der Heizgradtage eines bestimmten Zeitabschnittes

Heizgradtag: Heizgradtage sind ein Maß für den Wärmebedarf von Gebäuden während der Heizperiode. Sie stellen die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren täglichen Außentemperatur eines Heiztages und einer bestimmten Rauminnentemperatur (z.B. 20 °C) dar.

Heizwert: Siehe Kapitel 8.2.1

Horst: Als Horst wird in der Botanik eine Pflanzenwuchsform bezeichnet, bei der viele Triebe einer Pflanze eng aneinander stehen. Diese Wuchsform entsteht durch eine basale Verzweigung der Pflanze, ohne dass Ausläufer gebildet werden. Die Seitentriebe stehen

zudem meist aufrecht. Die Bildung von Horsten ist charakteristisch für viele Süß- und Sauergräser.

Industrieholz: Als Industrieholz bezeichnet man Rohholz, das in weiteren Verarbeitungsprozessen mechanisch zerkleinert oder chemisch aufgeschlossen wird. Es findet Verwendung zur Herstellung von Zellstoff und Holzschliff (Papierindustrie), Span- und Faserplatten, Holzwolle und andere industrielle Produkte.

Kappholz: Kappholz ist ein Industrierestholz und fällt bei der Längenkappung von Rund- bzw. Stammholz in Rundholzsortierbetrieben, Sägewerken oder Holzverarbeitenden Betrieben an.

Kulturfläche: Die Kulturfläche ist die Summe aus allen land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen (inklusive zugepachteter, exklusive verpachteter Flächen). Die sonstigen Flächen fallen nicht unter Kulturfläche.

Lichnutzungseffizienz: Darunter versteht man den Quotient aus der pro Zeiteinheit gebildeten Trockenmasse und der dabei von den Pflanzen aufgenommenen photosynthetisch aktiven Strahlung (400 bis 700 nm).

Luftüberschusszahl: Siehe Kapitel 9.1.1

Nutzholz: Unter Nutzholz werden Baumstämme verstanden, die zur Herstellung von Möbeln, Bauholz, Verpackungen usw. verwendet werden.

quenchen: Quenchen ist ein Verfahren, in dem Schadstoffe und Wärme absorbiert werden. (Verfahrenstechnik).

Rauch: Durch chemische oder thermische Prozesse entstandene feinst verteilte Teilchen in der Luft.

Restholz: Restholz sind jene Holzanteile, die beim Einschlag im Wald und bei der Be- und Verarbeitung von Holz in der Industrie als Neben- bzw. Koppelprodukt anfallen.

Rundholz: Siehe Derbholz

Ruß: Ruß besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff bestehenden Teilen aus unvollständiger Verbrennung.

Schlagabraum: Schlagabraum sind jene Biomassereste, die nach einem Holzeinschlag bzw. Rodung auf der Waldfläche belassen werden. Zum Schlagabraum gehören Baumkronen, Äste, nicht verkaufte Stammteile und die bei Rodung verbliebenen Wurzelteller.

Schröpfchnitt: Der Schröpfchnitt ist eine wichtige Pflegemaßnahme, die in der Regel bei 10 bis 15 cm Wuchshöhe der Neuansaat erfolgt. Er dient nicht nur der Unkrautbekämpfung, sondern auch dem schnellen Narbenschluß durch Anregung der Bestockung.

Schüttraummeter: Ein Raummeter (rm) entspricht einem Kubikmeter (m³) fester Holzmasse mit Zwischenräumen in der Schichtung (siehe Abbildung 12.3).

Schwader: Der Schwader ist ein landwirtschaftliches Gerät, um das Erntegut wie Heu oder Stroh zu gleichmäßigen Schwaden (Reihen, Strichen) zusammenzufassen. Diese können anschließend mit der einem Ladewagen oder einer Ballenpresse aufgenommen werden.

Schwarzlauge: Die Schwarzlauge (Kochlauge) ist ein energie- und ligninreiches Nebenprodukt der Zelluloseherstellung in der Papierindustrie und entsteht bei der Trennung des Lignins vom Zellstoff (der dann die Papierfasern bildet).

Sorption: Sorption ist eine Sammelbezeichnung für Vorgänge, die zu einer Anreicherung eines Stoffes oder auf einer Grenzfläche führen.

Stammholz: Siehe Derbholz

Staub: Durch mechanische Prozesse oder Aufwirbelung entstandene feinst verteilte Teilchen in der Luft.

Totreife: Bei der Totreife hat der Wassergehalt soweit abgenommen, dass das Korn nicht mehr mit dem Fingernagel eingedrückt oder gebrochen werden kann. Getreide wird in der Regel bei Voll- oder Totreife geerntet, da diese für den Drusch erforderlich ist (Eine Ernte mit Mähdreschern ist erst bei Totreife möglich)

Toxizitätsäquivalente: Die Toxizitätsäquivalente dient zur Abschätzung der Gefährlich- bzw. Giftigkeit von Dioxingemischen. Die giftigste Verbindung (2,3,7,8-TCDD) hat eine TEQ von 1. Ein Dioxin/Furan mit einer TEQ von 0,5 ist also halb so giftig wie das 2,3,7,8-TCDD.

Trockenmasse: Die Trockenmasse TM ergibt sich aus der Frischmasse abzüglich des Rohwassers. Trockenmasse + Wassergehalt = Frischmasse (100 Prozent)

Trockensubstanz: siehe Trockenmasse

Trockenstress: Als Trockenstress (auch Wasserstress genannt) bezeichnet man den Stress von lebenden Organismen (insbesondere Pflanzen) der durch Wassermangel hervorgerufen wird.

Umtriebszeit: Die Umtriebszeit bezeichnet in der Forstwirtschaft den zu erwartenden Zeitraum von der Bestandesbegründung bis zur Endnutzung durch Holzeinschlag.

Wasserstress: Siehe Trockenstress

Wirkungsgrad: Der Wirkungsgrad (η) ist das Verhältnis von abgegebener (P_{ab} = Nutzleistung)

und zugeführter Leistung (P_{zu})

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

η ... Wirkungsgrad, [%]

P_{ab} ... abgegebene Leistung (Nutzleistung), [W]

P_{zu} ... zugeführte Leistung, [W]

12.3 Vorsätze und Vorzeichen

A	Atto	10^{-18}	Trillionstel
F	Femto	10^{-15}	Billiardstel
P	Piko	10^{-12}	Billionstel
N	Nano	10^{-9}	Milliardstel
m	Mikro	10^{-6}	Millionstel
M	Milli	10^{-3}	Tausendstel
C	Zenti	10^{-2}	Hundertstel
D	Dezi	10^{-1}	Zehntel
Da	Deka	10^1	Zehn
H	Hekto	10^2	Hundert
K	Kilo	10^3	Tausend
M	Mega	10^6	Million
G	Giga	10^9	Milliarde
T	Tera	10^{12}	Billion
P	Peta	10^{15}	Billiarde
E	Exa	10^{18}	Trillion

Abbildung 12.1: Vorsätze und Vorzeichen

Quelle: FNR, 2000, 353

12.4 Umrechnungstabellen

	kJ	kcal	kWh	kg SKE	kg RÖE	barrel	m³ Erdgas
1 kJ	1	0,2388	0,000278	0,000034	0,000024	$1,76 \cdot 10^{-7}$	0,000032
1 kcal	4,1868	1	0,001163	0,000143	0,0001	$7,35 \cdot 10^{-7}$	0,00013
1 kWh	3.600	860	1	0,123	0,086	0,000063	0,113
1 kg SKE ^a	29.308	7.000	8,14	1	0,70	0,0052	0,924
1 kg RÖE ^b	41.868	10.000	11,63	1,428	1	0,0074	1,319
1 barrel	5.694.048	1.360.000	1.582	194,21	136	1	179,42
1 m³ Erdgas	31.736	7.580	8,816	1,082	0,758	0,0056	1

a. Steinkohleneinheiten

b. Rohöleinheiten

Abbildung 12.2: Umrechnungsfaktoren für verschiedene Energieeinheiten

Quelle: FNR, 2000, 352

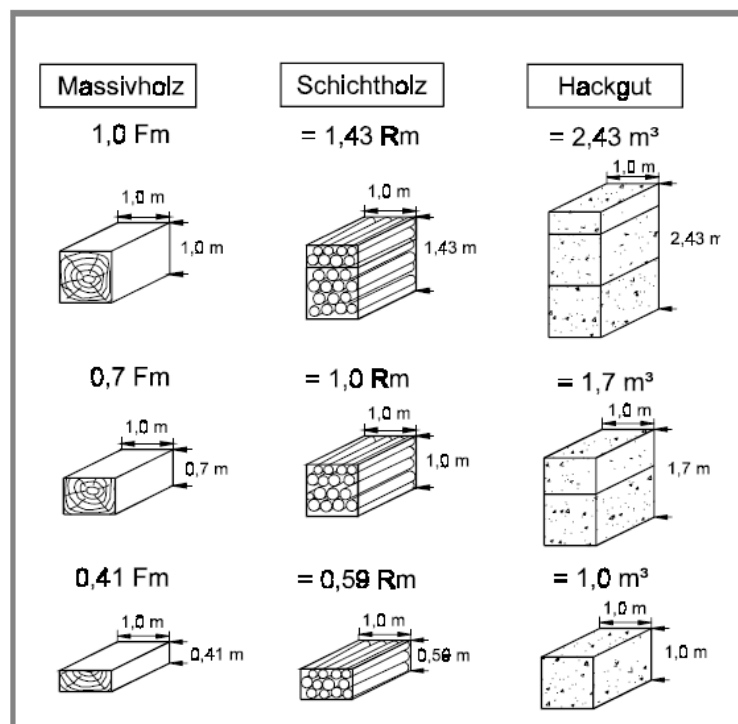


Abbildung 12.3: Umrechnungsfaktoren für Festmeter (fm), Raummeter (rm) und Schüttraummeter (m³)

Quelle: FNR, 2000, 89

Literaturverzeichnis

ACT - AUSTRIAN CLEAN TECHNOLOGY (s.a.): Technologien - Verbrennung von Biomasse, auf: http://www.act-center.at/de/technologien/energie/energieproduktion/biomasse/verbrennung_von_biomasse/verbrennung_von_biomasse.php (abgerufen am 18.07.10)

BAUERHANS� C., KOUKAL T., SCHADAUER K, (2008): Erste österreichweite Waldkarte. Forstzeitung 12, 26-27. Stand 02.01.2008, auf: http://www.waldwissen.net/themen/inventur_monitoring/fernerkundung/bfw_waldlayer_2008_DE/printerfriendly (abgerufen am 18.07.10)

BERLAKOVICH N. (2009): Pressekonferenz des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) am 22.01.09 in Wien, auf: http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web_print?dok=7773 (abgerufen am 18.07.10)

BFW - BUNDESFORSCHUNGS- UND AUSBILDUNGSZENTRUM FÜR WALD, NATURGEFAHREN UND LANDSCHAFT (2006): Ergebnisse der ÖWI, auf: <http://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=1586> (abgerufen am 18.07.10)

BFW - BUNDESFORSCHUNGS- UND AUSBILDUNGSZENTRUM FÜR WALD, NATURGEFAHREN UND LANDSCHAFT (2007): Um 70 Prozent mehr Biomasse in Österreichs Wäldern verfügbar - Zwischenergebnisse der Holz- und Biomasseaufkommensstudie liefern gute Argumente für Umstieg auf Erneuerbare Energie, auf: <http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=7021> (abgerufen am 18.07.10)

BFW - BUNDESFORSCHUNGS- UND AUSBILDUNGSZENTRUM FÜR WALD, NATURGEFAHREN UND LANDSCHAFT (2009): BFW-Praxisinformation Nr. 18 - 2009. Wien: Selbstverlag

BGBL (BUNDESGESETZBLATT FÜR DIE REPUBLIK ÖSTERREICH)- DEPONIEVERORDNUNG (2008): 39. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien (Deponieverordnung 2008)

BKZ MITWEIDA - BILDUNGS- & KOMMUNIKATIONSZENTRUM WASSERKRAFT MITWEIDA (2009): Kompetenznetzwerk Bioenergie, auf: <http://www.wasserkraftwerk-mittweida.de/bioenergie/biogen.htm> (abgerufen am 18.07.10)

DEPI - DEUTSCHES PELLETINSTITUT. (s.a. a): Die europäische Norm für Holzpellets (EN 14961-2), auf: <http://www.enplus-pellets.de/verbraucher.php> (abgerufen am 18.07.10)

DEPI - DEUTSCHES PELLETINSTITUT. (s.a. b): Infothek - Brennstoff Pellets, auf: <http://www.depi.de/infothek-grafiken.php> (abgerufen am 18.07.10)

DEPI - DEUTSCHES PELLETINSTITUT. (2010): Zertifizierung von Pellets für den Endkundenmarkt - Handbuch für Deutschland und Österreich, auf: <http://www.enplus-pellets.de/downloads/EnplusHandbuch.pdf> (abgerufen am 18.07.10)

DEIM S., GROSS E., LIEBHARD P. (2008): Rechtliche Grundlagen zur Holzproduktion im Kurzumtrieb in Österreich, Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, auf: <http://www.laendlicher-raum.at/article/articleview/71305/1/10406> (abgerufen am 18.07.10)

ENERGIEAGENTUR NRW (2009): Bioenergie, auf: <http://www.energieagentur.nrw.de/biomasse/page.asp?TopCatID=7688&RubrikID=7688> (abgerufen am 18.07.10)

FNR - FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (2000): Leitfaden Bioenergie - Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Gülzow: Selbstverlag

FORDAQ - DAS NETZWERK DER HOLZINDUSTRIE (2008): Energieholz - Fäller-Bündler-Aggregate auf dem Vormarsch, auf: http://holz.fordaq.com/fordaq/news/Energieholz_Holz_Holzheizkraftwerk_Energieholzernte_17221.html (abgerufen am 18.07.10)

FORSTGESETZ IDf. BGBl. I Nr. 22/2007 (2007): Bundesgesetz vom 3. Juli 1975, mit dem das Forstwesen geregelt wird (Forstgesetz 1975)

FREENET-HOMEPAGE (s.a.): Photosynthese, auf: <http://freenet-homepage.de/HPKrug/photosynthese.gif> (abgerufen am 21.08.09)

FRÜHWIRTH P., GRAF A., HUMER M., HUNGER F., KÖPPL H., LIEBHARD P., THUMFART K. (2006): *Miscanthus sinensis* 'Giganteus' - Chinaschilf als nachwachsender Rohstoff. Wien: Landwirtschaftskammer Österreich

GRÜNER BERICHT 2009 (2009): Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. Wien: AV+Astoria Druckzentrum

HEIß M. (2007): Vortrag der Österreichischen Bundesforste (ÖBf) in Gmunden am 07.03.07 zum Thema Kurzumtrieb - Erntetechnik, Trocknung, Verwertung, auf: http://bfw.ac.at/rz/document_api.download?content=Heiss_Erntetechnik.pdf (abgerufen am 18.07.10)

HARTMANN H. (2007): KTBL-Heft 74 - Heizen mit Getreide und was man darüber wissen muss (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft). Darmstadt: KTBL

JOHN DEERE (s.a.): Bioenergie - Restholzbündler 1490D, auf: http://www.deere.com/de_DE/forestry/bioenergy/1490d.html (abgerufen am 18.07.10)

KALTSCHMITT M. UND HARTMANN H. (2001): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag

KALTSCHMITT M. UND STREICHER W. (2009): Regenerative Energien in Österreich - Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalyse, Potenziale; Nutzung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner

KALTSCHMITT M., STREICHER W., WIESE A. (2006): Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte - Vierte, aktualisierte, korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag

KALTSCHMITT M., HARTMANN H., HOFBAUER H. (2009): Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren - 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag

KOMPOSTVERORDNUNG (2001): BGBl. II Nr. 292/2001 - Verordnung über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung), auf: <http://www.lebensministerium.at/article/articleview/26625/1/6969/> (abgerufen am 18.07.10)

KRANZL L., HAAS R., KALT G., DIESENREITER F., ELTROP L., KÖNIG A., MAKKONEN P. (2008): Strategien zur optimalen Erschließung der Biomassepotenziale in Österreich bis zum Jahr 2050 mit dem Ziel einer maximalen Reduktion an Treibhausgasemissionen - Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit)

KRÖNIGSBERGER O. (2008): Österreichische BauernZeitung - Schnelle Holzernte braucht leistungsfähige Logistik, auf: <http://www.bauernzeitung.at/?id=2500%2C43010%2C2163%2C%2CeF9QSUNIX05SWzBdPTAmaW5saW5lPTEmbnBmX3NldF9wb3NbaGl0c109JT11bnBmX3NldF9wb3MlMjU%3D> (abgerufen am 18.07.10)

LEBENSMINISTERIUM (06.10.2004): Nachwachsende Rohstoffe (NAWARO) - Was ist Biomasse?, auf: www.landnet.at/article/archive/5159 (abgerufen am 18.07.10)

LIEBHARD P. (2007): Energieholz im Kurzumtrieb - Rohstoff der Zukunft. Graz: Leopold Stocker Verlag

MASTEL K. (2009): KTBL-Schrift 476 - Die Landwirtschaft als Energieerzeuger, KTBL-Tagung (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) vom 04. bis 05. Mai 2009 in Osnabrück - Miscanthus: Anbau, Wirtschaftlichkeit und Eigenschaften als Brennstoff. Darmstadt: KTBL

NEUBARTH J. UND KALTSCHMITT M. (2000): Erneuerbare Energien in Österreich. Wien, New York: Springer-Verlag

NUSSBAUMER TH. (2000): Schweizer Baudokumentation - Holzenergie, auf:
<http://www.verenum.ch/Publikationen/Baudoc/1862601.pdf> (abgerufen am 18.07.10)

OBERNBERGER I., BRUNNER T., BÄRNTHALER G. (2006): Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. Biomass and Bioenergy (30), 2006. 973-982

OBERNBERGER I. UND SUPANCIC K. (2009): Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants - Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition, 29^h June - 03rd July, Hamburg

ÖSTERREICHISCHER WALDBERICHT 2008 (2008): Nachhaltige Waldwirtschaft in Österreich. Wien: BMLFUW

PRÖLL J. (2007): Pressekonferenz zur neuen Biomasseaufkommensstudie im Auftrag des Lebensministeriums am 06.11.07 in Wien, auf:
http://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20071106_OTS0047 (abgerufen am 18.07.10)

RENTZ O., GÜTLING K., KARL U. (2002): Forschungsbericht 200 46 317 (Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Universität Karlsruhe) - Erarbeitung Grundlagen für das BVT-Merkblatt Großfeuerungsanlagen im Rahmen des Informationsaustausches nach Art. 16(2) IVU-Richtlinie, auf: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2452.pdf> (abgerufen am 18.07.10)

SCHWEINBERGER J. UND GÖTTTRIED M. (2008): Bericht ALVA (Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-Veterinär- und Agrarwesen. „Ernähren uns in der Zukunft Energiepflanzen?“ am 26. - 27. Mai in LFZ (Lehr- und Forschungszentrum) Raumberg-Gumpenstein, auf:
http://www.alva.at/upload/Publikationen/Tagungsband/Tagungsband_2008.pdf (abgerufen am 18.07.10)

SPERR R. (s.a. a): Miscanthus x giganteus - Chinaschilf, Elefantengras, auf:
<http://www.energiepflanzen.at/de/landwirtschaft/kurzinfo-zu-miscanthuselefantengras/> (abgerufen am 18.07.10)

SPERR R. (s.a. b): Pappel/Weidensorten im Kurzumtrieb, auf:
<http://www.energiepflanzen.at/galerie/pappelweidensorten/> (abgerufen am 18.07.10)

STATISTIK AUSTRIA (2008): Land- und forstwirtschaftliche Betriebe nach Bundesländern 1951-2007 auf:
http://www.statistik.at/web_de/services/wirtschaftsatlas_oesterreich/land_und_forstwirtschaft/024378.html (abgerufen am 18.07.10)

STATISTIK AUSTRIA (2009 a): Jahresdurchschnittspreise und -steuern für die wichtigsten Energieträger 2003 auf:

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/preise_steuern/030502.html (abgerufen am 18.07.10)

STATISTIK AUSTRIA (2009 b): Jahresdurchschnittspreise und -steuern für die wichtigsten Energieträger 2007 auf:

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/preise_steuern/030493.html (abgerufen am 18.07.10)

STATISTIK AUSTRIA (2009 c): Energiebilanzen auf:

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html (abgerufen am 18.07.10)

STATISTIK AUSTRIA (2009 d): Bodennutzung in Österreich 2006 bis 2008:

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/land_und_forstwirtschaft/agrarstruktur_flaechen_ertraege/bodennutzung/index.html (abgerufen am 18.07.10)

UMWELTBUNDESAMT (2004): BGBl. Teil II Nr. 417/2004, Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich Änderung der Kraftstoffverordnung 1999

UNI-GÖTTINGEN (s.a.): Entwicklung von Häckslertechnik in der Abteilung Agrartechnik - Details zum Schneckenhacker, auf: <http://www.uni-goettingen.de/de/86454.html> (abgerufen am 18.07.10)

WALDHAUSER (s.a.): Waldhauser GmbH & Co. Wärmetechnik KG - Pellets-Heizkessel auf:

<http://pelletsheizung-muenchen.com/hp357/Pellets-Heizkessel.htm?ITServ=CYbb5cf7cX128b472c0d4X403c> (abgerufen am 18.07.10)

WEGMANN U. (2009): Waldwissen.net - Kletterkünstler Hangforwarder, auf:

http://www.waldwissen.net/themen/forsttechnik/forstmaschinen/wsl_hangforwarder_DE?start=0& (abgerufen am 18.07.10)

WIKIPEDIA (2006): Fälltechnik auf:

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Motors%C3%A4ge.png&filetimestamp=20060423134438> (abgerufen am 18.07.10)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfasst und andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich aus anderen Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Wien, Oktober 2010

Ort, Datum

Unterschrift