

Holztechnologie I: Holzbe- und Verarbeitung

Educational Material**Author(s):**

Niemz, Peter; Bächle, F.; Sonderegger, Walter

Publication date:

2000

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004537246>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

Holztechnologie 1



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Holztechnologie I

Holzbe- und Verarbeitung

1. Auflage 2003

Prof. Dr.-Ing. habil. P. Niemz
Dipl.-Forsting. ETH F.Bächle
Dipl.-Forsting. ETH W.Sonderegger



Holzwissenschaften
Wood Science

Vorwort

Die Vorlesung Holztechnologie 1 befasst sich einerseits mit der Holzbe- und Verarbeitung in der Sägerei und andererseits mit der weiteren Behandlung/Vergütung, respektive mit dem Holzschutz.

Das Vorlesungsskript stellt das Gerüst der Vorlesung dar. Damit es a) durch in der Vorlesung abgegebene Unterlagen ergänzt und b) nach Belieben gebunden, geheftet, eingeordnet werden kann, wird es als ungebunden und ungeheftet verkauft.

Es wird über die E-Collection der ETH Bibliothek als PDF-Datei zur Verfügung gestellt (<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/index.html>). Die Verbreitung ausserhalb der Vorlesung, auf elektronischem sowie auf physischem Weg ist untersagt.

Inhaltsverzeichnis:

Die jeweiligen Autoren der einzelnen Kapitel sind in Klammer erwähnt, wobei

FB F.Bächle

PN P.Niemz

WS W.Sonderegger

alle an der Professur Holzwissenschaften der ETH Zürich.

1. Ökologische Bedeutung des Holzes	2
1.1. Holz als CO₂-Speicher (WS)	2
1.2. Ökobilanzierung (WS)	4
1.2.1. Entstehung	4
1.2.2. Definitionen	4
1.2.3. Inhalt	5
1.3 Grundlagen der Holzverwendung	11
1.4. Verfahren zur Umwandlung von Biomasse in Energie (WS)	14
1.4.1. Verbrennung	14
1.4.2. Pyrolyse (Verkohlung)	17
1.4.3. Holzverkohlung	17
1.4.4. Flashpyrolyse	19
1.4.5. Vergasung	19
1.5. Literatur zu Kapitel 1	21
2. Grundprozesse der Holzbe- und Verarbeitung	3
2.1. Trennen (PN)	3
2.1.1. Schnittarten	3
2.1.2. Geometrie am Schneidkeil	5
2.1.3. Grundbegriffe des Zerspanens	6
2.1.4. Systematik von Trennvorgängen	9
2.1.5. Übersicht zu Maschinen der Holzindustrie	15
2.2. Holz Trocknung (PN)	18
2.2.1. Grundlagen	18
2.2.2. Qualitätskontrolle bei der Holz Trocknung	23
2.2.3. Methoden der Holz Trocknung	26
2.3. Dämpfen (FB)	32
2.3.1. Zweck	32
2.3.2. Ablauf	32
2.3.3. Dampfverbrauch	33
2.3.4. Dämpfzeiten	33

2.3.5. Kochen	33
2.4. Kleben (PN)	34
2.4.1. Allgemeines	34
2.4.2. Einteilung der Klebstoffe	35
2.4.3. Klebevorgang	36
2.4.4. Klebethorien	38
2.4.5. Einfluss des Holzes auf die Verklebungsgüte	40
2.4.6. Klebgrundoperationen	40
2.4.7. Beschreibung ausgewählter Klebstoffe	42
2.4.8. Wichtige Gebrauchseigenschaften von Klebstoffen	48
2.5. Holzvergütung (FB)	49
2.5.1. Chemisch	49
2.5.2. Biologisch	51
2.5.3. Physikalisch	52
2.5.4. Mechanisch (Druck)	55
2.5.5. Verformung von Holz	56
2.6. Literatur zu Kapitel 2	59
3. Schnittholzerzeugung	2
3.1. Zielstellung (PN)	2
3.2. Einschnittarten (PN)	5
3.3. Arbeitsabläufe im Sägewerk (PN)	6
3.3.1. Lagerung	6
3.3.2. Entrinden	8
3.3.3. Sonstige Prozessstufen	8
3.3.4. Vermessen	9
3.3.5. Ablängen	9
3.3.6. Sortieren	10
3.3.7. Einschneiden	10
3.3.8. Trocknen/Stapeln/Weiterverarbeiten	11
3.4. Hauptmaschinengruppen (PN)	12
3.4.1. Gattersägemaschine	12
3.4.2. Bandsägemaschinen	14
3.4.3. Profilieranlagen	16
3.4.4. Kreissägetechnik	18
3.5. Holzsortierung (PN)	20
3.6. Holzstapelung/Trocknung (PN)	25
3.7. Literatur zu Kapitel 3	27

4. Nutzung von Holznebenprodukten	2
4.1. Rindenverwertung	2
4.1.1. Rindenverbrennung	2
4.1.2. Rindenplatten	2
4.1.3. Rindenkompostierung	2
4.1.4. Rindenverwertung	2
4.2. Harze	11
4.2.1. Definitionen	11
4.2.2. Verwendung von Naturharzen	11
4.3. Gerbstoffe	15
4.4. Literatur zu Kapitel 4	16
5. Holzschutz	2
5.1. Ziele Holzschutz; Nachteile von Holz (FB)	2
5.2. Gefährdungsklassen (FB)	4
5.3. Holzschutz (FB)	5
5.3.1. Chemisch	5
5.3.2. Biologisch	11
5.3.3. Konstruktiv	12
5.3.4. Integrierter Holzschutz	12
5.3.5. Brandschutz	12
5.4. Literatur zu Kapitel 5	15
6. Prüftechnik und Qualitätskontrolle in der Holzindustrie	2
6.1. Einleitung (PN)	2
6.2. Qualitätssicherung nach ISO 9000-9004 (PN)	2
6.3. Aufbau eines Prüflabors/statistische Grundlagen (PN)	3
6.4. Spezielle Materialprüfungen (PN)	4
6.4.1. Rasterelektronenmikroskopie	4
6.4.2. Spannungs-/Dehnungsnachweis	4
6.5. Literatur zu Kapitel 6	25

Gesamtlayout: FB
Stand: März 2003

Inhaltsverzeichnis zu Kapitel 1

1. Ökologische Bedeutung des Holzes.....	2
1.1. Holz als CO₂-Speicher	2
1.2. Ökobilanzierung.....	4
1.2.1. Entstehung.....	4
1.2.2. Definitionen.....	4
1.2.3. Inhalt.....	5
1.2.3.1. I. Zieldefinition.....	5
1.2.3.2. II. Sachbilanz	7
1.2.3.3. III. Wirkungsabschätzung	9
1.2.3.4. IV. Interpretation	10
1.3. Grundlagen der Holzverwendung	11
1.4. Verfahren zur Umwandlung von Biomasse in Energie	14
1.4.1. Verbrennung.....	14
1.4.1.1. Die drei Phasen der Holzverbrennung.....	14
1.4.1.2. Einfluss der Holzart.....	15
1.4.1.3. Der Heizwert von Holz und der Wassergehalt.....	15
1.4.1.4. Rindenanteile	15
1.4.1.5. Energieträger Holz - Energetische Aspekte	16
1.4.1.6. Emissionen bei der Holzverbrennung.....	16
1.4.2. Pyrolyse (Verkohlung).....	17
1.4.3. Holzverkohlung.....	17
1.4.3.1. Energetische Aspekte	18
1.4.4. Flashpyrolyse.....	19
1.4.5. Vergasung	19
1.4.5.1. Energetische Aspekte.....	20
1.5. Literatur zu Kapitel 1	21

1. Ökologische Bedeutung des Holzes

1.1. Holz als CO₂-Speicher

Durch die durch die Treibhausgase bedingte Klimaerwärmung erhält das Holz seit einigen Jahren Bedeutung als CO₂-Speicher. CO₂ ist das bedeutendste anthropogen verursachte Treibhausgas (siehe Tabelle 1). An der Klimakonferenz in Kyoto 1997 wurde von den Unterzeichner-Staaten eine Beschränkung bzw. Reduktion der Treibhausgas-Emissionen in den Jahren 2008-2012 um gesamthaff 5% gegenüber dem Niveau von 1990 beschlossen. Die Schweiz verpflichtete sich dabei wie auch die EU-Staaten zu einer Reduktion von mindestens 8%, um andere Unterzeichner-Staaten wie z.B. die Russische Föderation, Australien oder Neuseeland zu entlasten. Im darauf erlassenen Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Gesetz) vom 8. Oktober 1999 wird eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 10% für den oben erwähnten Zeitraum gefordert, wobei die energetische Nutzung fossiler Brennstoffe um 15% und die fossilen Treibstoffe (ohne Flugtreibstoffe für internationale Flüge) um 8% zu vermindern sind.

Tabelle 1 Treibhausgase: Anteile am anthropogenen¹ Treibhauseffekt 1995 (nach Hasch 2002)

Treibhausgas ²	Chemische Formel	Anteil am Treibhauseffekt
Kohlendioxid	CO ₂	55 %
Methan	CH ₄	17 %
Distickstoffoxid ³	N ₂ O	5 %
Bodennahes Ozon	O ₃	14 %
FCKWs und Halogene		9 %

Bei der Bildung von Biomasse (z.B. Holz) wird der Atmosphäre durch die Photosynthese CO₂ entzogen und der Kohlenstoff in die Biomasse eingebaut.

Holz besteht durchschnittlich aus:

- 50 % Kohlenstoff (C)
- 43 % Sauerstoff (O)
- 6 % Wasserstoff (H)
- 1 % weitere Elemente

So enthält ein m³ Holz mit einem Trockengewicht von 500 kg ungefähr 250 kg Kohlenstoff und speichert somit 900 kg CO₂-Äquivalente.

¹ Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas. Der Anteil in der Atmosphäre wird jedoch durch den Menschen nicht verändert.

² Im Kyoto-Protokoll wird Ozon nicht zu den Treibhausgasen dazu gerechnet, dafür die FCKWs und Halogene präzisiert und unterteilt in: Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC) und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC). Zusätzlich wird Schwefelhexafluorid (SF₆) als Treibhausgas aufgeführt.

³ Distickstoffoxid = Lachgas. Neben der direkten Wirkung als Treibgas zusätzliche Wirkung als Ozonzerstörer (wichtigster Ozonzerstörer neben FCKW). N₂O-Moleküle haben eine sehr hohe Verweildauer von 130 bis 150 Jahren in der Atmosphäre. In grossen Höhen entstehen durch die photozyklische Zersetzung von N₂O reaktive Stickoxide, die zum Abbau des Ozons beitragen.

Wälder als Kohlenstoffspeicher, Kohlenstoffsinken und Kohlenstoffquellen (gemäss Gebirgswaldpflegegruppe ergänzt):

Kohlenstoffsenke: Der Wald nimmt in der Wachstumsphase CO₂ auf und bindet es. In dieser Phase stellt der Wald eine Kohlenstoffsenke dar. Durch die Messung des Zuwachses kann die jährliche, zusätzliche CO₂-Bindung berechnet werden.

Kohlenstoffspeicher: Urwälder, aber auch nachhaltig genutzte Wirtschaftswälder, befinden sich bezüglich des Kohlenstoff-Austausches im Gleichgewicht und stellen somit Kohlenstoffspeicher dar. Die Speicherwirkung hängt von der Höhe des Vorrates und der Humusschicht (CO₂-Bindung im Boden) ab und ist je nach Waldgesellschaft und Bewirtschaftungsform unterschiedlich.

Kohlenstoffquelle: Wird mehr Holz geerntet als nachwächst bzw. Wald umgewandelt, so wird Kohlenstoff freigesetzt. Der Wald wird somit zu einer Kohlenstoffquelle.

Meistens werden die CO₂-Emissionen aus regenerativen Energieträgern als CO₂-neutral bewertet. Nach Zimmer (2002) sollten die regenerativen Energieträger wie Holz, Holzwerkstoffe und Holzprodukte jedoch als Kohlenstoffspeicher betrachtet werden (C-plus-Effekt). Dies führt zu einer besseren ökologischen Bewertung der Holzprodukte (Abbildung 1).

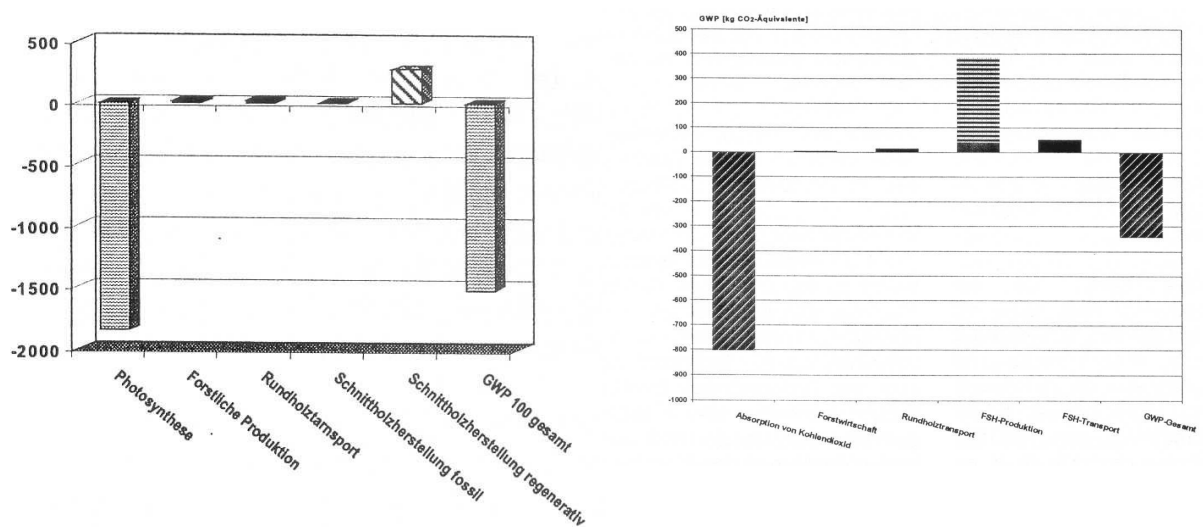


Abbildung 1 CO₂-Bilanzen: Für 1 m³ technisch getrocknetes Fichtenschnittholz (links); Für Kerto-Furnierschichtholz pro m³ Rundholzäquivalent (rechts). Aus Zimmer 2002.

Erläuterungen zu Abbildung 1:

Auf Grund der benötigten Energie wird der Anteil am Treibhauseffekt, den die Produktion des Schnittholzes bzw. Furnierschichtholzes von der Holzernte bis zum fertigen Produkt verursacht, berechnet. Dieser wird von der Energie, die im Holz gespeichert ist, abgezogen. Als Resultat erhält man den Betrag, den das Holzprodukt zur Klimaerwärmung beiträgt. Dieser ist in beiden Fällen negativ, d. h. die Menge des im Holz gespeicherten CO₂ ist höher als der CO₂-Ausstoss während der Produktherstellung. Die Energie wird dabei als GWP 100: Global Warming Potential (= Treibhauseffekt) in kg CO₂-Äquivalenten angegeben. Bei der Berechnung kann zusätzlich unterschieden werden zwischen fossilen Energieträgern wie Öl, Gas oder Kohle und regenerativen Energieträgern wie Holz, das in Form von Spänen, Sägemehl und Rinde während der Herstellung des Holzproduktes anfällt und gleich zu Heizzwecken weiter verwendet wird.

1.2. Ökobilanzierung

1.2.1. Entstehung

Die Ökobilanzierung ist eine junge Bewertungsmethode von Produkten. Durch den Bericht des Club of Rome „Die Grenzen des Wachstums“ wurde 1972 auf die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen aufmerksam gemacht. Darauf folgten noch in den 70er Jahren erste Produktbewertungen bezüglich des Energieverbrauchs. Anfang der 80er Jahre entstanden erste Lebenswegbilanzierungen (Verpackung), die dann auf immer weitere Produkte angewendet wurden. Da unterschiedliche Methoden der Ökobilanzierung entwickelt wurden, entstand in den 90er Jahren das Bedürfnis nach einheitlichen Kriterien zur Bewertung und Interpretation von Ökobilanzen. Dies führte zu den ISO-Normen 14040 - 14043.

1.2.2. Definitionen

Ökobilanz nach ISO 14040: „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs.“

Ökobilanz allgemein (nach Künniger und Richter 2001): „Die Ökobilanz ist ein Instrument zur Ermittlung, Analyse und Bewertung der Umweltbelastungen und Umwelteinwirkungen durch eine funktionelle Einheit. Dabei kann die funktionelle Einheit ein Produkt, Prozess, Betrieb oder auch eine Dienstleistung sein.“

Ökobilanz eines Produktes (nach Frühwald et al. 2002 in Anlehnung an ISO 14040): „In einer Ökobilanz werden die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebenswegs eines Produktes von der Rohstoffgewinnung, über Produktion, Anwendung bis zur Beseitigung (bzw. Entsorgung) untersucht.“

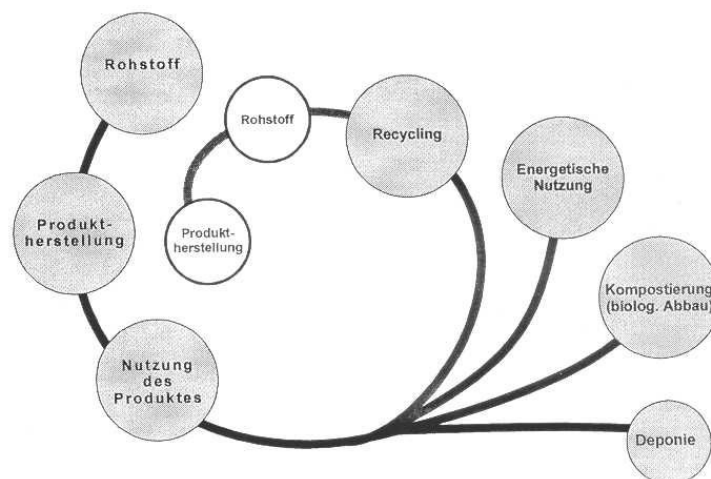


Abbildung 2 Der Lebensweg eines Produktes⁴ (Zimmer 2002).

⁴ Die wesentlichsten Methoden um die Umweltfreundlichkeit von Materialien, Produktionsverfahren und Produkten bestimmen zu können, sind die Material-Intensitäts-Analyse (MAIA) und die produktbezogene Ökobilanzierung. Die Material-Intensitäts-Analyse wurde am Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt und Energie entwickelt und orientiert sich nur am Materialinput. Die produktbezogene Ökobilanzierung bewertet dagegen zusätzlich auch alle Outputs (Emissionen). (nach Zimmer 2002)

- Zur Auswahl der geeigneten produktpolitischen Massnahmen im Bereich Produktökologie

Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz entspricht der detaillierten Planung der Studie. Diese beinhaltet zusammenfassend die Festlegung des zu untersuchenden Produktsystems (Funktion, funktionelle Einheit, Grenzen), die Anforderungen an die Daten (Qualität, Einschränkungen), die Wirkungskategorien (siehe 1.2.3.3. III. Wirkungsabschätzung) und den Aufbau des Berichtes. Im folgenden werden einige Punkte näher erläutert:

Funktionelle Einheit (=Bezugsgrösse): Mass für den Nutzen eines Produktsystems. Wichtig für den Vergleich von Produkten.

Beispiel: Wenn verschiedene Elektrizitätsmasten-Typen (Stahlrohr, Beton, Rundholz) miteinander verglichen werden, ist z.B. eine 0.4-kV Regelleitung als funktionelle Einheit besser geeignet als ein Einzelmast, da die Abstände zwischen den Masten je nach Material unterschiedlich sind.

Systemgrenzen (Einteilung in Module): Um die inneren und äusseren Grenzen eines Produktsystems festzulegen, wird der Lebensweg eines Produktes in einzelne Lebensabschnitte (Module) unterteilt (s. Abbildung 3), die weiter in Submodule aufgeteilt werden können.

Beispiele für Modul Produktherstellung (nach Frühwald und Hasch 2002):

Schnittholzherstellung mit möglichen Submodulen: Rundholzlager, Einschnitt, Schnittholzsortierung, Trocknung, ev. Imprägnierung.

Spanplattenherstellung mit möglichen Submodulen: Rohstoffbereitstellung, Spanaufbereitung, Trocknung, Beileimung, Presse, Schleifen, Lager, innerbetrieblicher Transport.

Der erste Lebensabschnitt von Holzprodukten beinhaltet die Holzproduktion von der Bestandesbegründung bis zur Holzernte und Bereitstellung an der Waldstrasse bzw. Lieferung ins Werk. Dieser Abschnitt wird bei der Bilanzierung von Holz- und Holzwerkstoffprodukten meistens pauschal behandelt. Die Erstellung von detaillierten Ökobilanzen zu diesem ersten Lebensabschnitt von Holzprodukten werden im 7. Semester (AK Forstliches Ingenieurwesen; Heinimann) behandelt (für weitergehende Literatur dazu vgl. auch Schweinle und Thoroe 2001).

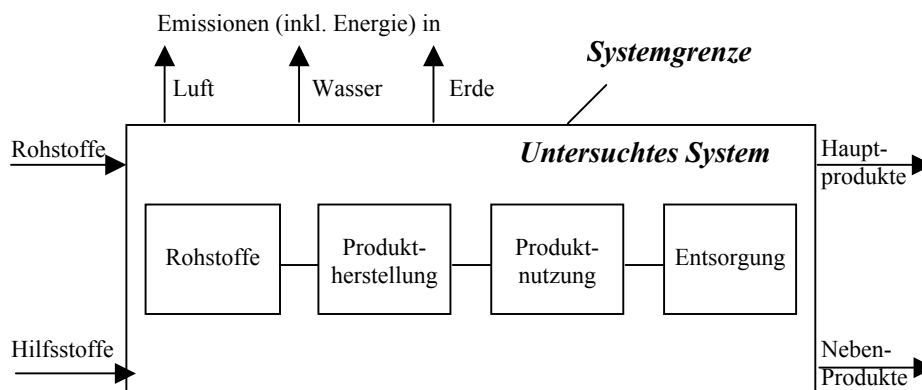


Abbildung 3 Modularer Aufbau einer Ökobilanz (aus Frühwald und Hasch 2002)

1.2.3.2. II. Sachbilanz

Die Sachbilanz ist die Darstellung aller umweltrelevanten Stoff- und Energieströme, d.h. der benötigten Ressourcen (Roh-, Werk-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie thermischer und elektrischer Energien) und der Emissionen in Luft, Wasser und Boden während des Lebenszyklus eines Produktes bzw. der einzelnen Module. Als Beispiel zeigt Tabelle 2 die Stoff- und Energieströme bei der Produktion einer Spanplatte.

Tabelle 2 Sachbilanz für die Produktion von Spanplatten für den Trockenbereich (aus Frühwald und Hasch 2002)

INPUT	kg/m³ Spanplatten	OUTPUT	kg/m³ Spanplatten
Rohstoffe		Produkt	
Industrieholz	95	Spanplatten	642.4
Schwarten und Kappstücke	127	Feuchte	54.4
Hackschnitzel	90.3	Summe	696.9
Späne	236.9	Nebenprodukte	
Spanplattenrecycling	6.4	Schonplatten, Kanthölzer, Leisten	5.1
Gebrauchtholz (Altholz)	87.8	Schleifstaub (zur Verbrennung)	68.9
Sonstiges	17	Sonstiger ausschuss	8
Summe Holz (atro)	660.4	Summe	82.1
Summe Wasser (63% Holzfeuchte)	415.8		
Leim und Zusatzstoffe		Flüssige Emissionen	
UF-Harz (Standardspanplatte)	54.6	Öffentliches Abwasser	36
Formaldehydfänger (techn. Harnstoff)	0.62	Sonstiges Oberflächenwasser	156.3
Härter (Ammoniumnitrat)	0.42	Altölentsorgung (Sondermüll)	0.027
Hydrophobierungsmittel (Paraffin)	2.50	Sonstige Fette/Öle	0.049
Emulgatoren	0.028	Markierungsfarbe organischer Lösungsmittel	0.0003
Sonstige Stoffe	0.011	Sonstige Markierungsfarbe	0.004
Summe Festmasse	58.2	Summe flüssige Emissionen	192.5
Flüssige Emissionen		Feste Emissionen	
Wasser aus:		Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle	1.457
Bindemittel	27.5	Stahlbänder (Holzplatz)	0.44
Paraffinemulsion	1.67	Metalle (Magnetabschneider)	0.008
Sonstigen Stoffen	0.47	Mischschrott (AzV)	0.51
Härter	1.71	Verpackungsmaterial:	
Sonstiges Prozesswasser:		Kunststoffe	0.23
Klimatisierungswasser (Luft)	25.2	Papier, Karton	0.034
Stadtwasser	96.2	Holz-Paletten	0.11
Sonstiges Produktionswasser	78.9	Metall	0.16
aus Brunnen		Sonstige feste Emissionen:	
Sonstiges Produktionswasser	53.4	Verwertbare Kunststoffe	0.05
Sonstiges:		Verwertbare Papiere/Kartons	0.03
Markierungsfarbe org. Lösungsmittel	0.002	Summe feste Emissionen	3.0
Sonstige Markierungsfarbe	0.011		
Summe	285.06		
Betriebsstoffe		Luftgetragene Emissionen	
Öle, fette, etc. (Betriebsstoffe)	0.105	Wasserdampf	448
Metalle (Betriebsstoffe)	1.1	Holzstaub und sonstiges	0.078
Sonstiges (Betriebsstoffe)	1.74	Summe	448.1
Summe Betriebsstoffe	2.96		
SUMME INPUT	1423	SUMME OUTPUT	1423

1.2.3.3. III. Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden die in der Sachbilanz erhobenen Daten auf ihre Umweltauswirkungen hin charakterisiert und bewertet. Zur Bewertung werden die Daten in verschiedene Gruppen aufgeteilt und gewichtet.

Eingeteilt wird in Summenparameter und wirkungsorientierte Parameter:

a) *Summenparameter (nach Hofer und Richter 1996)*

Primärenergie-Verbrauch: Sämtlicher Energieverbrauch auf Primärenergieträger (fossil oder erneuerbar) zurückgerechnet (Angabe in Megajoule).

Kritisches Luftvolumen, kritisches Wasservolumen: Luft- bzw. Wasservolumen, das durch die Emissionen belastet wird. Die Berechnung erfolgt anhand der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte des jeweiligen Landes¹⁰, indem die Emissionsdaten jedes Stoffes durch die entsprechenden Grenzwerte dividiert werden.

Feste Abfälle: Zur Deponie gelangende Abfälle. Gemäss der Schweizerischen Abfallverordnung¹¹ werden diese in die Kategorien Inertstoffe sowie Reaktor- und Sonderabfälle aufgeteilt.

b) *Wirkungsorientierte Parameter (nach Heijungs et al. 1992, zitiert in Hofer und Richter 1996)*

Treibhauseffekt (Global Warming Potential (GWP)): Gase, welche zum Treibhauseffekt beitragen, werden mittels Wirkungsfaktoren auf Kohlendioxid umgerechnet (kg CO₂-Äquivalent).

Photochemische Ozonbildung: Gase, die zur Bildung von photochemischen Oxidantien beitragen, werden mittels Wirkungsfaktoren auf Ethylen (kg C₂H₄-Äquivalent) umgerechnet.

Versauerung von Boden und Gewässern: Alle für die Versauerung relevanten Luftemissionen werden über Wirkungsfaktoren auf Schwefeldioxid (kg SO₂-Äquivalent umgerechnet).

Überdüngung: Emissionen in Wasser, Boden oder Luft werden über Wirkungsfaktoren auf Phosphat umgerechnet (kg PO₄-Äquivalent).

Humantoxizität: Emissionen mit einer Auswirkung auf die menschliche Gesundheit (kg Körpergewicht).

Ökotoxizität: Emissionen mit einem Einfluss auf die Stabilität von Ökosystemen (Wasser- oder Bodenökosysteme in m³ H₂O bzw. kg Boden).

¹⁰ Für die Schweiz gelten die Grenzwerte der Schweizerischen Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 28. März 2000) und die Grenzwerte in den Anhängen 2 und 3 der Schweizerischen Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 18. Dezember 2001):

Anhang 2 der (GSchV): Anforderungen an die Wasserqualität

Anhang 3 der GSchV: Anforderungen an die Ableitung vom verschmutztem Abwasser (3.1. Einleitung von kommunalem Abwasser in Gewässer; 3.2. Einleitung von Industrieabwasser in Gewässer oder in die öffentliche Kanalisation; 3.3. Einleitung von anderem verschmutztem Abwasser in Gewässer oder in die öffentliche Kanalisation).

¹¹ Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990 (Stand am 28. März 2000)

1.2.3.4. IV. Interpretation

In der Interpretation werden aus den Daten der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung Schlussfolgerungen und Empfehlungen an die Entscheidungsträger (Auftraggeber) formuliert (vgl. Zielsetzung).

Die Interpretation ist stark abhängig von der Qualität der erhobenen Daten. Daher ist eine Beurteilung der Daten von grosser Bedeutung. Nachfolgend sind einige Parameter zur Erfassung der Datenqualität aufgeführt:

- Genauigkeit (Varianz)
- Vollständigkeit
- Repräsentativität:
 - Zeitbezogener Erfassungsbereich (Zeitspanne, Alter der Daten)
 - Geographischer Erfassungsbereich (lokal, regional, national, kontinental, global)
 - Technologischer Erfassungsbereich (Einzelanlage, Mittelwert)
- Konsistenz
- Nachvollziehbarkeit

1.3. Grundlagen der Holzverwendung

Vom gesamten Baum können etwa 60% als Stammholz genutzt werden. Den restlichen Anteil machen Laub oder Nadeln, Äste und Zweige, Rinde sowie der Wurzelstock aus (Abbildung 4).

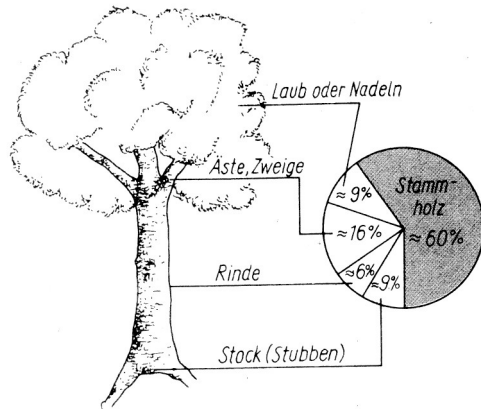


Abbildung 4 Anteil der verschiedenen organischen Substanzen an der Gesamt-Biomasse eines Baumes (Roland 1988).

Jährlich werden weltweit ca. 3.4 Mrd. Fm Holz genutzt¹². Davon wird rund die Hälfte als Brennholz verwendet: In Europa ca. 16 %, in Afrika ca. 85 %.

In der Schweiz betrug der Brennholzanteil an der gesamten Holznutzung im Jahr 1999 21 %. Der Brennholzverbrauch wurde von 1989 - 1999 dank Förderprogrammen des Bundes fast verdoppelt auf ca. 27 % des gesamten Holzverbrauchs. Abbildung 5 gibt einen Überblick über den Holzfluss in der Schweiz mit den Hauptverbrauchssektoren Energie, Bauwesen, Möbel, Verpackung, Papier/Karton, Do-it-yourself und übrige Holzwaren.

Das Holz kann gemäss seiner Verarbeitung folgendermassen unterteilt werden (in Anlehnung an Grammel 1989):

- Verwendung in roher oder mechanisch nur wenig veränderter Form:
 - Stangen, Stützen, Rammpfähle, Grubenstempel, Masten
- Verwendung nach mechanischer Verformung:
 - Schnittholz, Furniere, Holzwaren aller Art (Zündhölzer, Spankörbe, Holz-
wolle)
- Verwendung nach weitgehender mechanischer Verformung und Aufbau eines neuen Gefüges:
 - Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten, OSB, etc.
- Verwendung nach Auflösung des gewachsenen Fasergefüges
 - Holzschliff, Zellstoff → Papier, Karton
- Verwendung nach Zerlegung des Holzes in seine chemischen Grundbausteine durch Erwärmung
 - Holz als Energiestoff, hydrolytische Erzeugnisse → s. unter 1.4.
- Verwendung von Holznebenprodukten:
 - Rinde, Gerbstoffe, Harze (inkl. Terpentin- und Tallöl) → s. Kapitel 4

¹² Gemäss FAO Statistik 1999
Holztechnologie I

Dabei können folgende Stufen der Holzverarbeitung unterschieden werden (nach Roland 1988; s. auch Tabelle 3):

- Rohholzgewinnung (inkl. Rohholzaufbereitung, Sortimentsbereitstellung, Lagerung)
- Primäre Holzverwendung = Halbfabrikate (Verarbeitung zu Schnittholz, Lagenholz, Span- und Faserplatten, Zellstoff, Holzschliff)
- Sekundäre Holzverwendung = Endprodukte (Weiterverarbeitung zu Möbeln, Bauelementen, Holzwaren, Spielwaren, Musikinstrumenten, Papier, Karton, Chemieprodukten etc.)
- Verbrauch der Erzeugnisse

Tabelle 3: Wichtige Arten der Holzverwendung (nach Schuster in Roland 1988)

	Primäre Holzverwendung	Sekundäre Holzverwendung
Sägeholz	Schnittholz	Möbel Fenster, Türen Bauelemente Fahrzeug- und Schiffbau Holzgeräte, Holzwaren Schwellen, Leisten
Furnierholz	Furniere, Lagenholz	Möbel Inneneinbau, Ladenmöbel Formteile Verpackungen Schalungen
Plattenholz	Span- und Faserplatten	Möbel Inneneinbau Dämmelemente Fahrzeug- und Schiffbau Verpackungen
Chemie- und Faserholz	Zellstoff und Holzschliff	Papier, Karton Zellwolle, Kunstseide Verbandzellstoff Vulkanfiber Pharmazeutische und andere Chemieerzeugnisse
Schichtholz	Holzwohle, Späne	Leichtbauplatten Spanplatten Verpackungshilfsmaterial Sonstige Holzverwertung
Langholz, Pfähle, Stangen		Grubenholz, Masten Erd- und Brückenbau Bauwesen (Gerüste usw.) Landwirtschaftliches Bauwesen Zäune
Meilerholz		Holzkohle

in 1'000 m³ feste Holzmasse
en 1'000 m³ de bois compact

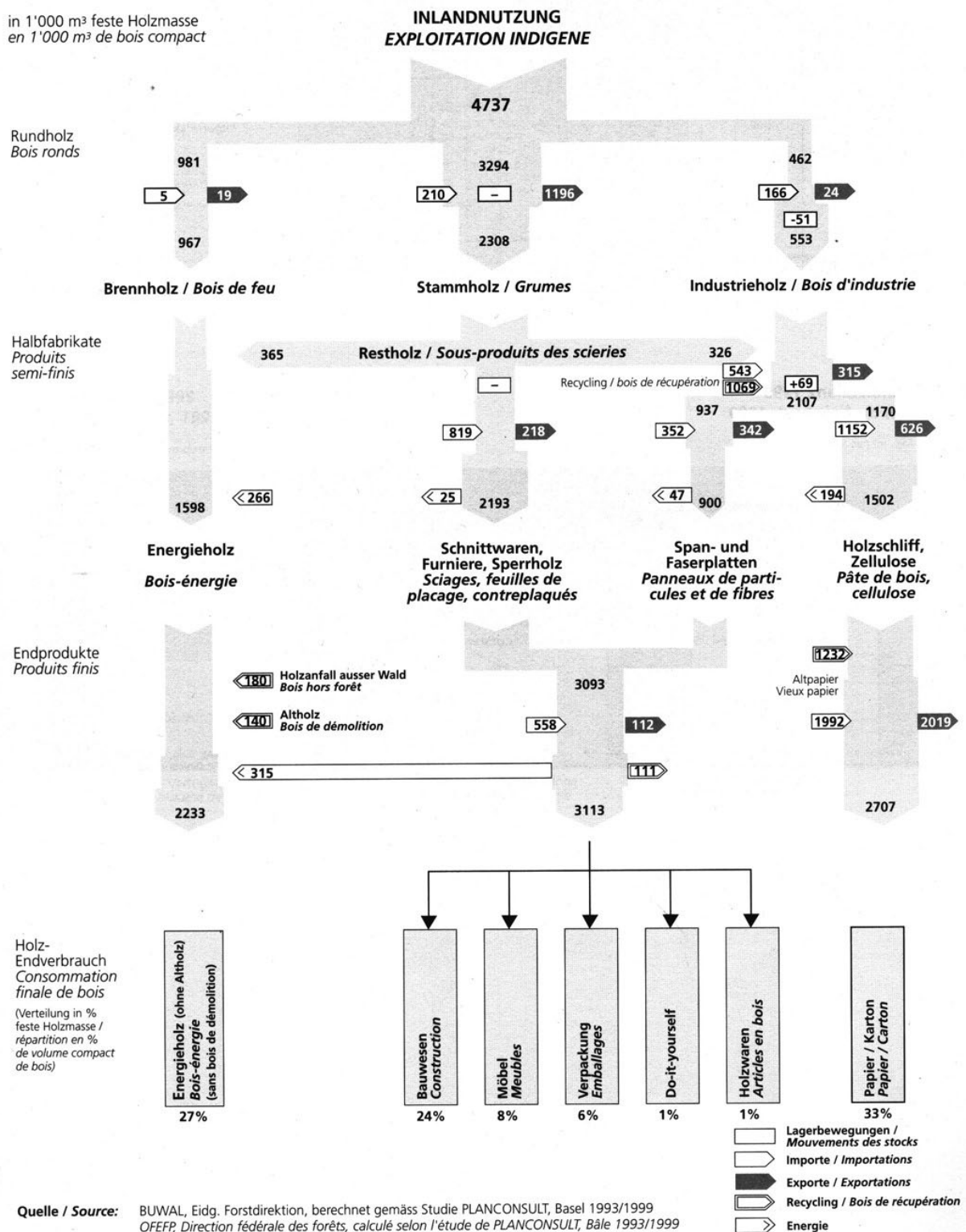


Abbildung 5: Übersicht über den Holzfluss in der Schweiz 1999 (Bundesamt für Statistik und BUWAL 2000).

1.4. Verfahren zur Umwandlung von Biomasse in Energie

Holz und andere Formen von Biomasse sind die wichtigsten erneuerbaren und verfügbaren Energieressourcen, die als einzige eine Quelle von flüssigen, gasförmigen und festen Brennstoffen darstellen. Holz und Biomasse können auf verschiedenen Wegen genutzt werden, um Energie bereitzustellen:

- Durch direkte *Verbrennung*, um Wärme abzugeben zu Heizzwecken, zur Dampfherstellung und zur Gewinnung von Elektrizität.
- Durch *Vergasung*, um gasförmige Brennstoffe zur Produktion von Wärme oder zur Stromerzeugung in Dieselmotoren und Gasturbinen einzusetzen.
- Durch „*fast pyrolysis*“ (eine Weiterentwicklung der *Pyrolyse*), um einen Flüssigbrennstoff herzustellen, der sich zu Heizzwecken oder als chemischer Rohstoff nutzen lässt als Ersatz von Erdöl.

1.4.1. Verbrennung

Verbrennung ist eine Abfolge von chemischen Prozessen (s. u.). Unter Reaktion mit Sauerstoff werden die Bestandteile des Holzes und der Rinde (Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und etwas Stickstoff) zu CO_2 und H_2O sowie Asche umgewandelt (Umkehrung der Assimilation), Wärme wird freigesetzt. Der obere Heizwert des Holzes schwankt je nach Holzart zwischen 14'500 und 22'000 kJ pro Kilogramm (atro); er ist fast ausschliesslich von der Rohdichte abhängig. Auf den Festmeter bezogen ergeben sich damit für die einzelnen Holzarten unterschiedliche Heizwerte. Der Wassergehalt ist der zweite wesentliche Einflussfaktor auf den Heizwert.

Das Holz ist bis ca. 100°C eine thermisch stabile Substanz. Darüber beginnt seine thermische Zersetzung. Lignin verbrennt als letzte der Hauptkomponenten des Holzes, und es bildet den grössten Teil der zurückbleibenden Holzkohle. Deswegen wird Lignin als der thermisch beständigste Holzbestandteil angesehen.

1.4.1.1. Die drei Phasen der Holzverbrennung

1. Trocknung (bis 150°C)

In der ersten Phase der Holzverbrennung wird das im Holz gebundene Wasser verdampft. Je mehr Wasser im Holz gebunden ist, um so mehr Energie wird dazu benötigt, das Wasser zu verdampfen. Dies ist ein wärmeverbrauchender (endothermer) Prozess. Dazu wird etwa 1-2 % des Heizwertes des lufttrockenen Holzes benötigt.

2. Thermische Zersetzung (Entgasung) ($150-550^\circ\text{C}$)

In dieser Phase laufen beim Holz zwei Prozesse parallel ab: Wechsel des Aggregatzustandes und thermische Aufspaltung seiner Substanz. Flüchtige Holzbestandteile gehen in die Gasphase über. Trockenes Holz besteht zu ca. 85 % aus flüchtigen, brennbaren Bestandteilen. Etwa 14 % der Holzbestandteile bleiben als Holzkohle übrig, wenn die Kohlevergasungstemperatur ($600-800^\circ\text{C}$) nicht erreicht wird. Auch die Entgasung ist ein wärmeverbrauchender Prozess. Die dazu verbrauchte Energie wird auf 10-20 % des Heizwertes des Holzes veranschlagt.

3. Oxidation (400-1100° C)

Ab ca. 400° C reagieren die brennbaren Gase spontan mit dem Luftsauerstoff. Man spricht hierbei von Oxidation. Dabei wird Energie frei (exotherme Reaktion). Es können Temperaturen bis 1100° C erreicht werden. Übrig bleibt Asche, also die nicht brennbaren Bestandteile des Holzes (0,5%-1%, je nach Rindenanteil).

1.4.1.2. Einfluss der Holzart

Der Heizwert ist definiert als Wärmemenge, die bei vollkommener Verbrennung eines Stoffes frei wird (Masseinheit kJ/kg, Bezugsgrösse Atro-Gewicht). Die Rohdichte hat den grössten Einfluss auf den Heizwert des Holzes. Aus dieser Abhängigkeit ist zu folgern, dass gleiche Gewichtsmengen gleich trockenen Holzes der verschiedenen Holzarten den gleichen Heizwert haben. Tatsächlich variiert der Heizwert von Holzart zu Holzart nur wenig. Legt man aber anstatt des Gewichts gleiche Raumdichte zugrunde, dann ergibt sich für das lufttrockene Stammholz nachstehende Reihenfolge der wichtigsten Holzarten: Hainbuche, Eiche, Rotbuche, Birke, Lärche, Kiefer, Fichte, Tanne.

1.4.1.3. Der Heizwert von Holz und der Wassergehalt

Der Heizwert von Holz ist neben der Rohdichte stark von seinem Wassergehalt abhängig.

Bei der Verbrennung geht eine gewisse Wärmemenge verloren. Sie wird verbraucht, um die im Holz stets enthaltene Feuchte zu verdampfen, was besagt, dass der erreichbare Heizwert um so geringer sein muss, je feuchter das Holz ist. In der Praxis hat daher auch nur der „untere Heizwert“ (H_u) Bedeutung. H_u ist die Wärmemenge pro kg Brennstoff, welche gewonnen werden kann, ohne den Wärmehalt des Wasserdampfes (aus der Holzfeuchte und aus der Verbrennung des Wasserstoffgehaltes) zu nutzen. H_u steigt proportional mit dem abnehmenden Wassergehalt u des Holzes an. H_u beträgt für lufttrockenes Holz (15% Feuchte) durchschnittlich 15'400 kJ/kg.

Da der Heizwert des Holzes mit zunehmendem Feuchtegehalt sehr stark absinkt, sollte es vor dem Einsatz als Brennmaterial mindestens 1, besser 2 Jahre unter Dach an einem trockenen, gut durchlüfteten Platz gelagert werden. Nur auf diese Art und Weise lässt sich ein geringer Feuchtegehalt von $u \leq 20\%$ erzielen. Ein zu hoher Feuchtegehalt verringert nicht nur den Heizwert, sondern auch die Feuerraum- und Abgastemperatur, wodurch die Bildung unverbrannter Gase, Holzteer, Holzessig usw. gefördert wird.

Dies gilt jedoch vor allem für kleinere Heizwerke. Die Industrie ist bei grossen Feuerungsanlagen bereits dazu übergegangen Holz grün zu verfeuern.

1.4.1.4. Rindenanteile

Häufig weist Holz, das bei der Verbrennung eingesetzt wird, noch erhebliche Mengen an Rinde auf. Der Heizwert von Rinde von verschiedenen Holzarten ist im Durchschnitt höher als die Werte für Holz, was auf den höheren Kohlenstoffgehalt in der Rinde zurückzuführen ist. Bei der Rindenverbrennung ist der Energie-Input für die Vortrocknung der generell nassen Rinde hoch. Die zusätzlich höheren Ascheanteile als im Holz und der Dreck reduzieren den Heizwert in der Rindenverbrennung.

1.4.1.5. Energieträger Holz - Energetische Aspekte

Mit der Verbrennung kann ein hoher Umwandlungswirkungsgrad von über 90% erreicht werden. Bei reiner Wärmenutzung kann nahezu die gesamte umgesetzte Energie genutzt werden. Der Wirkungsgrad der Stromerzeugung hängt v.a. von den nachgeschalteten Prozessschritten ab und liegt im Bereich von 8 - 42%.

Ein Raummeter Holz (450 kg) = 2000 kWh

Dies entspricht:

- 210 l Heizöl, 262 kg Steinkohle
- oder 210 m³ Erdgas

Weltweit werden jährlich ca. 3,2 Mrd. Fm Holz genutzt, davon rund 1,7 Mrd. Fm (53%) für Heizzwecke. In der Schweiz wird 31% des jährlichen Holzeinschlages für die Energiegewinnung eingesetzt, zumeist in grossen, kommunalen Hackschnitzelfeuerungsanlagen. Im sonstigen Europa werden ca. 16% des geschlagenen Holzes für die Energieerzeugung benötigt, in Südamerika und Asien ca. 75%, in Afrika sogar mehr als 85%.

In den wenig technisierten Ländern ist Holz heute noch das wichtigste Brenn- und Heizmaterial, dagegen stellen in den industrialisierten Ländern die fossilen Energieträger den Hauptanteil an der Energieversorgung.

In Europa gewinnt Holz als Brennmaterial wieder an Bedeutung. Abgesehen von der Nutzung als Kaminbrennstoff wird es zunehmend in hoch entwickelten Feuerungsanlagen, die einen hohen thermischen Wirkungsgrad aufweisen, in Form von Hackschnitzeln verbrannt. Da in den meisten Industrieländern Holz, insbesondere Schwach- und Restholz, ein Überschussprodukt darstellt, ist diese Nutzung auch sinnvoll.

1.4.1.6. Emissionen bei der Holzverbrennung

Die Emissionen bei der Verbrennung von Holz lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

- Unvermeidbare Emissionen bei vollkommener Verbrennung:
 - Wasserdampf H₂O hat keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt.
 - Kohlendioxid CO₂ ist das Produkt der vollständigen Verbrennung von Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoff leistet auf Grund des "geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs" keinen negativen Beitrag zum Treibhauseffekt.
 - Stickoxide NO_x tragen zum Sommersmog bei und verursachen sauren Regen, spielen aber wegen des sehr geringen Anteils bei der Holzverbrennung keine Rolle.
 - Aschepartikel (anorganischer Staubanteil) sind durch Primärmaßnahmen wie die richtige Luft- und Rauchgasführung gut beherrschbar und durch Sekundärmaßnahmen (Fliehkraftabscheider, Gewebe- und Elektrofilter) weiter reduzierbar. Eine Beeinträchtigung der Umwelt durch moderne Holzfeuerungsanlagen ist daher ausgeschlossen. Es entstehen im Gegensatz zu Öl- und Gasfeuerungen weder Schwefeldioxid (SO₂), noch kommt es zur Ablagerung von Schwermetallen wie Blei oder Cadmium.
- Vermeidbare Emissionen: Diese ergeben sich nur in Folge einer unvollständigen Verbrennung. Sie werden durch Optimierung der Feuerung sowie durch das richtige Brenngutsortiment minimiert.

- Kohlenwasserstoffe C_nH_m und Kohlenmonoxid CO werden durch hohe Verbrennungstemperaturen, ausreichend Verbrennungsluft und eine entsprechende Verweildauer in der heißen Verbrennungszone vermieden.
- Unverbrannte Partikel (Ruß) werden ebenfalls durch oben beschriebene Optimierung der Feuerung minimiert. Diese Emissionen stellen bei modernen Holzfeuerungsanlagen durch optimierten Abbrand keine Probleme dar.

1.4.2. Pyrolyse (Verkohlung)

Wird Holz unter Luftabschluss erwärmt, bilden sich brennbare Gase und Holzkohle; unter 600°C außerdem Teere und (Pyrolyse-)Öle. Der thermische Abbau des festen Brennstoffes erfolgt nur durch Einwirkung hoher Temperatur, also im Gegensatz zur Vergasung und Verbrennung, ohne Zufuhr von Luft. Somit ist die Pyrolyse eine Art Zwischenstadium auf dem Weg, Energieträger herzustellen.

Abhängig von der Aufheizgeschwindigkeit und Verweilzeit des Holzes im Pyrolyse-reaktor findet eine Unterscheidung zwischen langsamer Pyrolyse und schneller Pyrolyse (Flashpyrolyse) statt. Das erwünschte Hauptprodukt der langsamen Pyrolyse ist Holzkohle, dasjenige der schnellen Pyrolyse Öl.

1.4.3. Holzverkohlung

In hochindustrialisierten Ländern wird Holzkohle fast ausschliesslich industriell in Retorten-Meilern (REICHERT-Verfahren) gewonnen. Bei diesem Prozess kommt das Holz nicht mehr mit Feuer in Berührung, sondern die in sich geschlossene Retorte wird von aussen (zum Teil durch das gewonnene Gas) beheizt. Die Beschickung des 100 m^3 fassenden Retortensystems, sowie der gesamte Verkohlungsprozess ist weitgehend automatisiert. Weitere flüchtige Destillationsprodukte (Aceton, Methylacetat, Essigsäure u.a.) können voneinander getrennt werden.

Die Dichte der Holzkohle wird wesentlich durch die Holzart bestimmt. Laubholzkohle ist fest und dicht, Nadelholzkohle weich und porös.

Der Holzkohleverbrauch z.B. in Deutschland beläuft sich auf $81'000\text{ t/a}$. Davon werden ca. $57'000\text{ t}$ importiert und ca. $30'000\text{ t}$ im Inland hergestellt. Die Weltproduktion wird zur Zeit auf $2,4\text{ Mio t}$ geschätzt.

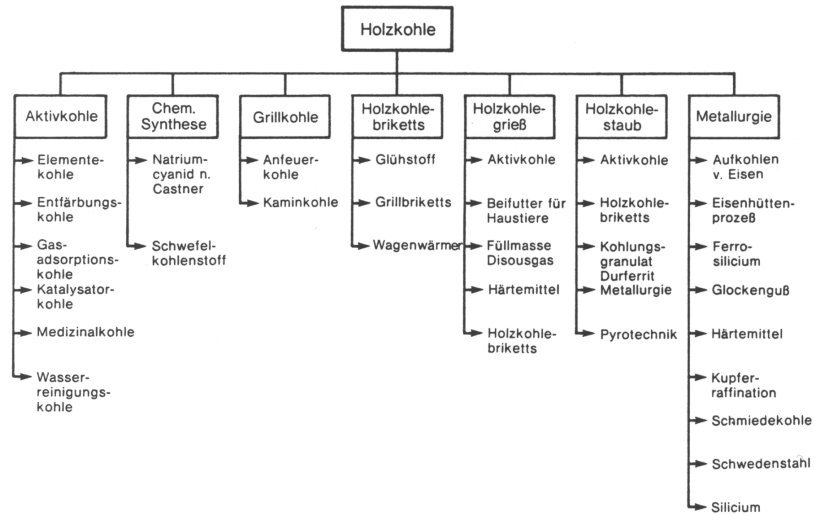


Abbildung 6 Verwendung von Holzkohle (Grammel 1989)

1.4.3.1. Energetische Aspekte

Der energetische Aspekt von Holzkohle ist im Vergleich mit Holz dargestellt (vgl. Abbildung 7).

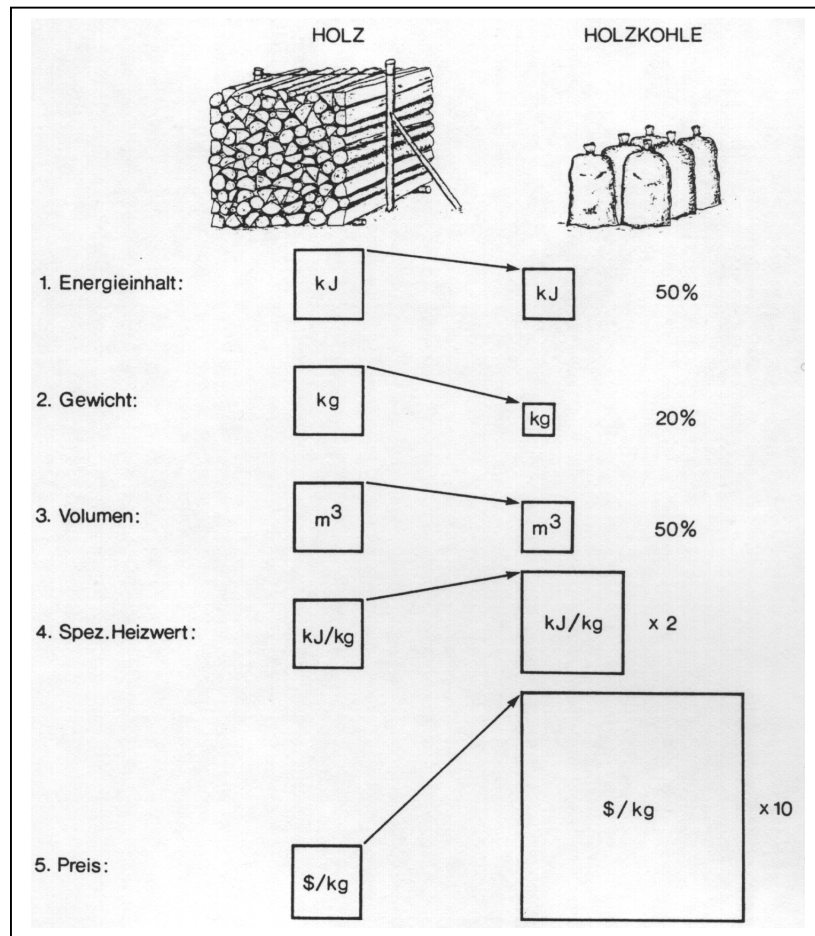


Abbildung 7 Eigenschaften von Holz im Vergleich zur Holzkohle

1.4.4. Flashpyrolyse

„Fast pyrolysis“ oder Flashpyrolyse ist ein Mitteltemperatur-Prozess, wobei Biomasse rasch unter Ausschluss von Sauerstoff erhitzt wird. Die wesentlichen Schritte der Flashpyrolyse sind:

- Sehr hohe Aufheiz- und Wärmeübertragungsraten
- Sehr genau kontrollierte Reaktionstemperatur von 500°C in der Dampfphase, mit kurzer Verweildauer des Dampfes von typischerweise weniger als 2 Sek., um die Gefahr der Sekundärreaktionen zu minimieren
- Rasche Kühlung des Pyrolyse-Dampfes, um das Bio-Ölprodukt zu erhalten

Nach dem Kühlen und der Kondensation erhält man eine dunkelbraune, freifliessende Flüssigkeit, die einen Heizwert von ungefähr der Hälfte von konventionellem Öl hat.

Chemisch gesehen bestehen die Pyrolyseöle aus einer Vielzahl von organischen, sauerstoffhaltigen Verbindungen (Carbonsäuren, Phenole, Alkohole,...).

Obwohl sie mit der traditionellen Pyrolyse-Methode (Verkohlung) verwandt ist, ist Flashpyrolyse ein weiterentwickelter Schritt, der genauestens kontrolliert wird, um eine hohe Ausbeute von Flüssigkeit zu erhalten.

Das Hauptprodukt „Bio-Öl“ wird in Ausbeuten von ca. 75 % (bezogen auf den trockenen Rohstoff) gewonnen. Zusätzlich entstehen als wertvolle Nebenprodukte Holzkohle (10-15%) und Gas (15-20%), die zur Erzeugung von Prozessenergie eingesetzt werden, so dass (ausser Asche) kein Abfall anfällt.

Für die Stromerzeugung aus Pyrolyseöl können Dieselmotoren und Gasturbinen eingesetzt werden, so dass sich nach Berechnungen niederländischer Fachleute ein Gesamtwirkungsgrad von 35% ergibt. Das ist deutlich mehr als man durch Verbrennung und Vergasung erzielen kann (20-30%). Zudem ist das Pyrolyseöl eine Quelle für chemische Rohstoffe.

Die Verflüssigung bietet den Vorteil, dass die Erzeugung des Energieträgers räumlich und zeitlich von seiner Verwendung entkoppelt werden kann; das Öl lässt sich raumsparend speichern und transportieren.

Die traditionelle Holzpyrolyse in Erdgruben und Meilern wurde schon in vorgeschichtlicher Zeit zur Erzeugung von Holzkohle durchgeführt. Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts setzte man Retorten ein, mit denen auch flüssige Nebenprodukte gewonnen werden konnten.

Die Pyrolyse ist eine vielversprechende Technologie, die sich regenerative Ressourcen in hoher Effizienz zunutze macht. Entscheidend für den praktischen Einsatz ist neben dem Wirkungsgrad auch, wie weit das produzierte Pyrolyseöl vor der Lagerung und Nutzung noch aufbereitet werden muss.

1.4.5. Vergasung

Vergasung ist die Technik zur Erzeugung brennbarer Gase aus Holz oder ähnlichen organischen Materialien. Im Unterschied zur Holzverkohlung, bei der Holzgas nur als Nebenprodukt anfällt, erfolgt eine nahezu vollständige Umwandlung der Feststoffe in Gase bei Temperaturen um 700 - 900°C. Bei der Vergasung laufen zwei Schritte gekoppelt ab: bei tieferen Temperaturen entstehen Teer und Holzkohle, bei höheren reagieren diese Produkte mit Luft oder Sauerstoff in einer Verkettung chemischer Re-

aktionen zu einem Gasgemisch aus Kohlenmonoxyd (CO), Kohlendioxid (CO₂), Wasserstoff (H₂), Wasserdampf, Spuren von Methan (CH₄), Stickstoff (N₂) und Teer.

Die Zusammensetzung der entstehenden Gase hängt in hohem Masse von der Feuchtigkeit des Holzes ab; dies gilt insbesondere für die Ausbeute an CO und CO₂ und wirkt sich daher auf den Heizwert des Holzgases aus.

1.4.5.1. Energetische Aspekte

Mit der Vergasung kann ein Umwandlungswirkungsgrad von Holz zu Produktgas von 70 - 85% erreicht werden. Der Wirkungsgrad der Stromerzeugung hängt v.a. von den nachgestellten Prozessschritten ab (Kleinanlagen mit Verbrennungsmotoren 12 - 25%, Kraftwerke mit Gasturbinen 30 - 45% oder mit Brennstoffzellen 50 - 60%).

Anfänglich wurde Holzgas für Leuchtzwecke in Gaswerken erzeugt. In der Zeit der beiden Weltkriege wurden die energiereichen Holzgase als Treibstoff für Verbrennungsmotoren genutzt (2,5 bis 3 kg atro-Holz ersetzen 1 l Benzin).

Die grosstechnische Vergasung verlangt höhere Versorgungsmengen, (die optimale Wirtschaftlichkeit soll erst bei 4000 t pro Tag erreicht werden) und ist daher in näherer Zukunft in Europa nicht realisierbar. Die Situation der Vergasung von Holz und Holzabfällen in kleinerem Rahmen in Gasgeneratoren ist als günstiger anzusehen. Durch die einheitliche Bestrebung den klimaneutralen Brennstoff Holz vermehrt einzusetzen, wurde im rheinländischen Oberhausen vom Fraunhofer-Institut ein Holzkraftwerk fast bis zur Serienreife entwickelt.

1.5. Literatur zu Kapitel 1

- Anonymus (2002):** Stellungnahme der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe (GWG) zur Ratifizierung des Kyoto-Protokolls und zur Rolle des Gebirgswaldes als mögliche biologische Kohlenstoff-Senke. Unveröffentlicht. 3 S.
- Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (2000):** Wald und Holz in der Schweiz. Jahrbuch 2000. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, 169 S.
- Bridgwater, A.V., Meier, D., Radlein, D. (1999):** An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 30: 1479-1493.
- Frühwald, A., Pohlmann, C. M., Hasch, J. (2002):** CO₂-Speicherung durch die Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen im Holzbau. In: Tagungsband der 9. Quedlinburger Holzbautagung 14.-16. November 2002. 20 S.
- Hasch, J. (2002):** Ökologische Betrachtungen von Holzspan- und Holzfaserplatten. Dissertation Universität Hamburg, 292 S.
- Heijungs, R., Guinée, J. B. et al. (1992):** Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Background. Center of Environmental Science, Leiden, Netherland.
- Hofer, P. und Richter, K. (1996):** Holz: Ein ökologischer Rohstoff. *Lignatec* 1/1996, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für das Holz (LIGNUM), Zürich, 27 S.
- Hungerbühler, K. (1997):** Grundkonzepte zum umweltorientierten Produkt- und Prozessdesign. Skript zur Vorlesung Umweltchemie III, ETH Zürich.
- Künniger, T. und Richter, K. (2001):** Ökobilanz von Konstruktionen im Garten- und Landschaftsbau. Forschungs- und Arbeitsbericht EMPA 115/43, Dübendorf, 171 S.
- Marutzky, R. und Seeger, K. (1999):** Energie aus Holz und anderer Biomasse. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 352 S.
- Meier, D., Faix, O. (1999):** Heizöl und Chemie-Rohstoff aus Holz, Flash-Pyrolyse eröffnet neue Möglichkeiten. Internetreport: www.verbraucherministerium.de/forschungsreport/rep1-99/holz.htm
- Nussbaumer, T. (1994):** Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz. Tagungsband zum 3. Holzenergie-Symposium. Bundesamt für Energiewirtschaft (ENET), Bern, 275 S.
- Nussbaumer, T. (1993):** Stofffluss bei der Verbrennung und Vergasung von Altholz. Eidgenössische Drucksachen und Materialzentrale EDMZ, Bern, 73 S.
- Roland, K., Müller, W., Schmidt, B., Schmidt, H.F.W., Zemmrich, D. (1988):** Wissenspeicher Holztechnik: Grundlagen. Fachbuchverlag, Leipzig, 720 S.
- Schweinle, J. und Thoree, C., (2004):** Vergleichende Ökobilanzierung der Rundholzproduktion in verschiedenen Forstbetrieben. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Nr. 204. 140 S.
- Weingarten, Joe (1997):** Holzvergasung. Arbeitskreis: Energetische Nutzung der Biomasse; Holz in Rheinland-Pfalz. Verlag Gebhardt & Hilden, Idar-Oberstein, 133 S.
- Zimmer, B. (2002):** Ökobilanzierung – Bewertungssystem für Werkstoffe und Produkte der Zukunft. In: Holz: Rohstoff - Werkstoff - Energiequelle der Zukunft S. 69-80. Institut für Holzforschung und Verband Holzwirte Österreichs, Wien.

www.clubofrome.org
<http://www.energie-schweiz.ch/>
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>
www.admin.ch/ch/d/sr/c641_71.html
www.fowi.ethz.ch/piw

Club of Rome
Energieportal der Schweiz
Kyoto-Protokoll
CO₂-Gesetz der Schweiz
Informationen zu Life cycle analysis