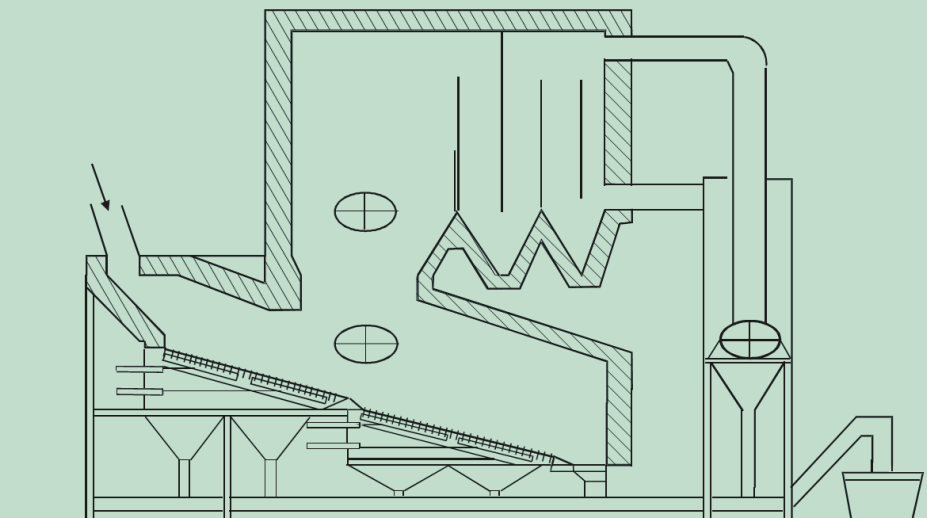


Folke Wolff

# Biomasse in Baden-Württemberg - ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz als Energieträger

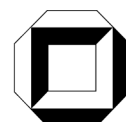


Folke Wolff

**Biomasse in Baden-Württemberg –  
ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung  
der Ressource Holz als Energieträger**

# **Biomasse in Baden-Württemberg – ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz als Energieträger**

von  
Folke Wolff



---

universitätsverlag karlsruhe

Dissertation, Universität Karlsruhe (TH),  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 2004

## **Impressum**

Universitätsverlag Karlsruhe  
c/o Universitätsbibliothek  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

[www.uvka.de](http://www.uvka.de)

© Universitätsverlag Karlsruhe 2005  
Print on Demand

ISBN 3-937300-44-9

## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung (DFIU) der Technischen Universität in Karlsruhe und wurde von mir im Anschluss daran zusammen geschrieben und fertig gestellt.

Für das Gelingen der Arbeit hat die Unterstützung vieler KollegInnen, Freunde und Familie beigetragen, wofür ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken möchte.

Allen voran danke ich Herrn Prof. Dr. O. Rentz für die Übernahme der Betreuung als Doktorvater und die Unterstützung und Motivation sowohl während als auch nach meiner Zeit am DFIU, was die Fertigstellung der Arbeit erst ermöglichte. Herrn Prof. Dr. T. Lützkendorf danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie den Herren Prof. Dr. Kowalski und Herrn Dr. Böttcher für Prüfung und faire Beurteilung.

Die Zeit am DFIU wird mir durch die herzliche Aufnahme und freundschaftliche Zusammenarbeit in der Gruppe von Frau Dr. Karl in sehr angenehmer Erinnerung bleiben. Ihr möchte ich außerdem dafür danken, dass sie mir jederzeit mit Rat und Hilfe zur Seite stand. Ebenso möchte ich mich bei meinen KollegInnen am DFIU für die gute Zeit am Institut und die Unterstützung bedanken. Herrn Dr. Fichtner, Herrn Dr. Wietschel, Frau Dr. Geldermann, Frau Dr. Avci und einigen anderen möchte ich für die Unterstützung im Bereich der Wirtschaftswissenschaften sehr herzlich danken.

Grundlage für die Berechnungen der Prozessketten für Biomassefeuerungen waren Erhebungen von Daten bestehender Anlagen. An dieser Stelle möchte ich daher allen Betreibern der Anlagen und anderen Fachleuten, die mir die Grundlagen für meine Arbeit zur Verfügung gestellt und viele sehr nützliche Hinweise für das Verständnis der Materie gegeben haben, sehr herzlich danken.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mir das Studium ermöglicht haben, sowie ihnen, meinen Geschwistern und engen Freunden dafür, dass sie stets zu meiner Unterstützung und Motivation beigetragen haben.

Mannheim, Januar 2005



# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>METHODIK UND VORGEHENSWEISE</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Potenzialanalyse der Ressource Holz in Baden-Württemberg</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Ökobilanzielles Bewertungsverfahren der energetischen Holznutzung</b>	<b>6</b>
3.2.1	Input-Output Analyse	9
3.2.2	Prozesskettenanalyse	13
<b>3.3</b>	<b>Betrachtung der Gesamtsituation Baden-Württemberg</b>	<b>16</b>
3.3.1	Energiesystemanalyse	17
3.3.2	Emissionen krebserzeugender Spurenstoffe	18
3.3.3	Chancen im Rahmen der Agenda 21	18
<b>4</b>	<b>POTENZIALE DER RESSOURCE HOLZ IN BADEN-WÜRTTEMBERG</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Aufkommen nach Holzarten</b>	<b>19</b>
4.1.1	Waldrestholz	22
4.1.2	Rinde	24
4.1.3	Gebrauchtholz	26
4.1.4	Landschaftspflegeholz	31
4.1.5	Sägenebenprodukte	33
4.1.6	Industrierestholz	34
<b>4.2</b>	<b>Charakterisierung der Holzarten im Hinblick auf die energetische Nutzung</b>	<b>36</b>
4.2.1	Einflussfaktoren auf den Heizwert	37

4.2.2	Emissionsrelevante Schadstoffgehalte	43
4.2.3	Charakterisierung der Aschen	48
<b>4.3</b>	<b>Brennstoffpreise der Holzarten</b>	<b>53</b>
<b>4.4</b>	<b>Einsatzgebiete der Holzenergie</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>BILANZIERUNG TYPISCHER PROZESSKETTEN</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Auswahl der Anlagenbeispiele</b>	<b>59</b>
5.1.1	Holzfeuerungen aus dem Bereich der kommunalen Nahwärmeversorgung	60
5.1.2	Fernheizwerke	61
5.1.3	Industrieheizkraftwerke mit reinen Holzfeuerungen	62
5.1.4	Mitverbrennung in Heizkraftwerken	62
<b>5.2</b>	<b>Charakterisierung der Elemente der Prozessketten</b>	<b>64</b>
5.2.1	Bereitstellung des Brennstoffs Holz	64
5.2.2	Feuerungsanlagen für Holz	87
5.2.3	Verwertung bzw. Entsorgung der festen Rückstände	124
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE DER PROZESSKETTENBERECHNUNG</b>	<b>143</b>
<b>6.1</b>	<b>Vergleich der Optionen für energetische Holznutzung</b>	<b>143</b>
6.1.1	Kumulierter Energieaufwand	143
6.1.2	Kohlenmonoxid- Emissionen	144
6.1.3	Stickoxid- Emissionen	145
6.1.4	Schwefeldioxid- Emissionen	145
6.1.5	Staub- Emissionen	146
6.1.6	Emissionen an Kohlendioxid	146
6.1.7	Spezifische Investitionen	147
6.1.8	Wärmegestehungskosten	148
<b>6.2</b>	<b>Vergleich mit fossiler Energieerzeugung</b>	<b>148</b>
6.2.1	Kommunale Nahwärmeversorgung mit dem Holz- Grundlast- System	149



---

6.2.2	Kommunale Nahwärmeversorgung mit dem Holz- Mittellast- System	150
6.2.3	Fernheizwerke	152
6.2.4	Industrieholzheizkraftwerke	153
6.2.5	Holz- Mitverbrennung im Heizkraftwerk Pforzheim	154
<b>7</b>	<b>SENSITIVITÄTSANALYSE DER PROZESSKETTENBERECHNUNG</b>	<b>156</b>
7.1	Variabilität und Unsicherheit der Daten über die Bereitstellung der Brennstoffe	156
7.2	Variabilität und Unsicherheit der Brennstoffpreise	158
7.3	Alternativen der Ascheentsorgung	160
<b>8</b>	<b>EXKURS I: ENERGIESYSTEMANALYSE DER ENERGETISCHEN HOLZNUTZUNG</b>	<b>164</b>
8.1	Charakteristika des Modells und betrachtete Szenarien	164
8.2	Ergebnisse der Modellberechnungen mit Perseus-Reg <sup>2</sup>	166
<b>9</b>	<b>EXKURS II: KANZEROGENE EMISSIONEN DURCH HOLZNUTZUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG</b>	<b>169</b>
9.1	Emissionen von Arsen- und Cadmium und ihren Verbindungen aus Holzfeuerungen	170
9.2	Emissionen von Benzol und PAK aus Holzfeuerungen	172
9.3	Emissionen von Dioxinen/ Furanen aus Holzfeuerungen	175
<b>10</b>	<b>EXKURS III: ENERGETISCHE HOLZNUTZUNG IM RAHMEN DER LOKALEN AGENDA 21 AM BEISPIEL DER GEMEINDE STUTENSEE</b>	<b>177</b>
10.1	Bilanzierung des Holzaufkommens in Stutensee	178
10.2	Mögliche Nutzung der Holzressourcen	179
10.3	Weitere Chancen und Anknüpfungspunkte zu La Petite Pierre	181

<b>11</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND KONSEQUENZEN FÜR POLITISCHE HANDLUNGSTRÄGER</b>	<b>184</b>
11.1	Nutzung Erneuerbarer Energien, CO <sub>2fossil</sub> -Einsparung	184
11.2	Emissionen durch die Nutzung der Holzenergie	185
11.3	Ökonomische Aspekte der Holzenergienutzung und deren Förderung	186
11.4	Holzenergienutzung zur Stromerzeugung im bestehenden Energiesystem Baden-Württemberg	189
11.5	Aktuelle Tendenzen	191
11.6	Anmerkungen zur Förderung von Wärmebereitstellung aus Holzfeuerungsanlagen	193
	<b>GLOSSAR</b>	<b>195</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>201</b>
<b>Anhang I –</b>	<b>Charakterisierung der Prozessketten</b>	
<b>Anhang II –</b>	<b>Ergebnisse der Prozesskettenberechnung</b>	
<b>Anhang III –</b>	<b>Daten und Ergebnisse zum Energiesystemmodell</b>	
<b>Anhang IV –</b>	<b>Rahmendaten zur Stadt Stutensee</b>	

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 4-1:</b>	Potenziale für energetisch nutzbares Holz in Baden-Württemberg	20
<b>Tabelle 4-2:</b>	Besitzstruktur der Waldflächen in Baden-Württemberg	22
<b>Tabelle 4-3:</b>	Charakterisierung der Rinde anhand der durchschnittlichen Kenngrößen	25
<b>Tabelle 4-4:</b>	Jährliche Zuwachsraten und technisch erfassbare Anteile verschiedener Landschaftspflegeholzarten	32
<b>Tabelle 4-5:</b>	Bestandteile des naturbelassenen Holzes (Laubholz)	37
<b>Tabelle 4-6:</b>	Heizwerte berechnet nach Dulong mit Angaben aus [MARUTZKY U. SEEGER 99]	38
<b>Tabelle 4-7:</b>	Umrechnungsfaktoren für Hackschnitzel aus Fichte und Buche	39
<b>Tabelle 4-8:</b>	Einteilung der Baumarten nach Energieinhalt	39
<b>Tabelle 4-9:</b>	Typische Holzfeuchten und Wassergehalte verschiedener Sortimente	41
<b>Tabelle 4-10:</b>	Berechnete Heizwerte für verschiedene Holzsortimente nach [MARUTZKY U. SEEGER 99]	42
<b>Tabelle 4-11:</b>	Beispielwerte für Anteile an emissionsrelevanten Elementen in mg/kg TS von Holzsortimenten	43
<b>Tabelle 4-12:</b>	Typische holzfremde Gebrauchtholzbestandteile und deren Auswirkungen	44
<b>Tabelle 4-13:</b>	Typische Partikelgrößen, Teilchendichten und Schüttdichten von Holzaschen	49
<b>Tabelle 4-14:</b>	Anteile der Aschefraktionen in Gew.-% des gesamten Ascheanfalls	49
<b>Tabelle 4-15:</b>	Nährstoffgehalt in Gew.-% der Trockensubstanz der Aschearten	50

<b>Tabelle 4-16:</b>	Gegenüberstellung der Potenziale für Baden-Württemberg mit den Anwendungen der Holzsortimente zur Energieerzeugung	58
<b>Tabelle 5-1:</b>	Charakterisierung der Anlagenbeispiele kommunale Nahwärmeversorgung	60
<b>Tabelle 5-2:</b>	Charakterisierung der Anlagenbeispiele für Fernheizwerke	61
<b>Tabelle 5-3:</b>	Charakterisierung der Anlagenbeispiele für Industrieheizkraftwerke mit reiner Holzfeuerung	62
<b>Tabelle 5-4:</b>	Charakterisierung der Industrieheizkraftwerke mit Mischfeuerung	63
<b>Tabelle 5-5:</b>	Technische Merkmale von Hackern verschiedener Funktionsprinzipien	66
<b>Tabelle 5-6:</b>	Kenndaten für Hackmaschinen verschiedener Größe	67
<b>Tabelle 5-7:</b>	Emissionen für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln	69
<b>Tabelle 5-8:</b>	Emissionen für die Bereitstellung von Rinde	69
<b>Tabelle 5-9:</b>	Kostenangaben für die Waldholz-Bereitstellung aus der Literatur	70
<b>Tabelle 5-10:</b>	Emissionen für die Bereitstellung von Landschafts Pflegeholz	72
<b>Tabelle 5-11:</b>	Angaben zu abgesaugtem Luftstrom von Entstaubungsanlagen	79
<b>Tabelle 5-12:</b>	Emissionen für die Bereitstellung von Gebrauchtholz	80
<b>Tabelle 5-13:</b>	Transportpreise für den Hackschnitzeltransport nach [EICHELBERGER 00]	81
<b>Tabelle 5-14:</b>	Kosten für die Bereitstellung von Altholz für die Anlagenbeispiele	81
<b>Tabelle 5-15:</b>	Energieaufwand für die Bereitstellung von Industrierestholz	82
<b>Tabelle 5-16:</b>	Emissionen für die Bereitstellung von Industrierestholz in kg/t Holz	83

<b>Tabelle 5-17:</b>	Transportpreise für den Hackschnitzeltransport nach [EICHELBERGER 00]	84
<b>Tabelle 5-18:</b>	Bereitstellungskosten für Industrierestholz aus externem Zukauf	84
<b>Tabelle 5-19:</b>	Technische Daten von Brikettier- und Pelletierverfahren	85
<b>Tabelle 5-20:</b>	Emissionen für die Bereitstellung von Sägespänen	86
<b>Tabelle 5-21:</b>	Partikelgrößen im Reingasstaub von Industrieholzfeuerungen	95
<b>Tabelle 5-22:</b>	Energiebilanzen über die Feuerungsanlagen –Ergebnisse	105
<b>Tabelle 5-23:</b>	Gewählte Emissionswerte (< 1 MW: 13 % O <sub>2</sub> , > 1MW: 11 % O <sub>2</sub> )	107
<b>Tabelle 5-24:</b>	Emissionswerte der Feuerungsanlagen (< 1MW: 13% O <sub>2</sub> , >1MW: 11 % O <sub>2</sub> )	110
<b>Tabelle 5-25:</b>	Emissionsfrachten der Feuerungsanlagen - für Holzkessel bzw. Holzanteil der Mischfeuerung	111
<b>Tabelle 5-26:</b>	Investitionen der Feuerungsanlagen	117
<b>Tabelle 5-27:</b>	Vergleich der Kriterien nach [KRAPF 00] für die Wirtschaftlichkeit von Biomasseheizwerken mit den Beispielanlagen	121
<b>Tabelle 5-28:</b>	Kosten der Energiebereitstellung für die Feuerungsanlagen (% der Jahreskosten)	122
<b>Tabelle 5-29:</b>	Vergleich der Schwermetallgrenzwerte der geplanten Neufassung der Düngemittelverordnung von 2003 mit der derzeit geltenden Fassung von 1999	126
<b>Tabelle 5-30:</b>	Stoffliche Anforderungen an Steinkohlenflugaschen nach DIN EN 450	129
<b>Tabelle 5-31:</b>	Zuordnungswerte für die Ablagerung von Abfällen nach Anhang B der TA Siedlungsabfall (TASi) und Anhang D der TA Abfall	131
<b>Tabelle 5-32:</b>	Ascheanfallmengen, abgeleitet aus Literaturangaben	134

<b>Tabelle 5-33:</b>	Emissionen bei Verwendung in der Landwirtschaft mit 1,3 t Asche/ha	136
<b>Tabelle 5-34:</b>	Emissionen bei Verwendung in der Forstwirtschaft	136
<b>Tabelle 5-35:</b>	Abschätzung der Transportpreise für den Aschetransport	137
<b>Tabelle 5-36:</b>	Emissionen bei Verwertung im Bergversatz	139
<b>Tabelle 5-37:</b>	Abschätzung der mittleren Transportentfernungen	140
<b>Tabelle 5-38:</b>	Energieaufwand für den Aschetransport zu den Deponien	140
<b>Tabelle 5-39:</b>	Emissionen für den Aschentransport zur Deponie	141
<b>Tabelle 5-40:</b>	Kosten pro Tonne Asche für die Deponieentsorgung	142
<b>Tabelle 7-1:</b>	Bandbreiten von Energiebedarf und Staubemissionen für die Bereitstellung	157
<b>Tabelle 9-1:</b>	Emissionen krebserzeugender Spurenstoffe in Baden- Württemberg 1994/96	169
<b>Tabelle 9-2:</b>	Emissionsfaktoren und Metallgehalte für Holz	171
<b>Tabelle 9-3:</b>	Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen	174
<b>Tabelle 9-4:</b>	PAH- Profile für verschiedene Quellen in Baden- Württemberg nach [EEA 99]	174
<b>Tabelle 9-5:</b>	Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen	175
<b>Tabelle 10-1:</b>	Holzaufkommen in der Stadt Stutensee aus [RENTZ ET AL 00]	179
<b>Tabelle 10-2:</b>	Gegenwärtiger und künftiger Wärmebedarf in Stutensee	180
<b>Tabelle 11-1:</b>	Vergleich von Staubminderung und spezifischer Investition von Staubabscheidern, Zahlen für 1 MWth nach [FNR 00]	186
 <b>Anhang I</b>		
<b>Tabelle I-1:</b>	Qualitätsmerkmale von Holzarten und ihre wichtigsten Auswirkungen	A-2
<b>Tabelle I-2:</b>	Angaben zu Heizwerten der Holzsortimente in der Literatur	A-3

<b>Tabelle I-3:</b>	Berechnung des Energieinputs für die Anlagenbeispiele	A-5
<b>Tabelle I-4:</b>	Anorganische Holzschutzmittel	A-10
<b>Tabelle I-5:</b>	Angewandte Holzschutzmitteltypen aus organischen Substanzen	A-11
<b>Tabelle I-6:</b>	Ascheanfallmengen aus verschiedenen Brennstoffsortimenten	A-12
<b>Tabelle I-7:</b>	Nährstoffgehalt in Gew.-% der Trockensubstanz der Aschen	A-13
<b>Tabelle I-8:</b>	Schadstoffbelastungen verschiedener Aschegemische in mg/kg Trockensubstanz Asche	A-13
<b>Tabelle I-9:</b>	Schadstoffbelastungen verschiedener Grobaschen in mg/kg TS Asche	A-14
<b>Tabelle I-10:</b>	Schadstoffbelastungen verschiedener Zyklon- und Feinstflugaschen in mg/kg Trockensubstanz Asche	A-16
<b>Tabelle I-11:</b>	Konzentrationen an organischen Schadstoffen in Holzaschen	A-17
<b>Tabelle I-12:</b>	Bodenreaktion und elektrischen Leitfähigkeit der Holzaschen	A-18
<b>Tabelle I-13:</b>	In Deutschland übliche Holzernteverfahren	A-20
<b>Tabelle I-14:</b>	Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen nach möglichem Aufgabematerial und Ziel- Spanlänge	A-23
<b>Tabelle I-15:</b>	Kenndaten verschiedener Zerkleinerer	A-24
<b>Tabelle I-16:</b>	Feuerungsarten [VDI 3462]	A-25
<b>Tabelle I-17:</b>	Energieaufwand für verschiedene Waldholzernte verfahren/ Durchforstungsverfahren	A-31
<b>Tabelle I-18:</b>	Übersicht über verschiedene Gebrauchtholzaufbereitungsanlagen und deren Energiebedarf	A-34
<b>Tabelle I-19:</b>	Kostenrechnung für Altholzaufbereitungsanlagen mit max. Durchsatz von 20 t/h nach [WEIßKOPF ET AL 97]	A-35

## Anhang II

<b>Tabelle II-1:</b>	Brennstoff- Bereitstellung für die Beispielanlagen	A-36
<b>Tabelle II-2:</b>	Energiebilanzen über die Feuerungsanlagen – ohne Bereitstellung des Brennstoffs und ohne Ascheentsorgung	A-37
<b>Tabelle II-3:</b>	Emissionswerte für Kleinfeuerungen aus der Literatur (< 1MW: 13% O <sub>2</sub> , >1MW: 11 % O <sub>2</sub> )	A-39
<b>Tabelle II-4:</b>	Emissionswerte für Großfeuerungen aus der Literatur (< 1MW: 13% O <sub>2</sub> , >1MW: 11 % O <sub>2</sub> )	A-41
<b>Tabelle II-5:</b>	Richtwerte für spezifische Investitionen diverser Komponenten der Bautechnik einer Biomasse-Anlage	A-42
<b>Tabelle II-6:</b>	Spezifische Preise von Entstaubungsanlagen, ab Werk	A-43
<b>Tabelle II-7:</b>	Richtwerte für den Personalbedarf zur technischen Betriebsführung von Bioenergieanlagen	A-44
<b>Tabelle II-8:</b>	Kriterien für die Wirtschaftlichkeit von Biomasseheizwerken	A-44
<b>Tabelle II-9:</b>	Angaben über Ausbringmengen von Holzaschen in Land- u. Forstwirtschaft	A-45
<b>Tabelle II-10:</b>	Aufteilung der Anbauflächen in Baden-Württemberg 1999	A-46
<b>Tabelle II-11:</b>	Entsorgungs-/Verwertungswege der Anlagenbeispiele	A-47
<b>Tabelle II-12:</b>	Entsorgungs-/Verwertungswege der Anlagenbeispiele Option: maximale Verwertung in Landwirtschaft und Bergversatz	A-48
<b>Tabelle II-13:</b>	Entsorgungs-/Verwertungswege der Anlagenbeispiele Option: maximale Verwertung in Forstwirtschaft und Bergversatz	A-49
<b>Tabelle II-14:</b>	Bereitstellung fossiler Energieträger	A-50
<b>Tabelle II-15:</b>	Fossile Energieträger – KEA und Emissionen mit Vorketten	A-51



**Anhang III**

<b>Tabelle III-1:</b>	Daten zu Kraftwerksoptionen für die Verwertung von Holz	A-100
<b>Tabelle III-2:</b>	Preise und Potenziale für Holz	A-100
<b>Tabelle III-3:</b>	Szenariocharakterisierung	A-101
<b>Tabelle III-4:</b>	Holznutzung und sich daraus ergebende Stromgestehungskosten im Szenario M1	A-101

**Anhang IV**

<b>Tabelle IV-1:</b>	Rahmendaten zur Stadt Stutensee	A-104
----------------------	---------------------------------	-------

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 3-1:</b>	Input-Output Schema	10
<b>Abbildung 4-1:</b>	Gebrauchtholzaufbereitung im Landkreis Calw	30
<b>Abbildung 4-2:</b>	Preise für Holzbrennstoffe, Stand: 2001	54
<b>Abbildung 4-3:</b>	Durchschnittspreise für Hackschnitzel (0-150 mm) im Süden Deutschlands laut [EUWID 03]	54
<b>Abbildung 4-4:</b>	Anwendungen der Holzenergie nach [FNR 00]	56
<b>Abbildung 5-1:</b>	Bilanzraum der Energiebilanz über die Feuerungsanlagen	103
<b>Abbildung 8-1:</b>	Struktureller Aufbau von regionalen Energie- und Stoffflussmodellen	157
<b>Abbildung 8-2:</b>	Zusammenhang Stromgestehungskosten zu Holzpreis bei Zufeuerung in Kohlekraftwerken	159
<b>Abbildung 9-1:</b>	Source Fingerprints verschiedener PAH- Emissionsquellen	164

### Anhang I

<b>Abbildung I-1:</b>	Schema für Holzaufbereitungsanlage	A-21
<b>Abbildung I-2:</b>	Schema einer Funkenlöschanlage	A-21
<b>Abbildung I-3:</b>	Prinzipskizze Schubbodenlagerung	A-22
<b>Abbildung I-4:</b>	Unterschubfeuerung	A-26
<b>Abbildung I-5:</b>	Vorschubrostfeuerung	A-27
<b>Abbildung I-6:</b>	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung	A-28
<b>Abbildung I-7:</b>	Muffeleinblasfeuerung	A-29
<b>Abbildung I-8:</b>	Schema eines Zyklons	A-30
<b>Abbildung I-9:</b>	Schema eines Elektroabscheiders	A-30

**Anhang II**

<b>Abbildung II-1:</b>	Spezifische Investitionen von automatisch beschickten biomassebefeuerten Kesseln, fertig montiert, einschl. Beschickung, Entaschung, Luft- und Rauchgassystem und Rauchgasreinigung	A-43
<b>Abbildung II-2:</b>	Spezifische Investitionen pro kWel von Dampfturbinen und –motoren, fertig montiert, einschl. Steuerung und Generator, jedoch ohne Kondensator	A-43
<b>Abbildung II-3:</b>	Vergleich der KEA für die ges. Prozessketten der Beispielanlagen	A-52
<b>Abbildung II-4:</b>	Prozentualer Vergleich der KEA-Beträge in der Prozesskette	A-53
<b>Abbildung II-5:</b>	CO- Emissionen der Prozessketten bezogen auf den Input an Holz	A-54
<b>Abbildung II-6:</b>	Prozentuale Beiträge zu den CO- Emissionen bez. auf den Holz Input	A-55
<b>Abbildung II-7:</b>	NO <sub>x</sub> - Emissionen der Prozessketten bezogen auf den Holz-Input	A-56
<b>Abbildung II-8:</b>	Prozentuale Beiträge zu den NO <sub>x</sub> - Emissionen der Prozessketten bezogen auf den Holz-Input	A-57
<b>Abbildung II-9:</b>	SO <sub>2</sub> - Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz-Input	A-58
<b>Abbildung II-10:</b>	Absolute Werte der Staub- Emissionsfrachten der Prozessketten pro Jahr	A-59
<b>Abbildung II-11:</b>	Staub- Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz-Input	A-60
<b>Abbildung II-12:</b>	Prozentuale Beiträge zu den Staub- Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz- Input	A-61

<b>Abbildung II-13:</b>	CO <sub>2</sub> fossil- Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz- Input	A-62
<b>Abbildung II-14:</b>	CO <sub>2</sub> fossil- Emissionen der Prozessketten – absolute Werte pro Jahr	A-63
<b>Abbildung II-15:</b>	Spezifische Investitionen der Beispielanlagen bez. auf den Holz-Input	A-64
<b>Abbildung II-16:</b>	Spezifische Investitionen bez. auf den gesamten Wärme-Output	A-65
<b>Abbildung II-17:</b>	Wärmegestehungskosten der Beispielanlagen ohne Stromgutschriften	A-66
<b>Abbildung II-18:</b>	Vergleich der Wärmegestehungskosten mit/ohne Stromgutschriften	A-67
<b>Abbildung II-19:</b>	Vergleich der Holz- Grundlast- Energiesysteme mit konventionellen Pendants	A-68
<b>Abbildung II-20:</b>	Vergleich der Holz- Mittellast- Systeme mit konv. Pendants	A-69
<b>Abbildung II-21:</b>	Vergleich der Fernheizwerke mit Holzverbrennung mit konventionellen Fernheizwerken	A-70
<b>Abbildung II-22:</b>	Vergleich der Industrie- Holzheizkraftwerke mit fossilen Heizkraftwerken	A-71
<b>Abbildung II-23:</b>	Vergleich der Mitverbrennung von Holz im Heizkraftwerk Pforzheim mit dem Betrieb mit ausschließlich fossilen Energieträgern und dem Modell-HKW mit Steinkohlefeuerung aus [GEMIS 00]	A-72
<b>Abbildung II-24:</b>	Vergleich der spez. Investitionen für Holz- und fossil befeuerte Heizwerke	A-73
<b>Abbildung II-25:</b>	Vergleich von Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten für Holz- und fossil befeuerte Heizwerke	A-74
<b>Abbildung II-26:</b>	Vergleich der spezifischen Investitionen für BHKW- Holzessel- Systeme und BHKW- Ölkessel- System	A-75

<b>Abbildung II-27:</b>	Vergleich von Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten für BHKW-Holzkessel- und BHKW- Ölkessel- Systeme	A-76
<b>Abbildung II-28:</b>	Vergleich der spezifischen Investitionen für Fernwärmeanlagen mit Holz und fossil befeuerte Heizwerke	A-77
<b>Abbildung II-29:</b>	Vergleich der Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten für Fernheizwerke mit Holz und fossil befeuerte Heizwerke	A-78
<b>Abbildung II-30:</b>	Vergleich der spezifischen Investitionen zwischen Industrieholzheizkraftwerken und fossil befeuerten HKW	A-79
<b>Abbildung II-31:</b>	Vergleich der Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten von Holz- Industrie- heizkraftwerken und fossil befeuerten HKW	A-80
<b>Abbildung II-32:</b>	Bandbreiten des Energiebedarfs für die Holzsortimente	A-81
<b>Abbildung II-33:</b>	Bandbreite der Staubemissionen aus der Bereitstellung der Holzsortimente	A-82
<b>Abbildung II-34:</b>	Bandbreite des KEA Holzbereitstellung für die Prozessketten	A-83
<b>Abbildung II-35:</b>	Bandbreite der Staubemissionen aus der Bereitstellung der Holzsortimente	A-84
<b>Abbildung II-36:</b>	Bandbreite des KEA Holzbereitstellung für die Prozessketten	A-85
<b>Abbildung II-37:</b>	Bandbreiten der Staubemissionen aus Holzbereitstellung für die Prozesskettenbeispiele	A-86
<b>Abbildung II-38:</b>	Einfluss des KEA- Holzbereitstellung auf die Prozesskette bei maximaler Abschätzung	A-87
<b>Abbildung II-39:</b>	Einfluss der Staubemissionen aus der Holzbereitstellung auf die gesamte Prozesskette bei maximaler Abschätzung	A-88
<b>Abbildung II-40:</b>	Bandbreite der Brennstoffpreise/Kosten für Holzsortimente	A-89

<b>Abbildung II-41:</b>	Bandbreiten der Brennstoffkosten für die berechneten Prozessketten	A-90
<b>Abbildung II-42:</b>	Auswirkung minimaler Brennstoffkosten auf die Wärmegestehungskosten der Feuerungsanlagen	A-91
<b>Abbildung II-43:</b>	Auswirkung maximaler Brennstoffkosten auf die Wärmegestehungskosten der berechneten Feuerungsanlagen	A-92
<b>Abbildung II-44:</b>	Ascheanfall in den Feuerungsanlagen der Prozesskettenbeispiele	A-93
<b>Abbildung II-45:</b>	Auf Energieoutput bezogene Aschemengen der Prozesskettenbeispiele	A-94
<b>Abbildung II-46:</b>	KEA, Kosten und Partikelemissionen der verschiedenen Ascheentsorgungs- und –verwertungswege	A-95
<b>Abbildung II-47:</b>	KEA der Ascheentsorgung/-verwertung der Prozessketten unter verschiedenen Optionen	A-96
<b>Abbildung II-48:</b>	Partikelemissionen der Ascheentsorgung/-verwertung der Prozessketten unter verschiedenen Optionen	A-97
<b>Abbildung II-49:</b>	Kosten der Ascheentsorgung/-verwertung der Prozessketten unter verschiedenen Optionen	A-98
<b>Abbildung II-50:</b>	Wärmegestehungskosten der Prozessketten bei maximaler Verwertung in Landwirtschaft und Bergversatz	A-99

### Anhang III

<b>Abbildung III-1:</b>	Entwicklung der spezifischen CO <sub>2</sub> -Emissionen	A-102
<b>Abbildung III-2:</b>	Entwicklung der spezifischen SO <sub>2</sub> -Emissionen	A-102
<b>Abbildung III-3:</b>	Entwicklung der spezifischen NO <sub>x</sub> -Emissionen	A-103
<b>Abbildung III-4:</b>	Entwicklung der spezifischen Partikelemissionen	A-103

## 0 Zusammenfassung

Um die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der energetischen Holznutzung in Baden-Württemberg zu untersuchen, wurden zunächst die Potenziale der verschiedenen Holzsortimente untersucht. Dabei ergab sich, dass Pauschalangaben über Holzpotenziale nur ein verzerrtes Bild der Wirklichkeit wiedergeben, da technische, ökonomische und rechtliche Gründe die Nutzung der Holzsortimente auf jeweils bestimmte Einsatzgebiete eingrenzen.

Für die Nahwärmeversorgung in kommunalen Feuerungsanlagen, Fernheizwerke, Industrieheizkraftwerke und Mitverbrennung von Holz wurde anschließend die gesamte Prozesskette hinsichtlich des Kumulierten Energieaufwandes, der Emissionen und der Kosten analysiert. Der Einfluss der vorgelagerten Prozessschritte der Holzbereitstellung sowie der nachgelagerten Ascheentsorgung auf KEA und Emissionen erwies sich als gering. Kosten der Ascheentsorgung spielen nur eine Rolle, wenn besonders hohes Ascheaufkommen, bedingt durch entsprechende Holzsortimente mit hohen Aschegehalten, wie Landschaftspflegeholz und Rinde, zu erwarten ist. Die Brennstoffkosten für Holz hingegen tragen mit bis zu 30 % zu den Wärmegestehungskosten bei. Dauerhafte Verfügbarkeit günstiger Holzbrennstoffe kann somit ein entscheidendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit einer Holzfeuerungsanlage sein. Den größten Anteil der Wärmegestehungskosten ist jedoch die durch die Investitionen verursachte Annuität. Um Wirtschaftlichkeit von Holzenergienutzung zu erreichen ist es also unbedingt erforderlich, bei der Planung der Anlagen die Investitionen durch bedarfsgerechte Auslegung gering zu halten. Ebenso wären Förderungen in Form von Investitionszuschüssen sinnvolle Maßnahmen, um die Nutzung dieser erneuerbaren Energieform zu unterstützen.

Mit der Durchführung einer Energiesystemanalyse wird die Holzenergienutzung in den Gesamtzusammenhang des bestehenden Energiesystems gestellt und ihre Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionellen Techniken auch in der Entwicklung der kommenden Jahrzehnte untersucht. Eine Analyse des Strommarktes für energetische Holznutzung ergab, dass ohne Berücksichtigung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes nur die Mitverbrennung entsprechend kostengünstiger Holzsortimente in Kohlekraftwerken zum jetzigen Zeitpunkt wirtschaftlich ist. Mit Laufe der Jahre steigt jedoch mit wachsenden Preisen von Erdgas und Steinkohle auch die Bedeutung der energetischen Holzverwertung. Wiederum ergab sich, dass der Preis der Holzsortimente ausschlaggebendes Kriterium für dessen wirtschaftliche Verwendung ist. Mit zunehmender Verwertung des Holzes lassen sich bis zu 6 % der fossil bedingten CO<sub>2</sub> Emissionen, sowie Schwefeldioxid-Emissionen einsparen, es müssen jedoch höhere Emissionen an Partikeln und Stickoxiden in Kauf genommen werden. Außer den bereits vielseitig diskutierten Emissionen an Partikeln und

Stickoxiden verursachen Holzfeuerungsanlagen außerdem noch erhöhte Emissionen an krebserzeugenden Spurenstoffen, wie Schwermetallen und organischen Schadstoffen, insbesondere Cadmium und Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Diese lassen sich durch Primärmaßnahmen wie gut geregelte Verbrennungsführung und insbesondere durch effektive Abscheidung der Feinstpartikel aus dem Rauchgas mindern. In Kleinf Feuerungen des Hausbrandes, die über solche Maßnahmen nicht verfügen, lassen sich diese Schadstoffemissionen jedoch nicht verhindern, wodurch in Baden-Württemberg allein 20 % der Cadmium-Emissionen und ca. 38 % der Emissionen an Benzo(a)pyren verursacht werden. Diesen Risiken der Holznutzung stehen die Chancen gegenüber, die sich für die Nachhaltigkeit insbesondere auf kommunaler Ebene ergeben, wenn hier bestehende Holzressourcen für die energetische Nutzung herangezogen werden. Am Beispiel der Stadt Stutensee konnte gezeigt werden, dass hier Potenziale besonders im Bereich der Wärmeversorgung öffentlicher Gebäude, Neubaugebiete und Industriegebiete bestehen.



# 1 Einleitung

Im Verlauf der letzten hundert Jahre stieg in den Industrieländern mit zunehmender Industrialisierung auch der Verbrauch an fossilen Energieträgern – Kohle, Erdöl, Ergas – steil an und liegt nun weltweit bei insgesamt 11 Milliarden t Steinkohleinheiten pro Jahr. Diesem rapide gestiegenen, hohen Verbrauch stehen in der Natur begrenzte Potenziale an fossilen Energieträgern gegenüber, so dass in einem Zeitfenster von hundert bis wenigen hundert Jahren die fossilen Brennstoffe zuneige gehen werden [HEINLOTH 00].

Neben der begrenzten Verfügbarkeit haben die fossilen Energieträger noch den Nachteil, dass bei der Verbrennung große Mengen an Kohlendioxid freigesetzt werden. Die Konzentration an CO<sub>2</sub> hat sich größtenteils durch diese bei den Verbrennungsvorgängen emittierten Mengen in den letzten hundert Jahren um etwa ein Drittel erhöht. Das Spurengas Kohlendioxid ist maßgeblich an der Erwärmung der Erde durch Absorption und partielle Rückstrahlung der von der warmen Erde emittierten Wärmestrahlung beteiligt, dem sog. „Treibhauseffekt“ [HEINLOTH 00].

Der energetischen Nutzung von Alt- und Restholz<sup>1</sup> wird im Rahmen der Nutzung erneuerbarer Energien und der Einsparung an fossilen Kohlendioxid- Emissionen ein hoher Stellenwert eingeräumt. So wird das technische Potenzial der Primärenergieeinsparung durch die Nutzung von Holz für Deutschland auf 2,8% geschätzt [FORSTABSATZFONDS 98].

Neben den Vorteilen der fossilen Primärenergieeinsparung und der Reduktion der Kohlendioxid- Emissionen bringen die Holzfeuerungen jedoch auch im Vergleich zu Öl- und Gasfeuerungen höhere spezifische Emissionen an Staub - insbesondere Feinstaub PM10 - und Stickoxiden mit sich. Durch entsprechende Feuerungs- und Rauchgasreinigungstechniken lassen sich diese Emissionen minimieren. Dadurch und durch die nötigen Maßnahmen zur Brennstoffaufbereitung, -lagerung und –zuführung, sowie Ascheaustrag werden die Holzenergieanlagen jedoch meist teurer als entsprechende Feuerungsanlagen für fossile Brennstoffe. Die zusätzlichen Investitionen sind ein wichtiger Grund dafür, dass die bestehenden Potenziale der Holzenergie derzeit nicht ausgenutzt werden.

Zur Förderung des Energieträgers Holz werden vom Land Baden-Württemberg bereits direkte Zuschüsse zu Investitionen in entsprechende Anlagen gewährt. Die diesbezügliche Richtlinie des Ministeriums Ländlicher Raum „Förderprogramm

---

<sup>1</sup> darunter wird Restholz aus der Durchforstung des Waldes, aus der primären und sekundären Holzverarbeitung und nach dem Produktgebrauch anfallendes Altholz verstanden, sowie bei der Pflege von Grünflächen und Straßenbegleitgrün anfallendes Landschaftspflegeholz

Holzenergie 2000“ trat zum 1. Juli 1997 in Kraft. Weiterhin wird aus Biomasse erzeugter Strom im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes gefördert. Neben dieser individuellen Förderung von Einzelprojekten stellt sich für das Land Baden-Württemberg die Frage, welche Rahmenbedingungen des Energiemarktes insgesamt für eine verstärkte Nutzung der Holzenergie geschaffen werden müssen bzw. wo die Grenzen eines ökonomisch und ökologisch sinnvollen Einsatzes von Holz zur Energieversorgung liegen. Insbesondere stellt sich die Frage, ob die Annahme der größeren Nachhaltigkeit der Holznutzung gegenüber fossilen Energieträgern auch dann noch haltbar ist, wenn der Blickwinkel auf die vor- und nachgelagerten Prozessschritte der Holzbereitstellung bzw. Ascheentsorgung erweitert wird.

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Um die Rahmenbedingungen einer wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz zu untersuchen, wurden in dieser Arbeit zunächst die Potenziale an Alt- und Restholz ermittelt und hinsichtlich des ökonomisch und ökologisch sinnvollen Einsatzes analysiert.

Die verschiedenen Nutzungswege für Alt- und Restholz wurden in Form von Prozessketten einschließlich Aufbereitungs- und Transportvorgängen dargestellt, stofflich und energetisch bilanziert, sowie die Kosten der einzelnen Prozessschritte untersucht. Anhand von ausgewählten Fallbeispielen wurde anschließend erarbeitet, unter welchen Rahmenbedingungen fossile Primärenergieträger und CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden können bzw. mit welchen Wärmegestehungskosten und zusätzlichen Emissionen die ausgewählten Nutzungswege verbunden sind.

Für die Einordnung der energetischen Holznutzung in den Gesamtzusammenhang des Energiesystems Baden-Württemberg wird eine Analyse mit dem bereits bestehenden Stoff- und Energieflussmodell PERSEUS-Reg<sup>2</sup> vorgestellt.

Da die energetische Holznutzung vor allem propagiert wird, um die Nachhaltigkeit der Energieversorgung zu erhöhen, werden in diesem Zusammenhang zwei weitere Aspekte kurz beleuchtet: Anhand des Beitrags aus Holzfeuerungen zu kanzerogenen Emissionen in Baden-Württemberg werden die Risiken der energetischen Holznutzung zur Diskussion gestellt.

Chancen, die die Ressource Holz dagegen gerade im kommunalen Bereich eröffnet, werden am Beispiel der Gemeinde Stutensee (Baden) und den Plänen einer grenzüberschreitenden Lokalen Agenda 21 mit La Petite Pierre (Elsass) aufgezeigt.

Aus diesen verschiedenen Blickwinkeln heraus werden Schlussfolgerungen gezogen und Konsequenzen dargelegt, die sich für die politischen Entscheidungsträger des Landes ergeben.

### 3 Methodik und Vorgehensweise

Im Folgenden wird die Vorgehensweise dieser Arbeit kurz skizziert und die dabei verwendeten Methoden vorgestellt.

#### 3.1 *Potenzialanalyse der Ressource Holz in Baden-Württemberg*

Um die allgemeinen Rahmenbedingungen und den wirtschaftlichen Kontext der Holznutzung in Baden-Württemberg zu verdeutlichen, wird im ersten Schritt eine Potenzialanalyse durchgeführt. Dabei werden die Potenziale differenziert nach Herkunft der Holz mengen, da sich mit der Quelle des Holzes außer den Mengen noch weitere Eigenschaften verknüpfen lassen, die die Qualität des Brennstoffs und nicht zuletzt den Preis beeinflussen.

Ebenso richtet sich die Methode der Potenzialerhebung im Einzelnen nach der Quelle – werden im Fall der Waldresthölzer z.B. jährliche Wachstumsraten und Statistiken der Einschlagmengen herangezogen, sowie geographische Gegebenheiten berücksichtigt, so sind im Fall der Industrieresthölzer die Wirtschaftsstatistiken der einschlägigen Industriezweige maßgebend. Auf die verwendeten Methoden werden beim jeweiligen Kapitel detaillierter eingegangen.

Anschließend wird auf die für die energetische Nutzung relevanten Charakteristika - wie z.B. der Heizwert, die Eigenschaften der Aschen und Brennstoffpreise - der Holzbrennstoffe detaillierter eingegangen.

Aus der Verknüpfung dieser Charakteristika mit den zuvor bestimmten Potenzialmengen und deren Anwendung auf bestimmte Einsatzgebiete der energetischen Holznutzung ergibt sich ein genaueres Bild, welche Holzpotenziale im einzelnen aktuell verfügbar sind.

#### 3.2 *Ökobilanzielles Bewertungsverfahren der energetischen Holznutzung*

Ökobilanzielle Bewertungsverfahren lassen sich folgendermaßen einteilen [SPENGLER 98]:

- *Verbal argumentative Bewertungsverfahren*: Verbal argumentative Bewertungsmethoden strukturieren die erfassten Stoff- und Energieströme und beurteilen diese anhand ausgewählter Umweltkriterien. Sie eignen sich daher lediglich für

eine erste Schwachstellenanalyse. Ein systematischer, nachvollziehbarer Bewertungsansatz fehlt jedoch.

- *Kostenorientierte Bewertungsansätze*: Durch den Versuch der Monetarisierung von Umweltwirkungen soll eine Internalisierung der durch Unternehmens-tätigkeiten hervorgerufenen externen Effekte erreicht werden. Die so ermittelten Umweltkosten sollen dem betrieblichen Rechnungswesen für Analyse- und Planungsaufgaben zur Verfügung stehen. Das Hauptproblem dieser Vorgehensweise liegt in der Ermittlung der „wahren“ externen Kosten.
- *Naturwissenschaftlich orientierte Bewertungsmethoden*: Hierbei handelt es sich um ein naturwissenschaftlich-technisches Vorgehen, umweltrelevante Energie- und Materialflüsse innerhalb vorher festgelegter Systemgrenzen zu quantifizieren und auf öko- und humantoxikologischer, technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Grundlage zu bewerten. Während die Quantifizierung von Energie- und Materialflüssen zwar aufwendig, in ihrer Vorgehensweise, abgesehen von einzelnen Problemfällen wie der Kuppelproduktion, jedoch recht unproblematisch ist, ist bereits die Auswahl von Kenngrößen und die Festlegung von Systemgrenzen gesellschaftspolitisch mitgeprägt. Gleiches gilt für die Interpretation und Bewertung unterschiedlicher Arten von Umweltwirkungen.
- *Relativ abstufende Bewertungsmethoden*: Herausragendes Beispiel ist die vom Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung entwickelte ABC-Methode, die zur Erstellung einer systematischen und umfassenden Schwachstellenanalyse von Betrieben, Prozessen oder auch Produkten herangezogen wird. Sie verzichtet auf eine quantitative Vergleichbarkeit von Umweltwirkungen und verfolgt vielmehr das Ziel aufzuzeigen, an welchen Stellen mit verhältnismäßig geringem Aufwand hohe Umweltentlastungen zu erzielen sind.

Mögliche Bilanzierungsebenen sind dabei die betriebliche Bilanzierung, die Prozessbilanzierung oder die Produktbilanzierung.

Konsensfähige und teilweise bereits standardisierte Vorgehensweisen, Bewertungsraster sowie Vereinbarungen über Systemabgrenzungen bei der Verwendung von ökobilanziellen Bewertungsverfahren existieren insbesondere im Bereich der naturwissenschaftlich orientierten Bewertungsverfahren. Ausgewählte Vertreter, die die möglichen Charakteristika entsprechender Bewertungsmethoden abdecken, werden im Folgenden aufgelistet, siehe auch [BACCINI U. BADER 96], [RENTZ ET AL. 98], [SPENGLER 98], [UBA 95], [SASSE 01]:

- *Ökologische Buchhaltung*: Diese Methode beruht auf der Berechnung ökologischer Knappheiten mit Hilfe von sogenannten Ökofaktoren. Diese ergeben sich aus Umweltwirkungen in einem abgegrenzten geographischen Gebiet und der dort maximal tolerierbaren Belastung. Multipliziert man jeweils die Ökofaktoren mit den zugehörigen Emissionen und bildet die Summe bezüglich

sämtlicher Umwelteinwirkungen, so lassen sich beispielsweise verschiedene Investitionsalternativen anhand ihrer Ökopunkte miteinander vergleichen. Nachteilig bei dieser Zusammenfassung ist der resultierende Informationsverlust.

- *Verfahren der kritischen Volumina*: Bei diesem Verfahren werden die gasförmigen, flüssigen und festen Emissionen sowie der Energieverbrauch jeweils separat erfasst und aufgelistet. Durch die Division der jeweiligen Emissionen durch im vorhinein ausgewählte Immissionsgrenzwerte und getrennte Aggregation dieser Quotienten für die genannten Bereiche ergeben sich die sogenannten „Kritischen Volumina“, die zur umweltbezogenen Bewertung der Stoff- und Energiebilanzen herangezogen werden. Die kritischen Volumina werden nicht zu einer einzelnen Kennzahl zusammengefasst, sondern sollen als ein „Ökoprofil“ dienen, dessen Bewertung dem Entscheider obliegt. Einen wesentlichen Kritikpunkt dieses Verfahrens stellt die Verwendung der jeweils gültigen, auf politische Bewertungen beruhenden Grenzwerte zur Berechnung der kritischen Volumina dar.
- *Beurteilung von Umweltwirkungen nach Wirkungskategorien*: Dieses Verfahren wurde zur Standardisierung von Produktökobilanzen vom Umweltbundesamt (UBA) und vom Deutschen Institut für Normung (DIN) entwickelt. Jedem Stoffstrom werden dabei Umweltwirkungen zugeordnet, die durch quantitative Gewichtungsfaktoren (Wirkungsindikatoren) die Umweltrelevanz hinsichtlich der verschiedenen Wirkungskategorien ausdrücken. Es erfolgt keine Aggregation der verschiedenen Umweltwirkungen. Die naturwissenschaftliche Analyse der einzelnen Wirkungskategorien, insbesondere von Interdependenzen bei gleichzeitiger Emission verschiedener Schadstoffe, ist jedoch bislang nicht abgeschlossen.
- *Ermittlung der besseren Umweltverträglichkeit*: Zur Konkretisierung der Begriffsdefinitionen „hochwertige Verwertung“ und „bessere Umweltverträglichkeit“ im Rahmen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes wurde von der Abfallberatungsagentur Baden-Württemberg (ABAG) im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg eine Systematik zur fachtechnischen Bewertung von Entsorgungsoptionen erarbeitet [ABAG 96]. Als Bewertungsmethode zur Feststellung der besseren Umweltverträglichkeit wird ein Summenparameter als Repräsentant der Umweltwirkungen ausgewählt, der möglichst viele relevante Wirkungskategorien abdecken sollte. Durch den Summenparameter explizit nicht abgedeckte Wirkungskategorien sollen durch ein geeignetes System von Kontrollfragen berücksichtigt werden.

Während im Fall der *Ökologischen Buchhaltung* und dem Verfahren *der kritischen Volumina* die Bewertung aus der Sicht der in der betrachteten Region erträglichen Umweltwirkungen erfolgt, wird mit den *Wirkungskategorien* bzw. *Summenparametern*

der anderen beiden Verfahren der Fokus direkt auf das einzelne Produktionsverfahren gelenkt.

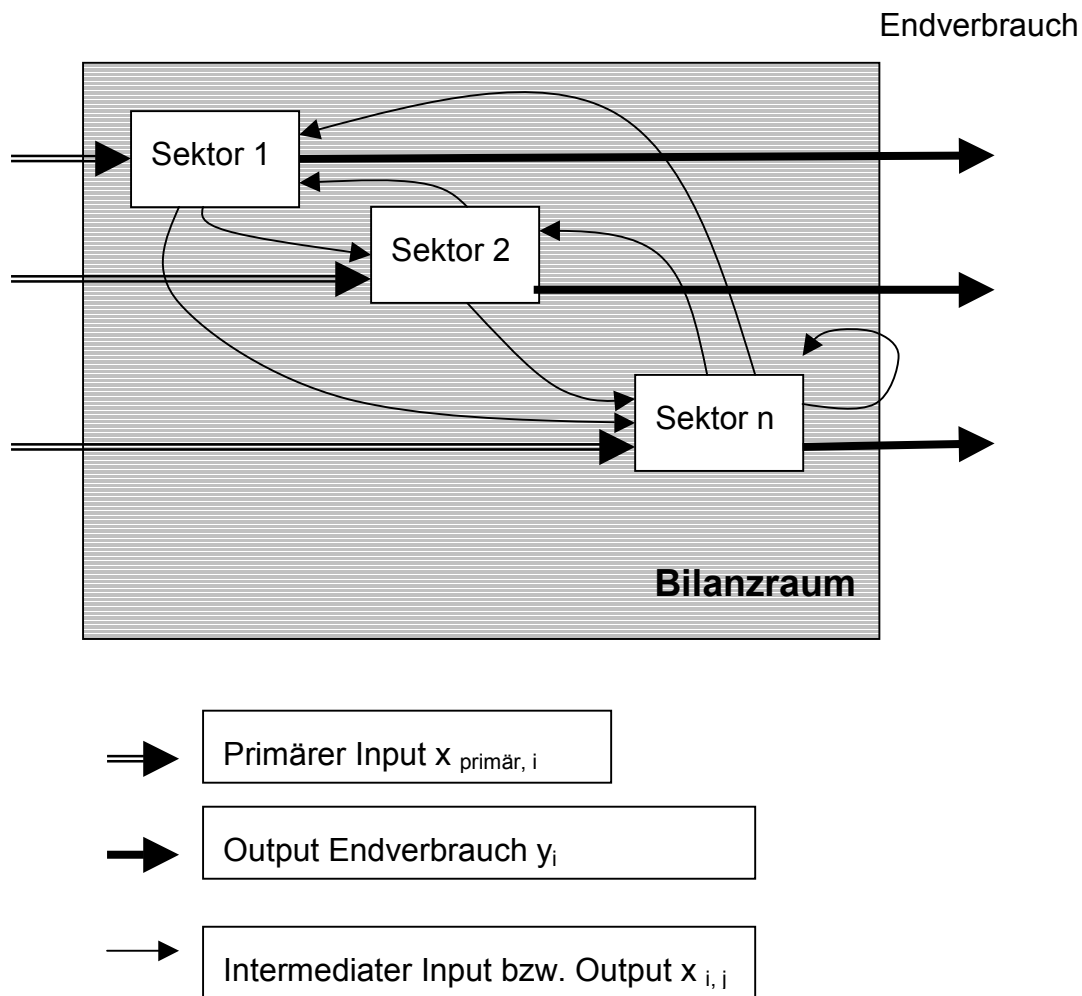
Für die Bewertung verschiedener technischer und organisatorischer Formen der energetischen Holznutzung ist demnach die Bewertung anhand ausgewählter Summenparameter die sinnvollere Vorgehensweise.

### 3.2.1 Input-Output Analyse

Bekanntlich wird zur Analyse von Stoffströmen und Umweltauswirkungen die Methode der Input-Output-Analyse angewandt (vgl. zum Beispiel [SCHAFFER 02], [BLÜMEL 01], [BARATA 02]), indem der klassische ökonomische Ansatz der Methode mit einem Ressourcen- und Emissionsintensitätsvektor erweitert und somit technische und naturwissenschaftliche Parameter in das produktionstheoretische Modell integriert werden.

Die Input-Output Analyse – auch intersektorale Analyse, Einsatz-Ausstoß-Analyse und Verflechtungsanalyse genannt – ist ein Instrument, mit dem sich die Wechselbeziehungen sowohl innerhalb der Produktionssphäre wie zwischen den Bereichen der Güterproduktion und der Güterverwendung erfassen lassen.

Für die Abbildung eines Wirtschaftssystems im Input-Output Modell, wird dieses zunächst in Sektoren eingeteilt. Die zur Produktion in jedem Sektor benötigten Ressourcen werden durch Primärressourcen  $x_{\text{primär},i}$  und Inputströme  $x_{i,j}$  aus anderen Sektoren gedeckt (vgl. Abbildung 3-1).



**Abbildung 3-1:** Input-Output Schema

Die von einem Sektor  $i$  an den Endverbraucher abgegebenen Outputmengen  $y_i$  ergeben sich damit aus dem gesamten Output  $x_i$  des Sektors abzüglich der an andere Sektoren abgegebene Mengen  $x_{i,j}$  nach folgender Gleichung:

$$x_i - \sum_{j=1}^n x_{i,j} = y_i; \quad (3.1)$$

Unter der Annahme, dass bei der Herstellung der Produkte des Sektors  $i$  in konstantem Verhältnis entsprechende Mengen an Ressourcen benötigt werden und Mengen an Neben- und Kuppelprodukten anfallen, kann der technische Koeffizient  $a_{i,j}$  eingeführt werden mit:



$$x_{i,j} = a_{i,j} \cdot x_j; \quad (3.2)$$

Mit der Kombination der Gleichungen (3.1) und (3.2) und dem Übergang zur Vektorschreibweise ergibt sich:

$$\begin{aligned} E \cdot x - A \cdot x &= y; \\ x &= [E - A]^{-1} \cdot y; \end{aligned} \quad (3.3)$$

mit

$$y = (y_1, \dots, y_n);$$

$$x = (x_1, \dots, x_n);$$

E Einheitsmatrix

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix};$$

$[E-A]^{-1}$  wird als Leontief-Inversmatrix bezeichnet.

In Erweiterung der klassischen ökonomischen Input-Output Analyse wird zur ökologischen Input-Output Analyse der Ressourcen- und Emissionsintensitätsvektor aufgestellt:

$$\begin{pmatrix} k_{\text{Holz},11} & \dots & k_{\text{Holz},1n} \\ k_{\text{CO}_2,11} & \dots & k_{\text{CO}_2,1n} \\ k_{\text{Staub},11} & \dots & k_{\text{Staub},1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ k_{\text{Energie},11} & \dots & k_{\text{Energie},1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ k_{\text{Asche},11} & \dots & k_{\text{Asche},1n} \end{pmatrix} = k_{\text{Energie}} \text{ Vektor der sektoralen Energieintensität} \quad (3.4)$$

Damit wäre

$$\begin{pmatrix} k_{\text{Energie}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{ij} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \end{pmatrix}; \quad (3.5)$$

$z$  = Vektor der Energieintensität per Einheit der Endnachfrage.

Sei zum Beispiel  $z_\lambda$  die Stromproduktion aus Holz, dann wäre

$z_\lambda$  [kJ/Output des Sektors  $\lambda$ ] =  $KEA_\lambda$  gleichbedeutend mit dem kumulierten Energieaufwand des Sektors  $\lambda$ .

Einheiten der Ressourcenintensitätsvektoren sind z.B. [kg Holz/Output des Sektors]. Die Emissionsintensitätsvektoren haben die Einheiten [kg Schadstoff/Output des Sektors] bzw. [kg Asche/Output des Sektors].

Die Annahme eines konstanten, statischen und linearen Verhältnisses zwischen erzeugtem Produkt bzw. Dienstleistung und benötigten Ressourcen bzw. erzeugten Emissionen in der Transformationsfunktion von Leontief stellt eine wesentliche Vereinfachung der realen Verhältnisse dar. Durch Schwankungen in der Zusammensetzung der Primärressourcen oder durch den Einsatz fortgeschrittener Technologien sind die Ressourcen- und Emissionsintensitäten zeitlichen Schwankungen unterworfen.

Die Einbeziehung naturwissenschaftlich-technischer Gesetzmäßigkeiten kann über die erstmals von [CHENEREY 53] vorgestellten *Engineering Production Function* (EPF) erfolgen. Die Einbeziehung technischer Zusammenhänge erfolgt hier durch die Zerlegung des Produktionsprozesses in die einzelnen chemischen und physikalischen Elementarvorgänge und die Berücksichtigung der Wechselwirkungen. Je höher die Zahl der Einflussgrößen, desto höher ist der Aufwand für die Aufstellung und Parametrisierung geeigneter Engineering Production Functions. Da für das in dieser Arbeit betrachtete Problem derzeit kein formaler Ansatz zur Beschreibung des Systemverhaltens existiert, wäre ein sehr hoher Aufwand nötig, um eine entsprechende Engineering Production Function aufzustellen.

Die durch das Input-Output Modell ermöglichte umfassende Analyse von Verflechtungen und Interaktionen zwischen den Sektoren ist nur dann möglich, wenn auch die entsprechende Datenbasis für alle Sektoren vorliegt. Schränkt man dagegen aus Zeitgründen die Zahl der betrachteten Sektoren auf die wesentlich mit einem bestimmten Produkt verbundenen ein und vernachlässigt in erster Näherung die Verflechtungen zwischen den Sektoren, so gelangt man zur Prozesskettenanalyse.

Aus den oben genannten Gründen wird daher auf die Aufstellung einer Transformationsmatrix verzichtet und die Prozesskettenanalyse zur techno-ökonomischen Bewertung der energetischen Holznutzung herangezogen.

### 3.2.2 Prozesskettenanalyse

Die Methodik der Prozesskettenanalyse wird bereits durch ihren Namen charakterisiert: es werden die verschiedenen Einflüssen auf die Umwelt, die sich im Laufe des gesamten Lebensweges eines Produkts von der Herstellung, Anwendung bis hin zur Entsorgung ergeben, aufsummiert und bewertet. Aufgrund der Vielfalt eingesetzter Zwischenprodukte und der Verflechtungen innerhalb einer arbeitsteiligen Volkswirtschaft ist eine umfassende Analyse aller Prozessstufen in den seltensten Fällen möglich. Die aus Zeitgründen in der Regel notwendige Vernachlässigung von Verflechtungen der verschiedenen Sektoren, sowie von Prozessstufen und ihre Erfassung durch Werte höheren Aggregationsgrades führt zwangsläufig zu Ungenauigkeiten [SASSE 01].

Erster Schritt und oftmals entscheidender Punkt im Hinblick auf die Ergebnisse der Bilanzierung ist die Festlegung der Bilanzgrenzen, innerhalb derer die Umwelteinwirkungen auf das „Konto“ des betrachteten Produkts angerechnet werden.

Die Prozesskettenanalyse ist eine Form der Ökobilanzierung, bei der die Bilanzgrenzen vergleichsweise eng gesteckt sind und der Fokus der Bilanzierung auf die einzelnen Prozessschritte und deren Einfluss auf die gesamte Prozesskette gelenkt wird. Dadurch werden nicht nur ganze Prozessketten miteinander verglichen, sondern auch der Einfluss einzelner Prozessschritte auf die Nachhaltigkeit des gesamten Vorgangs untersucht. In dieser Arbeit betrachtete Prozessschritte sind:

- Bereitstellung des Holzbrennstoffs (inklusive Transportwege)
- Feuerungsanlagen mit Emissionsminderungstechniken und Wärme- und Stromerzeugung
- Ascheentsorgung

Insbesondere stehen derzeit die zum Teil sehr komplexen Vorgänge bei der Holzbrennstoffbereitstellung und die noch immer umstrittenen vielfältigen Wege der Ascheentsorgung zur Diskussion.

Neben dem Vergleich der Prozessketten der energetischen Holznutzung untereinander wird ein Vergleich mit der Anwendung konventioneller Energieerzeugungsmethoden mit Öl, Gas und Kohle durchgeführt, um die ökologischen Vorteile der energetischen Holznutzung abzuwägen.

### 3.2.2.1 Parameter der Prozesskettenanalyse

In dieser Arbeit werden die folgenden Parameter betrachtet:

- (1) *Kumulierter Energieaufwand (KEA nach VDI Richtlinie 4600)*: Für Energiesysteme und Entsorgungssysteme wurde der KEA bereits vielfach angewandt als Repräsentant der Umweltwirkungen [SASSE 01], [ABAG 96], [FRITSCHE ET AL. 99]. Der KEA ist definiert als die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Damit werden die energetische Beurteilung und der Vergleich von Produkten und Dienstleistungen ermöglicht [VDI 4600]. Durch die weitere Differenzierung nach Anteilen von fossilen und erneuerbaren Primärenergieträgern wird der KEA zu einem anschaulichen Indikator für Aspekte der Nachhaltigkeit der Prozessketten.
- (2) *Emissionen*: Unter dem Blickwinkel des Klimaschutzes werden hier die CO<sub>2</sub> Emissionen aus fossilen Energieträgern berechnet. Weitere klimarelevante Gase wie Methan und Lachgas werden zunächst aufgrund der dürftigen Datenlage und um die Zahl der Parameter in überschaubarem Rahmen zu halten nicht betrachtet.
- (3) Des Weiteren werden die Massenluftschadstoffe NO<sub>x</sub>, Partikel, SO<sub>2</sub> und CO berechnet. Aufgrund der geringen Schwefelgehalte im Holz spielen SO<sub>2</sub> Emissionen in diesem Fall eine untergeordnete Rolle, während CO-, NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen der Holzfeuerungsanlagen Parameter sind, aufgrund derer die Nachhaltigkeit energetischer Holznutzung häufig in Frage gestellt wird.
- (4) *Kosten*: Um die Wirtschaftlichkeit der energetischen Holznutzung zu untersuchen, werden zum Einen die Kosten der einzelnen Prozessschritte, wie sie für die verschiedenen dabei beteiligten Akteure anfallen berechnet, wie z.B. die bei den Holzaufbereitungsfirmen anfallenden Kosten der Brennstoffaufbereitung. Zum Anderen wird auf Basis der Vollkostenrechnung die Wärme- und Stromgestehungskosten, wie sie dem Betreiber der Feuerungsanlagen entstehen, analysiert und den derzeit üblichen Preisen gegenüber gestellt.

Weitere Aspekte der Nachhaltigkeit, etwa im sozialen und gesellschaftlichen Bereich, werden nicht betrachtet – einerseits, um die Arbeit in überschaubarem Rahmen zu halten. Andererseits lassen sich die gesellschaftlichen Auswirkungen einzelner Feuerungsanlagen und deren vor- und nachgelagerte Prozessschritte gerade im Bereich kommunaler Wärmeversorgung schwer zweifelsfrei feststellen. Dazu wäre eher eine Betrachtung der Auswirkungen auf das Gesamtsystem hilfreich, die hier wiederum zu weit führen würde.

Angesichts der Zahl der zu berücksichtigenden Parameter, der Tatsache, dass diese zum Teil miteinander in Konflikt liegen werden und nicht zuletzt der großen Zahl der möglichen Alternativen könnten für die Entscheidungsfindung zum Beispiel der politischen Handlungsträger auch Instrumente der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung angewandt werden. Mögliche Handlungsalternativen umfassen zum Beispiel:

- Instrumente der finanziellen Förderung, wie Investitionszuschüsse, verbilligte Kredite etc.,
- Informationspolitik, etwa um die Verbreitung neuer Techniken zu unterstützen, beim Aufbau von Netzwerken katalytisch zu wirken,
- Unterstützung der Verbände, Interessensvertreter,
- Gesetzliche Regelungen.

Neben Entscheidungen über eine allgemeine Förderpolitik stehen auch im jeweiligen Einzelfall Behörden und potenzielle Betreiber vor einem multikriteriellen Entscheidungsproblem, wenn es darum geht, ob und in welcher Form am jeweiligen Ort eine Anlage zur energetischen Nutzung implementiert werden soll.

Instrumente der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung lassen sich einteilen in (vgl. [BELTON U. STEWART 02]):

- „*Value Measurement Models*“: Hier wird für jede Option und jedes Kriterium einzeln zunächst ein numerischer Wert vergeben, was zu einer Matrix führt, die nachher durch zum Teil gewichtete Aggregation zu einer Bewertung der Alternativen führt. Beispiele hierfür sind die „Multiattribute Value Theory“ (MAVT) oder der „Analytic Hierarchy Process“ (AHP).
- „*Goal, aspiration or reference level models*“: Für eine Auswahl an Kriterien werden hierbei Zielwerte definiert, die mit den jeweiligen Optionen möglichst weitgehend erreicht werden sollten. Aus dem Grad der Erreichung dieser Zielwerte kann ein Ranking der Alternativen vorgenommen werden. Ein Beispiel für diese Art der Entscheidungsunterstützung ist der von [KRAPP 00] aufgestellte Kriterienkatalog, der als Entscheidungsunterstützung über die Förderung von Holzfeuerungen zu kommunalen Nahwärmeversorgung Zielwerte für eine Auswahl von technischen und wirtschaftlichen Parametern vorgibt (vgl. detailliertere Beschreibung in Kapitel 5.2.2.5.3 und Tabelle II-8 in Anhang II).
- „*Outranking Models*“: Durch sukzessiven Vergleich jeweils zweier Optionen wird ein Ranking der zur Verfügung stehenden Alternativen vorgenommen. Beispiele für diese Instrumente sind PROMETHEE oder ELECTRE I, II oder III.

Aus der Sicht der politischen Handlungsträger lassen sich zu den oben angeführten, in dieser Arbeit betrachteten Kriterien, mühelos eine ganze Anzahl weiterer Parameter, wie z.B. örtliche Luftqualität, krebserzeugende Emissionen der Anlagen,

Finanzlage der jeweiligen Kommune, hinzufügen – ebenso ist die Zahl der möglichen Handlungsoptionen, auf die Politik der gesamten Region bezogen, nicht nur groß, die einzelnen Optionen schließen sich auch gegenseitig nicht unbedingt aus. Vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass die fundierte Anwendung von Entscheidungsunterstützungsmodellen sehr aufwendig wäre und somit den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Stattdessen wird hier eine technisch-wirtschaftliche Analyse durchgeführt, anhand derer mittels verschiedener (Bilanzierungs-)Methoden eine übersichtliche Zahl an Entscheidungskriterien identifizierbar wird, wodurch sich die formellen Entscheidungsunterstützungsmethoden erübrigen.

### **3.2.2.2 Anwendung auf Fallbeispiele**

In einigen Untersuchungen werden zur energetischen Holznutzung allgemeine Betrachtungen und Berechnungen durchgeführt, wie z.B. in [BIZ 00] oder [LEIBLE 03]. Die dabei getroffenen Annahmen und Voraussetzungen – angefangen bei Transportentfernungen über technische Machbarkeit bis hin zu Brennstoffpreisen – werden so in der Realität selten anzutreffen sein. Andererseits würde es zu weit führen, alle theoretisch denkbaren Möglichkeiten im Rahmen einer Untersuchung durchzudenken, um alle real vorkommenden Verhältnisse abzubilden.

Um für den konkreten Fall der energetischen Holznutzung auf dem Gebiet des Landes Baden-Württemberg zu einem Ergebnis zu kommen, wurden daher Fallbeispiele ausgewählt, anhand derer die technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Kriterien untersucht wurden. Die Auswahl der Beispiele erhebt keinesfalls Anspruch auf Repräsentativität. Vielmehr wurden hier für jedes Einsatzgebiet der Holzenergie einige typische Fälle bestehender Anlagen ausgewählt.

## **3.3 Betrachtung der Gesamtsituation Baden-Württemberg**

Ausgehend von der Betrachtung der ausgewählten Fallbeispiele und der Schlüsse, die sich daraus ergeben, wurde im nächsten Schritt der Bogen weiter gespannt und die Betrachtung des Gesamtsystems Baden-Württemberg angestrebt.

### 3.3.1 Energiesystemanalyse

Bei der Betrachtung der energetischen Holznutzung mithilfe von Prozesskettenanalysen besteht der Nachteil, dass der Gesamtzusammenhang des bestehenden Energiesystems außer Acht gelassen wird. So werden bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen z.B. der Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen Alternativen vernachlässigt, wie z.B. die Möglichkeit von Stromimporten und Exporten. Gerade für die Analyse zukünftiger Entwicklungen, bei der eine große Anzahl von Parametern berücksichtigt werden müssen, die auf das komplexe Energiesystem im Lauf der Jahre Einfluss haben, ist die Anwendung eines Energiesystemmodells sinnvoll.

Da der Schwerpunkt der Anwendung von Holzbrennstoffen in der Wärmenutzung liegt, wäre ein Energiesystemmodell speziell für Wärme besonders interessant. Ein solches Modell aufzustellen, bereitet jedoch eine Reihe von Problemen.

Um die Beheizungsstruktur in der gesamten Region Baden-Württemberg zu erfassen, wäre eine sehr umfangreiche Datenmenge zu verarbeiten, da gerade die Beheizung von Privathäusern, Handwerksbetrieben, Industriebetrieben usw. individuell erfolgt. Verlässliche Daten über Standzeit, variable und fixe Kosten, die für das Modell notwendig wären, sind derzeit nicht vollständig verfügbar. Schließlich sind entscheidende Parameter, die die zukünftige Entwicklung der Bedarfsseite eines Wärmesystemmodells betreffen, derzeit im Umbruch. Durch die Einführung der neuen Wärmeschutzverordnung und dem verstärkten Bau von Niedrigenergiehäusern bzw. Passivhäusern sind Prognosen, wie sich der Wärmebedarf des Altbaubestandes und künftiger Neubauten entwickeln werden, mit großen Unsicherheiten behaftet.

All dies zeigt, dass eine Analyse der Wirtschaftlichkeit von Holznutzung zur Wärmeversorgung mit sehr großem Aufwand verbunden wäre, der den Rahmen dieser Arbeit übersteigt.

Für die Holznutzung zur Stromgewinnung und gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung wurde in [RENTZ ET AL 01B] das Energiesystemmodell PERSEUS-Reg<sup>2</sup> angewandt. Mit Hilfe von Projektionen wurde die Konkurrenzfähigkeit verschiedener Einsatzmöglichkeiten von Holzbrennstoffen gegenüber der Stromproduktion mit konventionellen Energieträgern untersucht, insbesondere in Hinblick auf die Entwicklung des Energiemarktes in nächster Zukunft bis 2030. Außer der Konkurrenzfähigkeit der Holznutzung gegenüber den konventionellen Alternativen stand auch die Entwicklung der Emissionen des Energiesystems, die aus einer verstärkten Nutzung von Holzbrennstoffen resultiert, im Vordergrund.

Einzelheiten zu dem Energiesystemmodell PERSEUS-Reg<sup>2</sup> sind im Kapitel 8.1 beschrieben.

### 3.3.2 Emissionen krebserzeugender Spurenstoffe

Um die Nachhaltigkeit der energetischen Holznutzung für Baden-Württemberg ganzheitlich zu untersuchen, wurde in einem weiteren Exkurs der Beitrag der Holzfeuerungen zu den landesweit erzeugten Emissionen, insbesondere der krebserzeugenden Spurenstoffe näher betrachtet. Hierzu wurden quellenspezifische Statistiken herangezogen und mittels der Berechnungsmethode der Emissionsfaktoren eine Hochrechnung durchgeführt. Dabei werden den einzelnen Emissionsquellenarten – z.B. Industriefeuerungen, Hausbrand, Verkehr – aus der Analyse der dort eingesetzten Techniken Emissionsfaktoren pro Aktivitätseinheit – z.B. Masseneinheit Arsen pro eingesetzte Masseneinheit Brennstoff – zugeordnet und auf die aus der Statistik bekannten Aktivitätsraten der Quelle angewandt.

Schließlich wurden die aus Holzfeuerungen resultierenden Emissionsmengen denen anderer Quellen gegenüber gestellt.

### 3.3.3 Chancen im Rahmen der Agenda 21

Ein weiterer Aspekt der Nachhaltigkeit der energetischen Holznutzung ist die Anwendbarkeit der CO<sub>2</sub>-neutralen, erneuerbaren Ressource im Rahmen der Lokalen Agenda 21. Hierfür wurden in einem weiteren Fallbeispiel die Einsatzmöglichkeiten der Holzenergie für die Gemeinde Stutensee untersucht und deren Chancen auf grenzüberschreitende Zusammenarbeit mit dem elsässischen Gemeindeverbund La Petite Pierre dargelegt.

Die Vorgehensweise beruhte hierbei ebenfalls zunächst auf einer Potenzialanalyse der vorhandenen lokalen Ressourcen. Daran angeknüpft wurde eine Energie- insbesondere Wärmebedarfsanalyse der örtlichen Gebäudestrukturen und Industrien. In der Synthese dieser beiden Analysen wurden schließlich potenzielle Einsatzmöglichkeiten energetischer Holznutzung identifiziert.



## **4 Potenziale der Ressource Holz in Baden-Württemberg**

Um die allgemeinen Rahmenbedingungen einer wirtschaftlichen Nutzung von Alt- und Restholz in Baden-Württemberg aufzuzeigen, werden im Folgenden zunächst die technischen Potenziale der Region, differenziert nach Herkunft der einzelnen Holzbrennstoffe, untersucht. Die für den Einsatz in Feuerungsanlagen wichtigen verbrennungstechnischen Größen ebenso wie die für die Emissionen relevanten chemischen und physikalischen Eigenschaften werden einander gegenüber gestellt. Mit der Charakterisierung der Aschen werden die für die Verwertung oder Entsorgung relevanten Daten aufgezeigt. Schließlich werden den technischen Parametern die Brennstoffpreise der Holzsortimente gegenüber gestellt und daraus auf die möglichen und sinnvollen Einsatzgebiete der energetischen Holznutzung gefolgert.

### **4.1 Aufkommen nach Holzarten**

Im Rahmen dieser Arbeit wird vorwiegend auf bereits vorhandenen Potenziale an Alt- und Resthölzern, die unmittelbar für die energetische Verwertung zur Verfügung stehen, eingegangen. Potenziale, die mittel- oder langfristig durch Anbau von Kurzumtriebshölzern auf Brachflächen der Landwirtschaft erschlossen werden könnten, werden hierbei zunächst ausgeklammert.

Unter Restholz wird einerseits das als Kuppelprodukt anfallende Holz während industrieller Holzbe- und -verarbeitung verstanden, sowie das für die stoffliche Nutzung aus technischen oder ökonomischen Gründen nicht zu gebrauchende Waldholz, das während des Einschlags und der Aufbereitung anfällt. Unter Altholz fallen dagegen die Holz mengen, die als Palette, Möbelstück oder Bauteil in ihrer ursprünglichen Verwendungsform ausgedient haben und nun verwertet bzw. entsorgt werden müssen. Eine weitere Quelle für eventuell für die energetische Nutzung zur Verfügung stehende holzartige Biomasse ist das sogenannte Landschaftspflegeholz, das bei der Pflege von öffentlichen Grünanlagen, Straßenbegleitgrün usw. anfällt.

Die für die energetische Nutzung verfügbaren Holz mengen werden getrennt nach Waldrestholz, Rinde (anteilig von Waldrestholz aber auch als Nebenprodukt der stofflichen Nutzung), Gebrauchtholz, Landschaftspflegeholz, Sägewerksnebenprodukte und Industrierestholz betrachtet. Die theoretischen und technischen Potenziale für Baden-Württemberg sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

**Tabelle 4-1:** Potenziale für energetisch nutzbares Holz in Baden-Württemberg<sup>1</sup>

Holzart	theoretisches Potenzial	technisches Potenzial <sup>2</sup>	technisches Potenzial [PJ/a]
	[Mio t atro]	[Mio t atro/a]	(Heizwert in [MJ/kg atro])
Waldrestholz ohne Rinde	0,923	0,734	12,9
Rinde	0,383	0,326	6,2 (18,5)
Gebrauchtholz, naturbelassen	0,2	0,17	3,0 (17,7)
Gebrauchtholz, behandelt	0,6	0,51	9,0 (17,7)
Landschaftspflegeholz	0,7	0,47	8,3 (17,7)
Sägenebenprodukte ohne Rinde	0,86	0,69	12,2 (17,7)
Industrierestholz, naturbelassen	0,1	0,04	0,7 (17,7)
Industrierestholz, behandelt	0,2	0,08	1,4 (17,7)
Insgesamt	3,966	3,02	53,7

Das *theoretische Potenzial* wird bestimmt durch das physikalische Angebot eines Stoffes innerhalb einer gegebenen Region und eines bestimmten Zeitraumes ohne Berücksichtigung von technischen und wirtschaftlichen Schranken. Für Landschaftspflegeholz wird auch der Begriff „potenzielles Aufkommen“ verwendet [MEINHARDT ET AL. 00].

Das *technische Potenzial* bezeichnet dagegen den Anteil des theoretischen Potenzials, welcher unter Berücksichtigung von technischen Randbedingungen (z.B. topographischer Zugänglichkeit von Waldgebieten, derzeitige technische Möglichkeit zur Erfassung und energetischen Nutzung) nutzbar wäre [MEINHARDT ET AL. 00]. Zusätzlich dazu werden die gegebenen strukturellen und ökologischen Restriktionen sowie gesetzliche Vorgaben berücksichtigt, da sie letztlich auch - ähnlich den technisch bedingten Eingrenzungen - "unüberwindbar" sind. Es beschreibt damit den zeit- und ortsabhängigen, primär aus technischer Sicht möglichen Beitrag einer regenerativen Energie zur Deckung der Energienachfrage. Da es wesentlich durch die technischen Randbedingungen bestimmt wird, ist es im Unterschied beispielsweise zu dem wirtschaftlichen Potenzial deutlich geringeren zeitlichen Schwankungen unterworfen. Das technische Potenzial wird immer in absoluten Werten angegeben, d. h., dass der heute bereits genutzte Anteil der jeweiligen Energieform darin enthalten ist. [BIZ 00]

<sup>1</sup> Quellen: [FDFREIBURG 00], [MEINHARDT ET AL 00]

<sup>2</sup> falls nichts anderes angegeben: 85 % des theoretisch nutzbaren Potenzials (kursiv gesetzt)

Das *ökonomische Potenzial* umfasst den Anteil des technischen Potenzials, der gegenüber anderen Energien nach Ort, Zeit und gegebenen Bedingungen wirtschaftlich konkurrenzfähig ist [MEINHARDT ET AL. 00].

Das ökonomische Potenzial für Energieholz abzuschätzen, ist derzeit sehr schwierig, da einige wichtige Randbedingungen, wie der Förderung der Energieerzeugung aus Biomasse gemäß dem Erneuerbaren-Energien- Gesetz und der Biomasseverordnung, eben erst endgültig festgelegt wurden. Dadurch wurde gerade im Bereich Stromerzeugung, der große Mengen an Holzbrennstoffen benötigt, mit dem Bau einiger größerer Anlagen begonnen, die in den kommenden Jahren nach und nach in Betrieb gehen werden und den Markt an verfügbarem, kostengünstigen Brennstoff, stark beeinflussen werden. So sind beispielsweise derzeit vier Biomassekraftwerke der E.ON Kraftwerke GmbH in Bau ( Landesbergen bei Minden, Zolling bei München, Delitzsch, Emden) mit je 20 MW<sub>el</sub> Kapazität und ca. 130.000 t Altholzbedarf pro Jahr, die MVV Energie AG baut derzeit drei Biomassekraftwerke (Mannheim, Wicker, Königswusterhausen), deren Kapazität ebenfalls im Bereich von 20 MW<sub>el</sub> liegt [EUWID 03A].

Nicht abzusehen ist derzeit auch, wie groß die Kapazitäten der Mitverbrennung bzw. reinen Biomassefeuerungen in Zukunft sein werden. Dazu kommt, dass im Bereich der unbehandelten Gebraucht- und Industrierestholz noch die Konkurrenz der stofflichen Verwertung zu beachten ist. Ein Großteil dieser unbehandelten Hölzer (A1 und z.T. A2) werden derzeit zur Spanplattenherstellung, in der Zellstoff- oder Papierindustrie verwertet. Zur Abschätzung der regional verfügbaren Potenziale muss also auch immer die Anwesenheit dieser Industriezweige mit beachtet werden. Laut [MARUTZKY 00] ist in den nächsten Jahren ein deutlicher Anstieg der Aktivitäten, besonders im Bereich der Zellstoffindustrie, zu erwarten. Dies könnte dazu führen, dass das ökonomische Potenzial an unbehandeltem Restholz allein durch die stoffliche Nutzung voll ausgeschöpft wird.

Aus all diesen Gründen sind die Preise für Gebrauchtholz derzeit sehr stark in Bewegung und können auch regional sehr unterschiedliches Niveau haben. Längerfristige Preiszusagen werden von den Betreibern von Altholzaufbereitungsanlagen zurzeit vermieden. Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Gebrauchtholzmarktes und damit der ökonomischen Potenziale sind daher derzeit mit großen Unsicherheiten behaftet.

### 4.1.1 Waldrestholz

#### **Charakterisierung**

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. Dazu gehören Bäume, die während Durchforstungsmaßnahmen gefällt werden, für die stoffliche Nutzung jedoch wegen geringer Stammdurchmesser oder Schädlingsbefall noch nicht bzw. nicht mehr nutzbar sind. Aber auch bei der eigentlichen Ernte fallen minderwertige Baumteile an, wie Wurzelstock und Zopf, sowie Rinde, Äste, Laub und Spreißel und Kappholz. Erhebliche Mengen an Derb- und Schwachholz werden derzeit aus ökonomischen Gründen im Wald belassen und verrotten dort [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Als Hackschnitzel aufgearbeitetes Waldrestholz hat üblicherweise Spangrößen von 20-80 mm [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98]. Wassergehalt und Verunreinigungsanteil sind je nach Behandlung, Lagerplatz und Lagerdauer sehr unterschiedlich. In der vorliegenden Arbeit wurde bei von einem durchschnittlichen Wassergehalt von 30 Gew.-% ausgegangen (s. Kapitel 4.2.1). Verunreinigungen des Waldholzes können in Form von Steinen und Erde bei Ernte und Bringung, sowie Aufbereitung zu den Waldhackschnitzeln gelangen. Da der Großteil dieser Fremdstoffe an der Rinde haftet, hängt jedoch der Verunreinigungsanteil stark davon ab, ob die Rinde getrennt verwertet wird oder nicht [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98]. Der Aschegehalt von Waldholz ohne Rinde liegt im Schnitt bei 1,6 Gew.-%.

#### **Potenzial**

Das Potenzial an Waldrestholz zur energetischen Verwertung wurde von der Forstdirektion Freiburg auf der Grundlage der Nutzungsplanung für Baden-Württemberg abgeschätzt. Von den insgesamt 1,38 Millionen Hektar Waldfläche in Baden-Württemberg sind 62,2 % in öffentlichem Besitz (s. Tabelle 4-2) [FDFREIBURG 00].

**Tabelle 4-2:** Besitzstruktur der Waldflächen in Baden-Württemberg  
[FDFREIBURG 00]

	Fläche in ha	Anteil in % der Fläche
Körperschaftswald	531.502	38,5
Staatswald	327.708	23,7
Privatwald	513.243	37,2

	Fläche in ha	Anteil in % der Fläche
Bundeswald	8.280	0,6
Gesamt	1.380.733	100

Ausgehend von der in der Nutzungsplanung festgestellten Einschlagholzmenge von 5.926.000 m<sup>3</sup> Holz wurden für die Berechnung des Energieholzanteils folgende Annahmen getroffen:

- Der Derbholzanteil liegt bei 8 % der Nadelholzmenge und 20 % der Laubholzmenge.
- Die Nichtderbholz- und Reisholzanteile liegen bei 4,2 % der Nadelholzmenge und 7,5 % der Laubholzmenge.

Ausgehend von der sich aus dieser Rechnung ergebenden theoretisch nutzbaren Holzmenge (ohne Rinde, Sortimentsumschichtungen<sup>3</sup>, Scheitholz<sup>4</sup>) von 1.024.076 m<sup>3</sup> Holz, wurde getrennt nach der Befahrbarkeit der Flächen das technisch nutzbare Potential ermittelt. Davon wurden die Selbstwerberanteile<sup>5</sup>, Anteile für Naturschutzgebiete und bei den schwer befahrbaren Flächen auch Anteile wegen schwerer Zugänglichkeit des Gebietes abgezogen.

Schließlich ergeben sich für die technisch nutzbaren Holzmengen für energetische Nutzung von öffentlichen Waldfläche folgende Zahlen:

Technische nutzbare Holzmengen gesamt	1.180.651 m <sup>3</sup>
davon	
technisch nutzbar auf befahrbaren Flächen ohne Rinde	390.528 m <sup>3</sup> (33 %)
technische nutzbar auf schwer befahrbaren Flächen ohne Rinde	70.681 m <sup>3</sup> (6 %)
Selbstwerberanteil	293.616 m <sup>3</sup> (25 %)
Scheitholz	271.672 m <sup>3</sup> (23 %)
Sortimentsumschichtungen	59.560 m <sup>3</sup> (5 %)
Rinde	94.594 m <sup>3</sup> (8 %)

<sup>3</sup> ursprünglich für stoffliche Nutzung gedachtes Holz, das aufgrund ökonomischer oder technischer Gründe doch energetisch genutzt wird

<sup>4</sup> bei der Aufteilung des Stammholzes in nutzbare Abschnitte bleiben oft Reststücke übrig, die als Scheitholz genutzt werden

<sup>5</sup> Holz, das von Privatleuten mit Erlaubnis der Forstverwaltung selbst aus dem Wald geholt und meist zur Feuerung verwendet wird

Für Privatwälder wurde angenommen, dass die nutzbare Menge pro Flächeneinheit bei Großprivatwald (> 200 ha) vergleichbar mit dem öffentlichen Wald sei und bei Kleinprivatwald um etwa 25 % niedriger liege [FDFREIBURG 00].

Insgesamt ergibt sich also für die energetische Nutzung des Waldholzes in Baden-Württemberg folgendes technisches Potenzial [FDFREIBURG 00]:

**Gesamtmenge mit Rinde pro Jahr: 1.702.069 m<sup>3</sup> pro Jahr (14,1 PJ/a)**

**Gesamtmenge ohne Rinde pro Jahr: 1.565.903 m<sup>3</sup> pro Jahr (12,9 PJ/a)**

davon aus öffentlichen Waldflächen 1.180.651 m<sup>3</sup> pro Jahr (9,79 PJ/a)

aus Großprivatwäldern 181.595 m<sup>3</sup> pro Jahr (1,51 PJ/a)

aus Kleinprivatwäldern 340.123 m<sup>3</sup> pro Jahr (2,82 PJ/a)

Die bereits energetisch genutzte Menge liegt mit 881.289 m<sup>3</sup>/a (7,3 PJ/a) bei etwa der Hälfte des technisch nutzbaren Potenzials [FDFREIBURG 00].

#### 4.1.2 Rinde

##### *Charakterisierung*

Die Entrindung findet meist im Sägewerk oder der Papierfabrik statt. Dabei fällt die Rinde meist streifenförmig an, wobei die Streifenlänge je nach Entrindungsanlage, Holzart (Nadel- oder Laubholz) und Rohholzdurchmesser zwischen einigen Zentimetern bis über einen halben Meter variiert [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98]. Vor der Verwertung der Rinde wird diese meist noch in einem stationären Hacker nachzerkleinert. Der Wassergehalt des Brennstoffs liegt dabei zwischen 38 und 55 Gew.-% (s. Kapitel 4.2.1). Aufgrund der vorangegangenen Bearbeitungsschritte der Holzernte, Rückung, Transport und Lagerung ist der Verunreinigungsgrad mit Steinen, Erde und dergleichen bei Rinde relativ hoch. Durch staubfreie Lagerplätze mit befestigtem Untergrund kann der Anteil der Verunreinigungen auf ein Minimum reduziert werden.

---

<sup>6</sup> in Festmetern atro, Fichte/Buche 1:1: 468,5 kg/fm, 17,7 MJ/kg

In jüngster Zeit wird die Entrindung jedoch auch zunehmend im Wald durchgeführt, was dazu führt, dass die Rindenanteile vor Ort im Wald verrotten und nicht mehr zur energetischen Nutzung zur Verfügung stehen.

**Tabelle 4-3:** Charakterisierung der Rinde anhand der durchschnittlichen Kenngrößen

Eigenschaft	Nadelholz	Laubholz
Wassergehalt x	35-55 Gew.-%	
Schüttdichte	155 kg atro/Sm <sup>3</sup>	229 kg atro/Sm <sup>3</sup>
Heizwert	19,2 MJ/kg atro 7,3-11,0 MJ/kg (x = 38-55 Gew.-%)	17,83 MJ/kg atro 6,7-10,1 MJ/kg (x = 38-55 Gew.-%)
Energiedichte	1.810-3.652 MJ/Sm <sup>3</sup> (x = 38-55 Gew.-%)	2.452-4.939 MJ/Sm <sup>3</sup> (x = 38-55 Gew.-%)
Aschegehalt	8,0 Gew.-% der Rinde	
Sonstige	Cl: 50-300 mg/kg	

### **Potenzial**

Das Potenzial der energetischen Nutzung von Rinde ergibt sich aus dem Waldholzpotenzial und dem jeweiligen Anteil der Rinde an den Nadel- und Laubholzmengen (8 bzw. 10 Vol.-%). Im vorangegangenen Abschnitt wurde das Potenzial an Waldrestholz abgeschätzt, woraus sich ein Potenzial für Rinde von 136.166 m<sup>3</sup> (1,18 PJ/a) ergibt. Aber auch der stofflich genutzte Anteil der Nutzungsplanung (5.215.760 m<sup>3</sup> auf öffentlichen Waldflächen, d.h. 6,01 m<sup>3</sup>/ha) liefert eine energetisch nutzbare Rindenmenge.

Für den Rindenanteil aus der stofflichen Holznutzung ergibt sich in Anlehnung an die Rechnung für Waldrestholz [FDFREIBURG 00]:

öffentl. Waldflächen:

5.2115.760 m<sup>3</sup>/a Holznutzung (6,01 m<sup>3</sup>/ha) daraus 469.418 m<sup>3</sup> Rinde

Großprivatwälder:

136.394 ha\* 6,01 m<sup>3</sup>/ha\* 0,09 m<sup>3</sup> Rinde/m<sup>3</sup> Holz daraus 73.776 m<sup>3</sup> Rinde

Kleinprivatwälder:

340.617 ha\* 6,01 m<sup>3</sup>/ha\* 0,75\* 0,09 m<sup>3</sup>Rinde/m<sup>3</sup>Holz daraus 138.180 m<sup>3</sup> Rinde

gesamt theoretisch nutzbar aus stofflicher Nutzung: 681.374 m<sup>3</sup> Rinde

entspricht (mit 468,5 kg/fm und 18,5 MJ/kg) 5,91 PJ/a

technisch nutzbarer Anteil aus stoffl. Nutzung (85%)	5,02 PJ/a
+ Anteil aus Waldrestholz	<u>1,18 PJ/a</u>
<b>gesamt Rindenanteil theoretisch nutzbar:</b>	<b>6,2 PJ/a</b>

### 4.1.3 Gebrauchtholz

#### *Charakterisierung*

Unter Gebrauchtholz sind Materialien aus sehr unterschiedlichen Quellen zusammengefasst [MARUTZKY U. SEEGER 99]:

- Verpackungsrestholz, wie Kisten, Paletten
- Holz aus dem Bau- und Abbruchbereich, wie Fenster, Türen, Balken, Vertäfelungen
- Holz aus der Außenanwendung, wie Schwellen, Masten, Zäune, Stangen, Pfähle
- Holzhaltiges Sperrgut und Altmöbel, wie Möbel aller Art, Böden, Paneele, Zäune
- Sonstiges Altholz, z.B. Kabeltrommeln, Pfähle

Während der Wassergehalt von Gebrauchthölzern durch die Trocknung während Herstellung und Gebrauch der Materialien einheitlich niedrig liegt (Annahme hier: Wassergehalt  $x = 13$  Gew.-%, s. Kapitel 4.2.1.3), ist die stoffliche Zusammensetzung ansonsten sehr unterschiedlich. Die Bandbreite reicht von kaum verunreinigten, naturbelassenen Palettenhölzern, über Span- und Faserplatten mit bis zu 15 % Anteil an Bindemitteln bis hin zu mit Holzschutzmitteln belasteten Hölzern, die mit inzwischen verbotenen quecksilberhaltigen Substanzen behandelt wurden.

Nach den Regelungen der Altholzverordnung werden Gebrauchtholzsortimente in folgende Kategorien eingeteilt [GEGUSCH 01], [MARUTZKY U. OBERNBERGER 99]:



### Kategorie A I: Unbehandelte Hölzer

(in der Einteilung nach [BERGHOFF 98] zugehörig zu H1)

- naturbelassenes, d.h. lediglich mechanisch bearbeitetes, aber nicht verleimtes, beschichtetes Altholz. Zu den naturbelassenen Althölzern zählen nach der Tabelle 1 der LAGA [MEINHARDT ET AL. 00] folgende Holzabfälle: Paletten (Euro-, Einweg-, Industrie- aus Vollholz, Brauerei-, Brunnen-, CHEP-, CP-Paletten), Transportkisten, Verschläge aus Vollholz, Obstkisten aus Vollholz und Holzabfälle aus dem Baubereich. Zu den Baustellensortimenten zählen naturbelassenes Vollholz, Möbel, Küchen und sonstige Inneneinrichtungen aus naturbelassenem Vollholz. Nach [MEINHARDT ET AL. 00] sind etwa 20 % des Altholzaufkommens naturbelassen.

### Kategorie A II: behandelte Hölzer (nach [BERGHOFF 98] H2.1)

- Verleimte, beschichtete, lackierte, gestrichene und sonstige behandelte Holzabfälle ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel.

### Kategorie A III: behandelte Hölzer (nach [BERGHOFF 98] H2.2)

- Holzabfälle mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel.

### Kategorie A VI: behandelte Hölzer (nach [BERGHOFF 98] H2.3/H3)

- Mit Holzschutzmitteln behandelte Holzabfälle, die Wirkstoffe wie Quecksilber-, Arsen- und/oder Kupfer-Verbindungen oder Teeröle enthalten, wie z.B. Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen.

### Kategorie PCB-Altholz (nach [Berghoff 98] H3)

- Altholz, das mit PCB im Sinne der PCB/PCT-Abfallverordnung verunreinigt ist.

## ***Situation in Baden-Württemberg***

In einer Erhebung der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg wurden im Jahre 1999 insgesamt 80 Gebrauchtholzaufbereiter in Baden-Württemberg identifiziert, wobei etwa die Hälfte der Anlagen stationär betrieben wird und die restlichen semimobile oder mobile Anlagen darstellen [LFU 99]. Damit sind die stationären Anlagen und die Betreiber, deren Hauptgeschäft in der Holzverwertung besteht, weitgehend vollständig erfasst. Daneben gibt es jedoch noch viele Gebrauchtholzannahmestellen bei z.B. Bauschuttverwertern oder auf andere Abfallströme wie z.B. auf Papier spezialisierte Recyclingunternehmen, welche

ebenfalls Gebrauchtholz annehmen, z.T. auch vorsortieren oder grob vorbrechen, um das Holz dann an die eigentlichen Altholzverwerter weiterzugeben. Oft wird dabei ein Tausch der „Nebenprodukte“ durchgeführt: die Altholzreste der Altpapierverwerter werden z.B. gegen die Altpapierreste des Altholzverwerter „eingetauscht“. Der Weg des Gebrauchtholzes kann durch diese Aktionen unüberschaubar kompliziert werden und deutlich weitere Transportwege umfassen, als von dem Altholzaufbereiter, der die verwertbaren Hackschnitzel oder Späne herstellt, erfasst werden kann.

Sammlung und Transport der Gebrauchthölzer werden z.T. von den Abfallverursachern, wie z.B. Bauabbruchunternehmen selbst, meist jedoch mittels Containerdiensten durchgeführt. Die Containerdienste sammeln das Gebrauchtholz je nach Auftrag an verschiedenen Orten im Umkreis um einen oder mehrere Gebrauchtholzverwerter. Der Wertstoff wird mittels Containerfahrzeugen direkt zur Aufbereitungsanlage geliefert. Durch dieses System besteht kein direkter Kontakt zwischen dem Betreiber der Aufbereitungsanlagen und den eigentlichen Anfallorten der Gebrauchthölzer, die genaue Herkunft verschiedener Holzteile wird durch das Sammeln an verschiedensten Orten schwer nachvollziehbar.

Eine Alternative dazu sind Gebrauchtholzaufbereiter, die eigene Transportsysteme haben und somit Sammlung, Aufbereitung und Transport zum Abnehmer in einer Hand liegt. Teilweise beschäftigen auch reine Transportunternehmen Subunternehmer, die mit mobilen Zerkleinerungsmaschinen die Aufbereitung von z.B. Waldresthölzern übernehmen.

Die meisten der Anlagen sind im Regierungsbezirk Stuttgart angesiedelt – Landkreis Esslingen, Rems-Murr-Kreis bzw. rund um Heilbronn [LFU 99]. Hier werden etwa 320.000 t/a Gebrauchtholz aufbereitet, etwa 40 % der insgesamt in Baden-Württemberg pro Jahr aufbereiteten Menge. Der Regierungsbezirk Karlsruhe kommt mit 240.000 t/a auf eine ähnlich hohe Menge, diese wird aber vorwiegend von einem Holzaufbereiter mit sehr großen Kapazitäten (Fa. USEG Holzrecycling GmbH 200.000 t/a) verarbeitet. Allgemein liegen die Kapazitäten der Aufbereitungsanlagen eher zwischen 10.000 und 20.000 t/a (40 % der Anlagen) oder unter 10.000 t/a (30 % der Anlagen) [LFU 99].

Ein Großteil der in [LFU 99] erfassten Aufbereiter (48 Anlagen) hat sich auf die Annahme von A1 und AII- Holz spezialisiert, wobei meist mobile Anlagen (33 Anlagen) mit nur einem Zerkleinerungsschritt verwendet werden.

Bei 21 zumeist stationär betriebenen Anlagen werden auch AIII/IV- Hölzer angenommen bzw. verwertet, während lediglich 10 Anlagen ausschließlich mit unbehandeltem Holz der Klasse AI betrieben werden.

Einige der Aufbereitungsanlagen haben sich auf spezielle Altholzsortimente, wie z.B. Paletten, Altfenster oder Bau- und Abbruchholz spezialisiert, die sie ausschließlich

aufbereiten. Diese Anlagen haben meist sehr geringe Durchsatzmengen und z.B. bei Abbruchholz oder Altfenstern große jahreszeitlich bedingte Schwankungen der zu verarbeitenden Holzmengen zu verzeichnen.

Neben den einzelnen Altholzaufbereitern, von denen nur wenige größere Unternehmen überregional agieren, gibt es noch Unternehmen wie z.B. GROW, Montan Entsorgung, Interseroh, welche Altholz vermarkten und zwischen Aufbereitern und Abnehmern vermitteln, ohne selbst Aufbereitungsanlagen zu betreiben. Diese Unternehmen binden meist mehrere regional ansässige Altholzaufbereiter an sich und versuchen, bei größerem Bedarf an Altholz wie z.B. für größere Feuerungsanlagen, die notwendigen Brennstoffkapazitäten zu vermitteln bzw. organisieren, im Fall von Montan Entsorgung z.B. auch die Transporte für mehrere Altholzaufbereiter durch Verhandlungen mit Transportunternehmen.

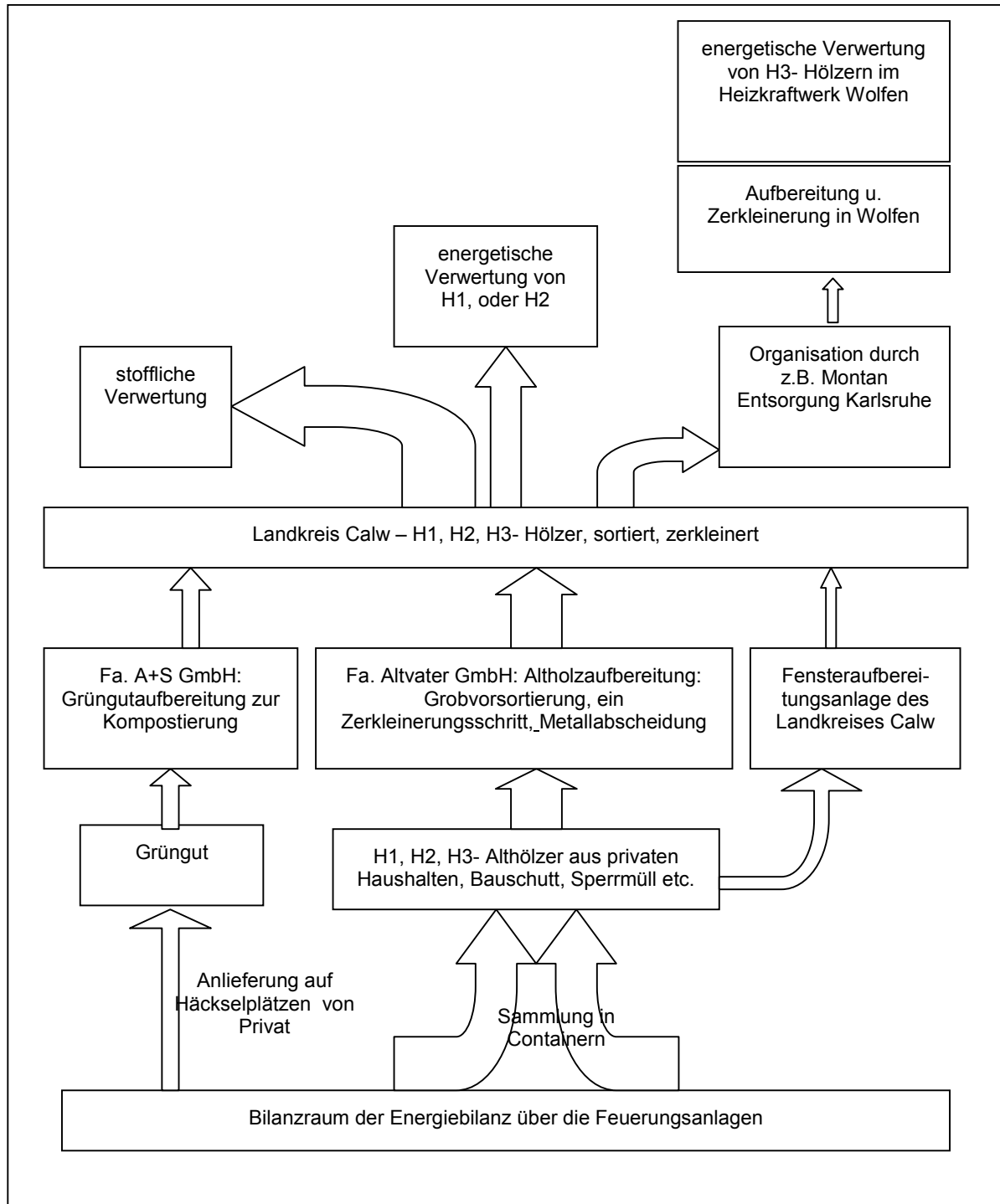
Dadurch, dass von vielen verschiedenen Stellen Gebrauchtholz gesammelt und angenommen wird und Transport und Aufbereitung der verschiedenen Altholzfraktionen nochmals in verschiedenen Händen liegen können, ergeben sich z. T. sehr komplexe Strukturen für die Verwertung der Hölzer. Für den Landkreis Calw ist dies beispielhaft in Abbildung 4-1 dargestellt.

### **Potenzial**

Durch eine Befragung von Altholzaufbereitern in Baden- Württemberg wurde in [MEINHARDT ET AL. 00] eine Menge an naturbelassenem Altholz von 0,16 Millionen t atro/Jahr, das als Hackschnitzel zur stofflichen oder energetischen Verwertung angeboten wird, abgeschätzt.

Ein anderer Ansatz geht von einem Altholzaufkommen von 80 bis 140 kg/Einwohner und Jahr aus, bei einem Anteil an naturbelassenem Holz von 20 % [MEINHARDT ET AL. 00].

Beide Ansätze führen zu einem durchschnittlichen theoretischen Altholzaufkommen von ca. 0,8 Mio t atro/Jahr, von denen 0,2 Mio t atro naturbelassen sind. Das technische Potenzial wird als ca. 80% des theoretischen Potenzials angenommen [MEINHARDT ET AL. 00].



**Abbildung 4-1:** Gebrauchtholzaufbereitung im Landkreis Calw

#### 4.1.4 Landschaftspflegeholz

##### **Charakterisierung**

Unter Landschaftspflegeholz ist das Holz aus öffentlichem und privaten Baum-, Hecken- und Strauchverschnitt zu verstehen. Holzschnitt fällt bei Straßengehölz- und Gewässerrandpflege, auf Friedhöfen, in öffentlichen Grünanlagen, in der freien Landschaft – z.B. Hecken, Feldgehölze und Streuobst – und in der Landwirtschaft im Intensivobstbau und Weinbau an [MEINHARDT ET AL. 00]. Zu der kommunalen Verwertung dieses Materials kommt meist auch noch der Grünabfall (Laub, Baum- und Strauchschnitt) aus privaten Kleingärten. Straßenbegleitgrün ist meist durch die verkehrsbedingten Emissionen stärker mit Schadstoffen belastet. Friedhofsabfälle und Weihnachtsbaumsammlungen müssen oft als Sondermüll behandelt werden, da durch die mitentsorgten Schmuckteile wie z.B. Friedhofslichter, Lametta etc., unter anderem erhöhte Schwermetallbelastungen vorliegen.

Die Anlieferung an den kommunalen Annahmestellen erfolgt in sehr unterschiedlichen Zerkleinerungsgraden – von unzerkleinertem, relativ großvolumigem Gestrüpp bis hin zu Feinteilen, wodurch eine Zerkleinerung und Homogenisierung in jedem Fall nötig ist.

Der Wassergehalt ist ebenfalls sehr unterschiedlich. In der vorliegenden Arbeit wurde von dem im Fall der Mitverbrennungsversuche im Heizkraftwerk Schwörer Haus gemessenen mittleren Wassergehalt von 42 Gew.-% ausgegangen [MLR 99].

##### **Potenzial**

Die Erfassung des energetisch nutzbaren Landschaftspflegeholzes über Abfallbilanzen berücksichtigt nur die Mengen, die auf zentralen Sammel- und Behandlungsplätzen von öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern anfallen (Abfallwirtschaftsämtern bzw. Gemeinden mit vom Kreis übertragener Abfallhoheit) und ist daher unvollständig. Nicht erfasst werden dabei [MEINHARDT ET AL. 00]

- Anteile, die direkt am Anfallort verbrannt, gehäckselt, anderweitig verwertet (über Privatleute oder Firmen) oder am Ort belassen werden,
- Anteile, die auf den Häckselplätzen der Gemeinden zerkleinert, aber nicht zu den Sammelplätzen weitergeleitet werden,
- Grünflächen- und Friedhofsabfälle, die von den jeweiligen Garten- und Friedhofämtern getrennt erfasst werden,
- Anteile an Mähgut.

Alternativ dazu wurde in [MEINHARDT ET AL. 00] eine Abschätzung des Potenzials anhand von vorhandenen Gehölzflächen und dazu ermittelten jährlichen Zuwachsraten an Holz durchgeführt. Möglichkeiten der Ermittlung der Gehölzflächen in Baden-Württemberg sind:

- (1) *Ermittlung über Anteile* an Grün- und Erholungsflächen (42 % der Fläche mit Gehölz bewachsen), Friedhofsflächen (20 %) und anhand der vorhandenen Straßenzulängen (0,6 ha/ Straßenzkilometer entlang von Autobahnen, 0,2 ha/Straßenzkilometer entlang von Bundes-, Landes- und Kreisstraßen;
- (2) *Ermittlung über das Digitale Landschaftsmodell (DLM25) des Amtlichen topographisch-kartographischen Informationssystems (ATKIS)* ; In diesem System, das in Baden-Württemberg vom Landesvermessungsamt betreut wird, wird mithilfe der digitalen Flächendaten über verschiedene Objektarten zur Zeit ein Abfragesystem entwickelt, das es möglich macht, Daten über einzelne Objektarten auf Kreisebene auszugeben. Nachteilig bei diesem System sind die unteren Erfassungsgrenzen von 0,1 ha bei „Gehölz“ und 1 ha bei „Streuobst“, sowie diverse Ungenauigkeiten, wie z.B. Überschneidungen an den Grenzflächen zu anderen Objekten;
- (3) *Erfassung durch Satellitenaufnahmen von LANDSAT TM von 1993*; die hierbei relevanten Flächenarten sind „lockerer Baumbestand“, „Weinbau“ und „Intensivobst“. Nachteilig hierbei ist die Beschränkung der Gehölzerfassung auf Außerortsgebiete.

Für die jährlichen Zuwachsraten und die Anteile an technisch erfassbarem Landschaftspflegeholz wurden die in Tabelle 4-4 aufgeführten Werte verwendet.

Daraus ergibt sich ein theoretisches Potenzial von 0,7 Mio t atro/Jahr und ein technisches Potenzial von 0,47 Mio t atro/Jahr, was deutlich über den üblichen Literaturangaben für Baden-Württemberg von 0,1 Mio t atro/Jahr liegt. Die Differenz wird von [MEINHARDT ET AL. 00] mit ungenauen Abschätzungen von Gehölzflächen und fehlender Berücksichtigung von Streuobstflächen begründet.

**Tabelle 4-4:** Jährliche Zuwachsraten und technisch erfassbare Anteile verschiedener Landschaftspflegeholzarten [MEINHARDT ET AL. 00]

Landschaftspflegeholzart	Jährliche Zuwachsrate	technisch erfassbarer Anteil
Streuobstflächen - Schnittholz	4 t/ha*a	20 %
Streuobstflächen - Rodungsholz	3 t/ha*a	50 %
Feldgehölze, Hecken etc.	5 t/ha*a	70 %
Schutzgebiete	(11.000 t/a)	0 % (verbleibt dort)
Weinbau - Rebschnitt		0 % (verbleibt dort)
Weinbau - Rodung	3,3 t/ha*a	50 %

Landschaftspflegeholzart	Jährliche Zuwachsrate	technisch erfassbarer Anteil
Innerorts - Straßenbereich	5 t/ha*a	70 %
Innerorts – Grün- und Friedhofsflächen	5 t/ha*a	90 %

#### 4.1.5 Sägenebenprodukte

##### *Charakterisierung*

Bei der Aufarbeitung der Holzstämme zu Schnittholz fallen mehrere Nebenprodukte an: Schwarten, Spreißel, Hackschnitzel, Kappscheiben, Säge- und Hobelspäne, Sägemehl und Schnittholzreste. Sie werden zumeist in Hackschnitzel ohne/mit Rindenanteil und Sägemehl nachzerkleinert und zur Verwertung in die Papier- und Zellstoffindustrie (rindenfreie Hackschnitzel), Spanplattenherstellung oder thermischen Nutzung weiterverkauft.

Hackschnitzel aus Sägewerken können als naturbelassenes Holz ohne nennenswerte Verunreinigungen betrachtet werden, das in der Feuchte in etwa im Bereich des frischen Waldholzes liegt – je nach Lagerung vor dem Einschnitt im Sägewerk. In der vorliegenden Arbeit wird von einem Wassergehalt der Sägespäne von 8 Gew.-% (Messungen bei der Mitverbrennung Schwörer Haus [MLR 99]) und der naturbelassenen Hackschnitzel von 35 Gew.-% ausgegangen (s. Kapitel 4.2.1.3).

Sägespäne und Hobelspäne entstehen bei der spanenden Verarbeitung von Holz (Gatter, Kreissägen, Hobelmaschine), während Holzstäube bei mechanischer Oberflächenbehandlung wie beim Schleifen anfallen.

Spangröße und –form sind abhängig von Art und Schärfe des Werkzeuges sowie von Holzart, Wassergehalt und Schnittrichtung. Im Allgemeinen haben Späne keine festen Größen. Für Sägespäne kann von einer Korngröße kleiner 5 mm ausgegangen werden, Holzstäube haben definitionsgemäß eine Korngröße kleiner 0,315 mm [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98].

##### *Potenzial*

In [MEINHARDT ET AL. 00] wurde die Menge an Sägerestholz auf der Grundlage von Statistischen Daten über die jährlich in Baden-Württemberg produzierten Schnittholzmengen abgeschätzt. Zu diesem Zweck wurden Angaben aus dem Statistischen Landesamt und „Forst und Holz 99“ der Zentralen Markt- und Preisberichtsstelle GmbH (1999) verwendet, die einen Rohholzverbrauch von 5.022.600 m<sup>3</sup> Holz pro Jahr in Baden-Württemberg und eine Schnittholzausbeute von

durchschnittlich 62 % angeben, verwendet. Der Anteil der Nebenprodukte beträgt danach 38 %. Für Nebenprodukte aus importiertem Rohholz werden nochmals 10 % aufgeschlagen, was zu einem theoretischen Potenzial an Sägewerksnebenprodukten in Baden-Württemberg von 0,86 Mio t atro pro Jahr führt. Dabei überwiegt der Anteil an Nadelholz mit 94 % deutlich gegenüber dem Anteil an Laubholz von 6 % [MEINHARDT ET AL. 00]. Eine Befragung von 27 der 470 Sägewerksbetriebe in Baden-Württemberg führte dagegen zu einem hochgerechneten Potenzial von 1,4 Mio t atro pro Jahr.

Als plausibler mittlerer Wert wird daher ein theoretisches Potenzial von 1,0 Mio t atro /Jahr angenommen [MEINHARDT ET AL. 00].

Aus den Umfragen ging außerdem die Zusammensetzung der Sägewerksnebenprodukte hervor. Die Nebenprodukte setzen sich im Schnitt wie folgt zusammen [MEINHARDT ET AL. 00]:

Rinde	14	Gew.-%
Hackschnitzel	52	Gew.-%
Sägemehl	32	Gew.-%
Späne (Hobel-, Fräs-)	0,3	Gew.-%
Schwarten und Spreißel	2	Gew.-%
Kappholz	0,3	Gew.-%

Für die Sägewerksnebenprodukte ohne Rinde ergibt sich also folgende Menge: 0,86 Mio t atro/ Jahr.

#### 4.1.6 Industrierestholz

##### *Charakterisierung*

Industrierestholz fällt als Produktionsrückstand bei der Holzbe- und -verarbeitung an. Es handelt sich um meist unbehandelte, stückige Holzteile wie Holzschnitzel, Kappholz oder Ablängstücke aus Massivholz, Schwarten und Spreißel. Industrierestholz fällt vor allem bei Zimmereien, Schreinereien, Möbel- und Fertighausherstellern an [BIZ 00]. Für die Potenzialabschätzung in [MEINHARDT ET AL. 00] wurde das Restholz aus Sägewerken gesondert betrachtet. Im Unterschied zu den Produktionsresten aus Sägewerken, sind bei Resthölzern des Handwerks, der Holzwerkstoffindustrie und der Möbelindustrie auch zum Teil Reste von Bindemitteln, Anstrichstoffen und Folienbeschichtungen enthalten. Restholzsortimente aus diesem Bereich sind Verschnitte, Abschnitte, Säge- /Gatterspäne, Hackschnitzel, Säge- und



Hobelspäne, Säumlänge, Schwarten und Spreißel. Nach Ergebnissen einer Umfrage von [MEINHARDT ET AL. 00] liegt der Anteil an naturbelassenen Nebenprodukten bei etwa 30 %.

Fehlten bei den in dieser Arbeit betrachteten praktischen Anlagenbeispielen die Angaben über den Wassergehalt des in Feuerungen eingesetzten Industrierestholzes, so wurde von  $x = 35$  Gew.-% ausgegangen (s. Kapitel 4.2.1.3).

### **Potenzial**

Aus der Abschätzung anhand von Schnittholzproduktionsdaten ergibt sich für Industrierestholz mit einem Anteil der Nebenprodukte von 18,6 % ein Potenzial von 0,38 Mio t atro/Jahr, wovon 0,1 Mio t atro (30%) naturbelassen sind. Auf der Grundlage von Befragungen von Schreinereien, Zimmereien und Holzverpackungsbetrieben ergab sich ein theoretisches Potenzial an naturbelassenem Industrierestholz von 0,31 Mio t atro, wovon 0,05 Mio t atro zur Weiterverarbeitung abgegeben werden [MEINHARDT ET AL. 00]. Der Anteil der abgegebenen Mengen liegt bei Zimmereien und Schreinereien bei ca. 10%, bei Holzverpackungsbetrieben bei 80%.

Eine Abschätzung von [MEINHARDT ET AL. 00] aus diesen beiden Ermittlungsmethoden beläuft sich auf 0,1 Mio t atro /Jahr an naturbelassenem Industrierestholz, was bei einem naturbelassenen Anteil von 30 % noch weitere 0,2 Mio t atro/Jahr an behandeltem Holz ergibt.

## **4.2 Charakterisierung der Holzarten im Hinblick auf die energetische Nutzung**

Eine Charakterisierung der Holzarten lässt sich mittels folgender Kenngrößen vornehmen [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98]:

- *chemische Kenngrößen*: Wassergehalt, Elementzusammensetzung, Anteil an anorganischen und organischen Schadstoffen und Fremdstoffen (Verunreinigungen), Aschengehalt, auswaschbarer Anteil, mikrobieller Abbau bei der Lagerung
- *energetische Kenngrößen*: Brennwert, Heizwert, Energiedichte
- *verbrennungstechnische Kenngrößen*: flüchtige Bestandteile, Ascheschmelzverhalten, Depositions- und Korrosionsverhalten, Aerosolbildung, Emissionen
- *physikalische Kenngrößen*: Abmessungen und Form, Dichte, Schüttdichte, Stapeldichte, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Staubbildung, Wärmeleitfähigkeit, Abriebfestigkeit
- *hygienische Kenngrößen*: Pilz- und Sporenbildung bei der Lagerung

Größere Schwankungen von Größen wie Wassergehalt, Schüttdichte, Heizwert und damit auch Energiedichte verursachen nicht nur technische Probleme, sondern bringen auch zum Beispiel Schwierigkeiten bei der Abrechnung zwischen Hackschnitzzellieferant und Abnehmer bzw. Feuerungsbetreiber mit sich. Tabelle I-1 im Anhang zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Qualitätsmerkmale von Holzarten und der Auswirkungen.

## 4.2.1 Einflussfaktoren auf den Heizwert

Der Energiegehalt der Holzsortimente wird meist als Heizwert angegeben und ist naturgemäß für die Entscheidung über eine energetische Nutzung, Festlegung der Brennstoffpreise und insbesondere auch für die Auslegung von Feuerungsanlagen eine entscheidende Größe. Auch für eine korrekte Ausführung der Energiebilanzen ist es unerlässlich, den Heizwert des jeweils eingesetzten Brennstoffs zu kennen, um die eingesetzte Primärenergiemenge berechnen zu können.

Der Heizwert des Holzes ist jedoch von vielen Einflussfaktoren abhängig, angefangen von der stofflichen Zusammensetzung (abhängig von Baumart, evtl. Behandlung oder Beschichtung im Fall von Gebrauchtholz), dem Wassergehalt (welcher wiederum von den Aufbereitungs- und Lagerungsschritten abhängt) bis hin zum gesundheitlichen Zustand des Holzes, d.h. davon, ob das Holzkrankheiten oder Pilzbefall vorliegen [VERSCHEURE 98].

Wird der Energieinhalt auf das Volumen bezogen angegeben, sind außerdem noch die Dichte des Feststoffs bzw. die Schüttdichte wichtig. Die Schüttdichte wird von Faktoren, wie der Spangrößenverteilung, der Spanform und vor allem auch der „Vorgeschichte“ des Schüttgutes, d.h. von eventuell beim Transport erfolgten Verdichtungen, beeinflusst.

### 4.2.1.1 Einfluss der Baumart, Baumteile

Die elementaren Bestandteile von Holz sind Kohlenstoff (50 Gew.-%), Sauerstoff (43 Gew.-%), Wasserstoff (6 Gew.-%) und Stickstoff sowie Schwermetalle, Halogene und Schwefel (zusammen ca. 1 Gew.-%) [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Die nach chemischen Verbindungen aufgeteilten Bestandteile von naturbelassenem Holz sind in Tabelle 4-5 aufgeführt.

**Tabelle 4-5:** Bestandteile des naturbelassenen Holzes (Laubholz) [MARUTZKY U. SEEGER 99]

Bestandteil	Gewichtsanteil an naturbelassenem Holz [Gew.-%]	Heizwert des reinen Bestandteils bzw. Polymergemisches [MJ/kg]
Cellulose	50	17,5
Hemicellulosen (= Polyosen)	25	16,5-17

Bestandteil	Gewichtsanteil an naturbelassenem Holz [Gew.-%]	Heizwert des reinen Bestandteils bzw. Polymergemisches [MJ/kg]
Lignin	25	30
Extraktstoffe: Harze, Wachse, Fette, Aminosäuren	< 5	38
Aschebildende Mineralstoffe	< 1	

Da der Lignin- Gehalt bei Nadelhölzern um etwa 5 Gew.-% höher liegt, ist auch der gewichtsbezogenen Heizwert von Nadelhölzern etwas höher: Laubhölzer haben einen Heizwert von ca. 4,8 kWh/kg, während Nadelhölzer 5,0 kWh/kg erreichen [VERSCHEURE 98].

Der Rindenanteil an der Masse eines Baumes liegt bei etwa 5 bis 10 Gew.-%, einschließlich der Innenrinde mit der Wachstumsschicht. Aufgrund des höheren Kohlenstoffanteils ist der Heizwert der absolut trockenen Rinde mit bis zu 5,4 kWh/kg meist deutlich höher als der des Holzes.

Mit der Näherungsformel von Dulong lässt sich der Heizwert auf der Grundlage der elementaren Zusammensetzung des Holzes berechnen:

$$Hu = 33,9 C + 121,4 (H - O/8) + 10,47 S; \quad (4.1)$$

mit  $Hu$ : unterer Heizwert des trockenen Holzes in [MJ/kg]

$C, H, O, S$ : Gewichtsanteile des jeweiligen Elements [kg/kg]

Mit den in [MARUTZKY U. SEEGER 99] angegebenen elementaren Zusammensetzungen ergibt sich daraus:

**Tabelle 4-6:** Heizwerte berechnet nach Dulong mit Angaben aus [MARUTZKY U. SEEGER 99]

	Fichtenholz	Fichtenrinde	Buchenholz	Buchenrinde
Heizwert $Hu$ , atro [MJ/kg]	18,0	19,2	17,3	17,8

**Tabelle 4-7:** Umrechnungsfaktoren für Hackschnitzel aus Fichte und Buche [VHE 00], [SCHAUMANN U. WALTER 96], [MARUTZKY U. SEEGER 99]

	Fichte			Buche		
	Festmeter fm	Raummeter rm (Ster)	Schüttkubikmeter Sm <sup>3</sup>	Festmeter fm	Raummeter rm (Ster)	Schüttkubikmeter Sm <sup>3</sup>
Festmeter fm	1	0,71 fm/rm	0,36 fm/Sm <sup>3</sup>	1	0,71 fm/rm	0,36 fm/Sm <sup>3</sup>
Schüttkubikmeter Sm <sup>3</sup>	2,8 Sm <sup>3</sup> /fm	2,0 Sm <sup>3</sup> /rm	1	2,8 Sm <sup>3</sup> /fm	2,0 Sm <sup>3</sup> /rm	1
Raummeter / Ster rm	1,4 rm/fm	1	0,5 rm/Sm <sup>3</sup>	1,4 rm/fm	1	0,5 rm/Sm <sup>3</sup>
Masse bei	kg/fm	kg/rm	kg/Sm <sup>3</sup>	kg/fm	kg/rm	kg/Sm <sup>3</sup>
x = 0%	379	265	155	558	391	229
x = 16,7%	446	312	182	656	460	269
x = 28,6%	541	379	221	797	559	327
x = 50 %	758	531	311	1.116	781	458
Heizwert <sup>1</sup> (atro)	1.899 kWh/fm	1.328 kWh/rm	777 kWh/Sm <sup>3</sup>	2.680 kWh/fm	1.878 kWh/rm	1.100 kWh/Sm <sup>3</sup>

Bezogen auf das Volumen liegen die Verhältnisse durch die relativ hohe Dichte von Laubholz gegenüber Nadelholz etwas anders. In Tabelle 4-7 sind die Umrechnungsfaktoren von Festmeter in Raummeter, die Masse, Dichte und Heizwert für Fichte und Buche einander gegenüber gestellt [VHE 00].

In [FORST-RH-PF 00] wird der Heizwert der verschiedenen Baumarten bezogen auf Raummeter in drei Klassen eingeteilt:

**Tabelle 4-8:** Einteilung der Baumarten nach Energieinhalt [FORST-RH-PF 00]

Energieklasse	Bezeichnung	Heizwert [kWh/fm] <sup>2</sup>	Baumart
Klasse 1	hoher Energieinhalt;	3.080	Hainbuche
	> 2.000 kWh/rm bzw. > 2.800 kWh/fm	2.940	Rotbuche, Eiche, Esche, Robinie
Klasse 2	mittlerer Energieinhalt;	1.900	Birke, Ulme, Ahorn
	1.500-2.000 kWh/rm bzw. 2.100-2.800 kWh/fm	1.700	Douglasie, Kiefer, Lärche

<sup>1</sup> aus Heizwerten für Fichten- und Buchenholz der Tabelle 4-6, mit  $1 \text{ kJ} = 2,7778 \cdot 10^{-4} \text{ kWh}$

<sup>2</sup> Angaben der Internetseite in [kWh/rm] wurden mit 1,4 rm/fm [VHE 00] in [kWh/fm] umgerechnet

Energie- klasse	Bezeichnung	Heizwert [kWh/fm] <sup>2</sup>	Baumart
Klasse 3	geringer Energieinhalt; < 1.500 kWh/rm bzw. < 2.100 kWh/fm	2.100	Erle, Fichte
		1.960	Weide, Tanne
		1.680	Pappel

Das Verhältnis von Schüttdichte zur Dichte der Festmasse hängt beim Waldrestholz außer von der Baumart auch noch von den Baumteilen ab, die mit aufbereitet wurden. So weist reines Derbholz (oberirdische Holzmasse ab 8 cm Zopfstärke) ein Verhältnis von 2,5 bis 3,0 Sm<sup>3</sup>/fm auf. Wird jedoch gleichzeitig noch Blattmasse/ Nadeln, Reisholz (unter 8cm Durchmesser), Industrieholz, Schwellenholz und Palettenholz mit aufgearbeitet, so kann der Umrechnungsfaktor auf bis zu 8,8 Sm<sup>3</sup>/fm steigen [VERSCHEURE 98]. In dem Fall würde Waldrestholz aus Fichte nur etwa 230 kWh/Sm<sup>3</sup> (Buche: ca. 320 kWh/Sm<sup>3</sup>) aufweisen.

#### 4.2.1.2 Einfluss des Gesundheitszustandes

Mit Holzkrankheiten und Pilzen befallenes Holz verliert durch den mikrobiellen Abbau mit der Zeit an Energieinhalt, erkennbar ist dies auch an dem reinen Gewichtsverlust der Hackschnitzel. Die Geschwindigkeit des Abbaus hängt von der Feuchte und Zusammensetzung des Materials ab. Nach [VERSCHEURE 98] verliert Industriebhackgut bei der Lagerung im Hackschnitzelhaufen etwa 1 % des Energieinhaltes pro Monat, sind es bei frischen Waldhackschnitzel bis zu 3 % Verlust an Energieinhalt pro Monat, Nadelhaufen können bis zu 10 % einbüßen.

#### 4.2.1.3 Einfluss des Wassergehaltes

Den größten Einfluss auf den Energiegehalt des Holzes hat der Wassergehalt (Gewichtsanteil Wasser bezogen auf die Gesamtmasse) bzw. Feuchte (Gewichtsanteil Wasser bezogen auf trockene Holzmasse). Zudem kann der Wassergehalt je nach eingesetztem Material (Baumart) stark unterschiedlich sein und verändert sich im Laufe der Behandlung bzw. Lagerung des Brennstoffs durch Trocknungseffekte

meist zugunsten des Energieinhalts. In Tabelle 4-9<sup>3</sup> sind beispielhaft die Bandbreiten der auftretenden Wassergehalte für verschiedene Holzsortimente aufgeführt [MARUTZKY U. SEEGER 99].

**Tabelle 4-9:** Typische Holzfeuchten und Wassergehalte verschiedener Sortimente [MARUTZKY U. SEEGER 99]

Brennstoff	Holzfeuchte u [Gew.-%]	Wassergehalt x [Gew.-%]
Waldholz, frisch eingeschlagen	80-120	44-55
Waldholz, 6 Monate abgelagert	30-60	23-38
Rinde, frisch	60-120	38-55
Hackschnitzel aus Sägerestholz	30-60	23-38
Scheitholz, frisch	60-100	38-50
Scheitholz, lutro	15-25	13-20
Sägerestholz, frisch	40-70	29-41
Gebrauchtholz	10-20	9-17
Holzpellets, -briketts	8-12	7-11
Holzwerkstoffe (Bauteile, Möbel)	6-12	6-11

Den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und unterem Heizwert  $H_u$  des Holzes beschreibt folgende Gleichung:

$$H_u = (1-x) \cdot H_{u, \text{atro}} - x \cdot r_0; \quad (4.2)$$

mit

$H_u$  unterer Heizwert des feuchten Holzes in [MJ/kg] oder [kWh/kg]

$x$  Wassergehalt in [Gew.-%]

$H_{u, \text{atro}}$  unterer Heizwert des absolut trockenen Holzes in [MJ/kg] oder [kWh/kg]

$r_0$  Verdampfungsenthalpie des Wassers bei 25°C: 2,44 MJ/kg bzw. 0,68 kWh/kg

<sup>3</sup> Da im Bereich der Holzenergie oft sowohl mit der relativen Feuchte  $u$  als auch mit dem Wassergehalt gerechnet wird, sind hier zum Vergleich beider Werte einander gegenüber gestellt (Zusammenhang zwischen  $u$  und  $x$ : vgl. Glossar). Im Folgenden und für die Berechnungen in dieser Arbeit wird jedoch ausschließlich der Wassergehalt  $x$  verwendet.

Mit Gleichung (4.2), den mit der Dulong- Formel berechneten Heizwerten und den Angaben zur Feuchte aus [MARUTZKY U. SEEGER 99] ergeben sich folgende Heizwerte für das feuchte Holz:

**Tabelle 4-10:** Berechnete Heizwerte für verschiedene Holzsortimente nach [MARUTZKY U. SEEGER 99]

Brennstoff	Wassergehalt x [Gew.-%]	Heizwert $H_{u, \text{feucht}}$ Fichte [kWh/kg]	Heizwert $H_{u, \text{feucht}}$ Buche [kWh/kg]
Waldholz, frisch eingeschlagen	44-55	ohne Rinde: 1,88-2,51 mit 10% Rinde: 1,90-2,53	ohne Rinde: 1,79-2,39 mit 10% Rinde: 1,80-2,40
Waldholz, 6 Monate abgelagert	23-38	ohne Rinde: 2,85-3,70 mit 10% Rinde: 2,87-3,73	ohne Rinde: 2,72-3,54 mit 10% Rinde: 2,73-3,55
Rinde, frisch	38-55	2,03-3,05	1,86-2,81
Hackschnitzel aus Sägereestholz	23-38	2,85-3,70	2,72-3,54
Sägereestholz, frisch	29-41	2,68-3,36	2,56-3,21
Gebrauchtholz	9-17	4,04-4,50	3,87-4,31
Holzpellets, -briketts	7-11	4,38-4,61	4,20-4,42
Holzwerkstoffe (Bauteile, Möbel)	6-11	4,38-4,67	4,20-4,48

Aus den berechneten Heizwerten in Tabelle 4-10 wird deutlich, dass der Wassergehalt des Brennstoffs einen weitaus größeren Einfluss auf den Energieinhalt hat, als die Baumart und geringe Anteile an Rinde. Die Berücksichtigung des bei Bäumen natürlich vorkommenden Gewichtsanteils von 5 bis 10 Gew.-% Rinde ändert den Heizwert nur geringfügig. Weitere Angaben und Analysenergebnisse aus der Literatur sowie die Berechnung der Heizwerte für die gewählten Anlagenbeispiele sind in Tabelle I-2 im Anhang zusammengestellt.



## 4.2.2 Emissionsrelevante Schadstoffgehalte

Da ein erhöhter Schadstoffgehalt im Holzsortiment dazu führen kann, dass verstärkte Maßnahmen zur Emissionsminderung an den Feuerungsanlagen ergriffen werden müssen und die Entsorgung der Aschen einen größeren Aufwand erfordert, kann der Schadstoffgehalt ein entscheidender Faktor dafür sein, ob die energetische Nutzung eines Holzsortiments wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll ist.

Eine Übersicht über Beispielwerte von Schadstoffbelastungen verschiedener Holzsortimente ist in Tabelle 4-11 dargestellt. Deutlich erkennbar ist an diesen Zahlen das Problem, dass die Zusammensetzung der einzelnen Holzsortimente sehr stark schwanken kann. Insbesondere bei den Althölzern ist es schwierig, Hölzer, die aufgrund unterschiedlicher Vorbehandlungen und Lebenswege in ihrer Zusammensetzung differieren, ohne aufwendige Analytik zu charakterisieren. Die derzeit gängige Praxis der Sortierung nach Augenschein und Herkunft führt also dazu, dass die Altholzmengen abhängig von der Qualität der Anlieferungen stark unterschiedlich belastet sind.

**Tabelle 4-11:** Beispielwerte für Anteile an emissionsrelevanten Elementen in mg/kg TS von Holzsortimenten [MARUTZKY U. SEEGER 99], [LFU 95], [KLENK 98], [MLR 99], [RÖSCH 96], [WIENHAUS U. BÖRTITZ 95]

Element	Altholz- gemisch	Baustellen- restholz	Rinde	Wald- holz	Späne	Grüngut	Straßen- begleit- grün	Straßenlaub
N	7.900	11.000- 16.000	2.000- 3.100	5.600	1.500- 4.100	6.800	7000	90.800- 141.000
S	2.000	100-200	k.A.	400	60	500	800	7.800-14.800
Cl	890-1.370	<100-3.380	k.A.	72,0	50	<300	<300	56.900- 19.800
F	21-110	<10-159	k.A.	<20,0	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
As	<1-27	0,5-1,6	0,3- 0,5	<0,1	0,1-0,3	k.A.	k.A.	k.A.
Cd	<0,1-3	0,7-4,4	1-2	0,04	0,1-0,4	<2,2	<2,2	0,6-2
Cr	0,3-108	6-192	1-4	0,7	2-5	54	37	12-33
Pb	2-1.410	4-1.776	4-10	4,2	0,4-40	<6,6	<6,6	95-215
Cu	2-1.430	2-6.844	8-11	2,8	1-5	10	12	25-54
Zn	14-5.110	20-3.144	120- 147	120	11-60	57	50	310-385

### 4.2.2.1 Herkunft der Schadstoffe bei Waldholz und Sägerestholz

Während sich der erhöhte Schadstoffgehalt in behandelten und beschichteten Althölzern leicht auf den Einfluss der holzfremden Stoffe zurückführen lässt, sind die erhöhten Schadstoffbelastungen naturbelassener Waldhölzer und insbesondere der Rinde erklärungsbedürftig. Besonders die Elemente Blei und Zink sind hier in erhöhtem Maße zu finden.

Für dieses Phänomen existieren verschiedene Erklärungsansätze. Zum einen wird eine Aufnahme der Schadstoffe über den Waldboden angenommen, was auf eine erhöhte Waldbodenbelastung hindeuten könnte. Bestätigt wird dies durch Untersuchungen von [ZOLLNER ET AL 97], nach dem etwa ein Drittel der bayrischen Waldböden erhöhte Werte für Blei, Cadmium, Zink und Kupfer enthalten. Ein weiterer Ansatz geht davon aus, dass die Bäume aufgrund der filternden Wirkung der großen Baumkronenoberflächen aus den bodennahen Luftmassen Schadstoffe aufnehmen [ZOLLNER ET AL 97]. Ein weiterhin denkbarer Aufnahmepfad führt über die zunehmende Versauerung der Waldböden, durch die die im Boden immobilisierten Schwermetalle freigesetzt werden. Diese freigesetzten Schadstoffe werden nach dieser Theorie ebenfalls verstärkt über die Wurzeln von den Bäumen aufgenommen.

Eine endgültige Klärung der Ursachen konnte jedoch bislang nicht gefunden werden.

### 4.2.2.2 Herkunft der Schadstoffe bei Althölzern

Eine Übersicht über typische holzfremde Gebrauchtholzbestandteile und deren Auswirkungen bezüglich der zu erwartenden Emissionen zeigt Tabelle 4-12.

**Tabelle 4-12:** Typische holzfremde Gebrauchtholzbestandteile und deren Auswirkungen [MARUTZKY U. SEEGER 99]

Holzfremde Bestandteile	Auswirkungen
Anstrichstoffe, alt	hoher Blei- und Zinkeintrag möglich
Anstrichstoffe, neu	Eintrag überwiegend (bei ausreichender Abgasentstaubung) nicht emissionsrelevanter Substanzen (Aluminium, Calcium, Chrom, Eisen, Mangan, Titan)
Beizen	geringer Schwermetalleintrag möglich
Bindemittel	häufig deutlicher Eintrag von Stickstoff, bei Ammoniumchlorid gehärteten Bindemitteln erhöhter Chloreintrag
Farblacke	Eintrag von Schwermetallen durch Pigmente
Flammschutzmittel	hoher Eintrag an Borsalzen und Ammoniumphosphat, Hemmung des Ausbrands

Holzfremde Bestandteile	Auswirkungen
Folienbeschichtungen, duroplastisch	merklicher Stickstoffeintrag
Folienbeschichtungen, thermoplastisch	bei PVC-Folien hoher Chloreintrag
Furnierbeschichtungen	Stickstoffeintrag durch Furnierleim
Holzschutzmittel, anorganisch	hoher Eintrag von ökologisch relevanten Elementen möglich
Holzschutzmittel, organisch	mäßiger Chloreintrag möglich
Holzschutzmittel, Teeröle und Carbolineen	hoher PAK-Eintrag, sonst nur geringe Änderung der Elementarzusammensetzung
Kantenmaterialien	hoher Chloreintrag bei Kantenmaterial auf PVC-Basis
Klebstoffe	geringe Auswirkungen
Klarlackanstriche	geringe Auswirkungen
Lamine	merklicher Stickstoffeintrag
Sonstige Veredelungsmittel (Wachse, Öle, etc.)	keine oder geringe Auswirkungen

### **Naturbelassene Althölzer**

Zu den naturbelassenen Althölzern zählen nach der Tabelle 1 der LAGA [MEINHARDT ET AL 00] folgende Holzabfälle: Paletten (Euro-, Einweg-, Industrie- aus Vollholz, Brauerei-, Brunnen-, CHEP-, CP-Paletten), Transportkisten, Verschläge aus Vollholz, Obstkisten aus Vollholz und Holzabfälle aus dem Baubereich. Zu den Baustellensortimenten zählen naturbelassenes Vollholz, Möbel, Küchen und sonstige Inneneinrichtungen aus naturbelassenem Vollholz.

Nach [MEINHARDT ET AL 00] sind etwa 20 % des Altholzaufkommens naturbelassen.

### **Einfluss von Bindemitteln, Beschichtungen**

Die zu den Holzwerkstoffen gezählten Span-, Faserplatten und Sperrhölzer enthalten zwischen 5 und 15 % Bindemittel und 85 bis 95 % Holzteile, wie Späne, Fasern, Furniere. Daneben werden häufig Härtingsbeschleuniger (Ammoniumchlorid bzw. Ammoniumsulfat) zugegeben und Paraffin zu Hydrophobierung verwendet. Flammschutzmittel werden dagegen nur in speziellen Anwendungsfällen eingesetzt – laut [MARUTZKY U. SEEGER 99] enthalten weniger als 2 % der Holzwerkstoffe brandhemmende Substanzen. Bei der Verarbeitung zu Möbeln und Bauteilen werden viele Holzwerkstoffe beschichtet oder lackiert.

Emissionsrelevant sind bei gutem Ausbrand und effektiver Entstaubung vor allem Substanzen, die nicht nur aus den Hauptbestandteilen des Holzes (Kohlenstoff,

Sauerstoff, Wasserstoff) bestehen, sondern insbesondere größere Anteile an Stickstoff, Chlor und Schwermetalle enthalten.

Nicht emissionsrelevant sind demnach bei gutem Ausbrand z.B. Polyvinylacetat („Weißleim“), Kunststoffteile auf Polyolefinbasis, Tannin-Formaldehyd-Leimharze, Wachse, nicht-pigmentierte Lacke auf Basis von Polyestern, Polyacrylaten, Alkydharzen und einigen Naturstoffen [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Für einen erhöhten Stickstoffeintrag und damit höhere Stickoxidemissionen sind vor allem Klebstoffe verantwortlich:

- Harnstoff-Formaldehyd-Leimharze (UF)
- Harnstoff-Melamin-Formaldehyd-Leimharze (MUF, MUPF)
- Diisocyanat-Klebstoffe (PMDI)
- Klebstoffe auf Proteinbasis (Casein-, Blutalbumin-, Glutinleime)
- Melamin-Formaldehyd-Imprägnierharze (MF)
- Harnstoff-Melamin-Formaldehyd-Imprägnierharze (MUF)
- Polyurethan-Lacke und -Kunststoffe (PUR)
- Nitrocellulose-Lacke (CN)
- säurehärtende Lacke (SH)

UF/MUF- Beschichtungen sorgen z.B. für eine Erhöhung des Stickstoffanteils am Holz von natürlicherweise 0,1 bis 0,3 auf 3 bis 4,5 Gew.-% [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Erhöhte Chlor- Einträge ergeben sich – abgesehen von einem Eintrag durch Holzschutzmittel - einerseits aus PVC- Beschichtungen, andererseits aus mit dem Härtebeschleuniger Ammoniumchlorid versehenen Holzwerkstoffen. Ammoniumchlorid wurde zu Beginn der 90er Jahre weitgehend durch chloridfreie Substanzen ersetzt. Das dabei eingesetzte Ammoniumsulfat kann jedoch zu erhöhten Schwefeleintrag von bis zu 800 bis 1.000 mg/kg führen (in naturbelassener Rinde: 400-800 mg/kg) [MARUTZKY U. SEEGER 99].

### ***Einfluss von Holzschutzmitteln***

Chemische Holzschutzmittel werden eingeteilt in [MARUTZKY U. SEEGER 99]:

- (1) wässrige oder salzartige Holzschutzmittel aus den Elementen Arsen (A<sup>1</sup>), Bor (B), Chrom (C), Fluor (F), Kupfer (K) und Zink (Z), sowie dem in älteren Stücken noch vorhandenen Quecksilber

---

<sup>1</sup> Kurzbezeichnung

(2) lösemittelbasierte Holzschutzmittel

(3) Steinkohlenimprägnieröle und Carbolineen

Die wässrigen und salzartigen Holzschutzmittel sind insbesondere für den Eintrag von Schwermetallen, sowie für Arsen- und Fluorverbindungen verantwortlich. Letztere stellen vor allem aufgrund ihrer hohen Flüchtigkeit ein Problem dar. Die Schwermetalle lassen sich dadurch, dass sie vorwiegend an Partikel gebunden vorliegen, mit Entstaubungsmaßnahmen aus dem Rauchgas abscheiden, während sich die Fluor- und Arsenemissionen nur durch aufwendigere Rauchgasreinigungen mindern lassen. Tabelle I-4 im Anhang zeigt eine Übersicht der angewandten Holzschutzmitteltypen, sowie wesentliche Einbringmengen und Eigenschaften.

Angewandte – zum Teil inzwischen verbotene – Holzschutzmittel auf organischer Lösemittelbasis und aus Teerölen sind im Anhang in Tabelle I-5 zusammengefasst. Emissionsrelevant sind dabei vor allem chlororganische Substanzen, wie Pentachlorphenol (PCP), Gamma-Hexachlorocyclohexan (Lindan) und Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT), die zwar inzwischen in Deutschland nicht mehr verwendet werden, zwischen 1950 und 1980 aber in großen Mengen in Hölzer eingebracht wurden. Nach [MARUTZKY U. SEEGER 99] liegen bei den zur Zeit eingesetzten Holzschutzmittel deutlich geringere Chloranteile vor und sie werden auch in kleineren Mengen ins Holz eingetragen.

Teeröle und Carbolineen bestehen aus Gemischen überwiegend aromatischer Kohlenwasserstoffe (auch PAK), in denen Halogene und Schwermetalle nicht oder nur in sehr geringen Mengen enthalten sind. Die Einbringmenge liegt mit bis zu 20% bei z.B. Bahnschwellen aus Buchenholz sehr hoch. Der Zusatz dieser Holzschutzmittel erhöht den Heizwert des Altholzes um 10 bis 20 % und ist vorwiegend bei nicht vollständigem Ausbrand emissionsrelevant [MARUTZKY U. SEEGER 99].

### 4.2.3 Charakterisierung der Aschen

Bei der Holzverbrennung bleiben feste Rückstände zurück, die aus den anorganischen Bestandteilen des Brennstoffs bestehen, je nachdem, wie unvollständig die Verbrennung abläuft jedoch auch organische Substanzen aufweisen.

Vor allem der Nährwert, die chemische Zusammensetzung und Eigenschaften wie Eluierbarkeit der Schadstoffe und pH-Wert sind maßgebliche Kriterien, nach denen die Aschen aus Holzfeuerungen von gesetzlicher Seite her eingeschätzt und für verschiedene Verwertungs- und Entsorgungswege zugelassen werden. Menge und Zusammensetzung der Aschen kann die Entsorgungskosten für die Reststoffe stark beeinflussen.

Drei Fraktionen der Holzasche fallen an:

- Die Grob- oder Rostasche bleibt als fester Rückstand im Brennraum zurück und besteht vorwiegend aus mineralischen Rückständen und den mit dem Brennstoff eingetragenen Verunreinigungen, wie Sand, Steine oder Metallteile.
- Die Flugasche besteht ebenfalls vorwiegend aus anorganischen Partikeln, die jedoch so klein sind, dass sie mit dem Rauchgas zu den Wärmetauschern (Verunreinigungen der Wärmetauscherrohre, die regelmäßig beseitigt werden müssen) und bis zu den Partikelabscheidern getragen werden.
- Die Feinstflugasche kann von den Zyklonen nicht vollständig abgeschieden werden. Emissionen dieser Partikelfraktion im Abgas können nur durch Gewebefilter oder Elektrofilter gemindert werden [VERSCHEURE 98].

Die Menge der anfallenden Holzasche hängt außer von der Qualität des Ausbrands auch von den eingesetzten Brennstoffen und deren physikalischen Eigenschaften (Span-/ Partikelgrößenverteilung) ab. Sehr feine Bestandteile können zum Beispiel bereits durch die Verbrennungsluft aus dem Brennraum ausgetragen werden und gelangen nur leicht angekohlt bis zu den Partikelabscheidern. Typische Teilchengrößen, Teilchendichten und Schüttdichten der Aschefraktionen sind in Tabelle 4-13 beispielhaft aufgeführt.

Wie sich der Ascheanfall auf die verschiedenen Aschefraktionen aufteilt, ist ebenfalls von der Beschaffenheit des eingesetzten Brennstoffs abhängig. Während bei dem Einsatz von Hackschnitzeln der Anteil der Grobasche deutlich überwiegt, kann bei einer Sägespänefeuerung die Flugasche auf über 50 Gew.-% des Ascheanfalls ansteigen. In [VERSCHEURE 98] sind übliche Aufteilungen der Aschefraktionen angegeben: Durchschnittliche Ascheanfallmengen sind im Anhang in Tabelle I-6 zusammengefasst.

**Tabelle 4-13:** Typische Partikelgrößen, Teilchendichten und Schüttdichten von Holzaschen [OBERNBERGER 94]

Aschefraktion	Brennstoff	Teilchen- größen [ $\mu\text{m}$ ]	mittlere Teilchendichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Schüttdichte (Mittelwert) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
Grobasche	Rinde	30-100.000	2.860	943
	Hackgut	15-50.000	2.866	960
	Späne	10-30.000	3.021	662
Flugasche/ Zyklonasche	Rinde	3-200	2.590	656
	Hackgut	2-160	2.682	430
	Späne	2-100	2.575	283
Feinstflugasche	Rinde	0,3-10	2.515	340
	Hackgut	kA.	kA.	kA.
	Späne	0,2-5	2.420	280

**Tabelle 4-14:** Anteile der Aschefraktionen in Gew.-% des gesamten Ascheanfalls [VERSCHEURE 98]

Aschefraktion	Rindenfeuerung	Hackschnitzelfeuerung	Spänefeuerung
Grobasche	75-85	70-90	20-30
Flugasche/ Zyklonasche	15-25	10-30	55-65
Feinstflugasche	1-4	3-6	10-15

Im Hinblick auf die möglichen Verwertungs- bzw. Entsorgungswege der Holzaschenfraktionen sind vor allem folgende Parameter interessant:

- Nährwert der Aschen, ausgedrückt durch den Gehalt an Nährstoffen und der Verfügbarkeit dieser Nährstoffe für die Pflanzen
- Gefährdungspotenzial der Aschen, charakterisiert durch die Gehalte an anorganischen und organischen Schadstoffen, sowie deren Mobilität, welche durch Eluierbarkeit, pH-Wert und Leitfähigkeit beschrieben werden können.

#### 4.2.3.1 Nährstoffgehalt

In Tabelle I-7 im Anhang wurden die in der Literatur angegebenen Analysenergebnisse und Durchschnittswerte der Nährstoffgehalte in Holzaschen einander gegenüber gestellt. Die Holzaschen enthalten vor allem Kalziumoxid (zwischen 10 und 50 Gew.-%), zu etwa gleichen Teilen Kaliumoxid und Magnesiumoxid, während die Anteile an Phosphor-, Mangan- und Natriumoxid eher

gering sind. Als besonders nährstoffreich erweisen sich die Sortimente Waldholz und Landschaftspflegeholz.

**Tabelle 4-15:** Nährstoffgehalt in Gew.-% der Trockensubstanz der Aschearten [MARUTZKY U. SEEGER 99], [VERSCHEURE 98], [SANDER U. ANDRÉN 97]

Ascheart	Brennstoff	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Grobasche / Nassasche	Waldholz (Müllheim, Neuenburg)	37-57	5-10	3-9	1-5
	Industrierestholz Furnierbetrieb [POHLANDT ET AL 96]	27	7	1	2
	Gebrauchtholz	31	2	3	1
Flugasche/ Zyklonasche	Waldholz (Müllheim, Neuenburg)	33	20	4	2
	Waldholz [SANDER U. ANDRÉN 97]	27,84	3,73	2,98	3,67
	Industrierestholz Furnierbetrieb [POHLANDT ET AL 96]	29	3	1	2
	Gebrauchtholz	28	3	3	1
Feinstflugasche	Waldholz (Müllheim, Neuenburg)	14-25	20-26	2-4	0,3-4
	Industrierestholz Furnierbetrieb [POHLANDT ET AL 96]	16	9	1	2
	Gebrauchtholz	17	8	0,5	0,4

#### 4.2.3.2 Gehalt an anorganischen Schadstoffen

Umweltrelevant an der Aschezusammensetzung ist vor allem der Gehalt an Schwermetallen, besonders an Zink und Cadmium. In den Tabellen I-8 bis I-10 im Anhang sind einige Literaturangaben zu Schwermetallgehalten in Holzaschen zusammengefasst.

Nach [ZOLLNER ET AL 97] reichern sich in den Flug- und Feinstflugaschen vor allem die leichtflüchtigen Schwermetalle, wie Zink, Cadmium und Blei an, welche zu 80 bis 98 % in diesen beiden Aschefractionen zu finden sind. Die schwerflüchtigen Schwermetalle (Nickel, Chrom, Cobalt) verbleiben zu etwa 50 % in der Grobasche.

#### 4.2.3.3 Gehalt an organischen Schadstoffen

Aufgrund unvollständiger Verbrennung sind in Holzaschen neben den mineralischen Bestandteilen des Holzes auch noch organische Verbindungen enthalten, die sich zum Teil während des thermischen Prozesses bilden. Einige der dabei gebildeten



aromatischen Verbindungen sind als krebserzeugende Schadstoffe bekannt. Untersucht wurden die Gehalte an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in der Summe und als einzelner Vertreter das Benzo(a)pyren BaP, Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (Dioxine/Furane oder PCDD/F). Einige Ergebnisse sind in Tabelle I-11 im Anhang zusammengefasst. Im Vergleich zu den Grenzwerten der Klärschlammverordnung liegen die Dioxin/Furan- Gehalte durchweg niedrig. Für die PAK ergeben sich jedoch Überschreitungen der Grenzwerte bei den Flugaschen und Feinstflugaschen.

#### 4.2.3.4 Eluierverhalten, pH-Wert

Typische Werte für pH und elektrische Leitfähigkeit sind im Anhang in Tabelle I-12 angegeben. Aufgrund der hohen Anteile an Oxiden und Hydroxiden der Elemente Calcium, Kalium, Magnesium und Natrium haben die Eluate der Holzaschen meist einen pH-Wert zwischen 12,0 und 13,5 und reagieren somit stark basisch („Brantkalkeneigenschaften“) [NOGER U. PLETSCHER 00]. Die Anteile von in Lösung sauer reagierenden Verbindungen, wie Sulfate, Chloride und Karbonate sind dagegen gering. Zugleich liegt die elektrische Leitfähigkeit z.B. im Vergleich zu der der Waldböden wegen des hohen Anteils freier Elektrolyten relativ hoch [ZOLLNER ET AL 97].

Chrom ist ein essentielles Spurenelement und findet sich daher in allen Biomassen, wobei es in den Pflanzen als Cr-III- Komplex gebunden vorliegt. Holz und Rinden enthalten bis zu 5 mg/kg Chrom. Bei der Verbrennung reichert sich das Element um Faktor 50 bis 200 an und wird zu Chromat (Cr-VI) oxidiert. Je besser der Ausbrand, d.h. je vollständiger die Oxidation der Bestandteile des Holzes, desto höher wird der Chromatanteil am Chrom-Gehalt. Da Chromat im Gegensatz zu Cr-III gut wasserlöslich ist, lässt es sich bei Eluattesten leicht auswaschen [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Die Eluierbarkeit der amphoteren Schwermetalle ist sehr stark vom pH-Wert der Lösungen abhängig. Dies gilt insbesondere für Zink- und Blei- Verbindungen. Während bei pH-Werten zwischen 9 und 12 die Löslichkeit von Zink und Blei jeweils unter 5 mg/l bleibt, steigt sie bei pH < 9 und > 13 exponentiell an [NOGER U. PLETSCHER 00]. Die Löslichkeit von Chrom-, Cadmium- und Molybdän- Verbindungen steigt vor allem bei pH-Werten unter pH 11 stark an, bleibt jedoch im alkalischen Bereich gering [NOGER U. PLETSCHER 00]. Dennoch sind die Chrom-(VI)-Eluatwerte von Holzaschen erhöht, so dass nach der bisherigen TA Siedlungsabfall eine Entsorgung auf Sonderabfalldeponien nötig wäre: [KOLB ET AL 98] messen z.B.

zwischen 1,69 und 4,86 mg/l Cr(VI) in Eluaten von Filterstäuben und < 0,01 bis 0,188 mg/l Cr(VI) in Eluaten von Rostaschen.

Für Grobaschen aus Feuerungsanlagen, die nach 1. BimSchV genehmigt wurden und demnach nur unbehandelte Hölzer einsetzen, wurde inzwischen eine Ausnahmeregelung getroffen: die Eluatgrenzwerte für Chrom (VI)- Verbindungen wurden mit der Begründung außer Kraft gesetzt, dass auf Deponien reduzierende Bedingungen herrschten und somit Cr (VI) zu dem ungefährlicheren Cr (III) reduziert werde [SCHÄFER 03].

#### 4.2.3.5 Schmelzverhalten

Das Schmelzverhalten der Aschen ist hinsichtlich der Verschmutzungsgefahr des Brennraums der Holzfeuerungskessel und Wärmetauscherrohre interessant. Für den Ascheschmelzpunkt sind vor allem die Gehalte der Asche an Kalium-, Calcium-, Magnesium- und Silizium- Verbindungen entscheidend [MLR 99].

Während der Kaliumanteil aufgrund der hohen Flüchtigkeit des Kaliums (Erweichung bei 740°C, Flüchtigkeit um bis zu Faktor 4,5 höher gegenüber den anderen Elementen) zu stärkeren Verschmutzungen und niedrigeren Erweichungstemperaturen führt, haben Ca und Mg einen gegenläufigen Effekt. Silizium erweicht erst bei relativ hohen Temperaturen. Die Teilchen wirken dann jedoch durch ihren abrasiven Charakter bis zu einem gewissen Grad reinigend, können aber bei zu hohen Si-Gehalten zu Erosionserscheinungen in der Anlage führen [MLR 99]. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den mineralischen Bestandteilen (Eutektika) kann jedoch das Schmelzverhalten und damit die Verschmutzungsgefahr nicht vollständig aus der isolierten Betrachtung der einzelnen Elemente hergeleitet werden [MLR 99].

Da Biomassen allgemein einen niedrigeren Schmelzbereich der mineralischen Bestandteile aufweisen, als z.B. Kohle, muss beim Betrieb dieser Feststofffeuerungen auf die Einhaltung relativ niedriger Brennraumtemperaturen geachtet werden. Probleme bereitet dies vor allem bei Brennstoffen mit besonders hohen Anteilen an Kalium- Verbindungen und damit extrem niedrigen Ascheschmelzpunkten, wie z.B. Stroh. Problematisch kann das Schmelzverhalten auch bei der Mitverbrennung von Biomasse in Kohle- Trockenfeuerungen werden, da hier vergleichsweise hohe Temperaturen auftreten und ein Schmelzen der Aschen nicht erwünscht ist.

### **4.3 Brennstoffpreise der Holzarten**

Die Preise der verschiedenen Holzsortimente sind von verschiedensten Faktoren abhängig:

- den Kosten der Brennstoffbereitstellung,
- den Preisen, die man etwa bei alternativer stofflicher Nutzung erzielen könnte bzw. den Zuzahlungen, die bei alternativer Entsorgung nötig wären,
- bei Anbietern der öffentlichen Hand, von dem Interesse, das daran besteht, durch energetische Holznutzung die Nachhaltigkeit der Kommune/Region zu fördern (indirekte Subvention),
- von Markt- und Saisonschwankungen, dem jährlichen Einschlag, internationalem Angebot, aber auch Nachfrage durch Verwertungsanlagen.

Während bei Waldholz die hohen Bereitstellungskosten (vgl. detailliertere Beschreibung in Kapitel 5.2.1.1) den Ausschlag für die relativ hohen Preise geben, indirekte Subventionen von Seiten der Kommunen aber den Preis unter Umständen sehr stark beeinflussen können, ist beim Gebrauchtholz vor allem der Schadstoffgehalt die Preis bestimmende Komponente. Je nach Einstufung in die Altholzklassen A I bis A IV ist die energetische Nutzung mit gesetzlichen Auflagen zur Emissionsminderung verbunden, die hohe Investitionen erforderlich machen. Sägeresthölzer und Industrieresthölzer sind dagegen meist nur gering mit Schadstoffen belastet oder gar unbehandelt, als Nebenprodukte der Holzverarbeitung zugleich mit nicht allzu aufwendigen Aufbereitungs- und Bereitstellungsprozessen verbunden, stellen also für die wirtschaftliche Nutzung des Energieträgers Holz die attraktivste Alternative dar.

Die in Abbildung 4-2 dargestellten Bandbreiten für Holzpreise im Energiebereich für 2001 sind starken Schwankungen unterworfen. In Abbildung 4-3 ist die Preisentwicklung zwischen April 2002 und April 2003 aufgezeichnet, die einen stetigen Anstieg der Preise für Gebrauchtholz erkennen lässt. Durch die Einführung der Biomasseverordnung, die bei Biomassenutzung zur Stromerzeugung hohe Einspeisevergütung garantiert, wurden in den letzten Jahren einige Holzkraftwerke im Bereich von 100.000 bis 150.000 t Altholzverbrauch pro Jahr geplant und umgesetzt. Die steigende Nachfrage nach günstigen Holzsortimenten führte zu ebenso steigenden Altholzpreisen und einer Verknappung des Industrieholzangebots [IHB 03]. In einigen Fällen führte das sogar dazu, dass Planungen für Holzkraftwerke wieder eingestellt wurden [IHB 03].

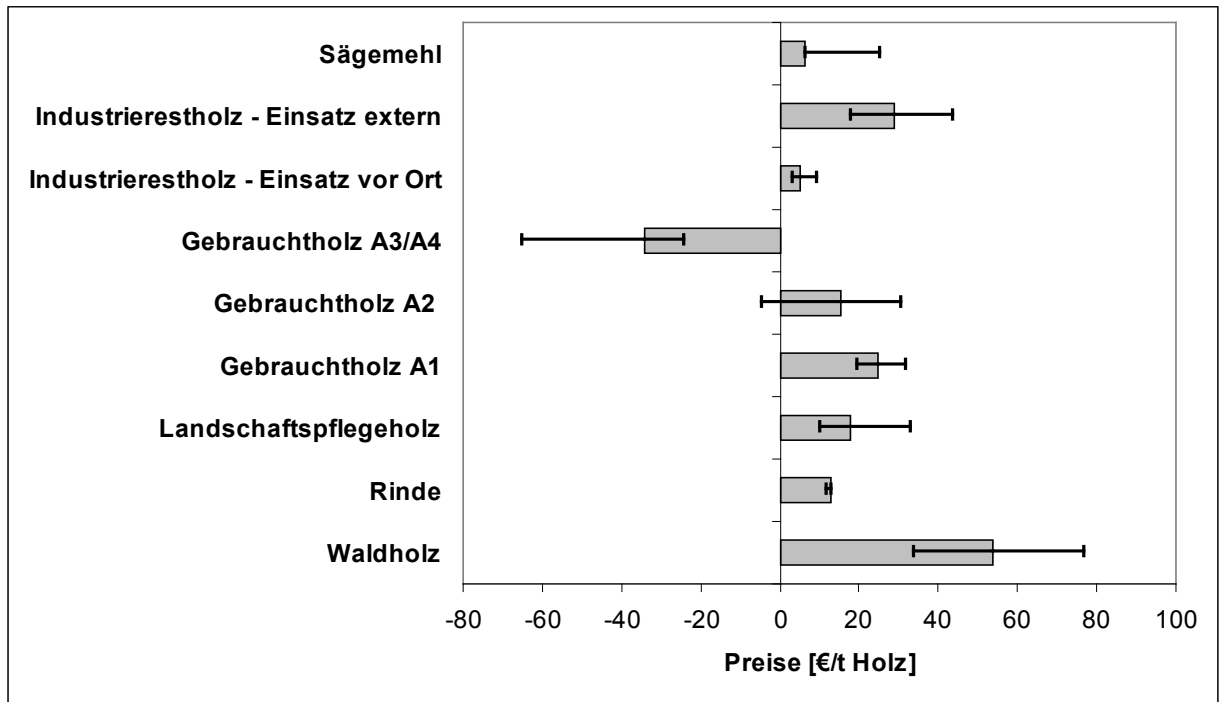


Abbildung 4-2: Preise für Holzbrennstoffe, Stand: 2001 [RENTZ ET AL 01B]

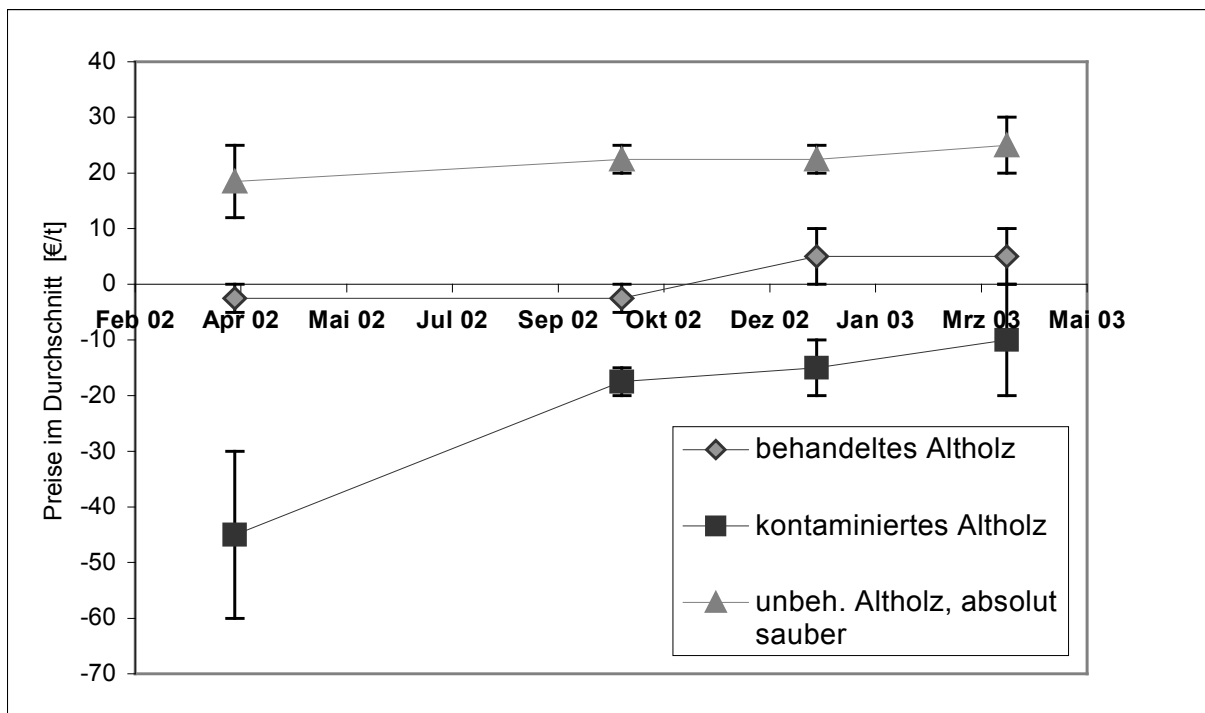


Abbildung 4-3: Durchschnittspreise für Hackschnitzel (0-150 mm) im Süden Deutschlands laut [EUWID 03]

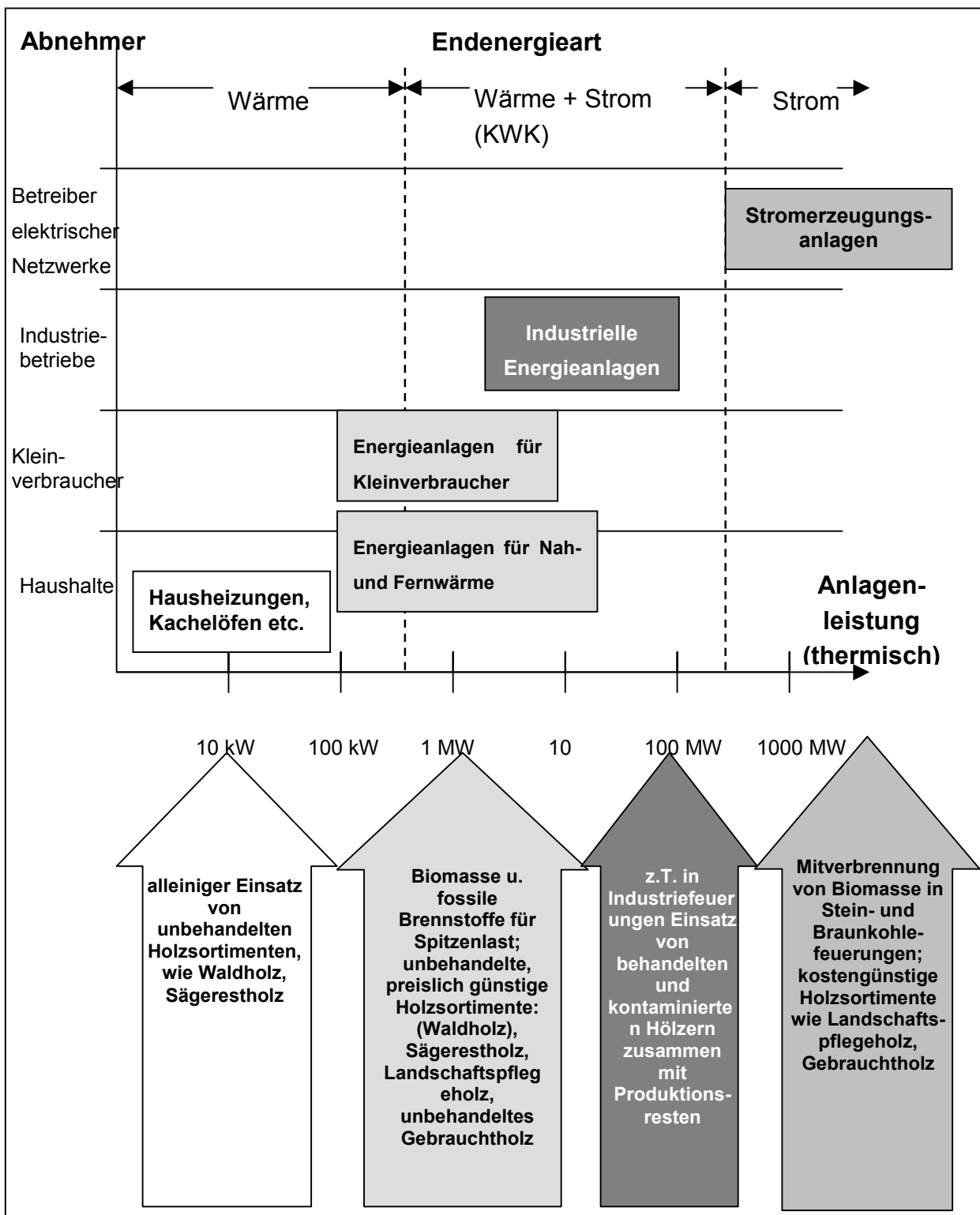
#### **4.4 Einsatzgebiete der Holzenergie**

Eine Gegenüberstellung der üblichen Einsatzgebiete der Holzenergie mit den aus technischen, wirtschaftlichen und gesetzlichen Gründen sinnvollen Einsatzmöglichkeiten der Holzsortimente liefert das in Abbildung 4-4 dargestellte Schema. Im untersten Leistungsbereich von Holzfeuerungen wird die Holzenergie vorwiegend zur Wärmebereitstellung in privaten Haushalten genutzt und für diese - Raumheizungen, Etagenheizungen oder Zentralheizungen – reine Holzfeuerungen mit unbehandeltem Holz installiert. Dabei kommen Scheitholz, Hackschnitzel oder Pellets aus Waldholz zum Einsatz, die von Holzhandel und Schreinereien bereitgestellt werden. Etwa 60 % des in diesem Bereich verbrannten Holzes entstammt jedoch nach einer Markterhebung der Rheinbraun AG [RENTZ 00B] nicht dem Brennstoffhandel, wird also über direkte Kontakte zu Wald- oder Obstbaumbesitzern oder aus eigenen Gärten bezogen. Im Bereich von einigen hundert Kilowatt Feuerungsleistung bis über 1 MW liegen Anlagen der kommunalen Nahwärmeversorgung, Wärmeversorgung größerer Gebäudekomplexe und der Werkstatt- oder Verwaltungsgebäude kleinerer und mittlerer Industriebetriebe, wie z.B. Schreinereien, Zimmereien. Hier sind meist zur Spitzenlastversorgung noch zusätzlich Gas/Öl- Kessel (bzw. Kombikessel für beide Brennstoffe) bzw. auch Blockheizkraftwerke installiert, wodurch teilweise auch der Strombedarf der Gebäude gedeckt werden kann. Durch die deutlich größeren Brennstoffmengen wird hier neben dem Waldholz auch möglichst günstiges unbehandeltes Holz verwendet, wie z.B. den Kommunen ohnehin zur Verfügung stehendes Landschaftspflegeholz bzw. Grünschnitt, unbehandeltes Gebrauchtholz oder Säge- und Industrieresthölzer von örtlich ansässigen Betrieben.

Fernheizwerke im Bereich einiger MW Feuerungsleistung werden ebenfalls noch überwiegend mit unbehandelten Hölzern, Rinde usw. zur Grundlastversorgung und Gas/Öl- Kesseln zur Spitzenlastversorgung betrieben.

Durch die bei der Verbrennung behandelte und kontaminierte Hölzer notwendigen zusätzlichen Emissionsminderungsmaßnahmen steigt das spezifische Investitionsvolumen an, weshalb solche Anlagen auch erst bei größeren Leistungen und verbunden mit günstigem, evtl. im eigenen Betrieb anfallendem Brennstoff oder gleichzeitiger Entsorgung von heizwertreichen Reststoffen lohnend werden.

So gibt es inzwischen einige Industrieheizkraftwerke – oft mit Wirbelschichtfeuerungen, was eine größere Bandbreite an eingesetzten Brennstoffen erlaubt, die die Wärme-, Prozessdampf- und Stromversorgung der Standorte weitgehend abdecken können und dabei in der Produktion anfallende Schlämme und feste Reststoffe thermisch verwerten können.



**Abbildung 4-4:** Anwendungen der Holzenergie nach [FNR 00]

Im Bereich der Großfeuerungsanlagen zur reinen Stromerzeugung war die Holzenergienutzung bislang nur in Form von Mitverbrennung eine wirtschaftlich denkbare Option. Mit Inkrafttreten der Biomasseverordnung und damit der Möglichkeit, die Stromeinspeisevergütungen nach EEG in Anspruch zu nehmen, wurde jedoch auch die Verstromung von Holz wirtschaftlich attraktiv. Dabei werden aufgrund der großen Mengen nur die kostengünstigsten Holzsortimente eingesetzt. Je nach genehmigungs- und emissionsrechtlichen Vorgaben sind die Sortimente in Einzelfällen auch bei diesen großen Anlagenleistungen auf das zumeist teure, unbehandelte Holz beschränkt. Die kostengünstigsten Potenziale bestehen dabei im Bereich Gebrauchtholz und Landschaftspflegeholz.

Aus diesem Schema geht hervor, dass Potenziale an energetisch verwertbarer Biomasse sinnvollerweise differenziert nach dem angestrebten Einsatzbereich – charakterisiert nach Endenergieart und Anlagengröße – angegeben werden sollten, da sich aus dem Einfluss technischer, gesetzlicher und wirtschaftlicher Vorgaben Restriktionen für den Einsatz der verschiedenen Sortimente ergeben. Undifferenzierte Angaben zu Biomassepotenzialen können leicht zur Überschätzung der tatsächlich verfügbaren Mengen im angestrebten Einsatzbereich führen.

Wendet man das Schema in Abbildung 4-4 auf die Potenzialangaben für Holzsortimente in Baden-Württemberg aus Tabelle 4-1 an, ergeben sich die in Tabelle 4-16 dargestellten Verhältnisse. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei Tabelle 4-16 um eine grobe, theoretische Darstellung handelt, bei der Überschneidungen und Konkurrenz um die Holzsortimente, auch aus der stofflichen Nutzung, außer Acht gelassen wurden. Ebenso nicht berücksichtigt wurde der Einfluss der Holzimporte oder –exporte und die Möglichkeit, dass im Einzelfall – z.B. durch spezielle Marktsituationen – weniger übliche Sortimente eingesetzt werden.

Alleine die Summen der jeweils pro Bereich maximal zu verfügbar stehenden Potenziale zeigen jedoch bereits deutliche Unterschiede. So zeigt sich, dass im Bereich Stromerzeugung und für die Nutzung in privaten Haushalten ein weitaus geringeres Potenzial zur Verfügung steht, als für Anlagen geringerer Größen in Industrie und Kommunalbereich.

**Tabelle 4-16:** Gegenüberstellung der Potenziale für Baden-Württemberg mit den Anwendungen der Holzsortimente zur Energieerzeugung

	Haus- heizungen, Kachelöfen	Anlagen für Klein- verbraucher	Anlagen für Nah- und Fernwärme	Industrielle Anlagen	Strom- erzeugungs- anlagen
Waldrestholz ohne Rinde (12,9 PJ/a)	<b>x</b>	-	-	-	-
Sägenebenpro- dukte ohne Rinde (12,2 PJ/a)	<b>(x)</b>	<b>X</b>	<b>x</b>	-	-
Rinde (6,2 PJ/a)	-	<b>X</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	-
Gebrauchtholz naturbelassen (3,0 PJ/a)	-	<b>X</b>	<b>x</b>	-	-
Industrieresthol- z unbehandelt (0,7 PJ/a)	-	<b>X</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	-
Landschaftspf- legeholz (8,3 PJ/a)	-	<b>X</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
Gebrauchtholz behandelt (9,0 PJ/a)	-	-	-	<b>x</b>	<b>x</b>
Industrieresthol- z behandelt (1,4 PJ/a)	-	-	-	<b>x</b>	<b>x</b>
Maximale theoretische Potenziale <sup>1</sup>	<b>12,9 (25,1)</b>	<b>30,4</b>	<b>30,4</b>	<b>25,6</b>	<b>18,7</b>

---

<sup>1</sup> Ohne Berücksichtigung von Überschneidungen und Konkurrenz um die Brennstoffe



## 5 Bilanzierung typischer Prozessketten

Im Folgenden werden die für die energetische Nutzung von Holz in Baden-Württemberg typischen Prozessketten hinsichtlich des kumulierten Energieaufwandes, der Emissionen und Kosten bilanziert. Dabei werden zunächst aus den bereits in Baden-Württemberg bestehenden Anlagen Beispiele für die Bilanzierung gewählt. Anhand dieser Beispiele wird dann – nach einer allgemeinen Charakterisierung der einzelnen Prozessschritte – die Bilanzierung der Parameter durchgeführt. In Kapitel 6 und 7 folgen die Auswertung der Prozesskettenbilanzierung, sowie eine Sensitivitätsanalyse, um Auswirkungen der naturgemäß vorhandenen Unsicherheiten auf das Gesamtergebnis zu untersuchen.

### 5.1 Auswahl der Anlagenbeispiele

Aus den Anwendungsfällen der Holzenergienutzung wurden einzelne Beispiele herausgegriffen, anhand derer die jeweils vollständige Prozesskette berechnet werden soll. Bei der Auswahl der Anlagenbeispiele wurde nach typischen Anwendungen für Baden-Württemberg gesucht. Dabei wurde ausgehend von der Holzfeuerungsanlage auch die Bereitstellung der verschiedenen, jeweils verwendeten Holzsortimente charakterisiert und hinsichtlich Energiebedarf, Emissionen und Kosten berechnet. Ebenso wurde die Ascheentsorgung in die Gesamtbetrachtung mit einbezogen.

Die gewählten Anlagenbeispiele lassen sich in folgende Gruppen untergliedern:

#### **(1) reine Holzfeuerungsanlagen**

- Anlagen aus dem Bereich der kommunalen Nahwärmeversorgung:
  - Holzfeuerung zur Deckung des Grundlastwärmebedarfs mit Öl/Gaskessel zur Spitzenlastdeckung,
  - Holzfeuerung zur Deckung der Mittellast des Wärmebedarfs; zusätzlich BHKW zur Grundlastdeckung und Öl/Gaskessel zur Spitzenlastdeckung,
- Heizwerk zur Fernwärmeversorgung,
- Industriekraftwerke zur Deckung des Prozessdampf-, Wärme- und Strombedarfs von Holzverarbeitenden Betrieben.

#### **(2) Mischfeuerungen mit Holz**

- Heizkraftwerk zur Deckung des öffentlichen Wärme- und Strombedarfs mit Mischfeuerung Steinkohle- Holz,

- Industrieheizkraftwerk zur Deckung des Prozessdampf-, Wärme- und Strombedarfs des Standorts mit Mischfeuerung Holz – weitere Produktionsreststoffe.

Außer verschiedenen Anlagengrößen und Wärme- bzw. Stromversorgungsaufgaben wurden noch Anlagen mit unterschiedlichen Feuerungstechniken und Alt- und Restholzsortimente ausgewählt.

### 5.1.1 Holzfeuerungen aus dem Bereich der kommunalen Nahwärmeversorgung

Im Bereich der kommunalen Nahwärmeversorgung wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Holzfeuerungsanlagen installiert, die meist auch von den Förderprojekten des Landes unterstützt wurden.

Die hier gewählten Beispiele sind in Tabelle 5-1 näher beschrieben. Betrachtet wurden zwei Unterschub- und vier Rostfeuerungen. Von den Unterschubfeuerungen wurde in einer ausschließlich Waldholz verbrannt (Hohentengen), während in der anderen fast die gesamte Bandbreite der in dieser Anlagengröße verwendbaren Holzsortimente verwendet wurde (Bodnegg). Die Feuerungsanlage in Metzingen zeichnete sich besonders dadurch aus, dass hier fast ausschließlich Grüngut verfeuert wurde. Die Feuerungsanlage in Nagold ist dagegen ein Beispiel für eine Rostfeuerung, in der überwiegend Waldholz genutzt wird.

**Tabelle 5-1:** Charakterisierung der Anlagenbeispiele kommunale Nahwärmeversorgung

	Bodnegg	Metzingen	Hohentengen	Nagold	Heilbronn-Böckingen	Dunningen
FWL Holzessel, Feuerungstechnik	440 kW <sub>th</sub> Unterschubf.	500 kW <sub>th</sub> Vorschubrostf.	300 kW <sub>th</sub> Unterschubfeuerung	460 kW <sub>th</sub> Vorschubrostf.	790 kW <sub>th</sub> Rostfeuerung	300 kW <sub>th</sub> Rostfeuerung
Lastbereich Holzessel	Grundlast, Betrieb Sept. bis Juni	Grundlast, Betrieb ganzjährig	Grundlast, Betrieb ganzjährig	Grundlast, Betrieb ganzjährig	Mittellast, Betrieb ganzjährig	Mittellast, Betrieb ganzjährig
sonst. Kessel	Öl: 390 kW <sub>th</sub>	Öl/Gas: 900 kW <sub>th</sub>	Öl/Gas: 700 kW <sub>th</sub>	Öl: 1.000 kW <sub>th</sub>	BHKW: 110 kW <sub>th</sub> 2 Öl 1.750 kW <sub>th</sub> u. 1.160 kW <sub>th</sub> solartherm.	BHKW: 110 kW <sub>th</sub> Öl/Gas: 900 kW <sub>th</sub>
Rauchgasreinigung	Multi-zyklon	Multizyklon	Multizyklon	Multizyklon	Multizyklon, Rauchgaswäscher mit Kondensation	Multizyklon

	Bodnegg	Metzingen	Hohentengen	Nagold	Heilbronn-Böckingen	Dunningen
Brennstoffsortimente	Industriestholz, Gebrauchtholz natubel, Waldholz, Grünschnitt, Sägemehl	Waldholz Grünschnitt	Waldholz	Gebrauchtholz natubel., Waldholz	Industriestholz Grünschnitt	Industriestholz Waldholz Grünschnitt
versorgte Objekte	Schulzentrum mit Hallenbad Netzlänge ca. 250 m	Schulzentrum	Schule, Sporthalle, Neubauten; Netzlänge: 280 m	Gymnasium und Jugendzentrum; Netzlänge: ca. 250 m	Berufsschulzentrum	Rathaus, Schulen, Festhalle, Seniorenwohnanlage Kindergarten; Netzlänge: 500 m

Die beiden Anlagen in Heilbronn und Dunningen sind Beispiele für die Kombination von einem Blockheizkraftwerk zur Deckung des Grundlastwärmebedarfs, einem Holzkessel für den Mittellastwärmebedarf und einem zusätzlichen Öl/Gas-Kessel zur Deckung der Spitzenlasten. Die Anlage in Heilbronn zeichnet sich besonders durch die Installation eines Rauchgaswäschers mit Nutzung der Kondensationswärme im Waschwasser aus.

### 5.1.2 Fernheizwerke

Zur Beschreibung der Holzenergienutzung für die Fernwärmeversorgung wurden die Heizwerke in Rotenbachtal und Müllheim herangezogen. Sie sind in Tabelle 5-2 näher charakterisiert.

**Tabelle 5-2:** Charakterisierung der Anlagenbeispiele für Fernheizwerke

	Fernheizwerk Rotenbachtal, Baden-Baden	Holzwärme Müllheim
FWL Holzkessel, Technik	3,25 MW <sub>th</sub> Rostfeuerung	3 MW <sub>th</sub> ; Vorschubrostfeuerung
Lastbereich Holzkessel	Grundlast	Grundlast
sonst. Kessel	3 Gas/Ölkessel à 7 MW <sub>th</sub> = 21 MW <sub>th</sub>	2 Ölkessel à 1,8 MW <sub>th</sub> = 3,6 MW <sub>th</sub>
Rauchgasreinigung	Multizyklon und Elektroabscheider	Multizyklon (Nachrüstung mit E-abscheider)
Brennstoffsortimente	Industriestholz, Rinde, Grünschnitt	Waldholz
Trassenlänge	5 km	2,2 km

Bei beiden Beispielanlagen handelt es sich um Rostfeuerungen, die zur Grundlast- und Mittellastversorgung betrieben werden und durch Öl- bzw. Öl/Gas-Kombinationskessel für die Spitzenlastversorgung ergänzt werden. Eingesetzt wird in Müllheim ausschließlich Waldholz, während in Rotenbachtal überwiegend Industrieresthölzer und Rinde verwendet werden. Zur Rauchgasreinigung wird in Müllheim bislang lediglich ein Multizyklon betrieben, in Rotenbachtal ist dagegen zusätzlich ein Elektroabscheider zur Minderung der Staubemissionen installiert.

### 5.1.3 Industrieheizkraftwerke mit reinen Holzfeuerungen

Zur Bereitstellung der in holzbe- und verarbeitenden Betrieben benötigten Prozesswärme werden oft die anfallenden Produktionsreste verwendet. Zwei Beispiele hierfür sind die Feuerungsanlagen der Fa. Schwörer Haus in Oberstetten und der Fa. Klenk in Oberrot. In beiden Anlagen wird sowohl Prozessdampf, als auch Wärme und Strom für den Industriestandort erzeugt und dafür Restholz bzw. Rinde aus der Holzverarbeitung verwendet (vgl. Tabelle 5-3).

**Tabelle 5-3:** Charakterisierung der Anlagenbeispiele für Industrieheizkraftwerke mit reiner Holzfeuerung

	<b>Rindenheizkraftwerk Oberrot, Fa. Klenk</b>	<b>Heizkraftwerk SchwörerHaus, Oberstetten</b>
FWL Holzkessel, Feuerungstechnik	2*18 MW <sub>th</sub> , 4,9 MW <sub>el</sub> , brutto Rostfeuerung, Einblasfeuerung für Späne	15 MW <sub>th</sub> , 3,28 MW <sub>el</sub> Vorschubrostfeuerung, Einblasfeuerung für Späne, 2 Ölbrenner im Kessel
sonst. Kessel	-	-
Rauchgasreinigung	Multizyklon und Elektroabscheider	Multizyklon und Elektroabscheider
Brennstoffsortimente	Industrierestholz, Rinde, Sägemehl	Industrierestholz, Rinde, Sägemehl
Wärmeauskopplungen	Dampf : Hochdruck- 420°C, 42 bar Mitteldruck- 220°C, 12 bar Niederdruck- 150°C, 2 bar	Industriewärme 120 °C Heizwärme 90°C Sattdampf für Industriepressen 170 °C

### 5.1.4 Mitverbrennung in Heizkraftwerken

Für die Mitverbrennung von Holz wurden zwei Beispiele ausgewählt: die Mitverbrennung von Holz mit Kohle im Heizkraftwerk Pforzheim und die Mitverbrennung

von Holz mit anderen Reststoffen im Industriekraftwerk Baienfurt. Bei beiden Anlagen handelt es sich um zirkulierende, atmosphärische Wirbelschichtfeuerungen. Während die Anlage in Baienfurt bereits seit 1998 Gebrauchtholz verwertet, blieb es in Pforzheim bisher lediglich bei der Planung für eine Mitverbrennung. In Tabelle 5-4 sind beide Anlagen charakterisiert.

**Tabelle 5-4:** Charakterisierung der Industrieheizkraftwerke mit Mischfeuerung

	<b>Heizkraftwerk Pforzheim</b>	<b>Industriekraftwerk Baienfurt</b>
FWL Holzkessel, Feuerungs- technik	max. 42 MW <sub>th</sub> Fernwärme, max. 29,7 MW <sub>el</sub> zirkulierende Wirbelschichtfeuerung	15 MW <sub>th</sub> , zirkulierende Wirbelschichtfeuerung
sonst. Kessel	Ölkessel	Ölkessel
Rauchgasreinigung	Multizyklon und Gewebefilter	Wäscher (Kalkmilch), Flugstromadsorber mit Additivzugabe, Gewebefilter
Brennstoffsortimente	Steinkohle, Heizöl EL, Erdgas, Klärgas, Industrierestholz, Gebrauchtholz (H1/H2), Waldholz, Grünschnitt	behandeltes Gebrauchtholz der Klasse H3, Schlämme und Faserreststoffe aus der Papierproduktion

## **5.2 Charakterisierung der Elemente der Prozessketten**

Der allgemeinen Charakterisierung des jeweiligen Prozessschritts folgt jeweils die Berechnung der Parameter KEA, Emissionen und Kosten, bezogen auf die Gewichtseinheit behandeltes Holz oder behandelte Asche bzw. bezogen auf den Energieoutput.

### **5.2.1 Bereitstellung des Brennstoffs Holz**

Im Folgenden werden die verschiedenen Prozesse zur Bereitstellung von Alt- und Resthölzern zur energetischen Verwertung beschrieben. Für die Bilanzierung der Parameter ist es sinnvoll, aus den vielen verschiedenen Verfahren zunächst die wichtigsten Schritte zusammenzufassen. Zum einen lassen sich dadurch einzelne Schritte, die in allen Verfahren auftreten, besser vergleichen (z.B. Transportwege) – zum anderen sind viele Untersuchungen auch nur auf einzelne der Ablaufschritte beschränkt und können so in den Gesamtzusammenhang gestellt werden. Aus dem prinzipiell üblichen Vorgehen für die unterschiedlichen Energieholzarten lassen sich dann jeweils Bilanzen über den Energiebedarf, Emissionen und Kosten anstellen.

Die Ergebnisse der Bilanzen für die Bereitstellung von Energieholz für die einzelnen Anlagenbeispiele sind in Tabelle II-1 im Anhang II zusammengefasst.

#### **5.2.1.1 Bereitstellung von Waldholz**

Die Bereitstellung von Waldrestholz für die energetische Nutzung wurde in folgenden Teilschritten betrachtet:

- Ernte + Rücken: Dieser Schritt beinhaltet die Arbeitsschritte Fällen, Entasten, Abzopfen, Vorliefern und Rücken
- Verarbeitung zu Hackschnitzeln: Die Zerkleinerung des Materials erfolgt im Fall des Waldholzes mithilfe von mobilen oder stationären Hackern
- Transport der Hackschnitzel zur Feuerungsanlage: Dieser Transportschritt erfolgt meist mit LKWs und Wechselcontainern, Forstspezialmaschinen, im Fall von bäuerlichen Privatwäldern zum Teil auch mit landwirtschaftlichen Schleppern und Anhängern.

### **5.2.1.1.1 Verfahren für Ernte und Rücken des Waldholzes**

Verfahrensschritte der Waldholzernte sind :

- Entasten, um beim Fällen eventuell hinderliche Äste zu beseitigen,
- Fällen des Baumes,
- Aufarbeitungsschritte, z.B. Abzopfen, grobes Entasten,
- Vorliefern auf die Rückegasse,
- Rücken zur Waldstraße, dort Poltern.

Je nach eingesetzter Technik und Mechanisierungsgrad können mehrere Schritte miteinander kombiniert durchgeführt werden (z.B. Vorliefern/Rücken oder Aufarbeiten/ Zerkleinern) bzw. kann sich die Reihenfolge des Ablaufs ändern.

Je nach der jeweiligen, speziellen Situation des Waldes – Geländebedingungen, Bestandesmerkmale, verfügbare Arbeitsmittel und Erschließung des Gebiets - werden Arbeitsverfahren mit unterschiedlichem Mechanisierungsgrad angewandt. Die Verfahrensarten reichen dabei von *rein motormanuellen* Verfahren, in denen vorwiegend Motorsägen und Handgeräte gebraucht werden, über *teilmechanisierte* Verfahren mit Unterstützung durch weitere Maschinen, z.B. einer funkgesteuerten Seilwinde zum Vorliefern auf die Rückegasse, bis hin zu *vollmechanisierten* Verfahren mit einem sog. Kranvollernter, welcher sämtliche Arbeitsschritte von Fällen, Entasten, Aufarbeiten bis hin zum Transport übernehmen kann [BOOTH 97].

Unter welchen Bedingungen in Deutschland die verschiedenen Verfahren üblich sind, ist im Anhang in Tabelle I-13 zusammengefasst [BOOTH 97].

### **5.2.1.1.2 Zerkleinerungstechnik für Waldholz**

Bei der Herstellung von Holzhackschnitzeln verschiedener Partikelgrößen aus Waldholz kommen Hacker zum Einsatz.

Es wird mit Waldrestholz ein relativ feuchtes Gut aufgegeben, bei dem jedoch darauf geachtet werden muss, dass feinere Bestandteile wie z.B. kleine Äste nicht unzerkleinert die Maschine passieren und hinterher zu Brückenbildung im Lagerbehälter führen. In einem solchen Fall kommt es zu Störungen beim Bunker-austrag, was wiederum die Brennstoffzufuhr zu der jeweiligen Feuerungsanlage beeinträchtigt.

Zum Einsatz kommen für die Aufbereitung von Waldholz mobile oder stationäre Hacker. Sie können nach dem jeweiligen Zerkleinerungsprinzip eingeteilt werden in Trommelhacker, Scheibenhacker und Schneckenhacker (vgl. [BIZ 00]). Bei Hackern

werden parallele Baum- oder Astteile mit einer geordneten Längsführung dem Schneidwerkzeug zugeführt, während Schredder und Zerspaner das Aufgabegut auch in wirrer Form verarbeiten können. Technische Merkmale der Hacker sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst [BIZ 00].

**Tabelle 5-5:** Technische Merkmale von Hackern verschiedener Funktionsprinzipien [BIZ 00]

Bauart	Schneidwerkzeug	Einzugsart	max. Holzstärke [mm]	Hacklänge [mm]	Kraftbedarf [kW]	max. technische Leistung [m <sup>3</sup> /h]
Scheibenhacker	1-4 Messer	ohne Zwangseinzug, 1-3 Walzen	100-300	4-180 meist einstellbar	8-105	2-60
Trommelhacker	2-8 Messer durchgehend oder 3-20 Messer einzeln	2 Walzen, Walze+ Stahlgliederband, 2 Stahlgliederbänder	180-450	5-80 meist einstellbar	45-325	15-100
Schneckenhacker	Schneckenwindung	Selbsteinziehend	160-270	20-80 je nach Schnecke	30-130	5-40

Während Trommel- und Scheibenhacker für die Produktion von Fein- und Mittelschnitzel geeignet sind, werden von Schneckenhackern mit relativ geringem Energieaufwand Grobschnitzel produziert. Alle drei Techniken können sowohl in mobiler Form, als auch als stationäre Hackmaschinen eingesetzt werden. Die beweglichen Maschinen sind meist als Anbau- oder Anhängegeräte ausgeführt, die über eine Zapfenwelle von landwirtschaftlichen Schleppern angetrieben werden können oder über einen eigenständigen Elektromotor oder Dieselmotor verfügen [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Der Energieaufwand für das Hacken von waldfrischem Holz liegt nach [BIZ 00] bei etwa 2-5 kWh/t, was einem Kraftstoffverbrauch von 0,7 bis 1,7 l Diesel oder etwa 0,2 bis 0,5 % der im Holz enthaltenen Energie (bei 30 % Wassergehalt) entspricht. Für trockenes Holz ist nach [BIZ 00] der auf das Volumen bezogene Energieaufwand um etwa 18% höher. In [MARUTZKY U. SEEGER 99] wird der Energiebedarf dagegen mit ca. 1-3 % des Heizwertes der Hackschnitzel angegeben. Kenndaten für unterschiedliche Hackmaschinengrößen sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst.



**Tabelle 5-6:** Kenndaten für Hackmaschinen verschiedener Größe [MARUTZKY U. SEEGER 99]

Durchsatz [m <sup>3</sup> /h]	3-25	25-40	40-100
Antriebsleistung [kW]	20-100	60-200	200-550
max. Materialdurchmesser [cm]	8-35	35-40	40-55
Preis [Euro]	7.000-40.000	25.000-80.000	100.000-320.000

### 5.2.1.1.3 *Trocknung waldfrischer Hackschnitzel*

Im Gegensatz zu Gebrauchtholz, das vor bzw. während der ersten Verwendung vollständig getrocknet wurde, weist Waldrestholz eine hohe Feuchte auf. Frisch geschlagenes Waldholz hat eine Feuchte zwischen 50 und 120% je nach Jahreszeit [MARUTZKY 99]. Befriedigende Verbrennungsergebnisse lassen sich für Hackschnitzel bis maximal 30-40% Feuchte erreichen, für emissionsarme Verbrennungen sollte die Feuchte unter diesem Wert liegen.

Verfahren zur Trocknung der Hackschnitzel reichen von einfacher Lagerung in lockeren Haufen an einem offenen, aber überdachten Platz, wo durch die im Inneren des Schüttgutes entstehende Gärungswärme getrocknet wird, bis hin zu Verfahren mit gezielter Belüftung mit durch Sonnenkollektoren oder mithilfe der Abwärme der Feuerungsanlagen angewärmter Luft [MARUTZKY U. SEEGER 99], [FELLER ET AL 99].

Die einfachste Form der Trocknung besteht darin, die Hackschnitzel in einem lockeren Haufen an einem überdachten, aber ansonsten offenen Platz zu lagern und durch die im inneren des Schüttgutes entstehende Gärungswärme trocknen zu lassen. Durch den Einsatz eines Glasdachs kann die Sonnenenergie mit relativ geringem Aufwand zur Trocknung genutzt werden. Effektivere Trocknung erreicht man durch die gezielte Belüftung der Hackschnitzel mit Kühler oder z.B. mit Sonnenkollektoren erwärmter Luft, die durch den freiliegenden Haufen geblasen wird und somit die Brüden abtransportiert. Mit diesem Verfahren lässt sich die Feuchte innerhalb von zwei bis drei Tage um 20-30% reduzieren [MARUTZKY U. SEEGER 99], [FELLER ET AL 99].

Für die Bilanzierung der Prozessketten wurde hier davon ausgegangen, dass die Waldhackschnitzel ohne weiteren Aufwand an Energie bzw. ohne weitere Emissionen getrocknet wurden.

#### **5.2.1.1.4 Bilanzierung der Parameter für die Bereitstellung von Waldholz und Rinde**

Während es zu den Kosten der Bereitstellung von Waldrestholz umfangreiche Berechnungen gibt, die allerdings aufgrund der unterschiedlichen Annahmen und Voraussetzungen zu z.T. sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen, gibt es kaum Daten über den Energiebedarf und die damit verbundenen Emissionen. Zum einen liegt das daran, dass die verschiedenen Verfahren allein durch den stark unterschiedlichen Mechanisierungsgrad schwer vergleichbar sind. Zudem kann ein und dasselbe Verfahren unter unterschiedlichen Bedingungen wie Holzart und Brusthöhendurchmesser der Bäume eine große Bandbreite an Ergebnissen bezüglich Energiebedarf und Kosten liefern.

##### **Energiebedarf**

In Tabelle I-17 im Anhang ist für verschiedene Ernteverfahren der jeweilige Energiebedarf dargestellt. Große Unterschiede bestehen in den Angaben zum Energiebedarf bei der Zerkleinerung in Hackern. Hier liegen die Werte zwischen 2 und 111 kWh/t. Der große Unterschied könnte daher rühren, dass an der einen Stelle die Zerkleinerung von Baumkronen und feinerem Astmaterial, an der anderen Stelle die Zerkleinerung ganzer Baumstämme betrachtet wurde.

Da Schlagabraum bzw. Restholz derzeit zumeist im Wald belassen wird, kann für diese Bilanzierung davon ausgegangen werden, dass 100% des energetisch genutzten Waldholzes aus Durchforstungsmaßnahmen stammt [SCHWEINLE 00B]. Dabei wird bei Laubbäumen zu etwa 70% teilmechanisiert und zu 30% vollmechanisiert durchforstet. Bei Nadelholz wird überwiegend vollmechanisiert durchforstet [SCHWEINLE 00B]. Aus einer Zusammensetzung von 50% Laub- und 50% Nadelholz ergibt sich also ein Anteil von teilmechanisiertem Holz von 35%, vollmechanisiert wird dagegen zu 65 % der Holzmenge durchforstet. Daraus ergibt sich mit 90 kWh/t für teilmechanisiertes Verfahren und 149 kWh/t für vollmechanisiertes Verfahren ein Durchschnittswert von 128 kWh/t.

Für die Bereitstellung von Rinde müssen zur Ernte der Bäume zunächst die gleichen Schritte durchgeführt werden, wie Fällen, Vorliefern und Rücken. Durch die Entrindung der Stämme wird dann das Material vom sonstigen Waldholz getrennt, was oft im Sägewerk durchgeführt wird. Geht man von einem Massenanteil von 10% Rinde an den Baumstämmen aus und überträgt dies auf die Ernteschritte, so ergibt sich dafür ein Wert von etwa 10 kWh/t. Dazu kommt der Energieaufwand für die Entrindung, der in Anlehnung an die in [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] angegebenen 8 kWh/t für Sägen im Sägewerk zu etwa 5 kWh/t abgeschätzt wird. Zusammen mit einem Transportaufwand von 13 kWh/t (nach [STOCKINGER U.

OBERNBERGER 98] für LKW-Container-Transport mit 10 km Entfernung) ergeben sich 28 kWh/t für die Bereitstellung von Rinde.

### **Emissionen**

Aus den Emissionsdaten für Dieselmotoren im Forstbetrieb und dem LKW-Bau-mix für Nahverkehr aus [GEMIS 99] ergeben sich folgende Emissionen:

**Tabelle 5-7:** Emissionen für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[GEMIS 00] Dieselmotor-Antrieb, Forst	0,24 g/kWh	3,73 g/kWh	0,084 g/kWh	265 g/kWh	1,1 g/kWh
[GEMIS 99] LKW-Transport Nahverkehr: Fernverkehr:	0,135 g/kWh 0,103 g/kWh	2,61 g/kWh 2,73 g/kWh	0,09 g/kWh 0,10 g/kWh	241 g/kWh 264 g/kWh	0,51 g/kWh 0,55 g/kWh
mit Offroad: 121 kWh/t + Road: 7 kWh/t für Bereitstellung	0,030 kg/t Holz	0,470 kg/t Holz	0,011 kg/t Holz	33,75 kg/t Holz	0,137 kg/t Holz

**Tabelle 5-8:** Emissionen für die Bereitstellung von Rinde

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[GEMIS 00] Dieselmotor- Antrieb, Forst	0,24 g/kWh	3,73 g/kWh	0,084 g/kWh	265 g/kWh	1,1 g/kWh
[GEMIS 99] LKW-Transport Nahverkehr: Fernverkehr:	0,135 g/kWh 0,103 g/kWh	2,61 g/kWh 2,73 g/kWh	0,09 g/kWh 0,10 g/kWh	241 g/kWh 264 g/kWh	0,51 g/kWh 0,55 g/kWh
mit Offroad: 21 kWh/t + Road: 7 kWh/t Holz für Bereitstellung	0,006 kg/t Rinde	0,097 kg/t Rinde	0,002 kg/t Rinde	7,252 kg/t Rinde	0,027 kg/t Rinde

### **Kosten bzw. Brennstoffpreis**

Die Kosten zur Bereitstellung von Waldhackschnitzel zur energetischen Nutzung werden meist nach Mechanisierungsgrad des Arbeitsverfahrens und BHD des Bestandes angegeben.

Unter der Annahme, dass bei den 35 % teilmechanisiert gefällten Bäumen der BHD eher zwischen 5 und 10 cm und bei den 65% vollmechanisiert gefällten Bäumen der BHD zwischen 10 und 15 cm liegt, ergibt sich ein Wert von 19 €/Sm<sup>3</sup> bzw. 77 €/t. Das entspricht auch dem in [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] für Durchforstungsmaßnahmen in Großwäldern angegebenen Wert.

Demgegenüber liegen die Preise für Waldhackschnitzel laut [FELLER ET AL 99] bei 55 (33-77) €/t bei 20-30% Wassergehalt bzw. bei 13 (7,7-18) €/Sm<sup>3</sup> bei Abrechnung nach Volumen. Die hier abgeschätzten Kosten liegen also am oberen Ende der erzielbaren Preisspanne. Die in [KRAPF 00] aus der Evaluation von Biomassekraftwerken abgeleitete Preisspanne liegt bei 53 (27-56) €/t. [TEXTOR 00] gibt Preise von 27-55 €/t Waldholz für Feuerungsanlagen an.

In dieser Arbeit wird mit einem von den Betreibern der Feuerungsanlagen zu zahlenden Preis von 54 €/t Waldholz gerechnet.

**Tabelle 5-9:** Kostenangaben für die Waldholz-Bereitstellung aus der Literatur [TEXTOR 00]

Mechanisierungsgrad	BHD [cm]	Kosten [€/Sm <sup>3</sup> ]
Teilmechanisiert	5	21-42 (34)
Teilmechanisiert	10	11-32 (20)
Teilmechanisiert	15	11-21 (16)
Vollmechanisiert	5	27-38 (32)
Vollmechanisiert	10	15-24 (19)
Vollmechanisiert	15	11-16 (14)

Für Rinde liegen die Preise in einem anderen Bereich: [TEXTOR 00] gibt 2,6-5 €/Sm<sup>3</sup> bzw. 7,9-16 €/t an; in [FELLER ET AL 99] sind es 3,6 (2,6-4) €/Sm<sup>3</sup> bzw. 13 (10-15) €/t. Es wird daher mit 13 €/t Rinde gerechnet.

### 5.2.1.2 Bereitstellung von Landschaftspflegeholz und Grünschnitt

Für die Bereitstellung von Landschaftspflegeholz werden in vielen Schritten ähnliche Verfahren angewandt wie für die Bereitstellung von Waldholz. Auch hier hängt jedoch das jeweils angewandte Verfahren von der speziellen Situation im Einzelnen ab, was zu einer großen Bandbreite angewandter Verfahren führt.

### **5.2.1.2.1 Charakterisierung der Bereitstellung**

Der Einsatz der jeweiligen Bearbeitungsverfahren zur Landschaftspflege hängt wie beim Waldholz davon ab, wie gut das Gelände zugänglich ist und welche Maßnahmen durchgeführt werden sollen.

Beim Rückschnitt von Randbäumen und Hecken, die regelmäßig auf den Stock zu setzen sind, werden meist motormanuelle Verfahren angewandt und anschließend mit mobilen Häckslern zerkleinert. Zum Hacken und Sammeln des Holzes werden zumeist die gleichen Maschinen verwendet, wie in der konventionellen Forstwirtschaft. Daneben gibt es noch spezielle Systemfahrzeuge, auf denen ein Sammelbunker für das Hackgut aufgesattelt ist [BIZ 00].

Werden die Gehölze lediglich zurückgeschnitten, werden Ast- und Heckenscheren eingesetzt, die als hydraulisch angetriebene Geräte an einem Auslegerarm oder an einer Frontladerschwinge montiert sind [BIZ 00].

Ein weiteres an konventionelle Maschinen anbaubares Gerät ist der Reihenhacker (Zerkleinerungsprinzip: Schneckenhacker). Dieser Hacker kann an die Fronthydraulik eines Schleppers angebaut werden und zum Zerkleinern von Ästen und Baumteilen mit maximalen Durchmessern von 25 cm auf gut befahrbaren Flächen verwendet werden [BIZ 00].

### **5.2.1.2.2 Bilanzierung der Parameter für die Bereitstellung von Landschaftspflegeholz**

Die Bereitstellung von Landschaftspflegeholz lässt sich grob einteilen in den Gehölzschnitt, die meist vor Ort durchgeführte Zerkleinerung und den anschließenden Transport zur Verwertungsstelle.

#### **Energiebedarf**

Für den Gehölzschnitt selbst können einige Geräte und Maschinen aus dem forstlichen Bereich verwendet werden. Der Energiebedarf für das motormanuelle Fällen von Bäumen liegt laut [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] bei 41 kWh/t. Da bei Landschaftspflegeholz jedoch vorwiegend Gestrüpp und Baumteile mit niedrigeren Durchmessern abgesägt werden müssen, wird hier von einem niedrigeren Wert von ca. 25 kWh/t ausgegangen.

Für die Zerkleinerung in mobilen Häckslern gibt [RÖSCH 96] einen Verbrauch an Diesel von durchschnittlich 33 l/h bei Durchsätzen von durchschnittlich 121 m<sup>3</sup>/h

Material an. Daraus ergibt sich ein Energiebedarf von etwa 8,5 kWh/t für den Zerkleinerungsvorgang.

Für den Transport des Materials werden wieder die in [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] angegebenen Werte für LKW-Container über 10 km Entfernung angenommen: 7 kWh/t für den eigentlichen Transport und 6 kWh/t für Beladen und Entladen.

Insgesamt ergibt sich aus diesen Annahmen ein Energiebedarf für die Bereitstellung von 46,5 kWh/t, was deutlich unter dem Energiebedarf für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln liegt. Hauptursache dafür ist der deutlich niedrigere Energieaufwand für die Zerkleinerung.

### **Emissionen**

Hier werden die Emissionsdaten für Dieselmotoren für Holzzerkleinerungsmaschinen und die [GEMIS 99] Daten für LKW-Transport zur Berechnung der Emissionen verwendet.

**Tabelle 5-10:** Emissionen für die Bereitstellung von Landschaftspflegeholz

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[HAMMEL 00] Dieselmotor für Zerkleinerer	0,2 g/kWh	9,0 g/kWh	0,084 g/kWh	265 g/kWh	1,6 g/kWh
[GEMIS 99] LKW-Transport Nahverkehr: Fernverkehr:	0,135 g/kWh 0,103 g/kWh	2,61 g/kWh 2,73 g/kWh	0,09 g/kWh 0,10 g/kWh	241 g/kWh 264 g/kWh	0,51 g/kWh 0,55 g/kWh
mit Offroad: 39,5kWh/t , LKW-Transport:7 kWh/t Holz ergibt sich für die Bereitstellung	0,009 kg/t Holz	0,374 kg/t Holz	0,004 kg/t Holz	12,155 kg/t Holz	0,067 kg/t Holz

### **Kosten bzw. Brennstoffpreis**

In [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] wird für die Fällung mit Motorsäge von Kosten von ca. 38,8 €/t TS ausgegangen. Wird hier wie beim Energiebedarf von 60% des Aufwands für Landschaftspflegeholz ausgegangen, so ergeben sich 24 €/t TS oder 7,7 €/Sm<sup>3</sup> für den Gehölzschnitt.

Für die Zerkleinerung sind in [RÖSCH 96] Werte für stationäre Anlagen zwischen 21 und 33 €/t angegeben. Das Häckseln in mobilen Großhäckslern kostet dagegen zwischen 9,7 und 14 €/t. Es wird daher von durchschnittlichen Kosten von ca. 18 €/t ausgegangen.

Zusammen mit weiteren 6 €/t [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] für den Transport (10 km mit LKW-Container) des zerkleinerten Materials zur Feuerungsanlage ergeben sich etwa 48 €/t TS bzw. 15 €/Sm<sup>3</sup> für die Bereitstellung von Landschaftspflegeholz.

In [FELLER ET AL 99] werden dagegen Preise von 21 (10-41) €/t bzw. 6,6 (6,1-7,7) €/Sm<sup>3</sup> Material angegeben, die also bei knapp der Hälfte der hier abgeschätzten Kosten liegen. [KRAPF 00] gibt an, dass die Preise für Landschaftspflegematerial deutlich unter 7,7 €/MWh, also 19 €/t liegen. Es wird daher in dieser Arbeit von einem Preis von 18 €/t ausgegangen, auch wenn die tatsächlichen Kosten für die Bereitstellung nach obiger Überschlagsrechnung vermutlich deutlich höher liegen.

### 5.2.1.3 Bereitstellung von Gebrauchtholz

Zu der Bereitstellung von Gebrauchtholz für Feuerungsanlagen gehören die Schritte Sammlung und Lagerung bzw. Transport zur Aufbereitungsanlage, die Aufbereitung selbst sowie der Transport des Schüttguts zur Feuerungsanlage. Je nach angestrebter Endteilchengröße und damit Ausstattung der Aufbereitungsanlage kann dieser Schritt bezüglich Energiebedarf und Emissionen sehr unterschiedlich ausfallen.

In der Aufbereitungsanlage selbst werden folgende Verfahrensschritte durchgeführt:

- Antransport des Gebrauchtholzes
- Vorsortierung
- Grobzerkleinerung
- Abscheidung von Metallteilen
- Sortierung per Hand, Sichten
- Nachzerkleinerung
- Abscheidung von Metallteile
- Siebung mit Rückführung zu grober Teile
- Lagerung
- Transport zum Verbraucher

Auch hier sind verschiedene Reihenfolgen üblich. Es werden außerdem bei unproblematischeren Gebrauchtholzsortimenten zum Teil Anlagen mit nur einem Zerkleinerungsschritt eingesetzt, die auch eine weniger aufwendige Abscheidung von Fremdstoffen haben. Zwischen den einzelnen Schritten sind Transportmittel

(Förderbänder etc.) nötig. An Stellen mit hohen Staubemissionen (Übergabestellen, Austrag aus Zerkleinerern) werden z.T. Entstaubungseinrichtungen installiert.

Ein Beispiel für ein allgemeines Ablaufschema für Holzaufbereitungsanlagen ist im Anhang, Abbildung I-1, skizziert [FLAMME U. WALTER 98].

### **5.2.1.3.1 Sortierungs-, Sichtungs- und Klassierungsverfahren**

Direkt nach der Anlieferung und noch vor Zerkleinerung der Gebrauchthölzer wird das angelieferte Material meist per Augenschein, nach Kriterien wie Herkunft und vorherige Verwendung, Farbe der Oberfläche usw. sortiert, um bereits möglichst weitgehend unbehandelte Hölzer von behandelten oder gar mit Schadstoffen belasteten Materialien zu trennen.

Nach erfolgter Zerkleinerung müssen dann noch zu grobe Stücke und Fremdstoffe, wie Mineralien, Kunststoffe und Metallteile entfernt werden, die bei der stofflichen oder energetischen Verwertung stören können. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Aufbereitung ist die Klassierung in verschiedene Spanlängen oder Korngrößenfraktionen. Die Abscheidung des Feianteils kann bereits vor der Nachzerkleinerungsstufe stattfinden, um nur die groben Teile weiter aufzumahlen. Für die gesamte Aufbereitung werden zwischen den Zerkleinerungsschritten jeweils mehrstufige Sortier-, Sichtungs- und Klassiervorrichtungen verwendet, die für Durchsätze von bis zu 100 t/h ausgelegt werden. Wichtige Elemente dieser Anlagen sind

- *Sortierbänder*, an denen optisch-manuell („organoleptisch“) sortiert wird; dabei werden Störstoffe wie Glas, Keramik u.ä. per Hand aussortiert;
- *Klassiervorrichtungen*: z.B. Trommelsiebe für große Mengen Gebrauchtholz; oder Flachsiebe mit Rüttelmotor für kleinere Mengen; in der Holzverarbeitenden Industrie kommen häufig Scheiben – und Sternsiebe zum Einsatz. [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98].
- *Metallabscheider*: Überbandmagnet mit Gummigürtelaustrageband für die Abscheidung von Eisenteilen, Wirbelstrommagnet für die Abscheidung von Nichteisenmetallen;
- *Metalldetektor*: Um zu vermeiden, dass Nachzerkleinerer durch Metallteile beschädigt werden, ist direkt vor der Feinmühle noch unterhalb des Förderbandes ein Metalldetektor für FE- und NE- Metalle angebracht, der bei Erkennen von Metallteilen das Förderband stoppt [BR 98B]; bei hohen Anforderungen an die Reinheit des Gutes werden auch für den kontinuierlichen Betrieb Ausblasvorrichtungen verwendet, die das vom Metalldetektor erkannte Stück per Luftstoß aus dem Materialstrom entfernen [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98].



- *Sichter*: Eine Möglichkeit, die sog. Hartstoffe, wie Glas, Keramik und NE- Metalle automatisch abzutrennen, sind Prallsichter. Dabei wird das Gut über eine Vibrorinne auf ein Leitblech gegeben, das es auf den definierten Bereich einer rotierenden Trommel ablenkt. Die Hartstoffe prallen ab und werden durch den Stoßeffect aus dem Materialstrom in ein Auffanggefäß abgeschieden, während der „Weichstoff“ Holz mit Drehrichtung der Trommel ausgetragen wird. Diese Technik funktioniert umso besser, je enger die Spanlängenverteilung des Materialstroms ist [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98].
- *Transportvorrichtungen*.

### **5.2.1.3.2 Zerkleinerung**

Für Gebrauchtholz ist im Gegensatz zum Waldrestholz noch eine weitere Vorzerkleinerung und je nach gewünschter Endkorngröße eine Nachzerkleinerung notwendig.

#### **Grobzerkleinerung**

Da das Industrierestholz bzw. der Sperrmüll in sehr unregelmäßigen und großen Stücken anfällt, wird hier meist ein Vorbrecher benutzt, um das Material anschließend in einer Hammermühle und in der Feinzerkleinerung der Brennstoff auf die gewünschte Endspanlänge zu bringen [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Für die Zerkleinerung von Gebrauchtholz werden zur Vorzerkleinerung Schredder (=Prallzerkleinerer) oder Brecher eingesetzt, die mit relativ geringem Kraftaufwand großen Mengen (Durchsatz z.B. 10-15 t/h) grobe Stücke bis auf eine Kantenlänge von ca. 500mm spalten können [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Im Gegensatz zum Zerkleinerungsprinzip der Hacker, das auf Schneidevorgängen beruht, wird das Material im Schredder durch Prallzerkleinerung (auch: „Prallmühlen“ – die Bezeichnungen für Zerkleinerungsmaschinen werden noch nicht einheitlich gehandhabt) bearbeitet, wobei durch die Beweglichkeit der Schlagwerkzeuge der Verschleiß auch bei hohem Anteil an Fremdkörpern gering bleibt [BIZ 00].

Zerspaner sind langsamlaufende Brecher mit ca. 15 bis 120 U/min, die ebenfalls einen sehr hohen Anteil an Fremdstoffen im Rohmaterial ertragen und besonders für sperrige Gebrauchthölzer wie Palettenholz, Fensterrahmen oder Altmöbel geeignet sind. Das Holz wird hierbei zwischen zwei gegensinnig rotierenden Ringelwalzen, an denen schneidende oder brechende Werkzeuge angebracht sind, zerspannt.

### ***Nach- und Feinzerkleinerung***

Bei geforderten Kantenlängen < 5mm, wie sie z.B. für Einblasfeuerungen nötig sind, wird das Holz in einem weiteren Schritt einer Feinmahlmühle zugeführt. Eine Feinmahlmühle besteht aus einem Mahlrotor, an dem 30 bis 50 Messer angebracht sind. Das Mahlgut wird durch die rotierende Bewegung und die daraus resultierende Eigenfliehkraft an einen feststehenden Siebring gedrückt und so lange zermahlen, bis die Partikel durch die Sieböffnungen zum Austrag gelangen können [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Eine Übersicht über die möglichen Arbeitsbereiche und Kenndaten von Zerkleinerern zeigen die Tabellen I-14 und I-15 im Anhang [WEIßKOPF ET AL 97]. Die beiden häufigsten Zerkleinerungsaufgaben für Gebrauchthölzern sind die Erzeugung von Spänen < 200 mm Spanlänge, vorwiegend für den Gebrauch in der Spanplattenindustrie, und < 30 bzw. < 10 mm Spanlänge, v.a. für die thermische Verwertung.

#### ***5.2.1.3.3 Transportmittel innerhalb der Aufbereitungsanlage***

Für den Transport über kurze Strecken zwischen Silo und Feuerungsbeschickung stehen eine ganze Reihe von Fördermitteln zur Verfügung, die nach der jeweils vorliegenden Aufgabe ausgewählt werden können. Wichtige Kriterien bei der Auswahl sind die Beschaffenheit des Transportguts (Stückigkeit, Feuchte, Empfindlichkeit), Transportentfernung, Höhendifferenz, Lärmbelastung, Witterungseinflüsse, laufende Energiekosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Investitionsaufwand und Verfügbarkeit [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Die häufigsten Fördermittel sind

- gleislose Flurförderfahrzeuge, sog. Radlader,
- Kratz- oder Trogkettenförderer,
- Schnecken: zum Einsatz kommen Trogschnecken, Rohrschnecken und Spiralschnecken,
- Gummigurttförderer,
- Förderrinnen,
- Pneumatische Förderung.

#### **5.2.1.3.4 Entstaubungseinrichtungen**

Bei Einsatz von staubenden Gütern muss in der Holzbe- und verarbeitenden Industrie zur Einhaltung der Arbeitsschutzkriterien darauf geachtet werden, dass die Staubkonzentrationen nicht über  $5 \text{ mg/m}^3$  bei bestehenden Anlagen bzw.  $2 \text{ mg/m}^3$  bei Neuanlagen liegen (Technische Richtkonzentrationen (TRK) nach den Technischen Regeln für Gefahrstoffe TRGS 102; nach der TA-Luft müssen dagegen nur Konzentrationen von  $20 \text{ mg/m}^3$  eingehalten werden [WEIßKOPF ET AL 97]). Dafür werden immer dann, wenn hohe Staubentwicklung zu erwarten ist, d.h. bei der Aufbereitung von relativ trockenen Hölzern, beim Einsatz von Schnellläufern und bei der Feinzerkleinerung von Holzspänen, Entstaubungsmaßnahmen getroffen.

Bei der *Trockenentstaubung* werden die Feinstäube mittels Absaughauben (Luftgeschwindigkeit 4-5 m/s) in ein Rohrsystem gesogen, wo sie mit etwa 18-20 m/s Luftgeschwindigkeit zu einem Gewebefilter geleitet werden [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98]. Die eingesetzten Gewebefilter unterscheiden sich vorwiegend durch ihre Abreinigungsvorrichtungen und sollten mit an der Oberfläche beschichteten Filtertüchern ausgerüstet sein, in der sich die Holzteilchen nicht verhaken können. Zur Gewährleistung der angestrebten Reingasstaubgehalte ist vor allem die sorgfältige Dimensionierung - meist auf der Grundlage von Erfahrungswerten der Anlagenbauer - der Luftmengen und Luftgeschwindigkeiten wichtig. Zu hohe Absauggeschwindigkeiten können unter anderem dazu führen, dass unerwünschte Partikelgrößen mitgerissen werden und der Druckverlust und damit Energiebedarf ansteigt. Bei optimalem Betrieb können auf der Reingasseite Reststaubgehalte von  $< 5 \text{ mg/m}^3$  eingehalten werden [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98]. Für den Explosionsschutz in Entstaubungsanlagen ist die VDI-Richtlinie 3673 zu beachten.

Eine weitere Möglichkeit, Staubemissionen zu unterbinden, ist die Wasser-Luft-Benebelung, die z.B. an Vorbrechern die frei werdenden Partikel mit Wassertropfen niederschlägt [BR 97].

#### **5.2.1.3.5 Brandschutzmaßnahmen**

Da bei der Aufbereitung von trockenem, brennbarem Material Funkenbildung nicht selten ist und zu Staubbränden und Explosionen führen kann, müssen bereits bei Anlagenplanung und Wirtschaftlichkeitsrechnung umfangreiche Brandschutzmaßnahmen mitberücksichtigt werden. Das beginnt bereits bei der Raumaufteilung der einzelnen Anlagenteile. Um das Brandrisiko zu verhindern und den Übergang des Feuers auf mehrere Anlagenbereiche, sollten für die Materialhalden einzelne, räumlich getrennte Bereiche vorgesehen werden, die für Löschfahrzeuge gut erreichbar sind [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98].

Durch den Einbau von Funkenlöschanlagen von Fachfirmen (Skizze siehe Abbildung I-2 im Anhang), die vom Verband der Sachversicherer (VdS) anerkannt sind, lassen sich Rabatte für die Feuerversicherung erwirken [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98].

### **5.2.1.3.6 Bilanzierung der Parameter für die Bereitstellung von Gebrauchtholz**

#### **Energiebedarf**

Für den Transport des Gebrauchtholzes zur Aufbereitungsanlage werden zumeist Wechselcontainer verwendet. Nach [GEMIS 99] liegt der Energiebedarf für LKW-Transport (LKW-Nah-D-Bau-(mix)) im Nahverkehr bei  $2,7778 \cdot 10^{-4}$  MWh/t km und im Fernverkehr bei  $2,4306 \cdot 10^{-4}$  MWh/t km (LKW-Fern-D-Bau-(mix)) (s. Anhang A). Die Entfernungen, die das Holz zur Aufbereitungsanlage zurücklegt, sind davon abhängig, wie stark belastet es ist. So werden A1/A2- Hölzer aus dem Umkreis von bis zu 80 km herantransportiert, während stärker belastetes A3/A4- Holz 100 bis 200 km bis zur nächsten Annahmestelle zurücklegen kann. Zur Berechnung des Transports für die Anlagenbeispiele werden hier Entfernungen von 50 km (14 kWh/t) für A1/A2- Hölzer und 130 km (32 kWh/t) für A3/A4-Hölzer angenommen.

Für die Abschätzung eines mittleren Energiebedarfs bei der Aufbereitung der Hölzer zu Hackschnitzeln werden einige Angaben von Herstellern und Betreibern verschiedener Anlagen verglichen (s. Tabelle I-18 im Anhang). Der Energiebedarf der betrachteten Beispiele für Aufbereitungsanlagen liegt zwischen 13 und 32 kWh/t Altholz. Für die Berechnung werden daher 20 kWh/t für die Altholzaufbereitung verwendet.

Nach der Aufbereitung müssen die Hackschnitzel ebenfalls zu den Feuerungsanlagen transportiert werden. Dazu werden ebenfalls die in GEMIS angegebenen Energieverbrauchsdaten verwendet (LKW-Nah-D-Bau-(mix) im Nahverkehr und LKW-Fern-D-Bau-(mix) im Fernverkehr). Die jeweiligen Entfernungen hängen wiederum sehr stark davon ab, in welche der Altholzkategorien das Material aufgrund seiner Behandlung, Beschichtung, Kontamination etc. eingestuft werden muss. Für die Beispielanlagen werden die von den Betreibern angegebenen Entfernungen verwendet.

#### **Emissionen**

Neben den Emissionen aus der benötigten Energiemenge entstehen auch noch Staubemissionen aus der Zerkleinerung und dem Umschlag der Holzteile. Die meisten größeren Aufbereitungsanlagen mit Schnellläufern als Zerkleinerungsmaschinen oder einer Feinzerkleinerungsstufe sind mit Entstaubungseinrichtungen

versehen. Dabei wird von den Austrittsstellen der Zerkleinerer und Umschlagstellen die Abluft abgesaugt und durch einen Gewebefilter (z.T. mit vorgeschaltetem Zyklon) gereinigt. Die bei der Aufbereitung entstehenden Staubemissionen hängen stark von der Feuchte des Holzes und der Zerkleinerungstechnik ab. Da große Schwankungen in der Zusammensetzung der angelieferten Gebrauchthölzer üblich sind, wird die Auslegung der Staubemissionsminderungsmaßnahmen aufgrund von Erfahrungswerten durchgeführt. Die Angaben zur abgesaugten Abluftmenge gehen daher zum Teil sehr stark auseinander (s. 5-11).

**Tabelle 5-11:** Angaben zu abgesaugtem Luftstrom von Entstaubungsanlagen

Zerkleinerungsstufen	Endspangröße [mm]	Durchsatz Altholz [t/h]	Abluftstrom [m³/h]	Quelle
Vorbrecher+ Nachzerkleinerer	0-40	ca. 7,5 (bei 30.000 t/a, Annahme: 4000 h/a)	35.000	Hörger und Schmid, Heidenheim
Vorbrecher + Hammermühle	0-200	20	10.000	[WEISKOPF ET AL 97]
Prallmühle	0-200	20	5.000	[WEISKOPF ET AL 97]
Prallhammermühle	0-70	18-20	50.000	Färber Holztechnik, Plochingen
Prallmühle	0-50	20	22.000 <sup>1</sup>	HAZEMAG&EPR, Dülmen
Prallbrecher+ zweirotoriger Hammerbrecher	0-30	20	13.000	[WEISKOPF ET AL 97]

Bei Einsatz von Feinzerkleinerern ist die abgesaugte Luftmenge deutlich höher als bei einstufigen Verfahren zum Vorbrechen und dem Einsatz von Langsamläufern.

In dieser Abschätzung wird von einem mittleren Volumenstrom von 25.000 m³/h bei 20 t/h Altholz ausgegangen. Mit einem Reingasstaubgehalt von 5 mg/m³ ergibt sich daraus etwa 6,3 g Staub/t aufbereitetes Altholz. Keine Emissionswerte gibt es für den Fall, dass lediglich eine Bedüsung eingesetzt wird oder gar keine Staubabscheidung eingesetzt wird (dieser Fall kommt aber durchaus nicht selten vor: einerseits, wenn aufgrund der Holzfeuchte und eingesetzten Zerkleinerer die Emissionen als gering erachtet werden; andererseits, wenn für Bedüsungsvorrichtungen an mobilen Anlagen der Wasseranschluss vor Ort fehlt oder aufgrund von Erosionsproblemen oder Verklebung Zyklone oder Gewebefilter ausfallen [ACHAUER 00]).

<sup>1</sup> oberer Wert nach [ZIBULSKI 00]

Zusätzlich zu den Staubemissionen aus der Zerkleinerung des relativ trockenen Materials entstehen noch Emissionen durch die Energiebereitstellung, die zumeist mithilfe von diesel- oder heizölbetriebenen Stromaggregaten oder Dieselmotoren bewerkstelligt wird.

Es ergeben sich die in Tabelle 5-12 angegebenen Emissionswerte.

**Tabelle 5-12:** Emissionen für die Bereitstellung von Gebrauchtholz

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[Hammel 00] Dieselmotor für Zerkleinerer	0,2 g/kWh	9,0 g/kWh	0,084 g/kWh	265 g/kWh	1,6 g/kWh
[GEMIS 99]LKW-Transport Nahverkehr:	0,135 g/kWh	2,61 g/kWh	0,09 g/kWh	241 g/kWh	0,51 g/kWh
Fernverkehr:	0,103 g/kWh	2,73 g/kWh	0,10 g/kWh	264 g/kWh	0,55 g/kWh
Staubemissionen durch Zerkleinerung	6,3 g/t Holz	0	0	0	0
Gemeinde Bodnegg; A1-Holz, 40km zw. Aufbereiter u. Feuerung Offroad: 20 kWh/t, Road: 11 kWh/t	0,012 kg/t Holz	0,209 kg/t Holz	0,003 kg/t Holz	7,951 kg/t Holz	0,038 kg/t Holz
Stadt Nagold: A1-Holz, 60km zw. Aufbereiter und Feuerung: Offroad:20 kWh/t Road: 31 kWh/t (nah)	0,014 kg/t Holz	0,261 kg/t Holz	0,004 kg/t Holz	12,771 kg/t Holz	0,048 kg/t Holz
HKW Pforzheim: A1/A2-Holz, 50km zw. Aufbereiter u. Feuerung: Offroad:20 kWh/t Road: 28 kWh/t (nah)	0,014 kg/t Holz	0,253 kg/t Holz	0,004 kg/t Holz	12,048 kg/t Holz	0,046 kg/ t Holz
Industriekraftwerk Baienfurt: A3-Holz, 150km zw. Aufbereiter u. Feuerung: Offroad:20 kWh/t Road: 68 kWh/t (fern)	0,017 kg/t Holz	0,366 kg/t Holz	0,008 kg /t Holz	23,252 kg/t Holz	0,069 kg/ t Holz

### **Kosten bzw. Brennstoffpreis**

Für die Kosten der Bereitstellung von Gebrauchtholz sind zunächst die Kosten der Sammlung und des Transports des unzerkleinerten Materials zur Aufbereitungsanlage anzusetzen. Für den Transport von unzerkleinertem Gebrauchtholz gibt [EICHELBERGER 00] für eine Entfernung von 50 km (für A1/A2- Hölzer) Kosten von 9 €/t an, für Entfernungen von 130 km ca. 12 €/t (interpolierter Wert zwischen 100 km 10 €/t und 200 km 15 €/t).

Die Aufbereitungskosten liegen nach eine Abschätzung von [WEIßKOPF ET AL 97] (s. Tabelle I-19 im Anhang) zwischen 16 und 22 €/t Altholz. Einen großen Anteil der variablen Kosten liefern die Reparatur- und Energiekosten. Den größten Anteil an den Energiekosten haben dabei die Zerkleinerungsenergie (zwischen 50 und 75%)

und die Energie, die durch Aufgabe per Radlader und Greifbagger (zwischen 16 und 30%) benötigt wird.

Für den Transport der Hackschnitzel vom Aufbereiter zur Feuerungsanlage können Kosten für Hackschnitzeltransport nach folgender Tabelle angesetzt werden:

**Tabelle 5-13:** Transportpreise für den Hackschnitzeltransport nach [EICHELBERGER 00]

Entfernung [km]	bis 10	20	30	50	100	200	300
Transportpreis [DM/Sm <sup>3</sup> ]			3,0	4,0	5,0	8,0	9,0
Transportpreis [DM/t Altholz] mit 0,199 t/Sm <sup>3</sup>	12,5	13,5	15,1	20,1	25,1	40,2	45,2

In den gewählten Anlagenbeispielen wird nur in der Feuerungsanlage der Stadt Nagold, im Heizkraftwerk Pforzheim und im Industriekraftwerk Baienfurt Altholz verwendet. Unter den jeweiligen Bedingungen ergeben sich rein rechnerisch folgende Kosten:

**Tabelle 5-14:** Kosten für die Bereitstellung von Altholz für die Anlagenbeispiele

Beispiel	eingesetztes Gebraucht- holz	Transport zum Aufbereiter	Kosten der Auf- bereitung	Transport vom Aufbereiter zur Anlage	Preis nach [EUWID 00A], zerkleinert	Preis des Altholzes + Transport zur Anlage
Gemeinde Bodnegg	A1	ca. 50 km 9 €/t	19 €/t	ca. 40 km 9 €/t	10-20 €/t gewählt: 15 €/t	25 €/t
Stadt Nagold	A1	ca. 50 km 9 €/t	19 €/t	ca. 60 km 10 €/t	10-20 €/t gewählt: 15 €/t	26 €/t
HKW Pforzheim	A1/A2	Ca. 50 km 9 €/t	19 €/t	ca. 50 km 10 €/t	-15 bis 20 €/t gewählt: 5 €/t	15 €/t
Industrie- kraftwerk Baienfurt	A4 (Bahn- schwelen)	ca. 130 km 12 €/t	19 €/t	ca. 150 km 17 €/t	-82 bis -41 €/t gewählt: -51 €/t	-34 €/t

### 5.2.1.4 Bereitstellung von Industrierestholz

Bei der Aufbereitung von Industrieresthölzern werden – soweit nötig – ähnliche Maschinen und Aufbereitungsverfahren verwendet, wie bereits für die Aufbereitung von Gebrauchthölzern in 5.2.1.3 beschrieben wurde.

Dabei muss unterschieden werden, ob das Material direkt in dem Werk, in dem es anfällt, zur Energieerzeugung verwendet oder von außerhalb angekauft wird. Während im ersten Fall die Transportwege zwischen Anfall und Aufbereitung des Materials und der Feuerungsanlage vernachlässigbar kurz sind, muss im zweiten Fall noch der Transportweg berücksichtigt werden. In beiden Fällen wird angenommen, dass das Industrierestholz bereits im Holzbe- oder verarbeitenden Betrieb auf die zur Feuerung nötige Spanlänge zerkleinert wurde.

#### **5.2.1.4.1 Bilanzierung der Parameter für die Bereitstellung von Industrierestholz**

##### **Energiebedarf**

Für die Aufbereitung zur feuerungstauglichen Spanlänge wird hier lediglich die Zerkleinerungsenergie angesetzt, unter der Annahme, dass der Energieaufwand für Aufgabe, Entstaubung usw. auch ohne energetische Verwertung der Resthölzer aufgebracht werden würde. Nach den Erhebungen zur Holzaufbereitung in [WEIßKOPF ET AL 97] liegt der Energieaufwand für die Zerkleinerungsmaschinen bei ca. 50 bis 70% des gesamten Energieaufwands der Aufbereitung. Mit 20 kWh/t Altholz gesamt ergeben sich also ca. 10 kWh/t allein für die Zerkleinerung.

Wird das zerkleinerte Restholz noch zur Feuerungsanlage transportiert, so werden nach [GEMIS 99] für LKW-Transport (LKW-Nah-D-Bau-(mix)) im Nahverkehr  $2,7778 \cdot 10^{-4}$  MWh/t km und im Fernverkehr bei  $2,4306 \cdot 10^{-4}$  MWh/t km (LKW-Fern-D-Bau-(mix)) angesetzt.

**Tabelle 5-15:** Energieaufwand für die Bereitstellung von Industrierestholz

Beispiel	Aufbereitung	Transport zur Anlage	Summe Energieaufwand
Gemeinde Bodnegg	10 kWh/t	ca. 40 km; 11 kWh/t	21 kWh/t
Gemeinde Dunningen	10 kWh/t	ca. 10 km („ortsansässig“); 3 kWh/t	13 kWh/t
Landkreis Heilbronn	10 kWh/t	ca. 40 km, 11 kWh/t	21 kWh/t
HW Rotenbachtal	10 kWh/t	ca. 30 km; 8 kWh/t	18 kWh/t
HKW Pforzheim	10 kWh/t	ca. 40 km; 11 kWh/t	21 kWh/t
HKW Oberrot	10 kWh/t	-	10 kWh/t
HKW SchwörerHaus	10 kWh/t	-	10 kWh/t



### **Emissionen**

Da das Industrierestholz meist eine deutlich höhere Feuchte aufweist als Altholz, sind auch die Emissionen bei der Zerkleinerung geringer. Zudem werden in Holzbe- und verarbeitenden Betrieben aus Gründen des Arbeitsschutzes meist die Stäube per Entstaubungsanlage abgesaugt und aus dem Abluftstrom abgeschieden. Die Holzstaubemissionen werden daher als vernachlässigbar gering angenommen.

Für die Emissionen aus der Energiebereitstellung, welche auch hier zumeist über Dieselmotoren oder Stromaggregate erfolgt, werden wiederum die Emissionsfaktoren von [HAMMEL 00] und [GEMIS 99] verwendet:

**Tabelle 5-16:** Emissionen für die Bereitstellung von Industrierestholz in kg/t Holz

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[Hammel 00] Dieselmotor für Zerkleinerer	0,2 g/kWh	9,0 g/kWh	0,084 g/kWh	265 g/kWh	1,6 g/kWh
[GEMIS 99] LKW-Transport Nahverkehr: Fernverkehr:	0,135 g/kWh 0,103 g/kWh	2,61 g/kWh 2,73 g/kWh	0,09 g/kWh 0,10 g/kWh	241 g/kWh 264 g/kWh	0,51 g/kWh 0,55 g/kWh
Gemeinde Bodnegg u. LK Heilbronn Offroad: 10 kWh/t Road: 11 kWh/t (nah)	0,003	0,119	0,002	5,301	0,022
Gemeinde Dunningen: Offroad: 10 kWh/t Road: 3 kWh/t (nah)	0,002	0,098	0,001	3,373	0,018
HW Rotenbachtal: Offroad: 10 kWh/t Road: 8 kWh/t (nah)	0,003	0,111	0,002	4,578	0,020
HKW Pforzheim: Offroad: 10 kWh/t Road: 11 kWh/t (nah)	0,003	0,119	0,002	5,301	0,022
HKW Oberrot: Offroad: 10 kWh/t	0,002	0,090	0,001	2,650	0,016
HKW SchwörerHaus Offroad: 10 kWh/t	0,002	0,090	0,001	2,650	0,016

### **Kosten bzw. Preise**

Während die Betreiber der Feuerungsanlagen, die das Industrierestholz von außerhalb beziehen, neben den marktüblichen Preisen noch die Transportkosten zu tragen haben, fallen für die Unternehmen, in denen das Restholz intern energetisch

verwertet wird, vor allem die Kosten für die Zerkleinerung – inklusive Abschreibungen und Zinsen für die Maschinen, Reparatur- und Energiekosten – an.

Bei Ankauf der Industrieresthölzer bei Sägewerken oder anderen holzbe- oder verarbeitenden Betrieben geben [KRAPF 00] ,[TEXTOR 00] und [FELLER ET AL 99] Preise zwischen 13 und 38 €/t Holz an, im Durchschnitt etwa 23 €/t. Für die Transportpreise ergeben die Preisangaben von [EICHELBERGER 00] folgendes:

**Tabelle 5-17:** Transportpreise für den Hackschnitzeltransport nach [EICHELBERGER 00]

Entfernung [km]	bis 10	20	30	50	100	200	300
Transportpreis [€/Sm <sup>3</sup> ]			1,5	2,0	2,6	4,1	4,6
Transportpreis [€/t Ind.restholz] mit 0,307 t/Sm <sup>3</sup>	4,6	4,9	5,0	6,6	8,3	13,3	15,0

Für die Anlagen mit externem Zukauf von Industrierestholz bedeutet dies:

**Tabelle 5-18:** Bereitstellungskosten für Industrierestholz aus externem Zukauf

Beispiel	Brennstoffpreis	Transport zur Feuerungsanlage	Summe
Gemeinde Bodnegg u. LK Heilbronn	23 €/t	ca. 40 km; 5,8 €/t	29 €/t
Gemeinde Dunningen		ca. 10 km („ortsansässig“); 4,6 €/t	28 €/t
HW Rotenbachtal		ca. 30 km; 5 €/t	28 €/t
HKW Pforzheim		ca. 40 km; 5,8 €/t	29 €/t

Bei interner Verwertung der Industrieresthölzer fallen die Transportkosten weitgehend weg, während fixe und variable Kosten für die Investition und den Betrieb der Zerkleinerungsmaschinen zu berücksichtigen sind – für die anderen Maschinen, die zur Aufbereitung nötig sind, wird angenommen, dass sie bereits in der Infrastruktur des jeweiligen Werkes vorhanden sind und auch überwiegend dort genutzt werden.

Laut Tabelle I-19 in Anhang I liegen die Summen aus Abschreibungen und Zinsen für die Zerkleinerungsmaschinen, Energiekosten und Reparaturkosten zwischen ca. 3,6 und 8,7 €/t Holz. Es wird daher von etwa 5 €/t als Kosten für die Aufbereitung von Industrierestholz ausgegangen.

### 5.2.1.5 Bereitstellung von Sägewerksnebenprodukten

Sägewerksnebenprodukte fallen meist in Span- und Korngrößen an, die für den Einsatz in Feuerungsanlagen keine weitere Zerkleinerung erfordern. Sehr feine Anteile, wie sie beim Einschnitt und der spanenden Oberflächenbehandlung immer entstehen, können, wenn sie getrennt von den gröberen Resten anfallen, noch einem weiteren Aufbereitungsschritt, dem Brikettieren oder Pelletieren, zugeführt werden. Dieses Material bringt wegen der Gefahr der Staubexplosion, Transportschwierigkeiten und Brückenbildung in Silos einige Probleme mit sich. Pellets oder Briketts bieten dagegen den Vorteil eines einfacher handhabbaren und feuerungstechnisch unproblematischen Brennstoffs.

Technische Daten verschiedener Brikettier- und Pelletierverfahren sind in Tabelle 5-19 [BIZ 00] zusammengefasst. Der relativ hohe spezifische Energieverbrauch, sowie die Tatsache, dass zum Teil noch eine Trocknung des Materials nötig ist, zeigt, dass es sich um relativ aufwendige Verfahren handelt. Die Preise für Briketts und Pellets liegen entsprechend hoch, so dass diese vorwiegend in Anlagen zur häuslichen Wärmebereitstellung zur Anwendung kommen.

**Tabelle 5-19:** Technische Daten von Brikettier- und Pelletierverfahren [BIZ 00]

Pressverfahren	übliche Durchsatzraten [t/h]	spezifischer Energieverbrauch [kWh <sub>el</sub> /t]	Schüttdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Kolbenstrangpresse	0,1-1,8	50-70	300-600
Kollergangpresse mit Ringmatrize	3-8	20-60	400-700
Zahnradpresse	3-7	20-60	400-600

#### 5.2.1.5.1 Bilanzierung der Parameter für die Bereitstellung von Sägewerksrestholz

Dagegen wird für die energetische Nutzung von Sägewerksnebenprodukten in den hier betrachteten Anlagenbeispielen davon ausgegangen, dass keine weiteren Aufwendungen für Zerkleinerung nötig sind, da die Reststoffe bereits in feiner Körnung während der Produktion anfallen. Das Material muss daher lediglich zum Heiz(kraft)werk transportiert werden.

Ausnahmefall ist der, dass das feine Material zunächst pelletiert oder brikettiert wird. Dazu wären zwischen 20 und 70 kWh<sub>el</sub>/t Material nötig [BIZ 00]. Da aber in den betrachteten Anlagen keine Pelletierung oder Brikettierung stattfindet wird dieser Aspekt hier vernachlässigt.

### **Energiebedarf**

Für den Transport wird folgendes angenommen:

- der Transport erfolgt in LKW-Containern
- die Entfernung zwischen Sägewerk und Heizwerk liegt bei rund 10 km

Damit lassen sich die Angaben aus [STOCKINGER U OBERNBERGER 98] zum Energiebedarf bei Hackschnitzeltransport verwenden, die bei 7 kWh/t liegen. Sägemehl wird vermutlich eher mit pneumatischer Förderung vom Container ins Silo befördert als mittels Radlader. Nach [MARUTZKY U. SEEGER 99] benötigt die pneumatische Förderung im Verhältnis zu mechanischen Förderern etwa das 3-4-fache der spezifischen Antriebsenergie. Daraus ergibt sich im Vergleich zum Radlader ein Energiebedarf von ca. 20 kWh/t.

### **Emissionen**

Insgesamt liegt also der Energiebedarf bei 27 kWh/t. Daraus ergeben sich mit den Emissionsfaktoren aus [BUWAL 00] für Dieselmotoren im Offroad-Bereich die in Tabelle 5-20 angegebenen Emissionen.

**Tabelle 5-20:** Emissionen für die Bereitstellung von Sägespänen

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[Hammel 00] Dieselmotor für Aufbereitung	0,2 g/kWh	9,0 g/kWh	0,084 g/kWh	265 g/kWh	1,6 g/kWh
[GEMIS 99]LKW- Transport Nahverkehr: Fernverkehr:	0,135 g/kWh 0,103 g/kWh	2,61 g/kWh 2,73 g/kWh	0,09 g/kWh 0,10 g/kWh	241 g/kWh 264 g/kWh	0,51 g/kWh 0,55 g/kWh
mit Road: 7 kWh/t + Offroad: 20 kWh/t Holz ergibt sich für die Bereitstellung	0,005 kg/t Holz	0,198 kg/t Holz	0,002 kg/t Holz	6,987 kg/t Holz	0,036 kg/t Holz

### **Kosten**

Für die Kosten werden hier die in [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] angegebenen 6 €/t atro für LKW- Transport mit Schüttgutlagerung im Nahbereich bis 20 km angenommen.

## 5.2.2 Feuerungsanlagen für Holz

Die Bestandteile einer Feuerungsanlage lassen sich in folgende Teile gliedern, welche jeweils in ihrer Gestaltung großen Einfluss auf die Effektivität der Energienutzung und auf die entstehenden Emissionen haben:

- Feuerungstechnik mit Zufuhreinrichtungen für den Brennstofftransport in den Feuerraum,
- Emissionsminderungseinrichtungen,
- Wärme- und Stromerzeugung.

### 5.2.2.1 Feuerungstechnik

Die Verbrennung von festen organischen Stoffen erfolgt über eine Reihe physikalischer Zustände und chemischer Reaktionen. Bei Holz und Holzwerkstoffen ist der Verbrennungsvorgang aufgrund der heterogenen Zusammensetzung und Morphologie der Materialien sehr komplex. Im Brennraum der Feuerungsanlagen finden Trocknungs-, Entgasungs- und Oxidationsphasen statt [VDI 3462].

Die Güte der Verbrennung und damit das Emissionsverhalten sind von verschiedenen Faktoren abhängig:

- *Brennstoffparameter*: Vor allem die Holzfeuchte und Stückigkeit spielen eine Rolle. Für das Emissionsverhalten ist außerdem die chemische Zusammensetzung relevant, z.B. Stickstoffgehalt hinsichtlich der  $\text{NO}_x$ -Emissionen oder Gehalt an Schwermetallverbindungen bezüglich der daraus zu erwarteten Emissionen.
- *brennstoffgerechte Vergasungsbedingungen*: Brennkammerbelastung, Verweilzeit des Brennstoffs im Feuerraum, Kesselleistung etc.
- *Ausbrandbedingungen*: Verweilzeit der Brenngase im Bereich hoher Temperaturen, Turbulenz zur guten Durchmischung von Brenngas mit zugeführter Luft, erreichte Spitzentemperaturen, Luftmenge und Luftführung.

Die verwendeten Feuerungsarten sind je nach Leistungsklasse unterschiedlich. Für Kleinfeuerungsanlagen kommen im Bereich des Hausbrands als Einzelöfen z.B. Heizkamine, Kaminöfen, Heizungsherde, Kachelgrundöfen oder –warmluftöfen und Pelletöfen zum Einsatz. Als Zentralheizkessel werden Unterbrandkessel oder Durchbrandkessel verwendet.

Im Bereich größerer Feuerungen werden dagegen Festbettfeuerungen (Rostfeuerungen, Unterschubfeuerungen, Vorofenfeuerung), Wirbelschichtfeuerungen (stationäre oder zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen) oder Einblasfeuerungen (Muffeleinblasfeuerungen, Staubfeuerungen) eingesetzt (s. Tabelle I-16 im Anhang). Im Folgenden sollen die hier relevanten Feuerungstechniken für Leistungen ab ca. 100 kW näher beschrieben werden: In den gewählten Beispielen werden Festbettfeuerungen (Unterschub-, Rostfeuerungen), Einblasfeuerungen und zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen angewandt.

### **5.2.2.1.1 Festbettfeuerungen**

Eine automatische Beschickung dieser Anlagen erfolgt durch mechanische oder pneumatische Fördersysteme.

#### ***Unterschubfeuerungen***

Man unterscheidet bei den Unterschubfeuerungen zwei verschiedene Bauarten, die Unterschubfeuerung und die Unterschub-Zyklonfeuerung.

Die Unterschubfeuerungsanlage (Abbildung I-4) ist die in den letzten Jahren am häufigsten eingesetzte Methode zur energietechnischen Nutzung von Stäuben, Spänen und Hackschnitzeln aus der Massivholz- und Spanplattenverarbeitung. Über eine Stokerschnecke wird der Brennstoff unter das bestehende Glutbett gedrückt. Die Beschickungseinrichtung mit Stokerschnecke besteht aus einem Dosierbehälter, dem Fallschacht und dem Förderrohr, in der die Schnecke geführt wird. In der Brennraummulde wird der Brennstoff getrocknet, entgast und unter Zugabe von Primärluft vergast [FNR 00]. Die im Glutbett entstehenden Verbrennungsgase werden weiter oben in der Ausbrandzone unter Zugabe von Sekundär- und gegebenenfalls Tertiärluft weiter oxidiert [VDI 3462].

Unterschubfeuerungen sind in der Regel selbstzündend und durch eine abgestimmte Brennstoff- und Luftzufuhr prinzipiell gut regelbar. Ein Nachteil dieser Feuerungsart besteht darin, dass besonders für CO und Gesamt-C und damit auch Geruchsemissionen, je nach Belastung, feuerungstechnisch nur unbefriedigende Emissionswerte erzielt werden können. Gerade in Phasen der Regelabschaltung verursacht der im Brennraum liegende Brennstoff erhebliche CO- und Gesamt-C-Emissionen, die nach Wiederanlauf zu Schadstoffspitzen führen. Der Betrieb im Schwachlastbereich ist mit Unterschubfeuerungen daher sehr ungünstig. Ein weiterer ungünstiger Aspekt ist die diskontinuierliche Entaschung, die durch eine Öffnung am Brennraumboden erfolgen muss [VDI 3462]. Unterschubfeuerungen werden im

Bereich zwischen 20 kW und 2 MW<sub>th</sub> angeboten und sind für Hackschnitzel, Späne und - bis zu einem gewissen Umfang – auch für Halmgutpellets und staubförmige Brennstoffe geeignet.

Eine Weiterentwicklung der Unterschubfeuerung ist die Unterschub-Zyklonfeuerung. Der Brennraum ist dabei als senkrecht stehender Zylinder ausgebildet. Im oberen Drittel erfolgt eine definierte Verengung der Brennkammer. Die Luftdüsen sind tangential auf einen imaginären Kreis im Brennraum ausgerichtet. Dadurch wird das Glutbett kreisförmig von der Verbrennungsluft umspült und abgebrannt. Zusätzlich wird eine bessere Verwirbelung der Brenngase erreicht, wodurch man einen besseren Ausbrand erzielen kann. Auch hier besteht jedoch der Nachteil, dass relativ große Brennstoffmengen im System bleiben müssen [VDI 3462].

### **Rostfeuerungen**

Im Leistungsbereich um und größer als 1 MW<sub>th</sub> sind Rostfeuerungen die dominierende Technologie zur Verbrennung von Biomasse. Allgemein werden Rostfeuerungen im Bereich zwischen 0,5 MW<sub>th</sub> bis 80 MW<sub>th</sub> eingesetzt, wobei der Großteil der bestehenden Anlagen zwischen 5 und 25 MW<sub>th</sub> liegt. Übliche Verbrennungstemperaturen liegen zwischen 1.100°C und 1.300°C. Bei der Rostfeuerung wird über ein kontinuierliches Beschickungssystem eine Brennstoffschicht auf einen Rost befördert. Dort wird der Brennstoff entzündet und verbrannt. Die verschiedenen Rostfeuerungstypen werden eingeteilt nach der Art und Weise, wie der Brennstoff auf dem Rost durch den Brennraum zum Ascheaustrag transportiert wird. Derzeit werden Vorschubrost-, Wanderrost-, stationäre Treppen/ Schrägrost- und Rückschubrostfeuerungen für die Verfeuerung holzartiger Biomassen verwendet.

Hinsichtlich der Brennstoffeigenschaften ist diese Feuerungsart sehr flexibel – es können vom Gatterspan über Holzgut mit geringem Staubanteil bis zu grobstückigen Holzresten mit in weiten Grenzen schwankenden Feuchten oder auch stark staubhaltige Brennstoffe eingesetzt werden. Die Brennstoffzufuhr erfolgt bei feinkörnigem Brennstoff mit einer Stokerschnecke, bei grobstückigem Material zumeist mit Hydraulikstempel, der unter einem Füllschacht angeordnet ist.

Die Primärluft wird unterhalb, die Sekundärluft oberhalb des Rostes und vor den teilweise ausschamottierten Nachbrennzonen eingeblasen, wobei der Luftstrom durch den Rost zugleich eine Kühlungsfunktion für den Rost selbst übernimmt. Die für die Müllverbrennung entwickelten wassergekühlten Roste wurden bislang vorwiegend bei Brennstoffen mit sehr niedrigem Ascheschmelzpunkt, wie Halmgüter eingesetzt. In neueren Anlagenkonzepten wird die Wasserkühlung jedoch auch eingesetzt, um die Primärluftzufuhr genauer auf den Verbrennungsluftbedarf – und nicht vorwiegend auf den Bedarf an Kühlungsluft abstimmen zu können.

Bei stationären Rostfeuerungen bewegt sich der Brennstoff lediglich durch die schräge, abschüssige Lage des Rostes durch den Feuerraum. Nachteil dieser Technik ist, dass diese Bewegung und damit Feuerung und Ausbrand selbst schwer steuerbar sind und so zu unregelmäßiger Verbrennung und CO- Emissionsspitzen führen. Aus diesem Grund werden stationäre Rostfeuerungen heute nicht mehr gebaut.

Bei Vorschub- oder Rückschubrostfeuerungen (s. Abbildung I-5) erfolgen die Bewegungen der (stationären) Rostelemente durch hydraulisch betätigte Zylinder oder Getriebemotoren mit entsprechender Mechanik. Dadurch wird der Brennstoff über den zum Ascheaustrag hin geneigten Rost befördert, während kleine Ascheteilchen bereits durch den Rost in Ascheauffangbehälter fallen können.

Bei der Wanderrostfeuerung wird der Rost mit einem langsam laufenden, horizontalen Förderband kontinuierlich weiterbewegt. Auch hier wird die Primärluft meist durch den Rost hindurch direkt in den Brennstoff eingeblasen, während Sekundärluft oberhalb zugegeben wird.

#### **5.2.2.1.2 Wirbelschichtfeuerungen**

In einer Wirbelschichtfeuerung wird der feste Brennstoff durch einen aufwärtsgerichteten Luftstrom in einen Zustand versetzt, in dem das physikalische Verhalten des Feststoff- Luft- Gemischs einer Flüssigkeit gleichkommt – der Feststoff wurde „fluidisiert“. Vorteil dieses Verfahrens ist die sehr gute Durchmischung von Brennstoff und Gasen, der zu einem guten Ausbrand führt. Es wird unterschieden in atmosphärische stationäre Wirbelschichtfeuerungen, zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen und Druckwirbelschichtfeuerungen, wobei sich letztere Technologie noch im Entwicklungs- bzw. Erprobungsstadium befindet.

##### **Stationäre Wirbelschichtfeuerung**

Dabei wird der aufbereitete Brennstoff in einem Wirbelbett mit 95 bis 98% Inertmaterial (meist Sand) und etwa 2 bis 5% brennbarem Material bei ca. 800 bis 900°C verbrannt. Der aufwärtsgerichtete Luftstrom ist dabei so stark, dass der Feststoff in Schwebelage gehalten wird, ohne nach oben hin ausgetragen zu werden. Die Luftgeschwindigkeiten reichen dabei von 1,5 bis etwa 3,5 m/s. Der Brennstoff kann über eine Wurfbeschickung von oben auf das Wirbelbett aufgegeben werden, oder auch per Förderschnecken direkt in das Wirbelbett eingebracht werden. Dort finden die Ent- und Vergasung des Brennstoffs und der Abbrand des festen Kohlenstoffs statt. Ein großer Anteil der flüchtigen Bestandteile wird in der Nachbrennkammer



unter Zugabe von Sekundärluft vollständig oxidiert [FNR 00]. Bei der stationären Wirbelschichtfeuerung können wie bei der Rostfeuerung Holzspäne mit bis zu 90mm Kantenlänge eingesetzt werden. Aufgrund des hohen apparativen Aufwands wird diese Technologie erst ab ca. 10 MW<sub>th</sub> in Betracht gezogen.

### **Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung**

Bei zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen wird der Luftstrom bis zu etwa 9 m/s gefahren, was dazu führt, dass der Feststoff kontinuierlich nach oben ausgetragen, über Zyklonabscheider vom Rauchgasstrom getrennt wird und wieder dem Wirbelbett zugegeben wird (s. Abbildung I-6 im Anhang). Im Gegensatz zur stationären Wirbelschichtfeuerung ist hier eine Aufbereitung des Brennstoffs auf maximal 30 bis 50 mm Kantenlänge erforderlich. Der optimale Einsatzbereich für zirkulierende Wirbelschichtfeuerung beginnt wegen des noch höheren apparativen Aufwands bei etwa 20 MW<sub>th</sub>.

Die prozessbedingte intensive Mischung und Verbrennung, der gute Wärmeübergang im Wirbelbett sowie die Entkoppelung der Verweilzeit der Partikel und der Rauchgase lassen hinsichtlich Feuchte, Zusammensetzung und Aufbereitung ein breites Brennstoffspektrum zu. Die Wirbelschichtfeuerung weist gegenüber der Rostfeuerung vor allem dann Vorteile auf, wenn auch Brennstoffe mit sehr hohem Wassergehalt wie Schlämme eingesetzt werden sollen [FNR 00].

Aufgrund der niedrigen Verbrennungstemperatur der Wirbelschichtfeuerung werden Probleme der Verschlackung und Verschmutzung gemindert. Bei sehr alkalireichen Brennstoffen, wie Stroh, oder Kunststoff- oder Glasanteilen im Altholz kann es jedoch zu Versinterung des Bettmaterials und Verklebungen an den Luftdüsen kommen. Trotz einer weiten Bandbreite an einsetzbaren Brennstoffen muss also bei der Aufbereitung der Brennstoffe für den störungsfreien Betrieb ein relativ großer Aufwand betrieben werden, um hohe Fremdstoffanteile im Brennstoff zu vermeiden.

Die Vorteile der Wirbelschichtfeuerung liegen eindeutig in der guten Teillastregelung, guten Ausbrandbedingungen – was zu niedrigen Emissionen führt –, dem großen Regelbereich sowie einer schnellen Regelanpassung. Dies rührt daher, dass sich relativ wenig Brennstoff im Brennraum befindet. Ein weiterer Pluspunkt ist die homogene Betttemperatur. Lokale Temperaturspitzen werden durch die dauernde Bewegung in der Wirbelschicht verhindert. Auch die große Bandbreite des einsetzbaren Brennstoffs spricht für die Wirbelschichtfeuerung.

Ein großer Nachteil dieser Feuerungsart sind die relativ hohen spezifischen Investitionen. Auch der energetische Eigenbedarf und damit die Betriebskosten liegen deutlich höher, als bei Rostfeuerungen, da durch die Luftgebläse ja ständig der Feststoff in Bewegung gehalten werden muss. Auch die Entsorgung der Asche

kann größere Probleme bereiten, da in der Regel der Kohlenstoffanteil in der Asche höher liegt.

### 5.2.2.1.3 **Einblasfeuerungen**

Bei den Einblasfeuerungen werden relativ feine Späne und Holzstäube (Partikeldurchmesser < 1mm) in Staubfeuerungen oder Muffeleinblasfeuerungen verbrannt.

In *Muffeleinblasfeuerungen* wird die Primärluft mit dem Brennstoff zusammen tangential in die Brennkammer eingeblasen (s. Abbildung I-7 im Anhang). Es bildet sich eine Strömung aus, die – einer Zyklonströmung ähnlich – rotiert. Größere, in den Brennraum eingeblasene Partikel setzen sich im hinteren Teil der Brennkammer ab und verbrennen dort. Feine Teilchen verbrennen im Flug. An einer Einschnürung der Muffel wird Sekundärluft eingeblasen. Diese Einschnürung am Muffelende bewirkt eine Geschwindigkeitserhöhung und somit eine gute Vermischung der Rauchgase mit der Sekundärluft. Moderne und größere Zykloneinblasfeuerungen sind kontinuierlich geregelt, d.h. die eingebrachte Brennstoffmenge ist auf die momentan erforderliche Feuerungsleistung und die Verbrennungsluftzufuhr genau abgestimmt. Mit diesen Feuerungen können die Emissionen an unverbrannten Rauchgasbestandteilen gering gehalten werden. Die gestufte Luftzufuhr mindert außerdem die  $\text{NO}_x$ -Bildung.

Sinnvoll ist der Einsatz dieser Technik nur, wenn das Holz bereits in feinen Partikeln, d.h. unter 5 -10mm vorliegt. Zudem darf der Wassergehalt maximal 15 Gew.-% betragen. Der typische Leistungsbereich liegt zwischen 2 und 7,5  $\text{MW}_{\text{th}}$  [VDI 3462].

Bei der *Staubfeuerung* können nur Teilchen unter 0,5 mm Kantenlänge eingesetzt werden. Dieser Brenner, der oft als Zusatzfeuerung z.B. bei Rostfeuerungen verwendet wird, arbeitet zumeist mit einer zentrisch angeordneten Zünd- und Stützflamme mit Öl oder Gas. Zur Verbrennung wird ein Gemisch aus Luft und Brennstoff in den Feuerraum geblasen und dort gezündet. Die Einblasung erfolgt z.T. tangential mit Drallströmung, z.T. differenziert in einen Kernstrom mit Primärluft-Brennstoff-Gemisch und einem Mantelstrom mit Sekundärluft. Die Vergrößerung der spezifischen Reaktionsflächen verbessert die Verbrennungsbedingungen, weshalb ein Großteil des Feststoffs bereits im Flug verbrannt wird. Für nicht ausgebrannte Brennstoffteilchen muss ein Rost vorhanden sein, dem zusätzlich Sekundärluft zugeführt wird.

Staubbrenner finden sich vornehmlich bei direkt beheizten Späne- und Fasertrocknern in der Holzwerkstoffindustrie. Als Brennstoff dienen dabei die Schleif- und Siebstäube aus der Produktion [VDI 3462].

## 5.2.2.2 Emissionsminderungstechniken

Bei der Verbrennung von Holz entstehen drei Gruppen von Emissionen: Die Emissionen aus vollständiger Verbrennung ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ), Emissionen aus unvollständiger Verbrennung ( $\text{CO}$ , Kohlenwasserstoffe, Ruß, etc.) und Emissionen aufgrund von mit dem Brennstoff eingetragenen Substanzen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCl}$ , Schwermetalle, Feinpartikel  $\text{PM}_{10}$ ).

### 5.2.2.2.1 Primärmaßnahmen

Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung zielen vor allem darauf ab, einen möglichst vollständigen Ausbrand zu schaffen. Einen verbesserten Ausbrand kann man durch Optimierung der Feuerraumtemperaturen ( $>800^\circ\text{C}$ ), Gewährleistung einer ausreichenden Verweilzeit der Rauchgase im Bereich hoher Temperaturen (mindestens 2 Sekunden bei  $850^\circ\text{C}$ ) und Optimierung der Durchmischung zwischen Verbrennungsluft und Rauchgas erreichen. Dazu müssen sowohl die Ausgestaltung des Brennraumes, als auch Luftzufuhr und Brennstoffzufuhr auf die jeweiligen Bedingungen angepasst sein. Weiterhin wichtig ist eine Optimierung der Regelung im Betrieb. Für vollständigen Ausbrand werden in manchen Fällen auch Additive, meist Oxidationskatalysatoren, dem Brennstoff zugefügt. Zur Überprüfung der Güte des Ausbrands werden die  $\text{CO}$ -Emissionen gemessen.

Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Verbrennungstemperaturen werden die Stickoxide bei Holzfeuerungen vorwiegend aus Brennstoff-Stickstoff gebildet. Die wichtigsten Parameter für die  $\text{NO}_x$ -Bildung sind dabei der Stickstoffgehalt des Brennstoffs, die Sauerstoffkonzentration im Brennraum und in der Ausbrandzone sowie die Ausbrandqualität der Rauchgase. Da an dem Stickstoffgehalt des Holzes allenfalls durch Aussortierung besonders stickstoffhaltiger Gebrauchtholzanteile Einfluss genommen werden kann, besteht das größte Minderungspotenzial im Einsatz einer gestuften Verbrennungsluftzufuhr. Hierbei wird der Brennraum leicht unterstöchiometrisch gefahren, um in der Ausbrandzone mittels Sekundärluftzufuhr überstöchiometrisch einen optimalen Ausbrand zu erhalten. Bei Verbrennung von naturbelassenen Hölzern kann so eine Emissionsreduktion von bis zu 50 % erreicht werden, bei Altholz mit hohem Stickstoffgehalt können die Emissionen um bis zu 75 % reduziert werden.

Die durch Abgasrezirkulation erreichbare Temperatursenkung hat bei gleicher Ausbrandqualität nur einen geringen Einfluss auf die  $\text{NO}_x$ -Emissionen, das Minderungspotenzial liegt dabei bei ca. 10% [MARUTZKY 00].

Primärmaßnahmen zur Minderung von Dioxin-/Furan- Emissionen (PCDD/F) zielen vor allem darauf ab, die zur De-novo-Synthese dieser Substanzen nötigen Bedingungen zu vermeiden. So können die zur Bildung von PCDD/F nötigen Temperaturen von 250°C bis 450°C vermieden werden, indem das heiße Rauchgas durch Quenchen diesen Temperaturbereich sehr schnell durchläuft und die Elektroabscheider bei unter 220°C betrieben werden. Des Weiteren kann die PCDD/F-Synthese verhindert werden, indem die Mengen der Vorläufersubstanzen reduziert werden. Durch einen möglichst geringen Anteil an Chlorverbindungen im Brennstoff und möglichst guten Ausbrand werden die zur Synthese erforderlichen Mengen an Chlor und organischen Verbindungen minimiert.

#### **5.2.2.2 Sekundärmaßnahmen**

Sekundärmaßnahmen werden bei Holzfeuerungen vorwiegend zur Minderung der Staubemissionen eingesetzt und wenn die Primärmaßnahmen zur Reduktion der Stickoxidemissionen nicht ausreichen. Die in den gewählten Anlagenbeispielen installierten Sekundärmaßnahmen sind Multizyklone, Elektrofilter, Gewebefilter und Rauchgaskondensation.

##### ***Partikelabscheider***

Partikel aus der Holzfeuerung können durch Zyklone, Elektroabscheider, Gewebefilter oder Nassabscheider, z.B. Wäscher, aus dem Rauchgas abgeschieden werden. Nassabscheider werden bei Holzfeuerungen nur in Ausnahmefällen eingesetzt, etwa wenn aus Platzgründen ein Elektroabscheider nicht verwendet werden kann. Aufgrund der geringen Bedeutung werden sie hier nicht näher beschrieben.

Die Aufwendungen zur Entstaubung des Rauchgases sind vom Feuerungstyp und insbesondere von der verwendeten Brennstoffart abhängig. Eine Entstaubungseinrichtung, die nach einer Staubfeuerung installiert ist, wird mit annähernd der gesamten im Brennstoff enthaltenen Asche beaufschlagt. Bei einer Rostfeuerung oder Unterschubfeuerung hingegen wird der grobe Ascheanteil direkt aus der Feuerung ausgeschleust und nur die feineren Partikel gelangen in den Staubabscheider. Der im Vergleich zu fossilen Brennstoffen hohe Anteil an Alkali- und Chlorverbindungen im Biomasse- Brennstoff führt zur Entstehung von Salzen (K-, Ca- Salze), die feinste Flugaschepartikel bilden mit aerodynamischen Durchmessern < 1µm. Der vergleichsweise geringe Anteil an Kohlenwasserstoffen und Ruß aus unvollständiger Verbrennung von etwa 1 Gew.-% der Partikel kann bei schlechten Ausbrandbedingungen oder nicht optimaler Regelung noch erheblich ansteigen.

Nach [GAEGAUF 00] liegen bei Holzfeuerungen rund 95% der Staubmasse im Bereich der Feinpartikelfraktionen bis 0,4  $\mu\text{m}$  Mobilitätswindmesser. Die mittleren Korngrößendurchmesser, die von den unterschiedlichen Staubabscheidern aus dem Rauchgasstrom abgetrennt werden können, sind sehr verschieden. Während mit Zyklonabscheidern nur gröbere Partikel (zwischen 2  $\mu\text{m}$  und > 1.000  $\mu\text{m}$ ) abgeschieden werden, können mit Gewebefiltern bereits Partikel ab 0,1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  und mit Elektroabscheidern Teilchen zwischen 0,01  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  aus dem Abgas entfernt werden [FNR 00]. Tabelle 5-21 zeigt Partikelgrößenverteilungen im Reingasstaub bei Einsatz unterschiedlicher Abscheider.

**Tabelle 5-21:** Partikelgrößen im Reingasstaub von Industrieholzfeuerungen [UMEG 99]

Partikelgröße	$\leq 1 \mu\text{m}$	$\leq 2,5 \mu\text{m}$	$\leq 10 \mu\text{m}$
mit Multizyklon	52 %	70 %	97 %
mit Elektroabscheider	62 %	68 %	88 %
mit Multizyklon und Elektroabscheider	41 %	55 %	80 %
mit Multizyklon und Rauchgaskondensation	95 %	96 %	100 %

Dass *Zyklone* nur relativ grobe Partikel abscheiden können, liegt daran, dass sie zu den Trägheitsabscheidern zählen, die die Teilchen aufgrund ihrer von der Partikelmasse abhängigen Trägheit in einem rotierenden Luftstrom an der Außenwand des Zyklons abscheiden. Erreicht wird dies durch einen im oberen Teil zylindrischen, im unteren Teil konischen Abscheideraum (s. Abbildung I-8 im Anhang), in den das vom Feuerraum kommende Gas tangential einströmt. Auf die Partikel wirken durch die Drehbewegung, in die der Luftstrom gerät, hohe Fliehkräfte, wodurch sie an der Außenwand abgeschieden und in den unter dem Zyklon liegenden Staubabfangbehälter gelangen. Der Entstaubungsgrad eines Zyklons hängt wesentlich von der Korngröße, der Partikeldichte, der Zyklongeometrie und dem Volumenstrom, mit dem sich die Gasgeschwindigkeit und der Druckverlust des Zyklons ändern, ab. Die erreichbaren Reingasstaubgehalte hinter Zyklonen von Holzfeuerungen liegen zwischen 100 und 150  $\text{mg}/\text{Nm}^3$ . Mit Multizyklonen mit mindestens fünf in Reihe geschalteten Zyklonen lassen sich zum Teil Konzentrationen unter 100  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  erreichen. Zyklone als einzige installierte Staubminderungsmaßnahme finden sich vor allem bei kleineren Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung < 5 MW [FNR 00].

*Elektroabscheider* können Staubpartikel und Nebeltröpfchen durch Einwirkung eines elektrischen Feldes abscheiden, das durch Anlegen einer Gleichspannung zwischen 20 und 100 kV zwischen zwei Elektroden aufgebaut wird.

Die Wirkung eines Elektroabscheiders ist vom elektrischen Widerstand der zwischen Sprüh- und Niederschlagselektrode strömenden Rauchgase und von der elektrischen Leitfähigkeit der Staubpartikel abhängig. Der Widerstand des Rauchgases sinkt mit abnehmender Temperatur und mit zunehmender Rauchgasfeuchte. Durch die Absenkung des elektrischen Widerstandes des Rauchgases erhöht sich die Wirksamkeit des Filters. Die Erhöhung der angelegten Spannung steigert ebenfalls die Filterwirkung, sie ist jedoch durch die Durchschlagsspannung begrenzt, welche ebenfalls von Feuchte und Temperatur abhängt. Um stets in einem optimalen Betriebspunkt zu arbeiten, ist also eine effektive Spannungsregelung nötig, insbesondere dann, wenn Schwankungen des Wassergehalts im Brennstoff auftreten.

Das Schema eines Elektroabscheiders ist in Abbildung I-9 im Anhang dargestellt.

Ein Elektroabscheider besteht aus einem Gehäuse, den meist als Platten ausgeführten Niederschlagselektroden und einem Sprühelektrodenraht mit möglichst vielen Spitzen, sowie einer Abklopfvorrichtung und einem Staubauffangbehälter.

Elektroabscheider haben einen hohen Abscheidegrad, und es werden allgemein Reingaskonzentrationen zwischen 10 und 50 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht. Zum Einsatz kommen bei Holzfeuerungen meist Trockenelektroabscheider, während Nass-Elektroabscheider nur in speziellen Fällen angewandt werden. Ein Nachteil von Elektroabscheidern beim Einsatz für kleine Anlagen liegt darin, dass relativ viel Platz benötigt wird (Bauhöhen um die 10 m).

In *Gewebefiltern* werden die staubhaltigen Gase durch eine poröse Gewebe- oder Filzschicht geleitet, wobei sich die Partikel an der Filterschicht ablagern. Der entstehende Filterkuchen muss ebenfalls von dem Rohgas durchströmt werden und bietet einen zusätzlichen Filtereffekt. Um den mit anwachsendem Filterkuchen steigenden Druckverlust und somit Energiebedarf im vertretbaren Rahmen zu halten, wird die Filterfläche periodisch abgereinigt. Dies kann z.B. durch einen Druckstoß entgegen der Durchströmungsrichtung oder durch zeitweise Umkehrung der Durchströmungsrichtung erfolgen. Aufgrund der relativ hohen Staubfrachten der Rohgase aus Holzfeuerungen wird vor einem Gewebefilter noch ein Vorabscheider, meist ein Zyklon eingesetzt. Einsatzgrenzen treten bei hohen Temperaturen auf, die das Filtermaterial zerstören können oder bei feuchten, klebrigen Anteilen im Rohgas, die den Filter zusetzen und eine Abreinigung verhindern. Für Holzfeuerungen kommen als Filtermaterialien Polyamide, Polyphenylensulfide, Glasfasern oder PTFE (Teflon) in Frage, welche Temperaturen von 150 bis 250 °C erlauben. Die untere

Temperaturgrenze muss eingehalten werden, um eine Taupunktunterschreitung und somit ein Verstopfen des Filters zu vermeiden.

Der Abscheidegrad von Gewebefiltern liegt wie bei den Elektroabscheidern sehr hoch und ist dabei im Gegensatz zu diesen unabhängig vom Volumenstrom, d.h. unabhängig vom Lastzustand der Anlage. Es werden Reingaskonzentrationen von 5 bis 10 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht. Weiterhin besteht die Möglichkeit, durch Sorptionsmittelzugabe saure Rauchgasbestandteile oder Schwermetalle oder PAK und PCDD/F abzuscheiden [FNR 00]. Bei dieser Trockensorption werden die Sorptionsmittel in den Rauchgasstrom eingedüst, reagieren zum Teil bereits in der Flugphase, vor allem aber nach Abscheidung an den Gewebefiltern mit den Rauchgasbestandteilen. Als Adsorbentien kommen für saure Abgasbestandteile (SO<sub>2</sub>, HCl, HF) z.B. Calciumhydroxid oder Calciumsilikat, für die Adsorption von Schwermetallen und PAK oder PCDD/F z.B. Aktivkohle in Frage [MARUTZKY 00]. Angewandt wird diese Technik jedoch nur bei Verbrennung behandelter Hölzer oder Holzwerkstoffe in großen Anlagen.

Bei feuchten Brennstoffen können zur Wärmerückgewinnung eingesetzte *Rauchgaskondensationsanlagen* auch zur Partikelabscheidung, gegebenenfalls in Kombination mit einer nassen Entstaubung, genutzt werden. Die Rauchgase werden in einem Multizyklon vorgereinigt, und anschließend wird der Wasserdampf zur Wärmerückgewinnung mittels Einspritzung einer geringen Wassermenge kondensiert. Da die Staubpartikel als Kondensationskeime wirken, werden sie mit dem Kondensat abgeschieden. Hierdurch können Reingasstaubgehalte von 40 mg/Nm<sup>3</sup> erzielt werden. Eine weitere Staubabscheidung durch Elektro- oder Gewebefilter kann somit entfallen. Dagegen muss bei Kondensationsanlagen das Abwasser – z.B. mithilfe von Eindickern, Neutralisationseinrichtungen – aufbereitet werden und es entsteht ein Reststoff mit (im Gegensatz zur sonst anfallenden Zyklonasche) relativ hohem Wassergehalt. Dieses vergleichsweise aufwändige und teure Verfahren wird nur für sehr feuchte Biomassen über 30 % Wassergehalt, vorwiegend für Hackschnitzel eingesetzt. Je feuchter der Brennstoff, desto besser ist die Wirtschaftlichkeit des Kondensators. Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz ist zudem eine sehr niedrige Rücklauftemperatur (ca. 30°C) im Fern- oder Nahwärmesystem, damit eine möglichst vollständige Kondensation des im Rauchgas enthaltenen Wassers stattfinden kann [FNR 00]. Ebenso wie bei den Elektroabscheidern besteht auch für Rauchgaskondensationsanlagen mit den Anlagenkomponenten zur Kondensatreinigung ein erhöhter Platzbedarf.

### **Maßnahmen zur sekundären NO<sub>x</sub>- Minderung**

Als Maßnahme zur weiteren NO<sub>x</sub>- Reduktion zur Einhaltung von Grenzwerten wird in manchen größeren Holzfeuerungsanlagen die SNCR- Technik (selektive-non-

catalytic-reduction) angewandt. Dabei werden die Stickoxide durch Zugabe von Ammoniak oder Harnstoff zu Stickstoff reduziert. Diese Maßnahme kann notwendig werden, wenn durch den Einsatz von Spanplatten oder Faserplatten besonders hohe Einträge von Stickstoff mit dem Brennstoff zu erwarten sind. Die Reduktionsreaktion findet jedoch nur in einem Temperaturfenster zwischen 850 und 950 °C statt, weshalb das Reduktionsmittel meist oberhalb des Brennraums eingedüst wird. Mit SNCR lassen sich Minderungen der  $\text{NO}_x$ -Emissionen von bis zu 50 % erreichen. Um einen Ammoniak oder Harnstoff-Schlupf zu vermeiden, müssen die Substanzen exakt dosiert werden. Zudem ist für einen ausreichenden Umsatz auf die Einhaltung der erforderlichen Verweilzeiten zu achten. Um dies zu erreichen, werden z.T. zusätzliche Umlenkungen in den Rauchgasweg eingebaut.

Die selektive katalytische Reduktion (SCR) wird dagegen nur selten für Holzfeuerungen eingesetzt. Hierbei kann die Umsetzung mit Hilfe von Katalysatoren bereits bei Temperaturen zwischen 200 und 450°C stattfinden.

Sekundärmaßnahmen zur Entstickung sind für Holzfeuerungen derzeit nur bei Großfeuerungsanlagen ( $> 50 \text{ MW}_{\text{th}}$ ) Stand der Technik, während sie bei kleinen und mittleren Holzfeuerungen weder wirtschaftlich noch technisch ausgereift sind [MARUTZKY U. SEEGER 99].

### 5.2.2.3 Energieumwandlung

In dem der Feuerung nachgeschalteten Kessel findet der Wärmetausch zwischen dem Rauchgas und dem Wärmeträger statt. Bei der Ausgestaltung der Kessel müssen vor allem die Besonderheiten des jeweils eingesetzten Brennstoffs berücksichtigt werden. Der hohe Gehalt der Abgase einer Holzfeuerungen an Fremdstoffen birgt eine erheblich größere Verschmutzungs-, Verschleiß- und Korrosionsgefahr als beim Öl- oder Gaskessel. Als Wärmeträgermedium wird meist Wasser verwendet, das gegebenenfalls verdampft wird. In Einzelfällen kommt auch Thermoöl zum Einsatz [MARUTZKY 00].

#### **Wärmetauschersysteme**

Als Wärmetauschersysteme sind Flammrohrkessel, Wasserrohrkessel und Thermoölkessel im Einsatz.

Die Flammrohrkessel werden im kleinen und mittleren Leistungsbereich zur Erzeugung von heißem Wasser oder Dampf verwendet. Dabei durchströmen die Abgase zumeist zylindrische und groß dimensionierte, vom Wasser umströmte Rohre. Die Vorteile liegen in der hohen Flexibilität bei Lastwechseln und dem



geringen Platzbedarf. Der maximale Betriebsdruck liegt zwischen 30 und 32 bar. Die Standzeit wird durch Anfälligkeit bezüglich hoher Staubkonzentrationen oder Korrosion begrenzt. Flammrohrkessel werden meist als Zweizug- oder Dreizugkessel ausgeführt.

Beim Wasserrohrkessel wird dagegen das zu erhitzende Medium in Rohren geführt. Der Wärmeübergang erfolgt hier vorwiegend durch Strahlung und zum geringeren Teil durch Konvektion. Bei Wasserrohrkesseln sind höhere Betriebsdrücke (bis 100 bar) möglich und sie sind auch weniger anfällig für Korrosion und Verschleiß. Nachteilig ist hier jedoch der größere Platzbedarf und der höhere Montage- und Kostenaufwand, sowie die schlechtere Zugänglichkeit für Reinigungsarbeiten. Wasserrohrkessel sind im kleinen Leistungs- und Niederdruckbereich sehr verbreitet. Aber auch zur Erzeugung von Dampf zur Stromerzeugung oder als Prozessdampf werden diese Kessel eingesetzt.

Thermoöl-Kessel werden nur in der Holzverarbeitenden Industrie verwendet, in der in speziellen Heißpressen zur Beheizung Thermoöl bereits eingesetzt wird. Aufgrund der hohen Vorlauftemperaturen von ca. 300°C treten hohe Rauchgasaustrittstemperaturen auf. Mithilfe einer Wärmekopplung zwischen Abgasstrom und Thermoöl-Vorlauf kann dieser Abgaswärmeverlust minimiert werden.

### ***Wärme- und Stromerzeugungssysteme***

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird mithilfe einer Druckerhöhung bei der Dampferzeugung und nachfolgender Entspannung in einer Dampfturbine oder einem Dampfmotor (jeweils mit Generator) Strom erzeugt. Zur möglichst effektiven Dampfkraftnutzung müssen Druck und Temperatur möglichst hoch liegen. Bei Holzfeuerungsanlagen können Überhitzungstemperaturen von bis zu 450°C gefahren werden, wobei mit steigender Temperatur das Problem der Hochtemperaturchlorkorrosion zunimmt. Die Verdampfungswärme des Dampfes nach dem Kraftprozess kann noch zu Heizzwecken genutzt werden, oder muss in einem luft- oder wassergekühlten Kondensator abgeführt werden.

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung mit konventionellem Dampfkreislauf werden Gegen-druckturbinen verwendet – im Gegensatz zu den Kondensationsturbinen, die zur reinen Stromerzeugung eingesetzt werden.

Neuere Entwicklungen sind geschlossene Gasturbinen und Stirling-Motoren. Bei geschlossenen Gasturbinen wird mit einem Hochtemperaturwärmetauscher gearbeitet, der mit dem Rauchgas aus der Holzfeuerung betrieben werden könnte. Die Erzeugung elektrischer Energie aus Biomasse mit geschlossenen Gasturbinen ist jedoch noch im Entwicklungsstadium. Das Hauptproblem bei der Umsetzung besteht in der Entwicklung eines Hochtemperatur-Wärmetauschers.

Der Stirling-Prozess ist ein Prozess mit hohem thermodynamischen Wirkungsgrad, bei dem die Wärme aus der Verbrennung direkt in mechanische Energie umgesetzt wird. Derzeit betriebene Anlagen haben jedoch bedeutend niedrigere Wirkungsgrade, vorwiegend aufgrund von Reibungsverlusten. Daher liegen die aktuell erzielten elektrischen Wirkungsgrade bei unter 25 %. Wird Holz zur Wärmeerzeugung verwendet, so entstehen weitere Probleme aufgrund der hoch korrosiven Rauchgase und der niedrigen Abgastemperaturen (weitere Reduktion des erreichbaren Wirkungsgrads). Die derzeitige Entwicklung konzentriert sich auf Anlagen im Bereich zwischen 5 und 20 MW<sub>el</sub>.

#### 5.2.2.4 Mitverbrennung von Biomasse in Kohlefeuerungen

Die Mitverbrennung von Biomasse in Kohlefeuerungen wird meist in Erwägung gezogen, um die Betriebskosten durch den Einsatz des relativ günstigen Ersatzbrennstoffs zu senken. Es bietet noch weitere Vorteile, z.B. durch die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades im Vergleich zu zwei einzelnen Feuerungen für Kohle bzw. Holz.

Für die Kohlefeuerungen werden in Deutschland meist Trockenfeuerungen oder Schmelzkammerfeuerungen eingesetzt, welche sich vor allem in der Verbrennungstemperatur unterscheiden. Während bei Trockenfeuerungen die Temperatur unterhalb des Ascheschmelzpunktes bleibt, wird dieser Punkt bei Schmelzfeuerungen überschritten, um die geschmolzene Asche flüssig abziehen zu können. Die Kohleverbrennung findet in beiden Fällen mit Staubbrennern statt.

Zur Mitverbrennung von Holz in Kohlestaubfeuerungen muss das Holz auf eine mittlere Teilchengröße von 2-4 mm gemahlen werden [HEIN 96]. Dabei kann das Holz sowohl in der Kohlemühle mitgemahlen als auch in separaten Einrichtungen zerkleinert werden. Aufgrund des im Verhältnis zur Kohle großen Volumenstroms des Holzes werden bei größeren Biomasseanteilen separate Zerkleinerungseinrichtungen bevorzugt.

In Schmelzkammerfeuerungen wird der Holzstaub entweder bereits mit dem Kohlenstaub vermengt zugeführt oder über einen separaten Brenner verbrannt. In Trockenfeuerungen besteht zudem noch die Möglichkeit, das Holz auf einem zusätzlichen Rost zu verfeuern. Allgemein wird die Mitverbrennung bevorzugt bei Braunkohlenfeuerungen durchgeführt, da hier die Unterschiede im Heizwert zwischen Holz und Kohle geringer sind.

Der Abgasvolumenstrom ändert sich bei der Mitverbrennung nur geringfügig: so ändert sich der feuchte Abgasvolumenstrom je nach Biomasse und Feuchte um maximal ein Prozent bei einem Anteil der Biomasse an der thermischen Leistung bis

zehn Prozent [HEIN 96]. Bei Trockenfeuerungen können aufgrund des niedrigeren Schmelzbereichs der Biomasseaschen je nach Brennstoff verstärkt Probleme durch Verschlackungen im Feuerraum auftreten. Durch den erhöhten Chlorgehalt besonders bei Stroh oder bei Altholz mit entsprechender Beschichtung oder Behandlung kann es zu erhöhter Hochtemperaturkorrosion an den Heizflächen kommen. Ein weiteres Problem ist die Beschädigung oder Deaktivierung von Katalysatoren - z.B. bei der bei Trockenfeuerungen üblichen High-Dust-SCR - durch die erhöhten Alkali- und Erdalkalibestandteile und Phosphorverbindungen in den Biomasserauchgasen. Hierdurch kann der Katalysator „vergiftet“ werden oder auch die Poren der aktiven Katalysatorzellen verstopft werden [HEIN 96].

Die Emissionen der Hauptschadgase  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$  werden durch die Mitverbrennung von Biomassen im Roh-Rauchgas nach Erfahrungen von [HEIN 96] gemindert oder bleiben etwa gleich. Durch den geringeren Schwefelgehalt der Biomassen wird die Rauchgasentschwefelung entlastet. Trotz des höheren Gehalts an Stickstoff in Biomassebrennstoffen bleiben die  $\text{NO}_x$ -Emissionen im Rohgas gleich. Obwohl zum Beispiel für Stroh der auf den Heizwert bezogene Brennstoffstickstoff in der gleichen Größenordnung wie für Kohle liegt, verursacht die höhere Freisetzung von Pyrolyseprodukten und flüchtigen Stickstoffverbindungen eine geringere Stickoxidbildung [HEIN 96]. Bei nicht ausreichender Aufmahlung bzw. zu geringer Verweilzeit des Biomasse-Brennstoffs im Feuerraum können die  $\text{CO}$ -Emissionen ansteigen. Insgesamt dürften bei Großfeuerungsanlagen die Emissionen im Großen und Ganzen gleich bleiben, da die Emissionsänderungen durch Nachregelung der Betriebsparameter aufgefangen werden können.

Probleme können für die Vermarktung der Aschen auftreten, da durch die Verbrennung von Biomassen ein erhöhter Anteil an Alkaliverbindungen und Unverbranntem auftreten können [HEIN 96].

Während in Baden-Württemberg bisher Projekte zur Mitverbrennung von Holz und Biomasse noch im Planungsstadium sind, wird außerhalb Baden-Württembergs bereits in einigen Kohlefeuerungen Holz mitverbrannt. Als wirtschaftlich erweisen sich besonders solche Projekte, bei denen mit möglichst geringem Umrüstungsaufwand – z.B. ohne separate Zerkleinerungseinrichtungen oder separate Lagerung - Holz mitverbrannt werden kann.

### **5.2.2.5 Bilanzierung der Parameter für Feuerungsanlagen**

Im Folgenden wird zunächst die Energiebilanz über die verschiedenen Holzverbrennungsanlagen dargestellt, um die Verhältnisse zwischen aufgewendeter und gewonnener fossiler und erneuerbarer Energie aufzuzeigen. Bei der Berechnung der

atmosphärischen Emissionen aus den Feuerungsanlagen sind die Feuerungstechnologie und die eingesetzte Rauchgasreinigung zu beachten.

In der Kostenbetrachtung werden Investitionen, Ausgaben und Einnahmen aus dem laufenden Betrieb betrachtet.

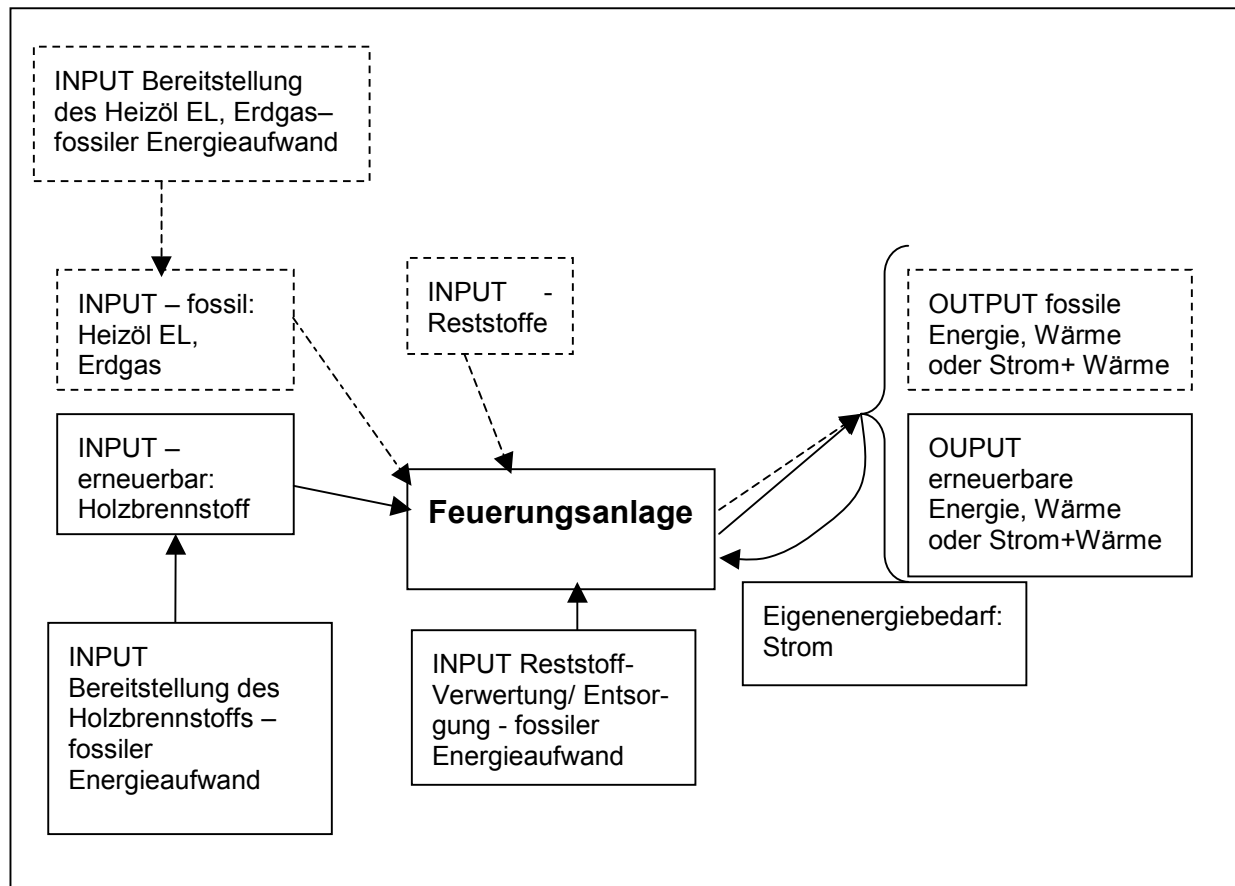
#### **5.2.2.5.1 Energiebilanzen über die Feuerungsanlagen**

In Abbildung 5-1 ist der Bilanzraum über die Energiebilanz der Feuerungsanlagen skizziert.

Zu den Aufwendungen zählen hierbei die über den Heizwert/Brennwert der Brennstoffe eingebrachte Energiemenge, sowie die Aufwendungen für die Bereitstellung der Brennstoffe und die Entsorgung/Verwertung der Aschen.

Die Holzenergie wird meist zur Deckung der Grund- oder Mittellast des Wärmebedarfs verwendet, wodurch in den meisten Fällen zusätzlich zum Holzkessel noch Öl/Gaskessel zur Deckung der Spitzenlast oder bei Heizwerken im kommunalen Bereich auch Blockheizkraftwerke zur Deckung der Grundlastwärme installiert sind. Beim Vergleich der Anlagen zur Holzenergienutzung im Hinblick auf die Deckung des Energiebedarfs gegenüber konventionellen Systemen müssen diese separaten Kessel und BHKWs mit berücksichtigt werden, da in diesen Fällen die Deckung des Wärme- und z.T. Strombedarfs nur über die zeitweise Nutzung fossiler Energien gegeben ist. Verglichen wird dabei das Verhältnis der aufgewandten Energiemengen ( $KEA_{\text{gesamt}}$ ) im Verhältnis zum erzielten Energieoutput (Strom und Wärme).

Mit dem  $KEA_{\text{gesamt}}$ -Input Holz wird die Brennstoffausnutzung für Holz dargestellt, d.h. der Holzenergie-Input dem Output an erneuerbarer Energie gegenüber gestellt.



**Abbildung 5-1:** Bilanzraum der Energiebilanz über die Feuerungsanlagen

Die zur Energiebilanzierung der Feuerungsanlagen verwendeten Daten sind in Tabelle II-2 im Anhang II aufgeführt. Bei lückenhaften Angaben zum Energieinput an fossilen Energieträgern wurden diese ausgehend von üblichen elektrischen und thermischen Nutzungsgraden über den Output berechnet und ergänzt. Bei aggregierten Angaben zum Output, die nicht in die Anteile aus erneuerbaren und fossilen Energieträgern aufgeschlüsselt waren, wurden die Wärme- und Strommengen nach dem Verhältnis des Inputs an erneuerbaren und fossilen Energieträgern aufgeteilt. Für den elektrischen Eigenbedarf waren insbesondere für die kleineren Anlagen kaum Daten vorhanden. Daher wurden für die größeren Anlagen Eigenbedarfsmengen aus Anlagen mit ähnlicher Technologie übertragen. Für die kleineren Anlagen liegt der elektrische Eigenenergiebedarf bei ca. 1,5 % der erzeugten Wärmemenge, inklusive der Kesselkreispumpe für die Nahwärmeversorgung [ZIPF 00]. Für Anlagen, bei denen durch den Betrieb von Abgasrezirkulationsgebläsen, Wäschern/ Kondensationsanlagen oder Elektroabscheidern mit erhöhtem Stromverbrauch zu rechnen ist, wird von etwa 3 % der erzeugten Wärmemenge ausgegangen.

In Tabelle 5-22 sind die Ergebnisse aus der Energiebilanz über die Feuerungsanlage (ohne Berücksichtigung der Bereitstellung der Brennstoffe und der Aschenentsorgung) dargestellt.

Mit dem  $KEA_{\text{Holz}}$ -Anlage, bei dem der Input an Holzenergie auf die Masse an eingesetztem Holz bezogen wurde, erhält man den durchschnittlichen Heizwert der Brennstoffe. Dieser liegt zwischen 2 bis 4 MWh/kg, je nach eingesetzten Sortimenten. Zu niedrigen Heizwerten führen hohe Anteile an Grüngut und Rinde, welche hohe Wassergehalte aufweisen. Einen hohen Heizwert erreicht man dagegen mit der Verwendung von Gebrauchtholz, dessen Wassergehalt meist um etwa 15 Gew.-% liegt.

Tabelle 5-22: Energiebilanzen über die Feuerungsanlagen – Ergebnisse

Anlagenbeispiel	technische Merkmale, Betriebszeit der Holzfeuerung	INPUT Holz [t/a]	INPUT <sub>erneuerbar</sub> [MW/h/a]	Summe INPUT <sub>fossil, Öl bzw. Gas</sub> [MW/h/a]	KEA <sub>Holz</sub> -Anlage [MW/h/t Holz]	KEA <sub>Holz</sub> -Anlage Output <sub>erneuerbar</sub> [MW/h/MWh]	KEA <sub>fossil</sub> -Anlage Output <sub>fossil</sub> [MW/h/MWh]	KEA <sub>gesamt</sub> -Anlage Output <sub>gesamt</sub> [MW/h/MWh]
Gemeinde Bodnegg	Unterschubf. 440 kW Holz, 390 kW Öl, Betrieb Sept.-Juni	439	1.351	104,2	3,08	1,14	1,23	1,15
Gem. Metzingen	Rostf. 500 kW Holz, 900 kW Öl/Gaskessel, Betrieb ganzjährig	600	1.289	558	2,27	1,32	1,12	1,25
Gem. Hohentengen	Unterschubf. 300 kW Holz, 700 kW Öl/Gaskessel, Betrieb ganzjährig	337,2	1.089,6	253	3,23	1,35	1,23	1,33
Stadt Nagold	Rostf. 460 kW Holz, Ölkessel, Betrieb Sept.-Apr.	310,8	1.084	248	3,49	1,47 (1,39-1,57)	1,23	1,42
Gemeinde Dunningen	Rostf. 300 kW Holz, 1.010 kW Ölk. und BHKW, Betrieb ganzjährig	239,9	746,0	1.353	3,11	1,33	1,14	1,20
Landkreis Heilbronn	Rostf. 790 kW Holz, 2.110 kW BHKW, Ölk., solar; Betr. ganzjährig	1.256	3.446,6	2.353	2,74	1,39	1,16	1,29
Holzwärme Müllheim	Rostf. 3 MW Holz, 3,6 MW Öl/Gas, Betrieb Sept.-Mai	4.500	12.912	1.406	2,87	1,67	1,11	1,60
Fernheizwerk Rotenbachtal	Rostf. 3,25 MW Holz, 21 MW Öl/Gas, Betrieb ganzjährig	6.417	21.000	13.333	3,29	1,06	1,11	1,08
HKW Pforzheim	ZWS 42 MW gesamt, ganzjährig	43.822	160.000	870.683	3,65	1,55	1,55	1,55
IKW Baienfurt	ZWS 15 MW gesamt, ganzjährig	17.500	102.080	101.125	4,18			
Rinden HKW Oberrot	Rostf. + Einblasf. 36 MW Holz, Betrieb ganzjährig	140.000	459.200	0	3,28	1,58	0	1,58
HKW SchwörerHaus	Rostf + Einblasf. 15 MW Holz, Betrieb ganzjährig	40.000	82.320	519,3	2,06	1,53	1,62	1,55

Die auf den Output bezogenen kumulierten Energieaufwände beschreiben das Verhältnis von eingesetzter Energie zu nutzbarer Wärme bzw. Strom, also den Kehrwert des Brennstoffausnutzungsgrades.

Im Bereich der kleinen Feuerungen zur Wärmeerzeugung im kommunalen Bereich liegen die  $KEA_{\text{Holz}}$ -Anlagenwerte unabhängig von der Feuerungstechnik (Rostfeuerung oder Unterschubfeuerung) bei etwa 1,35 MWh/MWh Output, d.h. dass etwa 35 % mehr Energie zugeführt werden muss, als Wärme erzeugt werden kann. Einen relativ hohen Wert zeigt hier die Feuerung der Stadt Nagold, welche mit 1,39 bis 1,57 selbst im günstigsten Fall einen höheren Energieeinsatz erfordert, als die anderen Kleifeuerungen. Ein Grund dafür könnte sein, dass die erzeugte Wärmemenge nur in einer sehr groben Schätzung angegeben wurde und daher mit einer hohen Unsicherheit behaftet ist. Eine Ursache für die geringe Brennstoffausnutzung könnte darin liegen, dass die Anlage lediglich während der kalten Jahreszeit betrieben wird und daher beim Anfahren nach längerer Standzeit längere Anwärmzeiten und/oder Zeiten ohne Wärmeerzeugung aufgrund von Störungen aufweist.

Die beiden Anlagen zur Fernwärmeerzeugung mit jeweils etwa 3 MW<sub>th</sub> weisen sehr unterschiedliche  $KEA_{\text{Holz}}$ -Anlagenwerte auf. Während die Brennstoffausnutzung im Fernheizkraftwerk Rotenbachtal mit 1,06 MWh/MWh Output sogar noch besser als die der Kleifeuerungen ist, ist der  $KEA_{\text{Holz}}$ -Anlagenwert für das Holzheizwerk in Müllheim mit 1,67 MWh/MWh Output der höchste aller betrachteten Anlagen. Wie in Nagold wird auch in Müllheim die Holzfeuerung nicht das ganze Jahr über betrieben, sondern während der Sommermonate ausgeschaltet und im Herbst wieder angefahren. Inwieweit zwischen beiden Parametern ein Zusammenhang besteht, kann aus den vorliegenden Informationen nicht geklärt werden. Einflussfaktoren auf den Brennstoffausnutzungsgrad sind z.B. ein hoher Wassergehalt, schwankende Eigenschaften, Störungen durch Übergrößen etc.

Bei den Heizkraftwerken liegt der  $KEA_{\text{Holz}}$ -Anlage mit 1,55 MWh/MWh Output allgemein höher, als bei den anderen Feuerungsanlagen, da hier mit der Stromerzeugung auch ein geringerer Wirkungsgrad der Energienutzung in Kauf genommen wird.

Die fossil befeuerten Kessel und Blockheizkraftwerke haben entsprechend den Brennstoffausnutzungsgraden zwischen 80 und 90 %  $KEA_{\text{fossil}}$ -Anlagenwerte zwischen 1,1 und 1,2 MWh/MWh Output. Ihr Einfluss auf den Gesamt-KEA der Anlagen hängt davon ab, wie hoch im Verhältnis zur Holzenergie der Einsatz an fossilen Energieträgern ist.



### 5.2.2.5.2 Emissionen der Feuerungsanlagen

Die Emissionen der Feuerungsanlagen hängen u.a. von der eingesetzten Feuerungstechnik, den Sekundär- und Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung und von den eingesetzten Brennstoffen ab. In den Tabellen II-3 und II-4 im Anhang II sind Literaturwerte für Emissionskonzentrationen im Abgas in Abhängigkeit von den eingesetzten Technologien und Brennstoffen aufgeführt.

Die Schwefeldioxid- Emissionen sind bei reinen Holzfeuerungen allgemein sehr gering, da mit dem Brennstoff nur kleine Mengen an Schwefel eingetragen werden. Lediglich bei Mischfeuerungen, insbesondere mit Kohle, müssen Minderungsmaßnahmen getroffen werden. Die Staubemissionen hängen sehr stark von den verwendeten Rauchgasreinigungsmaßnahmen ab und lassen sich daher bei fehlenden Angaben über die verwendeten Anlagenteile erschließen. Schwieriger ist dagegen die Abschätzung der Emissionswerte für Kohlenmonoxid und Stickoxid, da hierbei außer der Feuerungs- und Emissionsminderungstechnik noch die eingesetzten Brennstoffe, die Anlagendimension und die Betriebsführung bzw. Optimierung der Anlage sehr große Rollen spielen. Dementsprechend liegen die Angaben für Kohlenmonoxid- Emissionen in der Literatur in einer sehr großen Bandbreite zwischen 20 und 2.000 mg/m<sup>3</sup>.

Für die Feuerungen < 1 MW wurden die CO- und NO<sub>x</sub>- Emissionswerte nach Anlagengröße und Ausstattung gestaffelt abgeschätzt (s. Tabelle 5-23).

**Tabelle 5-23:** Gewählte Emissionswerte (< 1 MW: 13 % O<sub>2</sub>, > 1MW: 11 % O<sub>2</sub>)

Bemerkungen	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staub [mg/m <sup>3</sup> ]
< 500 kW, naturbel. Holz, Zyklon	400	200	15	120
≥ 500 kW, naturbel. Holz Zyklon	200	150	15	120
Rauchgaskond.				60
E-Abscheider				30
Gewebefilter				10
≥ 500 kW, mit Holzwerkstoffen ohne NO <sub>x</sub> - Minderung	250	500	wie naturbel.	wie naturbel.
für Fernheizwerk Rotenbachtal: Rostfeuerung; Zykon+ E-Abscheider, Ind.restholz, Rinde	50	150	10	30

Auch für das Fernheizwerk Rotenbachtal wurden Emissionswerte abgeschätzt. Bei den Großfeuerungen liegen die Emissionswerte in einer engeren Bandbreite. Da die

Anlagen stärker überwacht werden und mit sensibleren Regelungen ausgestattet sind, werden meist Emissionswerte erzielt, die sehr nahe bei den am Stand der jeweiligen Technik möglichen, minimalen Werten liegen.

In Tabelle 5-24 sind die Emissionskonzentrationen für die Anlagenbeispiele aufgeführt, wobei die abgeschätzten Werte kursiv markiert sind. Die Schwefeldioxidemissionen liegen dabei allgemein niedrig mit Ausnahme der Mischfeuerung des HKW Pforzheim. Hier wird Steinkohle verfeuert, die naturgemäß einen deutlich höheren Schwefelgehalt hat als das Holz. Bei der Mischfeuerung des Industriekraftwerks Baienfurt müssten die Schwefeldioxidemissionen ebenfalls höher liegen als bei reinen Holzfeuerungen. In diesem Kraftwerk wird jedoch durch einen Wäscher und eine Flugstromadsorption das Schwefeldioxid effizient gemindert, die erzielten Abgaskonzentrationen liegen dementsprechend niedrig.

Die Staubemissionswerte sind entsprechend den eingesetzten Minderungsmaßnahmen bei den erwarteten Konzentrationen. Der sehr niedrige Emissionswert von  $1 \text{ mg/m}^3$  im Fall des SchwörerHaus zeigt jedoch auch, dass je nach Auslegung und Optimierung der Abscheider auch deutlich niedrigere Staubkonzentrationen erreicht werden können. Das gilt auch für die Zyklonabscheider, wie der Emissionswert von  $70 \text{ mg/m}^3$  [IBS 00] zeigt, der bei einer Kleinf Feuerung mit Zyklon als einziger Emissionsminderungsmaßnahme gemessen wurde.

Für die CO- Emissionen ist die Vollständigkeit des Ausbrands entscheidend. Dabei können bei größeren Feuerungsanlagen meist bessere Ergebnisse erreicht werden als bei kleineren. Für die Stickoxidemissionen sind außer der eingesetzten Technik auch die mit dem Brennstoff eingetragenen Stickstoffmengen entscheidend. Die relativ hohen Emissionswerte von  $227$  und  $264 \text{ mg/m}^3$  bei den Feuerungen der Fa. Klenk in Oberrot und SchwörerHaus in Oberstetten deuten darauf hin, dass hier in den Produktionsresten besonders stickstoffhaltige Teile wie z.B. Spanplatten verbrannt wurden. Für die kleineren Feuerungen liegen die Emissionswerte höher, weil hier seltener die Möglichkeiten zur primären Emissionsreduktion mit Luftstufung und Abgasrezirkulation voll ausgeschöpft werden.

Die aus den Emissionskonzentrationen und den Abgasvolumenströmen berechneten Emissionsfrachten der Anlagen sind in Tabelle 5-25 dargestellt. Während die Angaben bezogen auf die Tonne eingesetzten Holzes lediglich die Verhältnisse der Emissionskonzentrationen widerspiegeln, wird bei Bezug der Emissionsfrachten auf die erzeugten Wärme- und Strommengen dazu noch der jeweilige Brennstoffausnutzungsgrad für Holz mit berücksichtigt. Auch hierbei spiegeln sich im Wesentlichen die Verhältnisse der Abgaskonzentrationen wider, mit einigen Ausnahmen. Beim Vergleich der Staubemissionen der Gemeinden Metzingen und Hohentengen fällt z.B. auf, dass trotz gleicher Emissionskonzentrationen im Abgas in Metzingen für die MWh Wärme  $0,2 \text{ kg}$  Staub mehr emittiert wird als in Hohentengen. Da das Verhältnis von Energieinput zu Energieoutput für Metzingen und

Hohentengen sehr nahe beieinander liegt - Metzingen hat sogar den etwas besseren Wert – muss die Ursache hierfür im niedrigeren Heizwert des Brennstoffs gesucht werden. Durch den hohen Anteil an Grüngut in Metzingen muss für etwa den gleichen Energieinput fast die doppelte Masse an Holz eingebracht werden. Die damit ebenfalls zusätzlich eingebrachte Menge an Mineralstoffen wird z.T. als Flugaschepartikel emittiert.

Bei den Stickoxidemissionen wird trotz ähnlicher  $\text{NO}_x$ - Werte pro t Holz aus der Feuerung des Heizwerkes in Müllheim fast die doppelte  $\text{NO}_x$ - Menge pro MWh Output emittiert als aus der damit vergleichbaren Feuerung der Fernheizwärme Rotenbachtal. Dieses Ergebnis lässt sich durch den deutlichen Unterschied der  $\text{KEA}_{\text{Holz}}$ - Anlage bez. auf Energieoutput erklären. Um in Müllheim die gleiche Menge Wärme wie in Rotenbachtal zu produzieren, muss etwa 60 % mehr Energie zugeführt werden, was zu einem deutlich höheren spezifischen Brennstoffdurchsatz führt.

Auch im Vergleich der Stickoxidemissionen pro Holzmasse und pro erzeugte Energiemenge der Heizkraftwerke Oberrot und SchwörerHaus ergibt sich eine Umkehr der Verhältnisse. Während Oberrot einen um ca. 15 % höheren  $\text{NO}_x$ - Wert bezogen auf die Holzmasse hat, zeigt es bezogen auf den Energieoutput einen um 36 % niedrigeren Wert. Auch hier ist die Ursache in einem deutlich niedrigeren Heizwert des Brennstoffs für SchwörerHaus zu suchen, wodurch höhere spezifische Durchsätze nötig werden.

Die Kohlendioxid- Emissionen der reinen Holzfeuerungen werden dabei als emissionsneutral angesehen, da hier angenommen wird, dass beim Wachstum der Bäume genauso viel Kohlendioxid gebunden wird, wie bei der Verbrennung emittiert wird. Eine Ausnahme bilden hier die Mischfeuerungen, bei denen Kohlendioxid-Emissionen aus den fossilen Brennstoffen emittiert werden.

**Tabelle 5-24:** Emissionswerte der Feuerungsanlagen (< 1MW: 13% O<sub>2</sub>, >1MW: 11 % O<sub>2</sub>)

Anlagenbeispiel	Feuerungstechnik Holzkessel, FWL	Emissionsminderungsmaßnahmen	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staub [mg/m <sup>3</sup> ]
Gemeinde Bodnegg	Unterschubf. 440 kW	Zyklon	400	200	15	120
Gem. Metzingen	Rostf. 500 kW	Zyklon	110	313	5	120
Gem. Hohentengen	Unterschubf. 300 kW	Zyklon	400	200	15	120
Stadt Nagold	Rostf. 460 kW	Zyklon	400	200	15	120
Gemeinde Dunningen	Rostf. 300 kW	Zyklon	400	200	15	120
Landkreis Heilbronn	Rostf. 790 kW	Zyklon, Wäscher mit Rauchgaskondensation	200	150	15	60
Holzwärme Müllheim	Rostf. 3 MW	Zyklon (evtl. demnächst mit E-Abscheider)	4,4	142	15	135
Fernheizwerk Rotenbachtal	Rostf. 3,25 MW	Zyklon, E-Abscheider	50	150	10	30
HKW Pforzheim	ZWS 42 MW Mischfeuerung	Gewebefilter	100	75	105	8
Industriekraftwerk Balenfurt	ZWS 15 MW Mischfeuerung	Wäscher (Kalkmilch), Flugstromadsorber, Gewebefilter	50	187	1,49	3,4
Rindenheizkraftwerk Oberrot	Rostf. + Einblasf. 36 MW	Zyklon, E-Abscheider	176	264	6	23
HKW SchwörerHaus	Rostf. + Einblasf. 15 MW	Zyklon, E-Abscheider	104	227	10	1

**Tabelle 5-25:** Emissionsfrachten der Feuerungsanlagen – für Holzkessel bzw. Holzanteil der Mischfeuerung

Anlagen- beispiel	CO [kg/a]	NO <sub>x</sub> [kg/a]	SO <sub>2</sub> [kg/a]	Staub [kg/a]	CO [kg/t Holz]	NO <sub>x</sub> [kg/t Holz]	SO <sub>2</sub> [kg/t Holz]	Staub [kg/t Holz]	CO [kg/MWh Output erneuerbar]	NO <sub>x</sub> [kg/ MWh Output erneuerbar]	SO <sub>2</sub> [kg/ MWh Output erneuerbar]	Staub [kg/ MWh Output erneuerbar]
Gemeinde Bodhegg	1.791	896	67	537	4,08	2,04	0,15	1,22	1,49	0,75	0,06	0,45
Gem. Metzingen	638	1.814	29	695	1,12	3,19	0,05	1,22	0,64	1,81	0,03	0,70
Gem. Hohentengen	1.376	688	52	413	4,08	2,04	0,15	1,22	1,68	0,84	0,06	0,50
Stadt Nagold	1.268	634	48	380	4,08	2,04	0,15	1,22	1,69	0,85	0,06	0,51
Gemeinde Dunningen	979	489	37	294	4,08	2,04	0,15	1,22	1,69	0,84	0,06	0,51
Landkreis Heilbronn	2.562	1.922	192	769	2,04	1,53	0,15	0,61	0,99	0,74	0,07	0,30
Holzwärme Müllheim	160	5.176	547	4.921	0,04	1,15	0,12	1,09	0,02	0,67	0,07	0,63
Fernheizwerk Rotenbachtal	2.599	7.797	520	1.559	0,41	1,22	0,08	0,24	0,13	0,39	0,03	0,08
HKW Pforzheim	35.638	26.505	37.356	2.802	0,81	0,60	0,85	0,06	0,35	0,26	0,36	0,03
Industrie- kraftwerk Balenfurt	7.088	26.507	211	482	0,41	1,51	0,01	0,03				
Rindenheizkraf- twerk Oberrot	199.584	299.376	6.804	26.082	1,43	2,14	0,05	0,19	0,67	1,00	0,02	0,09
HKW SchwörerHaus	33.384	72.867	3.210	321	0,83	1,82	0,08	0,01	0,62	1,36	0,04	0,01

### **5.2.2.5.3 Betrachtung der Erzeugungskosten für Wärme und Strom aus der Verbrennung von Holz**

Hier werden die Investitionen für den Bau der Feuerungsanlagen, sowie die Ausgaben und Einnahmen des laufenden Betriebes für Holzenergieanlagen betrachtet und die Besonderheiten, die bei dem jeweiligen Anlagentyp zu beachten sind, beschrieben.

In zwei Untersuchungen wurden bisher Holzfeuerungsanlagen, die vornehmlich der Nahwärmeerzeugung oder Heizung dienen, hinsichtlich ökonomischer Kriterien überprüft: In [STEINMANN 95] wurde von dem schweizerischen Verein für Holzenergie Vhe eine Umfrage bei 29 Holzfeuerungsanlagen durchgeführt, die im Bereich zwischen 100 und 1.000 kW<sub>th</sub> liegen und ausschließlich der Wärmebereitstellung dienen. In [KRAPF 00] sind die Ergebnisse der Evaluation von sechs bayrischen Holzfeuerungsanlagen und sechs weiteren Anlagen im sonstigen Bundesgebiet auszugsweise zusammengefasst. Die installierten Leistungen der von [KRAPF 00] betrachteten Anlagen liegen zwischen 0,5 MW<sub>th</sub> und 3,3 MW<sub>th</sub>.

Beide Autoren bemängeln zu hohe Wärmegestehungskosten in den vorhandenen Anlagen. Bei einer Gewinn- und Verlustrechnung auf der Grundlage der VDI-Richtlinie 2067 ergab sich bei [KRAPF 00], dass nur eines der zwölf untersuchten Heizwerke Gewinne erwirtschaften kann.

Um ein Aussage über die Wirtschaftlichkeit der gewählten Anlagenbeispiele zu bekommen, werden diese – je nach Datenlage – den in [KRAPF 00] erarbeiteten Kennwerten für die Wirtschaftlichkeit von Biomasseanlagen zur Wärmeerzeugung gegenüber gestellt.

#### **Investitionen**

Die Brutto- Investitionen für Holzenergieanlagen setzen sich zusammen aus

- 1) Netto- Investitionen,
  - Bautechnik der Energieerzeugung,
  - Maschinenteknik der Energieerzeugung,
  - Elektro- und Leittechnik der Energieerzeugung,
  - Wärmeverteilung (Nah/Fernwärmenetz),
  - falls vorhanden: Stromerzeugung und Stromverteilung,
- 2) Nebenausgaben für Planung, Genehmigung und Gutachten,
- 3) Vorsteuer/Mehrwertsteuer,

- 4) Bauzeitinsen,
- 5) Unvorhergesehenes [FNR 00].

Unter der Bautechnik der Energieerzeugung werden bauliche Maßnahmen für Kessel- und Maschinenhaus sowie Brennstofflager einschließlich deren technischer Ausrüstung und der zugehörigen Außenanlagen verstanden. Dabei müssen neben den Ausgaben für die Baukonstruktion und die technischen Anlagen beim Bau „auf der grünen Wiese“ auch noch Investitionen für Grundstück, Herrichten und Erschließen mit einberechnet werden. In Tabelle II-5 im Anhang II sind Richtwerte für die spezifischen Investitionen pro Volumeneinheit umbauter Raum bzw. Flächeneinheit befestigte Außenanlage angegeben.

Bei Aufstellung einer Heizanlage in neu zu errichtenden Gebäuden betragen für Anlagen ab etwa 100 kW die Investitionen für die Bautechnik erfahrungsgemäß etwa 20 bis 40 % der gesamten Investitionen [FNR 00]. Werden die Wärmeerzeugungsanlagen dagegen in bereits bestehende Gebäude – wie z.B. Schulräume, Sporthallen etc. – eingebaut, so liegen diese Investitionen sehr viel geringer. In diesem Fall spielen vor allem die Investitionen für das bei Holzfeuerungen nötige Brennstoffsilos eine große Rolle, insbesondere, wenn aus Platzgründen ein unterirdisches Silo nötig ist.

Zu hohe spezifische investitionsabhängige Kosten werden von [KRAPP 00] als einen Grund für zu hohe Wärmegestehungskosten genannt, sie lagen bei den untersuchten Projekten bei etwa 70% der spezifischen Jahresgesamtkosten. Einsparungspotenzial liegt dabei neben der Ausstattung der Heizzentrale vor allem in den baulichen Anlagenteilen. In [STEINMANN 95] wird der Anteil der Gebäude an den Investitionen mit durchschnittlich 30% angegeben, der Anteil für Silo mit Deckel und Ein- und Austragseinrichtungen liegt sogar bei knapp 40 %. Möglichkeiten zur Minderung der Investitionen für das Silo liegen in einer kleineren Dimensionierung und einfacheren Ausführung des Vorratsgefäßes. Die in [STEINMANN 95] untersuchten Anlagen wiesen sehr unterschiedliche Größen von Silos aus, welche zwischen zehn und 60 Tagesbedarfsmengen fassen konnten. Der Autor der Studie schlägt ein maximales Fassungsvermögen von ca. 10 Tagesbedarfsmengen vor, um auch in sehr kalten Perioden ausreichende Versorgungssicherheit zu gewährleisten, zugleich aber die Investitionen niedrig zu halten. Der Einfluss der durch das kleinere Silo und die Mehrzahl der Anlieferungsfahrten höheren Transportkosten wurde in der Studie nicht betrachtet.

Die Investitionen für einen Silodeckel mit Verteilereinrichtung (zur besseren Nutzung des Silovolumens) können mit bis zu 35.000 SFr (etwa 21.500 €) im Verhältnis zu den gesamten Investitionen für die Bautechnik sehr hoch liegen. Die bezogen auf das Nutzvolumen spezifischen Investitionen sind daher über weite Bereiche unabhängig von der Dimensionierung ([STEINMANN 95]: Bei Nutzvolumina bis 300 m<sup>3</sup>

liegen die Investitionen abhängig von der eingesetzten Technik zwischen 500 und 1.500 Fr/m<sup>3</sup> Nutzvolumen entsprechend ca. 307 bis 920 €/m<sup>3</sup>). Einsparmöglichkeiten ergeben sich hier vor allem durch die konstruktive Einbindung des Silos, um auf die Verteilereinrichtung verzichten zu können und relativ einfache Silodeckel verwenden zu können [STEINMANN 95].

Die Maschinentechnik der Energieerzeugung kann in folgende Anlagenteile untergliedert werden [FNR 00]:

- Holzkessel einschließlich Beschickung, Ascheaustrag und –lagerung,
- Spitzenlastkessel mit Nebensystemen (z.B. Heizöllagerung und –förderung zum Kessel) bzw. BHKW mit Gasversorgung,
- Rauchgasreinigung,
- Maschinentechnik der Biomasselagerung und –förderung bis zur Beschickung,
- Wasseraufbereitung,
- Rauchgas- und Luftsystem (einschließlich Ventilatoren), soweit nicht in den obigen Komponenten enthalten,
- bei KWK- Anlagen: Dampfturbosatz bzw. –motor einschließlich Generator,
- je nach Anlagenumfang weitere Nebensysteme wie Rückkühlanlage, Kondensatsystem, Be- und Entlüftungsanlage, Druckluftanlage, Wärmespeicher etc.,
- verbindende Rohrleitungen mit Pumpen, Behältern (z.B. Speisewasserbehälter) und Armaturen einschließlich deren Isolierung.

Die Investitionen für die Biomassekessel sind naturgemäß stark von der Leistungsgröße und der Ausstattung der Anlagen abhängig. In Abbildung II-1 im Anhang II sind spezifische Investitionen für Biomassefeuerungen angegeben. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die Investitionen nicht zwangsläufig einer Größendegression in Abhängigkeit von der thermischen Leistung unterliegen. Dies rührt daher, dass ab 1 MW z.B. eine deutlich aufwendigere Anlagentechnik mit automatischer Entaschung und oftmals eine Rostfeuerung – welche mit höheren Investitionen als Unterschubfeuerungen verbunden ist - üblich ist. Oberhalb einer Feuerungswärmeleistung von 5 MW wirkt sich die aufwändigere Entstaubung mit E-Abscheider oder Gewebefilter zusätzlich zu dem Zyklon kostensteigernd aus. In Tabelle II-6 im Anhang II sind spezifische Preise der Entstaubungseinrichtungen einander gegenüber gestellt.



Darüber hinaus werden bei größeren Leistungen die Kessel teilweise zur Dampferzeugung für Prozesswärme oder Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen genutzt, was zu höheren Investitionen gegenüber der Warmwassererzeugung führt [FNR 00].

Die Investitionen für Elektro- und Leittechnik sind sehr stark von der Anlagengröße und deren Komplexität, dem gewünschten Automatisierungsgrad und von individuellen Randbedingungen wie der vorhandenen elektrotechnischen Infrastruktur abhängig. Daher ist die Angabe von spezifischen Werten für diese Investitionen mit großen Unsicherheiten verbunden. Für erste grobe Abschätzungen können mit Investitionen für die Elektro- und Leittechnik von 10 bis 20 % der Investitionen für die Maschinenteknik gerechnet werden [FNR 00].

Für die Wärmeverteilung fallen außerhalb der Gebäudegrenzen des Heizwerks Investitionen für das Nahwärmenetz – Rohrleitungen, Verlegungsarbeiten – sowie für die verbraucherseitigen Einrichtungen (Hausstationen, bestehend aus kundenseitiger Hauszentrale und Übergabestation des Nahwärmenetzbetreibers) innerhalb der Gebäude der Wärmeverbraucher an. Die Investitionen für das Nahwärmenetz unterscheiden sich je nach Rohrleitungsnennweite, Verlegeverfahren und örtlichen Gegebenheiten, da ein wesentlicher Anteil der Verlegeinvestitionen (etwa 40 bis 60 %) durch den Tiefbau bestimmt wird. Je nach eingesetztem Material und Verlegeverfahren liegen die Investitionen zwischen ca. 256 und 1.176 €/m Trassenlänge.

Für die Planung, Gutachten, Abnahmen und dergleichen sowie Bauleitung werden weitere Ausgaben nötig, die sich auf etwa 10 bis 15 % der Nettoinvestitionen belaufen – je nach Leistung und Komplexität der Anlage [FNR 00]. Dazu wird für die Abschätzung der Investitionen hier noch ein Zuschlag von 5 bis 10 % für sonstige Investitionsposten gerechnet, die bei der Investitionsplanung meist als „Unvorhergesehenes“ mit eingeplant werden [FNR 00].

In Tabelle 5-26 werden die Ergebnisse einer Investitionsschätzung für die Beispielanlagen den teilweise bekannten tatsächlichen Investitionen gegenüber gestellt. Dabei zeigt sich bei den kleinen Anlagen eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Schätzung und Betreiberangaben – mit Ausnahme der Anlage in Heilbronn, die aber durch den Einsatz einer solarthermischen Komponente und einer Rauchgaskondensation erhöhte Investitionen aufweist. Bei den Fernheizwerken in Müllheim und Rotenbachtal sind die Abweichungen zwischen Schätzung und Betreiberangaben größer – was zum Teil auf aus Altanlagen übernommene Anlagenteile und daher Einsparungen bei den Investitionen zurückgeführt werden kann. Beim Fernheizwerk Rotenbachtal wurde z.B. ein Umbau eines bestehenden Werks vorgenommen, wobei nicht bekannt ist, welche Anlagenteile und Gebäude evtl. übernommen werden konnten. Ebenso zeigt sich bei dem Rindenheizkraftwerk Oberrot eine deutliche Abweichung, während die Übereinstimmung für die Anlage in Oberstetten sehr gut ist. Auch für diese beiden Anlagen gilt, dass z.T. bestehende

Infrastrukturen, wie z.B. Brennstofflager existieren, die aus der tatsächlich nötigen Investitionssumme herausfallen.

Hinsichtlich der spezifischen Investitionen bezogen auf den jährlichen Input an Holz gibt es große Unterschiede: während die meisten kleineren Anlagen, sowie die Anlagen zur Fernwärmeerzeugung bei Werten zwischen 0,5 und 1,5 T€/t Holz liegen, sind für die beiden Industriekraftwerke trotz zusätzlicher Ausgaben für die Stromerzeugung Werte von 0,26 T€/t Holz unter darunter möglich. Ausnahmen bilden das Heizwerk in Bodnegg, wo ebenfalls ein sehr kleiner Wert von 0,23 T€/t Holz realisiert wurde – vermutlich aufgrund von Einsparungen durch bereits vorhandene Anlagenteile und das Heizwerk in Dunningen, wo die Aufwendungen für zusätzliche Kessel überproportional hoch sind, also im Verhältnis wenig Holz eingesetzt wird. Die geringsten spezifischen Investitionen sind für die Mitverbrennung im Heizkraftwerk Pforzheim nötig, wo bereits mit 0,06 T€/ t Holz die Energie aus Holz genutzt werden kann.

### ***Kosten des Anlagenbetriebes***

Zu den Kosten des laufenden Betriebes einer Holzenergieanlage sind folgende Teile zu zählen [FNR 00]:

- 1) aus Investitionen abgeleitete fixe Kosten für Wartung und Instandhaltung, Versicherungen, Steuern
- 2) Personalkosten
- 3) verbrauchsabhängige Kosten für Betriebsmittel (Zusatzwasser, Strom etc.), Brennstoffe (Holz und fossile Energieträger) und Ascheentsorgung

Die Kostengruppe (1) umfasst alle Aufwendungen für Wartungs-, Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen mit Ausnahme der Personalkosten des eigenen Betriebspersonals. Je nach Wartungszyklen und Betriebsstörungen unterliegen diese Kosten starken jährlichen Schwankungen. Erfahrungswerte für die prozentualen Anteile in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2067, Blatt 1 (Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen) betragen [FNR 00]:

- Bautechnik der Energieerzeugung: 1,0 %/a der invest.abhängigen Kosten,
- Maschinenteknik der Energieerzeugung 2,0 %/a der invest.abhängigen Kosten,
- Elektro- und Leittechnik 1,5 %/a der invest.abhängigen Kosten,
- Nahwärmenetz 2,0 %/a der invest.abhängigen Kosten.

**Tabelle 5-26:** Investitionen der Feuerungsanlagen

Anlagenbeispiel	Bau- technik [T€]	Holz- kessel [T€]	sonst. Kessel, BHKW [T€]	Stromerz. [T€]	MSR <sup>1</sup> [T€]	Nahwärme- netz [T€]	Sonstiges [T€]	Gesamt Investition [T€] (T€/t Holz)
Gem. Bodnegg – berechnet	77	128	(s. Nahwärmenet z)	0	153 (mit sonst. Kessel)			358 (0,81)
Gem. Metzingen – berechnet - Betreiberangaben	21	77	138	0	32	0	54	322 353 (0,59)
Gem. Hohentengen – berechnet Betreiberangaben	15	46	107	0	23	86	56	333 (0,99) 266 (0,79)
Stadt Nagold – berechnet	48	71	153	0	34	77	72	428 (1,38)
Gem. Dunningen – berechnet - Betreiberangaben	22	46	138	36	33	153	86	514 654 (2,74)
Landkreis Heilbronn – berechnet - Betreiberangaben	48	121	324	37	72	0	121	723 1150 (0,92)
Holzwärme Müllheim – berechnet - Betreiberangaben	304	460	552	0	152	1.125	518	3.111 2.556 (0,57)
FHW Rotenbachtal – berechnet - Betreiberangaben	1.116	499	3.221	0	558	2.556	1.590	9.540 3.834 (0,60)
HKW Pforzheim – Betreiberangaben <sup>2</sup>	1.073	1.295			288			2.656 (0,06)

<sup>1</sup> Mess-, Steuer- und Regelungstechnik<sup>2</sup> Angabe für Umrüstung von reiner Kohlefeuerung auf Mischfeuerung

Anlagenbeispiel	Bau- technik [T€]	Holz- kessel [T€]	sonst. Kessel, BHKW [T€]	Stromerz. [T€]	MSR <sup>1</sup> [T€]	Nahwärme- netz [T€]	Sonstiges [T€]	Gesamt Investition [T€] (T€/t Holz)
IKB Baienfurt - Betreiberangaben								
RHKW Oberrot – berechnet - Betreiberangaben	2.559	11.964	0	831	1.919	153	3.485	20.912 15.339 (0,11)
HKW Schwörler – berechnet - Betreiberangaben	1.165	4.985	0	839	874	153	1.603	9.618 20.000 (0,5)

Des Weiteren fallen in die Kostengruppe (1) noch in der Regel Substanz-, Ertrags- und Mehrwertsteuern, sowie Kosten für Haftpflicht-, Maschinen und sonstige Versicherungen (z.B. gegen Elementarschäden). Substanzsteuern werden derzeit in Deutschland nicht erhoben. Ertrags- und Mehrwertsteuern sind jeweils von den speziellen Bedingungen des jeweiligen Unternehmens/Betreibers abhängig und daher nur schwer überschlagmäßig abzuschätzen. Für die Versicherungen gilt ein Erfahrungswert von ca. 0,5 bis 1,0 %/a der invest.abhängigen Kosten [FNR 00].

Die Kosten für die technische und kaufmännische Betriebsführung sind naturgemäß vom Personalbedarf abhängig, für den Erfahrungswerte in Tabelle II-7 im Anhang II aufgeführt sind [FNR 00]. Für die spezifischen Personalkosten kann ein Richtwert von 30.700 bis 51.100 € pro Personenjahr angesetzt werden. Hierbei handelt es sich um Mittelwerte, gebildet über die unterschiedlichen Qualifikationen des Personals, das üblicherweise für den Betrieb von Bioenergieanlagen benötigt wird. Für die Anlagen kleinerer Leistung ist eher der untere Wert der obigen Bandbreite anzusetzen, während für Großanlagen tendenziell der obere Wert zutreffend ist, da diese meist höher qualifiziertes Personal zur Bedienung der Anlagen benötigen [FNR 00]. Für Anlagen im kommunalen Bereich, die unter 500 kW Wärmeleistung liegen, wurde in Anlehnung an die Angaben der Betreiber mit 10 % der investitionsabhängigen Kosten gerechnet.

Kosten für Betriebsmittel umfassen:

- Zusatzwasser zur Deckung der Wasserverluste vorwiegend von Wasserdampf-Kreisläufen durch Absalzung und Abschlammung der Kesselanlage und nach Wartungsarbeiten an den Wasserkreisläufen,
- Strom zur Deckung des elektrischen Eigenbedarfs (insbesondere für Netzumwälzpumpen, Gebläse), der – falls keine Eigenstromerzeugung erfolgt – im Regelfall aus dem Netz der öffentlichen Versorgung bezogen wird,
- Dosiermittel der Wasseraufbereitung (falls erforderlich).

Für überschlägige Abschätzungen können die Kosten für Betriebsmittel mit 0,1 bis 0,5 %/a der invest.abhängigen Kosten angesetzt werden [FNR 00].

In Tabelle 5-28 sind die Kosten aus dem Anlagenbetrieb und die Annuität der Investition<sup>3</sup> zusammengefasst, wobei bei fehlenden Betreiberangaben die obig genannten Richtwerte und prozentualen Anteile herangezogen wurden. Für die Brennstoffkosten Holz und Ascheentsorgungskosten wurden die in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.3 ermittelten Kosten angesetzt. Für die Brennstoffkosten für fossile Energieträger wurden für Erdgas 1,04 Ct/kWh, für Heizöl EL 1,55 Ct/kWh angesetzt.

---

<sup>3</sup> berechnet nach der Annuitätenmethode, Annahmen: Zinssatz von 5 %, wirtschaftliche Nutzungsdauer 15 Jahre

Nach der Annuität, deren Anteil an den Jahreskosten zwischen 34 und 65 % liegt, stellen die Brennstoffkosten für Holz den größten Beitrag mit 14 bis 28 % der Jahreskosten. Dabei hängt innerhalb dieser Schwankungsbreite der Aufwand für den Brennstoff Holz naturgemäß sehr stark davon ab, welches Brennstoffsortiment verwendet wurde. Auch scheinen lokal sehr viel niedrigere Preise erzielbar zu sein, als im Durchschnitt in der Literatur angegeben. Dies bestätigen vor allem die insgesamt angegebenen variablen Kosten für Müllheim und Dunningen, welche jeweils unter den Kosten liegen, die mit den durchschnittlichen Bereitstellungskosten für Waldholz von 54 €/a aufzuwenden sind. Hier wurden auf der Grundlage der Betreiberangaben Brennstoffpreise von etwa 26 €/t Waldholz abgeschätzt.

Wo fossile Energieträger für die Abdeckung der Spitzen- oder Grundlast benötigt werden, spielen auch diese Kosten eine nicht unbedeutende Rolle, besonders bei den Fernheizwerken in Müllheim und Rotenbachtal, wo die Brennstoffkosten für fossile Brennstoffe mit fast 20 % zu den Jahreskosten beitragen.

Die Ascheentsorgungskosten tragen in einer sehr großen Schwankungsbreite mit 1 bis 29 % zu den Jahreskosten bei. Die hohen Entsorgungskosten fallen dabei vor allem dort an, wo durch die Wahl des Brennstoffs – v.a. durch Grünschnitt und Rinde – besonders hohe Aschegehalte vorhanden sind, welche zu relativ großen Mengen an zu entsorgender Asche führen.

### ***Wärmegestehungskosten (Basis: Vollkostenrechnung)***

Die Wärmegestehungskosten liegen für die Anlagen im kommunalen Bereich mit Berücksichtigung der Investition und des Unterhalts für das Nahwärmenetz zwischen 4,3 und 7,2 Ct/kWh. Dabei wurden die Wärmegestehungskosten für die gesamten Anlagen, inklusive der Öl- und Gaskessel berechnet und für in BHKW erzeugte Strommengen eine Gutschrift dafür berechnet, dass diese Strommenge nicht aus dem Netz bezogen werden muss. Bei den größeren Anlagen liegen die Wärmegestehungskosten tendenziell niedriger.

Für die beiden Industriekraftwerke in Oberrot und Oberstetten liegen die Wärmegestehungskosten mit 0,7 bis 1,5 Ct/kWh (je nachdem, ob nur eine Gutschrift für den nicht aus dem Netz zu beziehenden Strom berechnet wird oder von Einspeisung des Stroms mit Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz ausgegangen wird) verhältnismäßig niedrig. Da die Kosten des laufenden Betriebes zum großen Teil als prozentuale Anteile der investitionsabhängigen Kosten berechnet wurden, setzt sich hier der Trend fort, der bereits bei den Investitionen zu sehen war.

Die Kosten des laufenden Anlagenbetriebs dürften auch in Realität für die Industriekraftwerke dadurch niedriger liegen, dass zum Teil Maschinen, Infrastruktur

und Personal aus dem auf dem gleichen Werksgelände vorhandenen Holzverarbeitenden Betrieb genutzt werden können. Da außerdem die kapitalgebundenen Kosten den größten Anteil der Jahreskosten stellen, können durch besonders niedrige spezifische Investitionen somit niedrige Wärmegestehungskosten erreicht werden.

Ein Vergleich der ökonomischen Kriterien mit den nach [KRAPF 00] als sinnvoll erachteten Kennwerten zeigt, dass die angegebenen Grenzwerte für verbrauchsabhängige und fixe Kosten ohne Probleme eingehalten werden. Probleme gibt es bei der Einhaltung des Kennwerts für Annuität von 26 €/MWh. Dort, wo dieser Wert deutlich überschritten wird, liegen auch die Wärmegestehungskosten deutlich über den empfohlenen 51 €/MWh. Günstige Wärmegestehungskosten gibt es dagegen bei den Anlagen in Bodnegg, Metzingen, Dunningen und Heilbronn.

**Tabelle 5-27:** Vergleich der Kriterien nach [KRAPF 00] für die Wirtschaftlichkeit von Biomasseheizwerken mit den Beispielanlagen

	Annuität [€/MWh]	verbrauchsabhängige Kosten [€/MWh]	fixe Kosten mit Personalkosten [€/MWh]	Wärmegestehungskosten [€/MWh]
sinnvoll nach [KRAPF 00]	≤ 26	< 26	≤ 6,1	≤ 51
Bodnegg	27	13	3,1	43
Metzingen	22	19	4,6	47
Hohentengen	31	22	5,6	58
Nagold	43	20	7,7	71
Dunningen	30	17	4,1	51
Heilbronn	28	18	4,6	43

**Tabelle 5-28:** Kosten der Energiebereitstellung für die Feuerungsanlagen (% der Jahreskosten)

Anlagen- beispiel	Wartung & Instand- halt. [T€/a]	Versiche- rung & Steuer [T€/a]	Personal [T€/a]	Betriebs- mittel [T€/a]	Brennstoff Holz [T€/a]	Brennstoff fossil [T€/a]	Asche- ent- sorgung [T€/a]	Annuität [T€/a]	Jahres- kosten [T€/a]	Strom- gut- schrift [T€/a]	Wärme- gestehungs- kosten [€/kWh]
Gem. Bodnegg	1,3 (2%)	0 <sup>4</sup>	2,6 (5%)	0,92 (2%)	14,4 (26%)	1,6 (3%)	0,3 (0,5%)	34,5 (62%)	55	-	0,043
Gem. Metzingen	2,2 (3%)	0,97 (1%)	3,5 (5%)	0,1 (0,1%)	14,2 (20%)	7,3 (10%)	7,4 (11%)	34,0 (49%)	70	-	0,047
Gem. Hohentengen	17 (26%)				12 <sup>5</sup> (davon Holz: 8,6 (13%))		0,8 (1%)	34,2 (53%)	64	-	0,063
Stadt Nagold	2,7 (4%)	0,3 (0,5%)	4,1 (6%)	0,1 (0,1%)	15,0 (23%)	3,2 (5%)	1,1 (2%)	41,2 (64%)	68	-	0,071
Gem. Dunningen	22 (20%)				38 (34%) (davon Holz: 11,1 (10%))		(1,3 (1%)) in Brennst. Kosten enth.	53,2 (47%)	114	24,0 <sup>6</sup>	0,051

<sup>4</sup> bereits in Kosten für Schulbetrieb enthalten

<sup>5</sup> laut Betreiberangaben liegen die Brennstoffkosten mit 12 T€ deutlich unter den Brennstoffkosten für Holz, die mit 18 T€ abgeschätzt wurden (bei 54 €/t Holz); es wird daher wahrscheinlich ein Preis von maximal etwa 26 €/t Holz gezahlt, also sind es etwa 8,7 T€ für Holz-Brennstoffkosten

<sup>6</sup> [Vik 00] durchschnittlicher Strompreis für Sondervertragskunden in Deutschland: 5,6 CtkWh



Anlagen- beispiel	Wartung & Instand- halt. [T€/a]	Versiche- rung & Steuer [T€/a]	Personal [T€/a]	Betriebs- mittel [T€/a]	Brennstoff Holz [T€/a]	Brennstoff fossil [T€/a]	Asche- ent- sorgung [T€/a]	Annuität [T€/a]	Jahres- kosten [T€/a]	Strom- gut- schrift [T€/a]	Wärme- gestehungs- kosten [€/kWh]
Lkr. Heilbronn	7,2 (4%)	0,87 (0,4%)	11,1 (5%)	0,4 (0,1%)	29,2 (14%)	29,0 (14%)	14,7 (7%)	110,8 (55%)	203	30,7 <sup>6</sup>	0,038
HW Müllheim	230 (37%)			138 <sup>7</sup> (22%)	138 <sup>7</sup> (22%) (davon Holz: ca. 115 (19%))			in fixen Kosten enth.	368	-	0,041
FHW Rotenbacht.	24,0 (2%)	2,8 (0,3%)	205 (21%)	1,1 (0,1%)	163,5 (17%)	173,1 (18%)	41,6 (4%)	369,5 (38%)	980	-	0,031
RHKW Oberrot	96,1 (2%)	11,1 (0,3%)	307 (7%)	4,4 (0,1%)	1213 (28%)	0	1.292,4 (29%)	1477,6 (34%)	4.402	1575 <sup>6</sup> 2434 <sup>8</sup>	0,010 0,007
HKW Schwörer	64,0 (3%)	7,4 (0,4%)	307 (15%)	3,0 (0,1%)	346,7 (17%)	6,7 (0,3%)	277,3 (14%)	985,3 (49%)	1.997	1260 <sup>6</sup> 1948 <sup>8</sup>	0,023 0,002

<sup>7</sup> laut Betreiberangaben liegen die variablen Kosten also mit 138 T€ deutlich unter den Holzkosten, die hier mit 243 T€ abgeschätzt wurden (bei 54 €/t Holz); es wird daher wahrscheinlich ein Preis von maximal etwa 26 €/t Holz gezahlt, also etwa 115 T€ Brennstoffkosten Holz

<sup>8</sup> Mindestvergütung bei der Stromerzeugung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) für Anlagen > 5 MW: 8,7 Ct/kWh

### 5.2.3 Verwertung bzw. Entsorgung der festen Rückstände

Steigende Entsorgungskosten und neue rechtliche Rahmenbedingungen, wie die Einführung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes von 1996, legen seit langem den Gedanken nahe, die Holzaschen zu verwerten. Aufgrund der physikalischen Beschaffenheit und des Nährstoffgehalts sind folgende Verwertungswege prinzipiell denkbar [MARUTZKY U. SEEGER 99]:

- Zusatz zu mineralischen Baustoffen
- Einsatz als Bodenverbesserungs- oder Düngemittel
- Kofferungsmaterial im Wege- und Straßenbau
- Streumaterial im Winter
- Schleif- und Strahlmittel
- Industrielle Verwertung, zum Beispiel Neutralisation oder Adsorption
- Füllstoff im Bergversatz

Problematisch für die Wirtschaftlichkeit sämtlicher Verwertungswege ist die geringe Menge an Asche, die pro Heiz(kraft)werk anfällt. So errechnet [MARUTZKY U. SEEGER 99] zum Beispiel für eine Rostfeuerungsanlage mit einem Megawatt Feuerungswärmeleistung und 6.000 Jahresbetriebsstunden eine jährliche Aschemenge von 35 t. Die durch die unterschiedliche Herkunft der Gebrauchthölzer und die Eigenschaft des Waldholzes als Naturstoff stark schwankenden chemischen und physikalischen Eigenschaften der Holzasche können so nur durch Ansammlung größerer Mengen über längere Zeiträume hinweg kompensiert werden. Insbesondere für kleinere Anlagen sind also Aschelager nötig, die vor Regen und Wind geschützt sein müssen, um einen Verlust der wertvollen Nährstoffe bzw. Verwehungen zu verhindern [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Wichtige Kriterien für den Einsatz der festen Rückstände in den unterschiedlichen Bereichen - aber auch für die Beseitigung kontaminierter Aschen - sind außer dem Nährstoffgehalt noch der Gehalt an Schadstoffen, das Eluierverhalten, das Schmelzverhalten und eventuell nötige Behandlungsverfahren zur Immobilisierung der enthaltenen Schadstoffe.

#### 5.2.3.1 Verwertung der Holzaschen in Land- und Forstwirtschaft

Für den Einsatz von Düngern in der Landwirtschaft oder Kalk in der Forstwirtschaft sind jeweils die Beschaffenheit und der Nährstoffbedarf der vorhandenen bzw.

angebauten Bäume und Pflanzen relevant.

### **Eignung der Aschen**

Nach in [ZOLLNER ET AL 97] beschriebenen Ergebnissen von Untersuchungen bayrischer Waldböden sind diese meist ausreichend bis gut mit Nährstoffen ausgestattet. Mängel bestehen lediglich vereinzelt bei Magnesium, Kalium und Phosphor. Aufgrund der drohenden Versauerungserscheinungen können Calciumoxid-Zugaben zusätzlich zugegeben werden, um zur Säurepufferung beizutragen [ZOLLNER ET AL 97]. Von der Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg (FVA) wurden Vorgaben für *Mindestmengen an Nährstoffen* für Dünger entwickelt. Danach müssen mindestens 12 Gew.-% Magnesiumoxid (MgO), 6 Gew.-% Kaliumoxid (K<sub>2</sub>O) und 3 Gew.-% Phosphorpentoxid (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) enthalten sein, um die Asche sinnvollerweise als Dünger verwenden zu können. Daneben sind in kalkhaltigen Düngern i.d.R. etwa 30 Gew.-% Kalziumoxid enthalten.

Somit eignen sich die Aschen relativ gut zur Verwendung gegen Versauerungserscheinungen von Waldböden. Probleme bereitet jedoch bei allen Sortimenten die Einhaltung des Richtwertes für Magnesiumoxid. Lediglich Holzaschen aus der Verbrennung von Waldholz führen annähernd zu dem geforderten Gewichtsanteil des Minerals. Aufgeteilt nach den jeweiligen Anfallsorten der Aschearten in der Feuerungsanlage ergibt sich ein ähnliches Bild (s. Nährstoffgehalte der Aschefractionen in Tabelle 4-15, Kapitel 4.2.3.1): auch bei diesem Vergleich zeigen sich für Holzaschen aus Waldholz größere Anteile an für die Düngung des Bodens wertvollen Mineralien. Auch hier wird jedoch der von der FVA geforderte Mindestwert für MgO nicht erreicht. Betrachtet man jedoch die anderen Komponenten, so scheint die Grobasche am ehesten zur Nutzung des Nährstoffgehalts geeignet, da hier auch der Kalziumoxidanteil hoch genug ist.

Auch für den Einsatz als Sekundärrohstoffdünger auf landwirtschaftlichen Produktionsflächen ist der Gehalt an Nährstoffen in der Asche dem Nährstoffbedarf der jeweils angebauten Pflanzensorten gegenüber zu stellen. Dabei könnten die Aschen einer Düngermischung untergemengt werden, z.B. als Ersatz für die Kalk- oder Kaliumkomponente. Problematisch beim Einsatz könnte eventuell die Überschreitung von in der Düngemittelverordnung vom 4.8.1999 (BGBl.I 1999 S. 1758) angegebenen maximalen Werten für Phosphat ( 0,5 Gew.-% TS) und Kaliumoxid (0,5 Gew.-% TS) sein. Stoffe, deren Gehalte diese Werte übersteigen und die „nicht nur in geringen Mengen zur Aufbereitung organischen Materials oder in geschlossenen Systemen eingesetzt werden (...) dürfen nicht als Stoffe nach §1 Nr. 3 bis 5 (Kalidünger, Kali- und Magnesiumdünger, Calcium-, Magnesium-, und Schwefeldünger, Sekundärnährstoffdünger) des Düngemittelgesetzes gewerbsmäßig in den Verkehr gebracht werden“ [UMWELT-ONLINE 00]. Das Gesetz gilt jedoch nicht

für Forstflächen und in Gewächshäusern genutzte Flächen.

Problematisch können die hohen *Schwermetallgehalte der Aschen* werden, wenn diese als Sekundärrohstoffdünger eingesetzt werden. Bei Ausbringung im Wald bedenklich ist die Tatsache, dass sich hier Schadstoffe in Gebieten anreichern, in denen eine Vielzahl der Trinkwassergewinnungsgebiete in Deutschland liegen [ZOLLNER ET AL 97].

Bei den Aschengemischen, die aus Grobasche, Flugasche und Feinstflugasche bestehen, zeigt sich ein im Vergleich zu den Grenzwerten der Düngemittelverordnung zu hoher Gehalt an Zink und Cadmium. Bei der Betrachtung der einzelnen Aschefractionen zeigt sich jedoch ein anderes Bild. Die Grobaschen aus der Verbrennung von naturbelassenen Hölzern und Waldholzhackschnitzeln halten zum Großteil die Grenzwerte der Düngemittelverordnung und zum Teil auch die Vorsorgewerte der Bundes-Bodenschutz-Verordnung ein. Aschen aus der thermischen Verwertung von Gebrauchtholz und mit Holzschutzmitteln behandeltem Material können jedoch auch bei den Grobaschen nicht die Anforderungen für die landwirtschaftliche Nutzung einhalten.

Ein Entwurf einer Neufassung der Düngemittelverordnung sieht zwar allgemein (bis auf den Grenzwert für Zink) eine deutliche Verschärfung der Anforderungen an Schwermetallgehalten vor. Für Grobaschen aus „naturbelassenem Rohholz“ soll jedoch eine Ausnahme gelten. Diese sollen als Düngemittel verwertbar sein, während Zyklonaschen generell nicht zugelassen werden [SCHÄFER 03].

**Tabelle 5-29:** Vergleich der Schwermetallgrenzwerte der geplanten Neufassung der Düngemittelverordnung von 2003 mit der derzeit geltenden Fassung von 1999 [SCHÄFER 03]

mg/kg <sub>TM</sub>	As	Cd	Cr	Ni	Cu	Pb	Zn
Entwurf 2003	40	1,5	Cr VI: 2	80	70	150	1000
Fassung 1999		6	3000	100	200	200	750

Durch die Anlagerung der Schwermetalle an feine Partikel im Abgasstrom ist die Schadstoffbelastung der Flugaschen und Feinstflugaschen selbst bei unbehandelten Hölzern und Waldholz meist zu hoch für einen Einsatz als Düngemittel oder Bodenverbesserer.

Die Schwermetallbelastung der Waldböden ist bereits durch jahrelange Einträge, vor allem über den Luftpfad, auf einem hohen Niveau. Die bayrische Waldbodeninventur zeigt zum Beispiel erhöhte Werte an Blei, Cadmium, Zink, Kupfer und Nickel [ZOLLNER ET AL 97]. Daher ist in der Bundes-Bodenschutz-Verordnung das Konzept der „Frachten“ festgelegt, das bestimmt, dass über die jährlichen unvermeidbaren

Schwermetalleinträge z.B. über den Luftpfad hinaus nur gewisse Mengen dem Boden zusätzlich zugeführt werden dürfen. Ein Vergleich der Verhältnisse in Wingst, im Harz und in Solling zeigt, dass bei Ausnutzung der maximalen zusätzlichen Fracht zwischen 1 und 6 t Asche/ha (bei ein- bis zweimaliger Ausbringung pro Umtriebszeit) nach der Bundes-Bodenschutz-Verordnung vertretbar sind [ZOLLNER ET AL 97]. Des Weiteren ergab eine Bilanz über die mit Holzernte und Holzascheausbringung ein- und ausgetragenen Schwermetallmengen, dass bei Ausbringung lediglich der Grobaschen, durch den geringen Schwermetallgehalt dieser Fraktion insgesamt die Schadstoffbelastung des Waldes abnehmen müsste [ZOLLNER ET AL 97].

Die Anteile an *organischen Schadstoffen* können zur Begrenzung der Ausbringungsmengen bei landwirtschaftlicher oder forstwirtschaftlicher Nutzung der Aschen führen. Aus den Grenzwerten der Klärschlammverordnung von 1992 lassen sich z.B. nach [RÖSCH 96] maximal mögliche Ausbringungsmengen von Grobasche aus der Verbrennung von naturbelassenem Holz zwischen 12 und 33 t TS/ha\*a und von Flugasche zwischen 9 und 26 t TS/ha\*a errechnen. Diese Werte sind so hoch, dass sich zumindest für naturbelassenes Holz aus den Grenzwerten keine Einsatzbeschränkung ergibt. Anders sieht die Rechnung jedoch bei Althölzern und Holzwerkstoffen aus, die neben höheren Schwermetallanteilen auch z.T. erheblich höhere Gehalte an organischen Schadstoffen aufweisen.

Für die Ausbringung auf Waldböden sind die aggressiven *Branntkalk*eigenschaften der Holzaschen nicht unproblematisch. Die Organismen der Humusschicht sind optimal an das jeweils vorliegende chemische Milieu angepasst, weshalb eine rasche, starke Veränderung durch Ausbringung der reinen Aschen das Gleichgewicht empfindlich stören kann. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Anhebung der Bodenreaktion die Umsetzungsprozesse der organischen Substanz im und auf dem Boden so stark fördern kann, dass Nährstoffverluste auftreten und Beeinträchtigungen der Qualität der Sickerwässer eintreten können [ZOLLNER ET AL 97]. Bei Lagerung der Holzaschen im Freien reagieren diese jedoch mit dem Kohlendioxid der Luft und bilden dabei Karbonate. Dadurch werden die Branntkalk-eigenschaften der Holzasche abgemildert und es werden pH-Werte zwischen 8 und 9 erreicht. Der Gehalt an freien Elektrolyten wird soweit gesenkt, dass die elektrische Leitfähigkeit sich den Waldbodenverhältnissen annähert [ZOLLNER ET AL 97], [VERSCHEURE 98].

Neben der chemischen Zusammensetzung sind jedoch auch die *mechanisch-physikalischen Eigenschaften der Holzasche* wichtig. So sollte das Material gut streu- und blasfähig sein, nur geringe Anteile an Sand und anderen Ballaststoffen enthalten und nicht partiell gesintert oder verklumpt sein [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Letzteres sind Bedingungen für eine technisch problemlose Ausbringung in Feld oder Wald.

Für die Ausbringung müssen die Aschen in einem streu- oder blasfähigem Zustand sein, d.h. eventuell gemahlen und im Fall von Nassaschen noch zusätzlich

getrocknet werden, um nicht zu verklumpen. In der Landwirtschaft können dann Streumaschinen wie Kreisel-, Pendel- oder Schneckenstreuer eingesetzt werden, um das Material auf den Feldern zu verteilen [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Die Ausbringung im Wald kann dagegen per Hand oder pneumatisch, also durch „Verblasen“, mit Schleuderstreuern oder per Hubschrauber erfolgen. Dazu müssen die Aschen zunächst gesiebt werden, um verschleißende Bestandteile wie Steine und groben Sand abzutrennen. Um die Pufferkapazität der Aschen zu erhöhen, können außerdem noch Kalkmehl, Magnesiumkalke (Dolomit) oder Calciumhydroxid (Kalkoxyhydrat) zugemischt werden [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Nachteilig bei diesem Verfahren ist vor allem die hohe Staubentwicklung.

Um diese zu verhindern, können die Holzaschen auch granuliert werden. Dazu werden sie befeuchtet, eventuell aufgrund des geringen Eigenbindevermögens mit Bindemitteln versetzt – wie Melasse, Stärke oder Tapetenkleister – und mittels einer Aufbaugranulation zu Granulaten verarbeitet [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Vorteile der Granulierung liegen außer in der problemlosen Ausbringung auch in der Lagerung. Die relativ festen Körner zeigen eine geringere Staubentwicklung, verklumpen nicht unkontrolliert und lassen sich auch leichter fördern [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Durch den zusätzlichen Aufwand für Lagerung, Transport und Aufbereitung der Aschen bei der Granulierung entstehen jedoch Zusatzkosten [ZOLLNER ET AL 97].

### **5.2.3.2 Verwertung als Zusatz in Baustoffen, Straßenbelägen, Bergversatzmaterial**

In der Literatur wird vielfach vorgeschlagen, die Holzaschen – ähnlich wie die Flugaschen von Steinkohlefeuerungen - als Zuschlagstoffe für mineralische Baustoffe zu nutzen.

Zementwerkstoffen können etwa 10 bis 20 % Flugasche beigefügt werden, ohne dass die Festigkeit beeinträchtigt würde [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Durch die Einbindung der Schadstoffe – vor allem der Schwermetalle – in die Zementmatrix werden diese immobilisiert. Die jeweilige Schadstoffmenge in der Holzasche würde daher eine untergeordnete Rolle spielen [MARUTZKY U. SEEGER 99].

Für eine Zulassung von Zement oder Beton mit Holzaschenanteilen ist eine Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik DIBt erforderlich [SCHNEIDER 97]. Für Flugaschen aus Steinkohleverbrennung wurden 1996 in der Richtlinie zur „Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau“ chemische und physikalische Anforderungen festgelegt (s. Tabelle 5-30).

**Tabelle 5-30:** Stoffliche Anforderungen an Steinkohlenflugaschen nach DIN EN 450 [SCHNEIDER 97]

	Eigenschaft	Anforderung
chemische Anforderungen	Glühverlust	$\leq 5,0$ Gew.-%
	Chloridgehalt	$\leq 0,10$ Gew.-%
	Schwefeltrioxid	$\leq 3,0$ Gew.-%
	freies Calciumoxid CaO	$\leq 1,0$ Gew.-%
	freies CaO mit Prüfung der Raumbeständigkeit	$\leq 2,5$ Gew.-%
physikalische Anforderungen	Feinheit R-% bei 0,045mm	$\leq 40$ Gew.-%
	max. Abweichung vom Mittelwert der Feinheit	$\pm 10$ Gew.-%
	Aktivitätsindex nach 28 Tagen	$\geq 75$ %
	Aktivitätsindex nach 90 Tagen	$\geq 85$ %
	Raumbeständigkeit	$\leq 10$ mm
	Kornrohddichte, Mittelwert	$\pm 150$ kg/m <sup>3</sup>

Auch wenn die Verhältnisse für Aschen aus Biomasseverbrennungen nicht direkt mit den Steinkohleflugaschen vergleichbar sind (v.a. bezüglich der Schwermetallgehalte), zeigt jedoch z.B. der Wert für den Glühverlust von 5 Gew.-%, dass Holzaschen in der Regel nicht ohne weitere Aufbereitungsschritte verwertbar sein dürften. In [OBERNBERGER 90] durchgeführte Versuche zur Beimengung von Holzaschen zu Zement und Beton zeigten, dass die resultierenden Baustoffe mit zu geringen Festigkeitswerten nicht brauchbar waren. Da bisher wenig Erfahrungen über die Beimengung von Holzaschen zu Zement oder Beton vorliegen, wären weitere, umfangreiche Untersuchungen über die Auswirkungen auf den Baustoff Zement/Beton und über Umweltverträglichkeit nötig [EFFELS 00]. Zum Einsatz der Holzaschen in Baustoffen müsste außerdem gewährleistet werden, dass deren chemische und physikalische Eigenschaften nur in sehr geringen, festgelegten Bandbreiten schwanken. Solche Vorgaben trotz schwankender Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe und bei den relativ geringen Mengen an Holzasche, die pro Anlage anfallen, einzuhalten, würde einen hohen Aufwand erfordern. Dieser Verwertungspfad wird daher derzeit in Deutschland nicht verfolgt.

Für den Einsatz als Bergversatzmaterial müssen die Aschen gewisse Kriterien erfüllen, um sicherzustellen, dass auch langfristig bei eintretendem Grubenwasser keine Umweltgefährdung besteht. Derzeit werden allgemein vier verschiedene Einbringungsverfahren im Versatz-Bergbau angewandt [WALBAUM U. SCHLIZIO 98]:

- *offene Handhabung* von erdfeuchtem Material: Das Material wird auf Bändern in die Gruben transportiert, auf Transportfahrzeuge umgeladen und direkt in den Abbauhohlräumen abgekippt
- *Spülversatz*: In einer Mischanlage wird der Abfall mit der Transportflüssigkeit versetzt (bergwerkseigene Sole) und in Fallleitungen und Rohrleitungsnetzen in den Abbauhohlraum geführt. Das Versatzgut sedimentiert, während die Spülflüssigkeit in ein Sammelbecken abfließt und wieder nach übertage gepumpt wird.
- *Pumpversatz*: Das dickflüssige Abfall- Flüssigkeitsgemisch wird in den Hohlraum gefördert und bindet dort ab. Durch den sich aufbauenden Druck in der Schachtleitung sind keine zusätzlichen Pumpstationen nötig, um das Material zum Versatzort zu fördern [ZILLESSEN 95]. Es entsteht dabei keine Überschussflüssigkeit und die Schadstoffe werden in eine Matrix fest eingebunden.
- *Big Bag- Versatz*: Die Abfälle (Schüttgüter  $\leq 50$  mm Korngröße) werden in einer Konditionierungsanlage aufbereitet und in Big Bags gefüllt. Diese werden nach Aushärtung des Materials mittels Förderkorb nach untertage gebracht und in den zu verfüllenden Hohlräumen eingestapelt. Die Hohlräume zwischen den Big Bags werden mit Feinsalz oder hydraulischem Versatz gefüllt.

Für die Verwertung nicht abbindender Reststoffe kommen vor allem der Pumpversatz und Big-Bag-Versatz zum Einsatz. Dabei werden die Aschen mit abbindenden Materialien versetzt, wie z.B. Zemente und in geringerem Umfang auch REA-Gips oder Alphahalbhydrat [ZILLESSEN 95].

Die derzeitige Praxis der Verwertung von Abfällen als Bergversatz in Hohlräumen ehemaliger Salz-, Erz- und Kohlebergwerke ist nicht unumstritten [ZADLER 98], [STENGLER 00], [BMU 99], [UMWELTSERVICE 00]. Kritikpunkte liegen bei der Verbringung in Erz- und Kohlebergwerke, bei der allgemein langfristig der Kontakt mit dem Grundwasser nicht ausgeschlossen werden kann und die bisher in Deutschland vorherrschende Einstufung des Bergversatzes als Verwertung. Zudem werden die rechtlichen Vorschriften zurzeit in den Bundesländer sehr unterschiedlich umgesetzt. Um klare Rechtsvorschriften zu schaffen hat das Bundesumweltministerium im Sommer 2002 eine Bergversatz-Verordnung erlassen [EUWID 03]. Darin wird die Haltung der Bundesregierung deutlich, nach der die Einbringung von Abfällen in Bergwerke dann eine Verwertung darstellt, wenn dadurch andere Materialien ersetzt werden, mit denen sonst das Bergwerk verfüllt werden müsste.



### 5.2.3.3 Entsorgung auf Deponien

In Tabelle 5-31 sind die für die Entsorgung auf den verschiedenen Deponiearten relevanten Kriterien aufgeführt. Von den Holzaschen werden z.T. die pH- Grenzwerte und Grenzwerte der Eluatgehalte von Cr(VI) für alle drei Deponiearten überschritten.

**Tabelle 5-31:** Zuordnungswerte für die Ablagerung von Abfällen nach Anhang B der TA Siedlungsabfall (TASi) und Anhang D der TA Abfall [MARUTZKY U. SEEGER 99]

Eluatkriterien	Einheit	TASi Deponieklasse I	TASi Deponieklasse II	TA Abfall, Teil 1 Sonderabfalldeponie
pH-Wert	-	5,5-13	5,5-13	4-13
el. Leitfähigkeit	mS/cm	<10	≤ 50	≤ 100
Blei	mg/l	<0,2	≤ 1	≤ 3
Zink	mg/l	< 2	≤ 5	≤ 10
Cr(VI)	mg/l	< 0,05	≤ 0,1	≤ 0,5
Glühverlust	Gew.-%	<3	≤ 5	≤ 10

Ein zu hoher Glühverlust hat seine Ursache in der unvollständigen Verbrennung der Biomasse. Durch eine thermische Nachbehandlung können die organischen Bestandteile bei Temperaturen oberhalb 600°C aufoxidiert werden [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Die erhöhte Wasserlöslichkeit der Holzaschen von 10 bis 30 Gew.-% wasserlöslicher Bestandteile ist dagegen nur schwer zu beeinflussen. Die Überschreitung des Deponiekriteriums wird in diesem Punkt meist „hingenommen“ [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Die pH-Werte der Holzasche liegen zwischen 12 und 13,5 und damit nur leicht über den zulässigen Werten. Zudem sinkt der pH-Wert wie oben bereits beschrieben mit zunehmender Lagerungszeit. Um erhöhten Chromatanteilen im Eluat entgegenzuwirken, wären jedoch vor einer Ablagerung weitere Behandlungsschritte nötig [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Bei Holzaschen aus Anlagen, die nach 1. BImSchV genehmigt wurden und demnach ausschließlich unbehandeltes Holz verfeuerten, gilt der Zuordnungswert für Eluatgehalte von Cr (VI) neuerdings nicht mehr. Hier wird davon ausgegangen, dass die reduzierenden Bedingungen der Deponie dafür sorgen, dass Cr (VI) zu unschädlicherem Cr (III) reduziert wird und damit eine Deponierung dieser Aschen auf Hausmülldeponien unbedenklich sei [SCHÄFER 03]

Positive Beeinflussung der Eigenschaften der Holzaschen lassen sich durch folgende Maßnahmen erreichen [MARUTZKY U. SEEGER 99]:

- Verfestigung der Aschen mit z.B. Portlandzement, Puzzolane, Kalk, Gips oder Wasserglas

- thermische Nachbehandlung: in Laborversuchen konnten mit Chromat belastete Aschen durch Behandlung bei 500 bis 800°C über zwei Stunden in sauerstofffreier Atmosphäre dekontaminiert werden.
- veränderte Verbrennungsführung, so dass die Aschen partiell gesintert oder geschmolzen anfallen und die Schadstoffe somit in die Aschen eingebunden werden
- Reduzierung der Chromatanteile durch Wasser mit Hilfe der Nassentaschung. Auf diese Weise konnten Aschen mit bis zu 2 mg/l Cr-VI Eluatanteil auf bis zu  $\leq 0,1$  mg/l gebracht werden
- Reduzierung mit zusätzlichen Reduktionsmitteln, vorwiegend Aldehyde und Zucker, z.B. Formaldehyd; dabei entsteht aus dem umgesetzten Formaldehyd Formiat, während der überschüssige Anteil zu Methanol und Ameisensäure disproportioniert. Die organischen Stoffe werden im weiteren Verlauf der Ablagerung chemisch oder biologisch zu Kohlendioxid abgebaut bzw. in die Aschematrix eingebaut [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Nötig zur Reduzierung von Aschen mit Eluatwerten von 3 bis 5 mg/l Chromat sind etwa 1,5 kg Formaldehyd und 0,5 bis 1 m<sup>3</sup> Wasser auf eine Tonne Asche. Bei Feinaschen steigt der Bedarf an Reduktionsmittel auf das zwei- bis dreifache [MARUTZKY U. SEEGER 99].

#### 5.2.3.4 Sonstige Wege

Ein weiterer möglicher Nutzungsweg ist die Beimischung von Holzaschen zu Biokomposten. Hierdurch wird der Nährstoffgehalt verbessert und der pH-Wert erhöht. Das Problem der geringen Anfallmengen an Holzasche stellt sich hier nicht [MARUTZKY U. SEEGER 99]. Wie bei dem Einsatz als Sekundärrohstoffdünger können jedoch nur von den Schadstoffgehalten her unbedenkliche Verbrennungsrückstände verwendet werden.

In [POHLANDT ET AL 94] wurden außerdem Versuche zum Adsorptionsverhalten der Aschen bezüglich Schwermetallen in Abwässern untersucht. Aufgrund der Gehalte an SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und CaO besitzen die Aschen ein gewisses Adsorptionspotenzial. Theoretisch einsetzbar sind für diese Anwendung ebenfalls nur die Grobaschen, da möglichst geringe Schwermetallkonzentrationen nötig sind. Dabei besteht bei dieser Aschenfraktion der Nachteil, dass die Körner relativ grob sind (gemessene mittlere Korngröße z.B. 100 µm) und die Grobaschen für die Anwendung als Adsorptionsmittel aufgemahlen werden müssten [POHLANDT ET AL 94]. Die Adsorptionsfähigkeit der Aschen liegt besonders für Cadmium, Cobalt, Kupfer, Nickel und Blei-Ionen auf ähnlich hohem Niveau wie bei Aktivkohle. Ein Hindernis für den

Einsatz als preiswerte Alternative zu Aktivkohle ist die Erhöhung des pH-Wertes und des Salzgehaltes durch Aschen.

Für Aschen aus der Verbrennung von mit Holzschutzmitteln belastetem Gebrauchtholz schlägt [POHLANDT ET AL 94] zur Minderung der Schadstoffgehalte und Rückgewinnung der Inhaltsstoffe eine Extraktion vor. Anhand von Extraktionsversuchen mit verschiedenen Lösemitteln wurde nachgewiesen, dass insbesondere die Elemente Kupfer und Chrom gut aus den Aschen extrahierbar sind. Zur vollständigen Rückgewinnung müssen die Metalle aus dem Extraktionsmittel abgeschieden werden, während die teilweise von Schadstoffen abgereicherten Aschen weiterhin beseitigt werden müssen. Aufgrund der geringen Mengen an Asche aus einheitlich belasteten Althölzern und der preiswerten Deponierungsmöglichkeiten wird ein solches Verfahren zur Zeit nicht in der Praxis angewandt.

Ein Verfahren zur Reduzierung der erhöhten Chrom-VI- Gehalte zu Chrom-III könnte auch in der Zugabe von Holzaschen in den Faulturn von Kläranlagen bestehen [KOLB ET AL 98]. Im Faulturn findet eine anaerobe Fermentation statt. Durch die Bildung von Merkaptanen, Schwefelwasserstoff und Fe-II- Verbindungen herrschen reduzierende Bedingungen, die zum Abbau von Chromat zu Chrom-III führen. Als problematisch könnte sich dabei lediglich die Toxizität hoher Chromatgehalte für die Mikroorganismen erweisen. Schädlichkeitsschwellen für E.coli und Methanbakterien liegen bei 0,7 mg/l bzw. 1,5 mg/l Cr(VI). In [KOLB ET AL 98] wurden Versuche bei 0,3 mg/l und 0,8 mg/l Cr(VI)- Ausgangskonzentration in der Fermentationslösung durchgeführt. Trotz der Überschreitung der Schädlichkeitsschwelle wurde in beiden Fällen die Cr(VI)- Konzentration innerhalb von 7 Tagen auf unter die Nachweisgrenze (0,05 mg/l) reduziert. Zu untersuchen ist dabei noch, inwiefern der Chromat-Gehalt der Klärschlämme dabei ansteigt bzw. in welchen Mengen die Holzaschen zugegeben werden können.

### **5.2.3.5 Bilanzierung der Parameter für die Entsorgung der Aschen**

Für die Bilanzierung von Energiebedarf, Emissionen und Kosten der Ascheentsorgung/Verwertung muss zunächst die Menge an festem Rückstand bestimmt werden – soweit keine genauen Angaben der Anlagenbetreiber vorliegen. Dafür wurden aus den Literaturangaben in Tabelle 5-32 mittlere Ascheanfallmengen für die einzelnen Brennstoffarten abgeleitet:

**Tabelle 5-32:** Ascheanfallmengen, abgeleitet aus Literaturangaben

Brennstoffart	Ascheanteil in Gew.-%
Waldholz	1,6
Landschaftspflegeholz	5,0
Straßengehölz	14,0
Grünschnitt	10,0
Rinde	8,0
Sägespäne	0,7
naturbelassenes Holz ohne Rinde	1,0
Industrierestholz	5,0
Gebrauchtholz	5,0

Im Folgenden sollen Energieaufwand, Emissionen und Kosten der verschiedenen Ascheentsorgungswege ermittelt und für die Anlagenbeispiele berechnet werden. Dabei werden die von den Anlagenbetreibern angegebenen derzeitigen Entsorgungs- und Verwertungswege den außerdem noch denkbaren Verwertungsmöglichkeiten gegenüber gestellt. Die Ergebnisse der Berechnungen für die Beispiele sind in den Tabellen II-11 bis II-13 im Anhang II zusammengefasst.

#### **5.2.3.5.1 Verwertung als Sekundärrohstoffdünger in Landwirtschaft oder Forstwirtschaft**

Für die Verwendung als Sekundärrohstoffdünger sind, wie aus dem Abschnitt über die Schadstoffgehalte zu entnehmen ist, nur Grobaschen aus der Verbrennung von naturbelassenen Hölzern geeignet.

Die möglichen Ausbringmengen in der Forstwirtschaft werden sehr unterschiedlich angegeben. Begrenzender Parameter ist nach [ZOLLNER ET AL 97] bei der forstlichen Düngung der hohe basisch wirksame Anteil. Die Mengen sollten sich also in diesem Fall an den bei der Waldkalkung angestrebten Säurekapazitäten orientieren.

In Tabelle II-9 im Anhang II sind einige berechnete Ausbringmengen und in Ausbringversuchen realisierte Holzschendüngemengen angegeben. Wichtig zur Festlegung der optimalen Mengen an Sekundärrohstoffdünger sind in jedem Fall die individuellen, örtlichen Bodengegebenheiten und der Nährstoffbedarf, der sich daraus ergibt.

Als durchschnittliche Ausbringmenge für Holzaschen auf Waldflächen wird (aus der Bandbreite der Werte zwischen 10 und 1.500 kg/ha\*a) ein Wert im unteren Bereich von 200 kg/ha\*a angesetzt, um der Gefahr zu starker Beeinflussung des

ökologischen Gleichgewichts Rechnung zu tragen.

Für die Ausbringung in der Landwirtschaft ist zunächst die Einhaltung der in der Düngemittelverordnung festgelegten maximalen Schadstoffmengen nötig. Werden diese eingehalten, so wird bei Holzaschen meist der Kaliumgehalt als bestimmender Mindestnährstoffgehalt herangezogen (trotz der Phosphatgehalte der Asche spielt dieser Bestandteil eine untergeordnete Rolle, da die Phosphate in den Holzaschen nur sehr schlecht für Pflanzen verfügbar sind [POHLANDT ET AL 94]) und gemäß der durch die verschiedenen Pflanzenarten entzogenen Nährstoffe gedüngt. Für die großflächige Ausbringung der Holzaschen müsste laut [DELLER 00] eine Anerkennung als Sekundärrohstoffdünger beantragt werden. Damit verbunden wäre der Nachweis, dass die Gehalte an Nähr- und Schadstoffen in Holzaschen über längere Zeiträume gleich bleiben, und die Einordnung als eine bestimmte Sekundärrohstoffdüngerart (z.B. anorganischer PK-Dünger).

Für die pro Aschemenge nötigen Anbauflächen in der Landwirtschaft wird als Frucht der Winterweizen herangezogen. Wie aus Tabelle II-10 in Anhang II ersichtlich wird, werden knapp 40 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Getreideanbau genutzt, davon wiederum ein Großteil mit dem Anbau von Winterweizen.

Zudem ergibt sich durch die geringe Ausbringmenge für Winterweizen von 1,3 t/ha\*<sup>a</sup> eine maximale Fläche und damit eine worst-case- Abschätzung für den Aufwand der Düngernutzung.

### ***Energiebedarf der Ausbringung***

Für die Ascheverwertung als Sekundärrohstoffdünger muss der Reststoff zunächst zum Ausbringort transportiert werden. Da die Asche meist möglichst kostengünstig verwertet werden soll, wird sie für die umliegenden Felder oder Waldflächen verwendet, also für die Verwertung in der Landwirtschaft maximal 20 km, für Forstwirtschaft maximal 30 km transportiert. Für diesen Energieaufwand können die [GEMIS 99]- Daten zu Nahverkehr von LKW im Baugewerbe verwendet werden mit einem Energieverbrauch von  $2,7778 \cdot 10^{-4}$  MWh/t km (LKW-Nah-D-Bau-(mix)). Das ergibt einen Transportaufwand von 5,5 kWh/t für Verwertung in der Landwirtschaft und 8,3 kWh/t für Transport zum nächstgelegenen Wald.

Für die Ausbringung des Materials auf Felder mittels Schleuderstreuer sind ca. 11 kWh/ha nötig, bei einer Ausbringmenge von 1,3 t/ha also etwa 8,5 kWh/t Asche.

Die Ausbringung von Asche als Ersatz oder Zusatz bei der Kalkung erfolgt per Hubschrauber oder Verblasegerät, wobei die Ausbringung aus der Luft standardmäßig angewandt wird, da hierbei das Material gleichmäßiger verteilt werden kann [SCHWEINLE 00A]. Dabei werden pro Tonne Kalk für den Hubschrauber 73-91 kWh (8 bis 10 Liter Flugbenzin) und für das Verblasegerät etwa 140 kWh

(14 Liter Treibstoff) benötigt [MAXIT 00]. Das sehr feine Material muss zur besseren Handhabung bei Ausbringung per Hubschrauber granuliert werden. [MAXIT 00] gibt für die Granulierung einen Energiebedarf von 17 m<sup>3</sup> Erdgas pro Tonne Kalk an, was etwa 170 kWh/ t entspricht. Daraus ergibt sich ein Energieeinsatz von 250 kWh/t Asche. Nach [SCHWEINLE 00A] sind dagegen bei der Kalkung per Hubschrauber zwischen 15,3 und 22,5 kWh/t Kalk Energieeinsatz nötig – wobei mit diesen Größenordnungen kein Granulierungsschritt in die Betrachtungen mit einbezogen sein dürfte.

In der Summe sind für die Verwendung in der Landwirtschaft 14 kWh/t Asche, für die Verwendung in der Forstwirtschaft 250 kWh/t nötig.

### **Emissionen**

Bei der Verwendung von Asche als Sekundärrohstoffdünger oder bei der Kalkung entstehen Emissionen vorwiegend beim Transport und durch den Energieeinsatz bei der Aufbereitung. Partikelemissionen durch Verwehungen oder beim Schüttgutumschlag werden hier vernachlässigt. Für die Verwendung in der Landwirtschaft sind werden folgende Mengen emittiert:

**Tabelle 5-33:** Emissionen bei Verwendung in der Landwirtschaft mit 1,3 t Asche/ha

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[KALTSCHMITT U. REINHARDT 97] Schlepper	0,0031 kg/ha d.h. 2,4 g/t	0,0336 kg/ha d.h. 26,0 g/t	0,0025 kg/ha d.h. 1,9 g/t	2,9157 kg/ha d.h. 2,243 kg/t	0,014 kg/ha d.h. 11,0 g/t
[GEMIS 99]LKW-Transport Nahverkehr	0,135 g/kWh	2,61 g/kWh	0,09 g/kWh	0,241 kg/kWh	0,51 g/kWh
mit 5,5 kWh/t Transport folgt gesamt	0,0031 kg/t	0,0403 kg/t	0,0024 kg/t	3,569 kg/t	0,0138 kg/t

Für die Ausbringung zur Kalkung von Waldflächen ergibt sich folgendes:

**Tabelle 5-34:** Emissionen bei Verwendung in der Forstwirtschaft

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
Erdgas	0,007 g/m <sup>3</sup> Gas	1,8 g/m <sup>3</sup> Gas	0,27 g/m <sup>3</sup> Gas	1.900 g/m <sup>3</sup> Gas	0,34 g/m <sup>3</sup> Gas

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[SCHWEINLE 00A] Hubschrauber mit Flugbenzin	0,15 g/l Flugbenzin	8,25 g/l	0,75 g/l	2.363 g/l	1,2 g/l
[GEMIS 99]LKW- Transport Nahverkehr	0,135 g/kWh	2,61 g/kWh	0,09 g/kWh	241 g/kWh	0,51 g/kWh
mit pro t Asche: 17m <sup>3</sup> Erdgas; 82 l Flugbenzin und 8,3 kWh LKW- Transport folgt gesamt	0,0135 kg/t	0,729 kg/t	0,0668 kg/t	228,07 kg/t	0,108 kg/t

### **Kosten bzw. Preise**

Zu berücksichtigen sind Aufwendungen für Transport, Aufbereitung und die Ausbringung selbst.

Ähnlich wie beim Klärschlamm-Transport [RENTZ ET AL 99] werden Speditionsunternehmen für den Transport beauftragt. Nach Angaben der Transporteure kommen dabei auf 100 Vollfahrten 25 Leerfahrten. [RENTZ ET AL 99]

**Tabelle 5-35:** Abschätzung der Transportpreise für den Aschetransport

Entfernung [km]	bis 10	20	30	50	100	200	300
Transportpreis [€/t]	2,1	2,4	2,8	3,9	6,3	10,8	15,0

Die Abschätzung der Transportpreise wurde durch einen Vergleich der Richtpreistabelle KURT aus dem Jahr 1995 (, der Abschätzung der Transportkosten Steigerung zwischen 1995 und 2000 (insgesamt + 12,76 %) von [BGL 00] und Preisangaben von Transportunternehmern erreicht.

Die Transportpreise liegen beim Aschetransport bezogen auf das transportierte Gewicht deutlich niedriger als beim Transport von Holzhackschnitzeln. Das liegt daran, dass beim Transport per LKW und Schüttgutcontainer per Schüttkubikmeter Material, also nach Volumen abgerechnet wird, und bei der Asche durch die höhere Dichte eine größere Masse pro Volumeneinheit bewegt wird.

Für den Transport zur Verwertung in der Landwirtschaft müssen so 2,4 €/t (20km), für die Verwertung in der Forstwirtschaft 2,8 €/t (30km) aufgewendet werden.

Nach [RÖSCH 96] und [MARUTZKY U. SEEGER 99] entstehen an Kosten für die Ascheaufbereitung etwa 10-41 €/t – hier wird daher mit 10 €/t für die einfache Aufbereitung

durch Abscheiden der Störstoffe für die Verwendung in der Landwirtschaft und mit 41 €/t bei Granulieren des Materials für die Ausbringung per Hubschrauber gerechnet.

In [RÖSCH 96] wird für die Aschen aus Rinde, Sägespänen und Hackgut ein mittlerer Düngerwert von 78 €/t TS angegeben, der tatsächliche Düngerwert liegt jedoch aufgrund der eingeschränkten Pflanzenverfügbarkeit von Phosphat um ca. 20 % darunter, also bei etwa 61 €/t TS. [MARUTZKY U. SEEGER 99] gibt dagegen einen Düngerwert von 87 €/t Asche an.

Für die Verwertung der Asche als Sekundärrohstoffdünger in der Landwirtschaft ergibt sich zusammen mit der Gutschrift für den Düngerwert der Asche von -74 €/t und den Kosten für die Ausbringung mit landwirtschaftlichem Schlepper von 8,4 €/ha d.h. 6,4 €/t<sup>1</sup> rein rechnerisch ein Gewinn von 55 €/t Asche. Da in der Praxis jedoch lediglich die Kosten für konventionellen Dünger eingespart werden, ohne für die Asche zusätzlich zu bezahlen, wird hier von einer kostenneutralen Verwertung ausgegangen.

Die Ausbringung per Hubschrauber für forstliche Zwecke kommt allein durch den erhöhten Treibstoffeinsatz und den erforderlichen Granulierungsschritt deutlich teurer. Mit etwa 15 €/ha, also 77 €/t für die Ausbringung ergibt sich insgesamt ein Kostenaufwand von etwa 46 €/t Asche.

### **5.2.3.5.2 Verwertung als Bergversatzmaterial**

Eine gängige Alternative für die Entsorgung auf Deponien ist für Materialien, die nicht zur Düngung von Feld- oder Waldböden geeignet sind, die Verwertung als Bergversatzmaterial.

#### **Energieaufwand**

Da die Verwertung als Bergversatzmaterial nur in dafür geeigneten Bergwerken stattfinden kann, muss die Asche in diesem Fall relativ weit transportiert werden, um z.B. in Salzbergwerken in Thüringen eingesetzt werden zu können. Daher wird hier von einer mittleren Entfernung von 300 km ausgegangen, die zu einem Energiebedarf für den Transport von 73 kWh/t Asche führt.

Die Verbringung des Materials untertage kann auf folgende Art und Weise erfolgen:

- Einbringung per *hydraulischem Versatz*: Vermischen mit anderen Versatz-

---

<sup>1</sup> mit 1,3 t/ha\*a Ausbringmenge auf Winterweizenfelder



stoffen und Wasser; Einpumpen in den Hohlraum; Energiebedarf vorwiegend über Fördermittel (Dieselantrieb);

- Einbringung per *Big Bag*: Versatz mit anderen Versatzstoffen und Wasser; Einfüllen in Big Bags; Transport der Big Bags in den Hohlraum; Energiebedarf ebenfalls aufgrund des Transports (Dieselantrieb).

Für die Verbringung untertage wurde von [GSES 00] ein Durchschnittswert von 24,5 kWh/t (2,06 kg Diesel/t Asche ) angegeben.

Insgesamt liegt also der Energieaufwand bei etwa 98 kWh/t Asche.

### **Emissionen**

Auch hier entstehen die Emissionen vorwiegend durch den Verbrauch an Treibstoff zum Transport des Materials.

**Tabelle 5-36:** Emissionen bei Verwertung im Bergversatz

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[HAMMEL 00] Dieselmotor	0,2 g/kWh	9,0 g/kWh	0,084 g/kWh	265 g/kWh	1,6 g/kWh
[GEMIS 99]LKW- Transport Fernverkehr:	0,103 g/kWh	2,73 g/kWh	0,10 g/kWh	264 g/kWh	0,55 g/kWh
mit 73 kWh/t für Transport und 24,5 kWh/t für Offroad folgt gesamt	0,012 kg/t Asche	0,420 kg/t Asche	0,009 kg/ t Asche	25,765 kg/t Asche	0,079 kg/t Asche

### **Kosten bzw. Preise**

Für den Transport müssen laut Tabelle 5-35 15 €/t (300 km) berechnet werden. Hinzu kommt die Annahmgebühr beim Bergwerk, die bereits die Kosten für die Aufbereitung enthält, mit 51-153 €/t [ZADLER 98] – es wird mit durchschnittlich 102 €/t gerechnet. Das ergibt einen Aufwand für die Entwertung als Bergversatzmaterial von 117 €/t.

#### **5.2.3.5.3 Entsorgung auf Deponien**

Der vorherrschende Entsorgungsweg der Aschen aus der Holzverbrennung ist bislang die Beseitigung auf Deponien. Grund dafür sind meist auch die geringen

Mengen, die die Verwertungswege als unwirtschaftlich erscheinen lassen. Gerade bei den Flugaschen und Feinstflugaschen, sowie bei den Aschegemischen, werden aber auch Bedingungen bezüglich der Schadstoffgehalte nicht erfüllt.

### **Energiebedarf bei Entsorgung auf Deponien**

Zur Bestimmung der Transportwege zur Entsorgung auf Deponien wurden - sofern keine Angaben der Anlagenbetreiber vorlagen – je nach erwarteter Schadstoffbelastung der Aschen mittlere Entfernungen abgeschätzt.

**Tabelle 5-37:** Abschätzung der mittleren Transportentfernungen

Entsorgungsweg	mittlere Transportentfernung	Annahmen
Hausmülldeponie	Entfernungsklassen I nah: ≤ 10 km II mittel: ≤ 50 km III fern: ≤ 100 km	
Bodenaushub- und Bauschuttdeponie	≤ 20 km	
Sondermülldeponie	Deponien in Billigheim (BW), Raindorf (BY), Gallenbach (BY) und Gerolsheim (RP)	jeweils kürzester Entsorgungsweg

Mit dem in [GEMIS 99] angegebenen Energiebedarf für LKW-Transport (LKW-Nah-D-Bau-(mix)) im Nahverkehr von  $2,7778 \cdot 10^{-4}$  MWh/t km und im Fernverkehr von  $2,4306 \cdot 10^{-4}$  MWh/t km (LKW-Fern-D-Bau-(mix)) ergibt sich für die einzelnen Anlagenbeispiele folgendes:

**Tabelle 5-38:** Energieaufwand für den Aschetransport zu den Deponien

Anlagenbeispiel	Aschefraktion	Deponieart	Entfernung zw. Feuerungsanlage und Deponie [km]	Energieaufwand [kWh/tAsche]
Gemeinde Bodnegg	alles	Hausmülldeponie	20	5,6
Gemeinde Dunningen	alles	Hausmülldeponie	20	5,6
Stadt Nagold	alles	Hausmülldeponie	20	5,6
Landkreis Heilbronn	alles	Hausmülldeponie	20	5,6
Metzingen	alles	Hausmülldeponie	20	5,6
Gemeinde Hohentengen	alles	Hausmülldeponie	20	5,6
HW Müllheim	Zyklonasche	Sondermülldeponie	262	63,7

Anlagenbeispiel	Aschefraktion	Deponieart	Entfernung zw. Feuerungsanlage und Deponie [km]	Energieaufwand [kWh/tAsche]
RindenHKW Oberrot	alles	Hausmülldeponie	20	5,6
IKW Baienfurt	alles	Sondermülldeponie	166	40,3

### Emissionen

Die Emissionen aus dem Transport sind pro Tonne Asche in Tabelle 5-39 dargestellt.

**Tabelle 5-39:** Emissionen für den Aschentransport zur Deponie

Schadstoff	Partikel	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> fossil	CO
[GEMIS 99]LKW-Transport					
Nahverkehr:	0,135 g/kWh	2,61 g/kWh	0,09 g/kWh	241 g/kWh	0,51 g/kWh
Fernverkehr:	0,103 g/kWh	2,73 g/kWh	0,10 g/kWh	264 g/kWh	0,55 g/kWh
für den Transport zur Hausmülldeponie (5,6 kWh/t)	0,0008 kg/ t Asche	0,015	0,0005	1,350	0,003
HW Müllheim: 63,7 kWh/t	0,007	0,174	0,006	16,82	0,035
IKW Baienfurt 40,3 kWh/t	0,004	0,110	0,004	10,64	0,022

### Kosten bzw. Preise

Für die Kosten des Transports können wieder die in Tabelle 5-35 genannten Transportpreise herangezogen werden. Dazu kommen die von den Deponiebetreibern geforderten Annahmegebühren. Für Hausmülldeponien liegen diese Gebühren im Schnitt bei 153 €/t<sup>2</sup>, während für die Sondermülldeponien allgemein zwischen 230 und 460 €/t<sup>3</sup> verlangt werden, speziell sind es derzeit in Billigheim<sup>4</sup>: 250 €/t und in Gallenbach: 189 €/t. Es werden daher durchschnittlich 230 €/t Annahmegebühr für die Entsorgung von Asche als Sondermüll angenommen.

Insgesamt ergeben sich für die einzelnen Anlagenbeispiele folgende Kosten pro Tonne Asche:

<sup>2</sup> [LKLÖRRACH 97]

<sup>3</sup> [ZADLER 98]

<sup>4</sup> [SBW 00], [GSB 00] jeweils Anlieferung in BigBags

**Tabelle 5-40:** Kosten pro Tonne Asche für die Deponieentsorgung

<b>Anlagenbeispiel</b>	<b>Entfernung/ Kosten für den Transport</b>	<b>Annahmegebühren</b>	<b>Gesamtkosten Deponieentsorgung</b>
Gem. Bodnegg, Dunningen, Stadt Nagold, Lkr. Heilbronn, Metzingen, Hohentengen, HKW Pforzheim, RindenHKW Oberrot	20 km / 2,40 €/t	153 €/t	156 €/t
HW Müllheim	262 km / 13,40 €/t	230 €/t	243 €/t
IKW Baienfurt	166 km / 9,27 €/t	230 €/t	239 €/t

## 6 Ergebnisse der Prozesskettenberechnung

Die Ergebnisse der Berechnung des kumulierten Energieaufwandes (KEA), der Emissionen und Kosten für die gesamten Prozessketten der Anlagenbeispiele sind in den Abbildungen II-3 bis II-18 zusammengefasst. Um den KEA, die Emissionen und die Kosten bzw. Investitionen der Anlagen miteinander vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse jeweils auf die Jahresmenge an Holz- Input oder auf die erzeugte Wärme- und Strommenge bezogen.

Darüber hinaus sind in den Abbildungen II-19 bis II-23 Vergleiche der Systeme mit Holzenergienutzung mit den konventionellen Pendants auf der Grundlage der ausschließlichen Nutzung fossiler Energieträger dargestellt.

### 6.1 Vergleich der Optionen für energetische Holznutzung

Im folgenden werden die verschiedenen energetischen Nutzungsmöglichkeiten für die Ressource Holz hinsichtlich des kumulierten Energieaufwands, der Emissionen an Kohlenmonoxid, Stickoxiden, Schwefeldioxid, Staub und fossilem Kohlendioxid, sowie hinsichtlich der spezifischen Investitionen und Wärmegestehungskosten miteinander verglichen.

#### 6.1.1 Kumulierter Energieaufwand

In den Abbildungen II-3 und II-4 sind die Ergebnisse der Berechnung des kumulierten Energieaufwands über die gesamte Prozesskette für die Anlagenbeispiele dargestellt, wobei die aufzuwendende Energie auf den gesamten Output an Wärme und Strom bezogen wurde. Die Ergebnisse liegen allgemein zwischen 1,15 und etwa 1,7 MWh/MWh Output, d.h. dass etwa das 1,15 bis 1,7- fache an Energie aufgewendet werden muss, um die gewünschte Energiemenge zu liefern.

Dabei besteht die aufzuwendende Energie bei den kommunalen Heizwerken mit Holz- Grundlastversorgung zu über 60 % aus erneuerbarer Energie, nämlich dem Energieträger Holz. Der restliche Energieaufwand teilt sich in 10-30 % fossile Energieträger Öl oder/und Gas und bis zu ca. 3 % Bereitstellung der fossilen Energieträger. Die Bereitstellung des Holzes und die Ascheentsorgung sind mit unter 5 % Anteil am KEA kaum relevant. Einen besonders hohen Anteil an erneuerbarem KEA zeigt die Prozesskette der Anlage in Bodnegg, wo besonders wenig fossile

Energie zusätzlich benötigt wird. Wo der Anteil an fossiler Energienutzung niedrig liegt, ist auch tendenziell der absolute Wert des KEA niedriger.

Bei den kommunalen Heizwerken mit Holzenergienutzung für den Mittellast-Wärmebedarf liegt der Anteil des fossilen Energieaufwands entsprechend dem höheren Einsatz an Öl und Gas bei 45 bis 65 %, während die erneuerbare Energie aus Holz 30 bis 55 % des KEA ausmacht.

Bei der Fernwärmeversorgung mit Holzenergienutzung in Rotenbachtal und Müllheim zeigen sich relativ große Unterschiede der KEA- Werte. In Müllheim besteht der aufzuwendende KEA zu über 80 % aus erneuerbarer Energie, wobei durch die Verwendung von 100% Waldholz auch die Holzbereitstellung einen im Vergleich zu den anderen Prozessketten hohen Beitrag liefert, der allerdings immer noch bei etwa 5 % liegt. Für das Fernheizwerk Rotenbachtal ist durch die stärkere Nutzung an fossiler Energie der Anteil an erneuerbarem KEA geringer, insgesamt liegt der Energieaufwand jedoch unter dem für die Fernwärmebereitstellung in Müllheim.

Der hohe KEA- Wert für Pforzheim wird zu etwa 85 % durch die Bereitstellung und den Input an fossilen Energieträgern geliefert. Dagegen wird für die Energiebereitstellung in den Anlagen Oberrot und Oberstetten zu über 95 % erneuerbare Energie aufgewendet.

Insgesamt zeigt sich die Tendenz, dass bei den kleineren Anlagen zur Nahwärmenutzung der kumulierte Energieaufwand dann zunimmt, wenn mehr fossile Energie genutzt wird. Bei den Anlagen mit höherer installierter Leistung, bei denen durch bessere Optimierungsmöglichkeiten eine effektivere Brennstoffenergieausnutzung und damit niedrigere KEA zu erwarten wären, liegen die KEA- Werte in einem ähnlichen Bereich. Einflüsse auf den Brennstoffnutzungsgrad, die diese relativ hohen KEA- Werte erklären könnten, sind z.B. der Anteil an (stets mit geringerem Wirkungsgrad verbundener) Stromerzeugung, Verluste im Fernwärmenetz, Art des Brennstoffs und Schwankungen in dessen Beschaffenheit und Zusammensetzung, Anzahl der An- und Abfahrvorgänge etc.

### **6.1.2 Kohlenmonoxid- Emissionen**

In den Abbildungen II-5 und II-6 sind die CO- Emissionen der Prozessketten dargestellt, bezogen auf die jährliche Menge an Holz-Input. Die spezifischen Emissionen liegen in einer sehr weiten Bandbreite zwischen 0,2 und 4,9 kg CO/t Holz. Mit Ausnahme der Prozessketten für Pforzheim und Müllheim entsteht der größte Teil der Emissionen (bis zu > 95 %) bei der Verbrennung des Holzes. In Pforzheim überwiegt durch den großen Anteil an fossilen Energieträgern am Energie-Input der Emissionsanteil aus der Verbrennung von Steinkohle. In Müllheim liegen die CO- Emissionen allgemein sehr niedrig, zugleich wird aber mit der

ausschließlichen Nutzung von Waldholz relativ viel Energie zur Brennstoffbereitstellung benötigt, so dass die Holz- Bereitstellung über 70 % der CO-Emissionen verursacht.

Da die CO- Emissionen also sehr stark mit den Emissionen aus der Holzfeuerung korrelieren, liegen sie mit Ausnahme der Anlagen in Metzingen und Pforzheim bei Prozessketten mit kleinen Feuerungsanlagen deutlich höher als bei größeren Feuerungen.

### 6.1.3 Stickoxid- Emissionen

Die Stickoxid- Emissionen der gesamten Prozesskette sind für die Anlagenbeispiele in den Abbildungen II-7 und II-8 dargestellt. Die spezifischen Emissionswerte liegen zwischen 1,7 kg NO<sub>x</sub> /t Holz und 3,6 kg NO<sub>x</sub> /t Holz, wobei die Prozesskette in Pforzheim bis zu 6,2 kg NO<sub>x</sub>/t Holz verursacht. Die Emissionen werden - mit Ausnahme von Pforzheim – überwiegend durch die Holz- Verbrennung verursacht, wobei im Gegensatz zu den CO- Emissionen hier die Holz- Bereitstellung mit bis zu 30% Anteil bereits bei Prozessketten mit hohem Energieaufwand für die Bereitstellung, wie z.B. Müllheim, ins Gewicht fällt. Die niedrigsten NO<sub>x</sub>- Emissionen zeigen hier die Prozessketten für Rotenbachtal und Müllheim, während die für Oberrot, Oberstetten und Baienfurt evtl. aufgrund höherer Stickstoffeinträge mit dem Brennstoff bei Industrierestholz und Gebrauchtholz- Nutzung höher liegen. Von den Prozessketten der kleineren Feuerungsanlagen werden tendenziell höhere NO<sub>x</sub>- Emissionen verursacht, wobei vor allem Dunningen und Metzingen erhöhte Werte haben. In Dunningen wird ein deutlich höherer NO<sub>x</sub>- Anteil durch die Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Die erhöhten Stickoxidemissionen in Metzingen können mit den relativ niedrigen CO- Emissionen der Feuerungsanlage zusammenhängen, wenn durch erhöhte Feuerraumtemperaturen zwar ein besserer Ausbrand, aber zugleich höhere Stickoxidemissionen erzielt werden.

### 6.1.4 Schwefeldioxid- Emissionen

Die Schwefeldioxid- Emissionswerte für die Prozessketten sind in Abbildung II-9 im Anhang zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die SO<sub>2</sub>- Emissionen mit der Verwendung von Steinkohle und Heizöl steigen, während aus der reinen Holzverbrennung nur Emissionen kleiner 0,5 kg/t Holz resultieren. Dementsprechend zeigt Pforzheim den höchsten Emissionswert mit über 5 kg/t Holz.

### 6.1.5 Staub- Emissionen

Die Emissionsfrachten in Abbildung II-10 liegen bei sehr unterschiedlichen Größenordnungen. Überraschend ist dabei die hohe Emissionsfracht der Prozesskette für Oberrot, die vermutlich zum einen aus dem insgesamt im Vergleich zu den anderen Beispielanlagen sehr hohen Holz- Input von 140.000 t Holz pro Jahr und zum anderen durch die Verwendung eines Elektro-Abscheiders mit 23 mg/m<sup>3</sup> und einem daraus resultierenden relativ hohen Emissionsfaktor verursacht wird. Die hohe Staub- Emissionsfracht für Pforzheim ist dagegen aufgrund der ebenfalls sehr hohen Aktivität und einer reinen Feststofffeuerung mit Steinkohle plausibel. Die im Vergleich zu Rotenbachtal hohe Emissionsfracht für Müllheim lässt sich mit dem hohen Emissionsfaktor (100 mg/m<sup>3</sup>) aufgrund der Rauchgasreinigung mit einem Multizyklon ohne weitere Staubminderungsmaßnahme erklären.

Aus den Darstellungen der Staub- Emissionen bezogen auf die Tonne Holz- Input (Abbildungen II-11 und II-12) wird deutlich, dass die Staubemissionen wie die Emissionen an Kohlenmonoxid und Stickoxiden ebenfalls überwiegend aus der Verbrennung des Holzes stammen. Ausnahmen bilden hierbei die Prozessketten in Oberrot, Pforzheim und Baienfurt. Dabei haben in Oberrot und Baienfurt die Holzbereitstellung, Ascheentsorgung bzw. die Verbrennung fossiler Brennstoffe deshalb einen prozentual hohen Einfluss, weil die Staub- Emissionen insgesamt sehr niedrig liegen. In Pforzheim überwiegt dagegen deutlich die Emission aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, was bei Steinkohlefeuerungen zu erwarten ist.

Die höchsten spezifischen Staub- Emissionen sind mit 0,6 bis 1,3 kg/t Holz bei den Prozessketten der kleineren Anlagen zu finden. Dabei kann in Heilbronn mit der Rauchgaskondensationsanlage ein relativ niedriger Wert erzielt werden.

Bei den Prozessketten mit größeren Anlagen liegen die spezifischen Staub- Emissionswerte allgemein unterhalb von 0,5 kg/t Holz, mit Ausnahme der Anlage in Müllheim, deren Staub- Emissionswert durch die ausschließliche Verwendung eines Zyklons in den Bereich der kleineren Anlagen kommt.

Die Staub- Emissionswerte der Prozessketten lassen sich also vorwiegend durch die Wahl der Staubabscheidemaßnahmen der Feuerungsanlage beeinflussen.

### 6.1.6 Emissionen an Kohlendioxid

Da der Energieträger Holz als CO<sub>2</sub>- neutral betrachtet wird und daher keine klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht, sind auch die Kohlendioxid-Emissionen der Prozessketten nur vom Einsatz an fossilen Energieträgern abhängig. Die Abbildungen II-3 und II-4 im Anhang II zeigen deutlich, dass die bei der Holz-



Bereitstellung oder der Ascheentsorgung verbrauchten Mengen an fossiler Energie keine Rolle spielen im Vergleich zum fossilen Energieeinsatz für Spitzenlastkessel oder Mitverbrennung.

### 6.1.7 Spezifische Investitionen

Die niedrigsten spezifischen Investitionen bezogen auf den jährlichen Holz- Input lassen sich mit der Mitverbrennung in dem Heizkraftwerk in Pforzheim realisieren (vgl. Abbildung II-15, Anhang II), gefolgt von den Industrieheizkraftwerken in Oberstetten und Oberrot, welche trotz höherer Investitionen durch die zur Stromerzeugung nötigen Anlagenteile ebenso wie Pforzheim unter 0,26 T€/ t Holz bleiben. Dies lässt sich durch Synergieeffekte mit den in Oberstetten und Oberrot vorhandenen holzverarbeitenden Betrieben erreichen, indem durch z.B. bereits vorhandene Brennstoffsilos die Investitionen niedrig gehalten werden können.

Die spezifischen Investitionen pro t Holz für Rotenbachtal, Müllheim und Bodnegg liegen im Bereich von etwa 0,6 T€/ t Holz. Bei den kleineren Anlagen mit Nahwärmenutzung schwanken die hier dargestellten spezifischen Investitionen auch durch die unterschiedliche Berücksichtigung der Investitionen für die Nahwärmenetze. Zum einen wurde nicht überall eine Netzinstallation mitgerechnet, da z.T. bereits bestehende Netze verwendet werden konnten. Zum anderen hat die Länge der Nahwärmenetze einen entscheidenden Einfluss – die Investitionen werden pro Meter verlegter Netzleitung berechnet. Somit wird in Dunningen mit 500 m Trassenlänge eine höhere Investition nötig als für die anderen Anlagen, deren Nahwärmenetze unter 300 m Länge liegen bzw. bereits vorhanden sind.

Während sich die Verhältnisse der spezifischen Investitionen pro t Holz bei den kommunalen Holzfeuerungsanlagen direkt auf die pro MWh Wärme-Output bezogenen Investitionen übertragen lassen, verschieben sich bei den Anlagen in Oberrot und Oberstetten, sowie bei den Fernwärmeheizwerken die Verhältnisse. Bezogen auf den Holz- Input haben Rotenbachtal und Müllheim etwa gleiche spezifische Investitionen, die auf die erzeugte Wärmemenge bezogene Investition in Rotenbachtal liegt jedoch deutlich niedriger. Dies kann durch den höheren KEA-Wert in Müllheim und der damit geringeren Brennstoffausnutzung erklärt werden. Außerdem wurden in Rotenbachtal durch nur geringfügig höhere Investitionen zusätzliche Kessel zur fossilen Energienutzung mit größeren Leistungen (therm. Leistung insgesamt Rotenbachtal > 24 MW<sub>th</sub> – Müllheim 6,6 MW<sub>th</sub>) installiert und mit diesen zusätzliche Wärme produziert. Die spezifischen Investitionen in Oberstetten und Oberrot, die bezogen auf den jährlichen Holzeinsatz noch relativ nah beieinander liegen, sind bezogen auf die erzeugte Wärmemenge sehr unterschiedlich. Dies liegt daran, dass in den beiden Industriekraftwerken in sehr

unterschiedlichen Verhältnissen Strom und Wärme produziert werden: in Oberrot liegt das Verhältnis an Output Strom zu Output Wärme bei etwa 1: 10, während in Oberstetten dieses Verhältnis bei 1: 1,4 liegt und somit mit ähnlichen spezifischen Investition pro t Holz deutlich weniger Wärme produziert wird.

### **6.1.8 Wärmegestehungskosten**

In Abbildung II-17 und II-18 sind die Wärmegestehungskosten - ohne bzw. mit Gutschrift für den Erlös aus der Stromeinspeisung – dargestellt. Es zeigt sich, dass die Wärmegestehungskosten für Kleinanlagen mit zwischen 0,046 und 0,071 €/kWh durchweg deutlich höher liegen, als die für die Fernheizwerke (0,03 bis 0,04 €/kWh) und die Industriekraftwerke (0,01 bis 0,024 €/kWh). Der größte Kostenanteil wird durch die Annuität gestellt, weshalb die Verhältnisse der Investitionen sich auch in den Wärmegestehungskosten wiederfinden. Neben der Annuität spielen noch die Brennstoffkosten für Holz und die betriebsabhängigen Kosten, die hier die fossilen Brennstoffkosten, Betriebsmittelkosten, fixe Kosten und Personalkosten enthalten, eine Rolle. Ascheentsorgungskosten gewinnen nur dort an Bedeutung, wo die Aschemengen besonders hoch sind, wie z.B. in Metzingen durch den Einsatz von Grünschnitt (10% Asche- und mineralische Verunreinigungen) oder in Oberstetten und Oberrot durch den Einsatz von Rinde.

## **6.2 Vergleich mit fossiler Energieerzeugung**

Im Folgenden werden die Beispielanlagen zur Holzenergienutzung mit ihren konventionellen Alternativen verglichen, die zur Bereitstellung der jeweils benötigten Wärme- und Strommengen genutzt werden könnten. Die Daten zur Berechnung der Vergleichssysteme sind aus [GEMIS 00] entnommen, wobei auch die entsprechenden Vorketten und „Nachketten“ zur Bereitstellung der fossilen Energieträger und zur Ascheentsorgung im Falle fester Brennstoffe berücksichtigt wurden. Die Daten über Investitionen und Kosten der in [GEMIS 00] beschriebenen Prozesse sind nur unter Vorbehalt mit den Ergebnissen aus den hier betrachteten Beispielen vergleichbar. Aus den [GEMIS 00]- Daten geht nicht hervor, auf welcher Grundlage (Betreiberangaben, Abschätzungen, Statistiken, Bilanzgrenzen, z.B. Einbeziehen der Wärmenetze) und unter welchen Annahmen (z.B. Zinssatz etc.) die Investitionen und Kosten berechnet wurden. Besonders bei generischen Daten, wie z.B. einem „Durchschnittsheizwerk“ für Deutschland, ist damit nicht sicher, inwiefern es mit real existierenden bzw. speziell den hier betrachteten Anlagen vergleichbar ist. Daher wurden, sofern Daten über Holzheiz(kraft)werke in [GEMIS 00] vorhanden waren,

diese in den Vergleich mit einbezogen, um eine Gegenüberstellung auch zwischen nach [GEMIS 00] berechneten Holzanlagen und den in dieser Arbeit erhobenen Daten anstellen zu können.

### **6.2.1 Kommunale Nahwärmeversorgung mit dem Holz- Grundlast-System**

In Abbildung II-19 sind die Ergebnisse des Vergleichs der Holz- Grundlast- Systeme mit Heizwerken auf der Grundlage von Erdgas und Heizöl EL- Feuerungen dargestellt.

Der *kumulierte Energieaufwand* der konventionellen Systeme mit ausschließlich fossiler Energienutzung liegt mit etwa 1,3 MWh/MWh Output im gleichen Bereich wie der der Holzenergiesysteme (1,15-1,5 MWh/MWh Output), wobei Bodnegg sich durch besonders geringen Energieeinsatz bei der Bereitstellung des Holzbrennstoffs und damit auch einen geringeren KEA- Wert auszeichnet. Zu beachten ist dabei, dass über 60 % des Energieaufwands bei den Holzenergiesystemen aus erneuerbarer Energie besteht.

Die fossil bedingte *Kohlendioxid- Emissionen* liegen für die Holzenergiesysteme bei etwa der Hälfte der Energiebereitstellungssysteme mit ausschließlich fossilen Energieträgern, wiederum mit Ausnahme von Bodnegg, das im Verhältnis zu den anderen Holzenergiesystemen nochmals um die Hälfte weniger Kohlendioxid-Emissionen verursacht. Diese Kohlendioxid- Emissionen werden überwiegend aus der Feuerung fossiler Energieträger zur Abdeckung der Spitzenlast emittiert und nur zu einem vernachlässigbar geringen Anteil durch Holzbereitstellung bzw. Ascheentsorgung erzeugt.

Die *Emissionen an Staub, Stickoxiden und Kohlenmonoxid* der Holzenergiesysteme liegen um ein Vielfaches über denen der Erdgas- oder Heizöl EL- Systeme. Bei den *Schwefeldioxid- Emissionen* spielt der Schwefelanteil im Brennstoff die entscheidende Rolle, dementsprechend erreicht ein Heizwerk mit Heizöl EL höhere, ein Heizwerk mit Erdgas niedrigere Emissionswerte als Holzenergiesysteme.

Abbildung II-24 im Anhang II zeigt einen Vergleich der *spezifischen Investitionen* (bezogen auf die thermische Leistung der Anlagen) zwischen Holzheizwerken und fossil befeuerten Heizwerken für die Nahwärmeversorgung. Die in [GEMIS 00] enthaltenen Daten zu Heizwerken liegen dabei deutlich über den in dieser Arbeit erhobenen bzw. berechneten. Demzufolge ergibt sich im Vergleich der „GEMIS- Holzheizwerke“ zu den „GEMIS- fossilen Heizwerken“ ein erheblicher Unterschied. Die spezifischen Investitionen liegen in diesem Fall für Holzheizwerke etwa doppelt so hoch wie für fossile Anlagen. Im Gegensatz dazu zeigt ein Vergleich der von [IBS 00] für fossil befeuerte Anlage und Holzfeuerung in Hohentengen berechneten

spezifischen Investitionen, dass der Unterschied nur sehr gering ausfallen kann. Allgemein liegen die spezifischen Investitionen für fossile Heizwerke unter denen der Holzfeuerungen mit Holz- Grundlastkessel. Die Größe dieser Differenz ist jedoch vom Einzelfall abhängig. Grund für die erhöhten Investitionen bei Holzfeuerungen können z.B. höhere Aufwendungen für Lagerräume sein – durch die geringere Energiedichte sind größere Lager nötig. Auch aufwändigere Brennstoffzuführung und höhere Preise für die Kessel ist eine Ursache für erhöhte Investitionen.

In Abbildung II-25 sind *Betriebskosten*<sup>1</sup>, *Brennstoffkosten* und *Wärmegestehungskosten* einander gegenüber gestellt. Die Betriebskosten der fossil befeuerten Heizwerke liegen tendenziell unterhalb denen für Holzheizwerke, was z.B. durch den erhöhten Wartungsaufwand bei Holzfeuerungen erklärbar ist. Bei Betriebskosten für fossil befeuerte Anlagen und Holzanlagen, die auf der gleichen Grundlage berechnet wurden, ist die Differenz zwischen diesen beiden Optionen vergleichsweise gering.

Die spezifischen Brennstoffkosten liegen für Holzfeuerungen deutlich unterhalb derer für fossil befeuerte Anlagen. Da die hier dargestellten Daten noch vor Einführung der Ökosteuer und dem Preissprung der Öl- und Gaspreise von Ende des Jahres 2000 datieren, dürfte diese Differenz in letzter Zeit noch größer geworden sein.

Die Wärmegestehungskosten, bezogen auf kWh- produzierte Wärme, sind nach Abbildung II-25 für fossil befeuerte Heizwerke geringer als für Holzfeuerungen. Durch die höheren Preise fossiler Brennstoffe in jüngster Zeit haben sich diese Verhältnisse zugunsten der Holzfeuerungen verschoben. Die Differenz zwischen fossil und mit erneuerbaren Brennstoffen befeuerten Heizwerken ist somit zumindest kleiner geworden, wenn nicht die Wärmegestehungskosten in Einzelfällen sogar gleich sind.

### **6.2.2 Kommunale Nahwärmeversorgung mit dem Holz- Mittellast- System**

Das Vergleichssystem der Holzenergiesysteme mit Blockheizkraftwerk zur Grundlast-, Holzkessel zur Mittellast- und Öl/Gaskessel zur Spitzenlast- Wärmeversorgung besteht ebenfalls aus einem Blockheizkraftwerk zur Grundlastversorgung und einem entsprechend der geforderten Spitzenlasten dimensionierten Ölkessel. Es wurden daher aus den [GEMIS 00]- Daten zwei Vergleichssysteme abgeleitet, die jeweils den Verhältnissen in Dunningen und Heilbronn entsprechen, abgeleitet aus dem

---

<sup>1</sup> Betriebskosten sind hier (und im Folgenden): Wartungs- und Instandhaltungskosten, Versicherungen, Steuern, Personalkosten, Betriebsmittelkosten, Ascheentsorgungskosten - Brennstoffkosten sowie kapitalgebundene Kosten werden separat betrachtet

erforderlichen Wärmebedarf. Die Ergebnisse sind in Abbildung II-20 im Anhang II dargestellt.

Wie auch bei den Holzenergie- Grundlastsystemen ist der *kumulierte Energieaufwand* für die Holzenergie- Mittellastssysteme deutlich höher (um etwa 25%), als der für die konventionellen Vergleichssysteme. Zugleich besteht der KEA der Holzsysteme hier zu etwa 30 bzw. 45 % aus erneuerbarer Energie, was also in etwa dem zusätzlichen Aufwand entspricht.

Die fossil bedingten *Kohlendioxid- Emissionen* sind für die Holzenergiesysteme geringer als für die konventionellen Alternativen. Für die Prozesskette in Heilbronn wird mit Holznutzung nur etwa die Hälfte des CO<sub>2</sub> emittiert, während in Dunningen die Differenz zum konventionellen System nur etwa 20 % beträgt, was in dem Fall auch dem Anteil an erneuerbarem Energieaufwand durch den Holzeinsatz entspricht. Die Einsparung an Kohlendioxid- Emissionen durch Holzenergienutzung korreliert also mit dem Anteil des Holz- Inputs am Energieaufwand.

Ebenso wie bei den Grundlast- Holzenergiesystemen liegen auch hier die *Staub-, Stickoxid- und Kohlenmonoxid- Emissionen* im Vergleich zu den konventionellen Systemen höher. Dabei ist aber die Differenz vergleichsweise gering, z.B. wird mit den Holz- Mittellastsystemen etwa doppelt so viel Stickoxid emittiert wie mit BHKW-Ölkessel-Systemen. Von den Grundlast- Holzsystemen wurde im Verhältnis zu den Vergleichssystemen etwa das Dreifache an Stickoxiden emittiert. Die *Schwefeldioxid- Emissionen* hängen wiederum von dem jeweils eingesetzten Brennstoff ab. So wird vom Vergleichssystem für Heilbronn deutlich mehr SO<sub>2</sub> emittiert, da dort zu 70 % die Energie mit Heizöl EL bereitgestellt wird. Dagegen ist der Unterschied von Dunningen zum BHKW/Ölkessel- System sehr gering, da mit 60% Energieeintrag durch Erdgas etwa ähnlich viel SO<sub>2</sub> emittiert wird wie mit einer Holzfeuerung mit BHKW und Ölkessel.

Bei den spezifischen *Investitionen, Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten* zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bereits für die Heizwerke mit Holz- Grundlastkessel (vgl. Abbildungen II-26 und II-27): Die Investitionen, Betriebskosten und Wärmegestehungskosten der Holzfeuerungs-systeme liegen höher, die Brennstoffkosten etwas niedriger als die der fossil befeuerten Heizwerke. Die Differenzen zwischen den Daten für fossile und erneuerbare Brennstoffe sind jedoch bei Holz- Mittellastsystemen im Vergleich zu den Holz- Grundlastsystemen deutlich geringer. Während für Hohentengen die rein fossil befeuerte Alternative etwa doppelte Brennstoffkosten mit sich bringt, liegt der Unterschied für Dunningen nur bei etwa 10 %.

### 6.2.3 Fernheizwerke

In Abbildung II-21 sind die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den Fernheizwerken auf der Grundlage von Holzenergie und den konventionellen Heizwerken mit Erdgas und Heizöl EL- Nutzung dargestellt.

Wie schon bei den kommunalen Nahwärme- Systemen liegen auch bei den Fernheizwerken die Werte für den *kumulierter Energieaufwand* konventioneller Systeme im Bereich derer für Holzenergienutzung.

Die fossil bedingten *Kohlendioxid- Emissionen* liegen mit Holzenergienutzung bei etwa einem Drittel bis etwa bei der Hälfte der Emissionen für Erdgas- bzw. Heizöl EL- Heizwerke und somit in einem ähnlichen Verhältnis zu den konventionellen Systemen, wie schon bei der Grundlast- Holzenergienutzung im kommunalen Nahwärmebereich.

*Staub- und Stickoxid- Emissionen* sind für Müllheim deutlich höher im Vergleich zu der ausschließlich fossilen Energienutzung, während durch die verstärkte Nutzung der fossil betriebenen Zusatzkessel in Rotenbachtal für dieses System die Unterschiede deutlich geringer ausfallen.

Bei den *Kohlenmonoxid- Emissionen* sind die Differenzen zwischen Holzenergienutzung und den Vergleichssystemen nur marginal. Hier wird also bei der Feuerungsanlage in Rotenbachtal ein ähnlich guter Ausbrand erreicht, wie bei den Erdgas- und Heizöl EL- Feuerungen. Für Müllheim stammen die CO- Emissionen vorwiegend aus der Holz- Bereitstellung, während für die Holzfeuerung ein besonders niedriger CO- Emissionsfaktor erreicht wird.

Für die *Schwefeldioxid- Emissionen* gilt wieder die Korrelation zwischen Schwefelinhalt des Brennstoffs und Emission, wodurch das Heizöl EL- Heizwerk die höchsten, das Erdgas- Heizwerk die niedrigsten und die Holzenergiesysteme mittlere Emissionen verursachen.

Die *spezifischen Investitionen* für mit Holz befeuerte Fernheizwerke im Vergleich zu mit Gas-, Öl- oder Kohle befeuerten Heizwerken sind in Abbildung II-28 einander gegenüber gestellt. Die spezifischen Investitionen für das Fernheizwerk Rotenbachtal liegen unter denen der fossil befeuerten Heizwerke. Lediglich die Investitionen für Gas- Heizwerke sind im Vergleich zu Rotenbachtal niedriger, während die Investitionen für Müllheim deutlich über allen anderen Investitionssummen sind. In der Investition für Müllheim sind jedoch die Aufwendungen für die Installation des Fernwärmenetzes enthalten, was bei den in [GEMIS 00] berechneten Heizwerken vermutlich nicht der Fall ist. Im Vergleich zu mit Öl befeuerten Heizwerken liegen die Investitionen für Holzheizwerke in etwa im gleichen Bereich, Kohleheizwerke und Gasheizwerke erfordern dagegen deutlich höhere bzw. niedrigere Summen.

In Abbildung II-29 werden *Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten* von mit fossilen und erneuerbaren Brennstoffen befeuerten Fernheizsystemen miteinander verglichen. Die Betriebskosten sind dabei für fossil befeuerte Heizwerke niedriger als für Holzfernheizwerke. Die Brennstoffkosten liegen für Holzheizwerke und Kohleheizwerke auf etwa demselben Niveau, während Öl und Gas teurer sind. Allgemein sind die insgesamt aus diesen Kosten resultierenden Wärmegestehungskosten für Holzfernheizwerke tendenziell höher als für fossil befeuerte Systeme. Dabei sind die Unterschiede allerdings gering. Nur mit Kohle befeuerten Heizwerken sind deutlich niedrigere Wärmegestehungskosten erreichbar, während die Wärmegestehungskosten bei Öl- und Gas- Heizwerke in etwa im gleichen Bereich bzw. bei Heizwerken mittlerer Größe nach den [GEMIS 00] Daten sogar höher als die der Holzheizwerke sein können.

#### 6.2.4 Industrieholzheizkraftwerke

KEA und Emissionen der Industrieheizkraftwerke in Oberstetten und Oberrot werden in Abbildung II-22 im Anhang II mit Heizkraftwerken auf der Grundlage von Steinkohlefeuerungen und Erdgasfeuerungen verglichen.

Aufgrund des verhältnismäßig hohen KEA- Wertes für das HKW Erdgas mit über 1,8 MWh/MWh Output liegen die KEA der Holzenergiesysteme in diesem Fall sogar unter dem eines konventionellen Systems. Im Vergleich zum Steinkohle- Heizkraftwerk ist jedoch immer noch ein höherer KEA für die Holzenergiesysteme notwendig. In Oberstetten und Oberrot besteht der kumulierte Energieaufwand zu über 95 % aus erneuerbarer Energie.

Aus diesem Grund sind auch die fossil bedingten *Kohlendioxid- Emissionen* der Holzheizkraftwerke vernachlässigbar gering gegenüber den fossilen Heizkraftwerken.

Die höchsten *Staub- Emissionen* werden durch das Steinkohle- Heizkraftwerk verursacht, während die Staub- Emissionen aus dem Heizkraftwerk in Oberstetten wie die Emissionen aus dem Heizkraftwerk mit Erdgasfeuerung vernachlässigbar gering sind.

Auch bei den *Stickoxid- und Kohlenmonoxid- Emissionen* liegen die Werte der Prozesskette für Oberstetten sowohl unter denen für die Prozesskette für Oberrot, als auch deutlich (bei etwa der Hälfte) unter denen der konventionellen Energiebereitstellungssysteme. Dagegen liegen die NO<sub>x</sub>- und CO- Emissionen für Oberrot jeweils noch über denen der Erdgas- und Steinkohle- Heizkraftwerke. Dies ist auf die relativ hohen Emissionsfaktoren der Feuerung in Oberrot zurückzuführen.

Die höchsten *Schwefeldioxid- Emissionen* werden durch das Steinkohle-Heizkraftwerk verursacht, während die beiden Holzheizkraftwerke und das Erdgas-Heizkraftwerk dagegen fast vernachlässigbar niedrige SO<sub>2</sub>- Mengen emittieren.

In den Abbildungen II-30 und II-31 werden die spezifischen *Investitionen, Betriebs-, Brennstoff- und Wärmegestehungskosten* von Kohle- und Gas- Heizkraftwerken mit denen der Holzheizkraftwerke in Oberrot und Oberstetten verglichen. Im Vergleich zu den Kohleheizkraftwerken liegen die spezifischen Investitionen für Holzheizkraftwerke niedriger, ebenso wie die Betriebskosten und die Brennstoffkosten. Die Wärmegestehungskosten sind jedoch für Kohle und Holz auf dem gleichen Niveau, was auf eine größere Energieeffizienz bzw. größere Volllaststundenzahl der Kohleheizkraftwerke schließen lässt.

Im Vergleich zu Gas- Heizkraftwerken haben Holzheizkraftwerke unter den Bedingungen in der Holzbe- und verarbeitenden Industrie spezifische Investitionen auf etwa dem gleichen Niveau, tendenziell höhere Betriebskosten und deutlich niedrigere Brennstoffkosten (weniger als die Hälfte der Brennstoffkosten). Daraus ergeben sich für Gas- Heizkraftwerke höhere Wärmegestehungskosten als für die in dieser Arbeit bilanzierten Holzheizkraftwerke. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Investitionen für Holzfeuerungen in Holzbe- und verarbeitenden Betrieben durch verschiedene Synergieeffekte (z.B. gemeinsames Silo) niedriger liegen. Zudem liegen die Brennstoffkosten dadurch sehr niedrig, dass das Holz vor Ort als Reststoff anfällt. Mit den Bedingungen in anderen Industriebetrieben oder für öffentliche Stromerzeuger ist dies also nicht vergleichbar.

### 6.2.5 Holz- Mitverbrennung im Heizkraftwerk Pforzheim

In Abbildung II-23 werden KEA und Emissionen für das Heizkraftwerk Pforzheim mit reiner fossiler Energiebereitstellung und mit Mitverbrennung einander gegenüber gestellt. Zusätzlich ist das Modell- Heizkraftwerk für Steinkohle aus [GEMIS 00] mit aufgenommen.

Der *kumulierte Energieaufwand* wird durch die Mitverbrennung von Holz im Gegensatz zur reinen fossilen Feuerung etwas erhöht. Der KEA für das Modell- HKW Steinkohle liegt bei etwa einem Drittel des HKW Pforzheim ohne Mitverbrennung. Grund dafür könnte sein, dass für das Modell- HKW eine wesentlich größere Anlage mit 100 MW<sub>el</sub> installierter Leistung mit Technik nach dem neuesten Stand herangezogen wurde. Zudem wird im HKW Pforzheim im Verhältnis mehr Strom produziert, was zu einem erhöhten KEA- Wert führt.

Entsprechend den KEA sind auch die fossilen *Kohlendioxid- Emissionen* für das HKW Pforzheim ohne Mitverbrennung am höchsten, gefolgt von den Emissionen bei Mitverbrennung, die etwa um den Anteil des Energieeintrags durch Holz niedriger



liegen, bis hin zu den Emissionen für das Modell- HKW- Steinkohle, bei dem offenbar eine besonders effektive Brennstoffausnutzung erreicht wurde.

Die *Staub-, Stickoxid-, Kohlenmonoxid- und Schwefeloxid- Emissionen* des HKW Pforzheim unterscheiden sich - ob mit oder ohne Mitverbrennung von Holz - kaum. Da für die Mitverbrennung davon ausgegangen wurde, dass in etwa die gleichen Schadstoffkonzentrationen im Betrieb beibehalten werden, entstehen Unterschiede in den Emissionsfrachten lediglich durch die verschiedenen spezifischen Rauchgasvolumina von Holz und Steinkohle. Diese Unterschiede sind jedoch vergleichsweise gering.

Die Literaturangaben über die Höhe der zusätzlichen spezifischen *Investitionen* für die Umrüstung zur Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken variieren stark. So werden in [BRÖKELAND 00] drei Projekte beschrieben, bei denen keinerlei zusätzliche Investitionen für die Mitverbrennung nötig waren, während nach [KINDLER ET AL 00] etwa 2,6 €/kW<sub>el</sub>, nach [OTT 97] etwa 90 €/kW<sub>el</sub> und nach [HEIN 96] zwischen 77-153 €/kW<sub>th</sub> Biomasseleistung nötig sind. Die Investitionen sind dabei für Brennstoffannahme- und Lagerung, Brennstoffaufbereitung und Modifizierung der Brennstoffzufuhr und des Ascheaustrags nötig. Je nach Eigenschaften des eingesetzten Holzbrennstoffs und eventuell bereits für Biomasse-Mitverbrennung geeigneten Anlagenteilen kann die nötige zusätzliche Investitionssumme für die Umrüstung stark variieren. Beim Neubau von Anlagen, bei denen die Mitverbrennung von Biomasse bereits im Gesamtkonzept enthalten ist, lassen sich durch die bessere Einpassung der für die Biomasse bestimmten Anlagenteile die zusätzlichen Investitionen im Vergleich zur Umrüstung minimieren.

Durch erhöhten Aufwand für Instandhaltung und Wareneingangskontrollen für den Holzbrennstoff (besonders bei Altholz nötig) steigen in einigen Fällen auch die *Betriebskosten* bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken. Nach Angaben in [KINDLER ET AL 00] (7,7-10 €/t Altholz) und [OTT 97] (230 T€/a für das HKW Pforzheim) liegen die zusätzlichen spezifischen Betriebskosten bei etwa 0,0005-0,001 €/kWh<sub>el</sub>. Für die in [BRÖKELAND 00] beschriebenen Projekte wurden keine zusätzlichen Betriebskosten – außer den Brennstoffkosten für Holz – angegeben. Aufgrund der starken Schwankungen in Zusammensetzung und Eigenschaften der Holzbrennstoffe – sowohl bei unbehandelten Fraktionen wie Waldholz, als auch bei Gebrauchtholz und Landschaftspflegeholz – sind die Qualitätskontrollen für den Holzbrennstoff besonders bei langfristigem Betrieb wichtig und müssen daher auch für die Kalkulation der zusätzlichen Betriebskosten berücksichtigt werden. Bei Abweichungen in der Qualität des Brennstoffs besteht das Risiko der Verschlackung und Korrosion im Brennraum bzw. Kessel.

## 7 Sensitivitätsanalyse der Prozesskettenberechnung

Bei der Berechnung der Prozessketten für die Holzenergienutzung wurden einige Annahmen und Abschätzungen getroffen, um Datenlücken auszugleichen (z.B. zu Staub- Emissionen aus Gebrauchtholzaufbereitungsanlagen), oder wenn die vorhandenen Daten in weiten Bereichen voneinander abwichen, etwa bei den Angaben zum Energiebedarf der Waldholzbereitstellung.

Des Weiteren sind einige Angaben mit großen Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung in nächster Zukunft verbunden, wie z.B. die Brennstoffpreise der Holzsortimente, welche aufgrund des derzeit instabilen Marktes sehr großen Schwankungen unterliegen.

Zudem sollen auch in absehbarer Zeit verfügbare, neuere Technologien oder Verfahren mit berücksichtigt werden, die ebenfalls die Gesamtbilanz beeinflussen könnten, wie z.B. neue Möglichkeiten der Ascheverwertung, die bislang kaum genutzt werden.

Um herauszufinden, ob die mit großen Schwankungen und Unsicherheiten behafteten Daten in sensiblen Bereichen der Prozesskettenrechnung liegen und also das Gesamtergebnis stark beeinflussen können, sollen diese im Folgenden näher untersucht werden.

Dabei haben die Schwankungsbreiten ihre möglichen Ursachen einerseits in der Variabilität der Größe. So sind z.B. Brennstoffpreise lokal sehr unterschiedlich, so dass sich daraus die zu untersuchende Bandbreite ergibt. Andere Größen wie z.B. der Energiebedarf einzelner Bereitstellungsverfahren oder die Staubemissionen aus der Gebrauchtholzaufbereitung sind nur unzureichend bekannt, so dass die vorgenommenen Abschätzungen mit einer in ihrer absoluten Höhe unbekanntem Unsicherheit verknüpft sind.

### **7.1 Variabilität und Unsicherheit der Daten über die Bereitstellung der Brennstoffe**

In Tabelle 7-1 sind die Bandbreiten von Energiebedarf und Emissionen der Bereitstellungsverfahren für die verschiedenen Holzsortimente einander gegenüber gestellt. Diagramme zu Bandbreiten von Energiebedarf und Emissionen sind in Anhang II, Abbildungen II-34 und II-35 enthalten.

Hinsichtlich des kumulierten Energieaufwands der Bereitstellung weist das Sortiment Waldholz nicht nur den größten Wert auf, sondern auch die größte mögliche

Schwankungsbreite. Die große Bandbreite des Energiebedarfs bei der Waldholzbereitstellung ergibt sich daraus, dass es sehr viele verschiedene Verfahren gibt, das Waldholz zu fällen, aufzubereiten und aus dem Wald zu bergen und wenig darüber bekannt ist, welche Verfahren eingesetzt werden. Zudem sind die Literaturangaben über Waldholzaufbereitung meist differenziert nach Brusthöhendurchmesser (BHD) der zu fällenden Bäume angegeben, worüber für ganz Baden-Württemberg ebenfalls wenig verlässliche Aussagen existieren.

**Tabelle 7-1:** Bandbreiten von Energiebedarf und Staubemissionen für die Bereitstellung<sup>1</sup>

Brennstoff	Bemerkung	Energiebedarf [kWh/t Holz]	Staub Emissionen [kg/t Holz]
Waldholz	Bereitstellung	34,5-227 (128)	0,008-0,054 (0,030)
Rinde	Bereitstellung	21-41 (28)	0,004-0,009 (0,006)
Landschaftspflegeholz	Bereitstellung (ohne/mit Anlieferung)	21,5-46,5 (46,5)	0,004-0,009 (0,009)
Gebrauchtholz A1/A2	Emissionen aus Energieaufwand	27-46 (34)	0,004-0,008 (0,006)
Gebrauchtholz A3/A4	Emissionen aus Energieaufwand	45-64 (52)	0,010-0,013 (0,013)
Gebrauchtholz	Emissionen aus Entstaubung der Aufbereitungsanlage		0,00125-0,0125 (0,0063)
Gebrauchtholz A1/A2	Gesamtemissionen aus der Bereitstellung	27-46 (34)	0,005-0,021
Gebrauchtholz A3/A4	Gesamtemissionen aus der Bereitstellung	45-64 (52)	0,011-0,026
Industrierestholz interne Verwertung	Bereitstellung	10-14 (10)	0,002-0,003 (0,002)
Industrierestholz externe Verwertung	Bereitstellung	20-24 (21)	0,003-0,004 (0,003)

Bei dem Energieaufwand für die Bereitstellung von Rinde überwiegen Transport und Aufwand für die eigentliche Entrindung der Hölzer, so dass die große Bandbreite der Fäll- und Vorliefer- Verfahren hier einen geringeren Einfluss zeigt.

Bei dem Landschaftspflegeholz kann je nachdem die Sammlung des Materials mit Anlieferung zum Aufbereitungsort mitgerechnet werden. Wird dieser Teil der Bereitstellungskette vernachlässigt, weil z.B. das Grüngut von Privat angeliefert wird

<sup>1</sup> in Klammern: zur Prozesskettenberechnung herangezogene Werte

und die Bilanz erst ab dem am Häckselplatz vorhandenen Holz gerechnet wird, so sinkt damit der Energieaufwand auf etwa die Hälfte.

Beim Gebrauchtholz rührt die Bandbreite des Energiebedarfs von Unterschieden im Energiebedarf der z.T. sehr verschieden konzipierten stationären oder mobilen Aufbereitungsanlagen her. Die dort zu erwartende Unsicherheit ist dennoch bedeutend kleiner, als die aufgrund der unterschiedlichen Verfahren für das Waldholz bestehenden, da die energieintensivsten Schritte, wie z.B. die Zerkleinerung des Gebrauchtholzes, keine so große Unterschiede im Energiebedarf aufweisen, wie die unterschiedlichen Fäll- und Vorrückverfahren der Waldholzernte.

Da die Emissionen überwiegend aus dem zur Energiebereitstellung verbrannten fossilen Brennstoff stammen, sind die Verhältnisse für die Staubemissionen denen der KEA-Werte vergleichbar. Eine Ausnahme bilden hier die Staubemissionen aus der Aufbereitung der relativ trockenen Gebrauchthölzer. Diese Emissionen konnten nur über die sehr ungenauen Angaben über Entstaubungsluftströme der Anlagen und durch Annahmen zum Reingasstaubgehalt berechnet werden und führen daher zu großen Bandbreiten der möglichen Staubemissionsmengen.

In den Abbildungen II-36 und II-37 im Anhang II sind die maximal möglichen Bandbreiten der KEA- Holzbereitstellung bzw. der Staubemissionen aus der Bereitstellung für die berechneten Prozessketten dargestellt. Es wird deutlich, dass die Schwankungsbreiten umso größer werden, je größer der Anteil der mit großen Unsicherheiten behafteten Holzsortimente wird, wie z.B. Waldholz. In den folgenden Abbildungen II-38 und II-39 wurde jeweils der obere Grenzwert der Abschätzungen für KEA und Emissionen eingesetzt. Beim Vergleich mit den entsprechenden Diagrammen II-4 und II-12 zeigt sich, dass auch für diesen Fall der Einfluss der Holzbereitstellung auf die gesamte Prozesskette gering bzw. im Fall der Staubemissionen für Oberstetten bei einem Anteil von etwa einem Drittel bleibt.

Trotz der großen Unsicherheiten gerade im Bereich des Waldholzes sind hier also durch Abweichungen nach oben oder unten keine entscheidenden Veränderungen des Gesamtergebnisses zu erwarten.

## **7.2 Variabilität und Unsicherheit der Brennstoffpreise**

In Abbildung II-40 im Anhang II sind die Bandbreiten der Brennstoffpreise für Holzsortimente dargestellt. Die größten Schwankungen sind bei behandeltem und kontaminiertem Gebrauchtholz und bei Waldholz möglich – hier können Differenzen von fast 50 €/t Holz auftreten. Auch für die externe Verwertung von Industrierestholz sind noch Preisunterschiede von bis zu 26 €/t Holz möglich. Grund für die großen Unterschiede im Bereich der Gebrauchthölzer ist die instabile Marktsituation.

Während bis vor kurzem bei der energetischen Verwertung behandelter und kontaminierter Hölzer vor allem der Entsorgungsaspekt im Vordergrund stand, die Holzanbieter also an die Feuerungsanlagenbetreiber „Entsorgungsgebühren“ zahlten, könnte durch die geänderte Gesetzeslage und Förderungspraxis in Zukunft der Aspekt von Holz als erneuerbarer Energiequelle überwiegen. Damit würde auch das Gebrauchtholz zu einem wertvollen Brennstoff, für den zumindest verminderte Entsorgungsgebühren erzielbar sind, eventuell sogar von den Anlagenbetreibern gezahlt werden müsste. Ebenso führt die Konkurrenzsituation der stofflichen Verwertung zu energetischen Verwertung bei unbehandelten Hölzern dazu, dass je nach Situation und Region sehr unterschiedliche Preise erzielt werden. Beim Waldholz kommt noch ein weiterer Aspekt hinzu. Wird das Waldholz aus kommunalen Waldgebieten für die Nahwärmeversorgung der eigenen Gemeinde verwendet, so kommt es vor, dass die Preise für den Brennstoff nicht unbedingt kostendeckend angesetzt werden. Zumindest besteht eine erhebliche Differenz zwischen den in der Literatur genannten Kosten der Waldholzbereitstellung von ca. 33 bis 77 €/t und den z.T. vereinbarten Preisen von etwa 26 €/t.

Landschaftspflegeholz wird erst in letzter Zeit verstärkt zur energetischen Verwertung herangezogen. Die über die Kosten der Sammlung und Aufbereitung verfügbaren Daten beziehen sich also vielfach noch auf ein der Kompostierung zugeordnetes Material. In vielen Fällen werden bislang in den Kommunen mit relativ hohem Aufwand große Mengen an Kompost erzeugt, der sich zumindest in der Vergangenheit als schlecht absetzbares Produkt für die Nutzung durch Privatpersonen erwiesen hat. Daher steht auch für das Landschaftspflegeholz oft noch der Entsorgungsaspekt im Vordergrund, was zu relativ niedrigen Brennstoffpreisen führt. Je nachdem, von wem – von eigenen kommunalen Einrichtungen oder von Fremdfirmen - und mit welchem Aufwand das Grüngut also gesammelt und aufbereitet wird, können die entstehenden und angerechneten Kosten und somit auch die Preise bislang stark variieren.

Die durch diese Preisschwankungen für die berechneten Prozessketten (theoretisch) möglichen Bandbreiten der Brennstoffkosten sind in Abbildung II-41 in Anhang II dargestellt. Die größtmöglichen Abweichungen ergeben sich naturgemäß bei großen Brennstoffmengen an Waldholz, Landschaftspflegeholz und kontaminiertem Gebrauchtholz. Da in den Prozessketten für Müllheim, Hohentengen, Nagold, Metzingen und Bodnegg hauptsächlich Waldholz und Landschaftspflegeholz verwendet werden, ergeben sich bei der Annahme maximaler oder minimaler Brennstoffpreise auch die größten Auswirkungen auf die Brennstoffkosten. In der Praxis sind die Brennstoffpreise besonders bei großem Bedarf mit den Lieferanten festgelegt und lediglich über Preisgleitklauseln veränderlich. Diese Schwankungen

der Brennstoffkosten wären also nur dann möglich, wenn der Brennstoff ohne feste Vertragspartner kurzfristig auf dem Holzmarkt gekauft werden müssten.

In den Abbildungen II-42 und II-43 sind jeweils die minimalen bzw. maximalen Brennstoffkosten gemäß der in der Literatur angegebenen Bandbreite zur Berechnung herangezogen worden. Im Vergleich mit Abbildung II-17 zeigt sich, dass die Auswirkungen für die Industrieheizkraftwerke, die die eigenen Produktionsreste zu relativ konstanten Konditionen verwenden können, am geringsten ausfallen. Dagegen würden Feuerungsanlagen mit großem Brennstoffbedarf, wie z.B. die Fernheizwerke, beim Ankauf von Waldholz auf dem freien Markt großen Preisschwankungen unterworfen sein. Auch die Feuerungsanlagen zur Nahwärmebereitstellung, die größtenteils mit Waldholz oder/und Landschaftspflegeholz angewiesen sind, müssten bei maximalen Brennstoffpreisen mit deutlich höheren Wärmegestehungskosten rechnen.

Neben den je nach ausgehandeltem Brennstoffpreis bestehenden leichten Vor- oder Nachteilen bestimmen jedoch immer noch überwiegend die kapitalabhängigen Kosten die Verhältnisse der Wärmegestehungskosten für die verschiedenen Anlagen.

### **7.3 Alternativen der Ascheentsorgung**

Nach den Angaben der Betreiber der hier betrachteten Feuerungsanlagen wird bislang der Großteil der Aschen über Hausmülldeponien beseitigt bzw. im Bergversatz verwertet. Neuere Untersuchungen z.B. der Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg haben gezeigt, dass bei vielen Aschen aus der Verbrennung unbehandelter Holzsortimente auch die Verwertung als Kalkersatz in der Forstwirtschaft möglich wäre. Auch die Verwertung als Sekundärrohstoffdünger in der Landwirtschaft wird derzeit als mögliche Alternative zur Beseitigung diskutiert. Daher werden im Folgenden die möglichen Auswirkungen auf Energieaufwand, Emissionen und Kosten der Prozessketten bei verstärkter Nutzung der Aschen in Land- und Forstwirtschaft mit der bisherigen Entsorgungspraxis verglichen werden.

In Abbildung II-46 im Anhang II sind Kumulierter Energieaufwand, Partikelemissionen und Kosten der verschiedenen Entsorgungswege einander gegenüber gestellt. Den höchsten Energiebedarf bringt die Ausbringung der Asche in der Forstwirtschaft mit sich. Dieser hohe Energiebedarf rührt von dem nötigen Granulierungsschritt und der Ausbringung per Hubschrauber. Wird wie in manchen Fällen üblich per Schleuderstreuer ausgebracht, so wird auch die Granulierung des Materials überflüssig und der Energieaufwand gleicht sich dem der Ausbringung auf

landwirtschaftlichen Flächen an. Der ebenfalls große Energiebedarf bei der Verwertung als Bergversatzmaterial hat seine Ursache in den weiten Wegen, die die Asche zu einem geeigneten Bergwerk transportiert werden muss und in dem Energieaufwand der Verbringung untertage. Weite Transportwege sind auch für die Beseitigung auf Sondermülldeponien entscheidend für den KEA. Die energetisch günstigsten Varianten stellen bei diesem Vergleich die Verwertung in der Landwirtschaft und die Beseitigung auf Hausmülldeponien dar. Bei den Verwertungsschritten in Land- und Forstwirtschaft ist jedoch stets zu beachten, dass meist nur ein Teil der anfallenden Aschemenge - nämlich die Feuerraumasche, die etwa zwei Drittel der Aschemenge beträgt – zur Verwertung geeignet sind. Das restliche Drittel muss dann als Sondermüll beseitigt werden. Zu dem Energieaufwand der reinen Verwertung in der Land- und Forstwirtschaft kommt also in der Praxis noch ein Energieaufwand der Beseitigung der Feinst- und Zyklonaschen hinzu.

Die Partikelemissionen bei der Ascheentsorgung werden durch die Energiebereitstellung, überwiegend für den Transport, verursacht. Daher sind die Emissionen auch bei dem energieintensivsten Verfahren am höchsten. Daneben spielt noch eine Rolle, welchen Anteil am Energieverbrauch der Gebrauch von Offroad- Maschinen hat, welche im Gegensatz zu den sehr gut optimierten LKW- Motoren mit Katalysator oder Rußfilter deutlich höhere spezifische Emissionen aufweisen. So werden z.B. beim Bergversatz aufgrund des Einsatzes von Offroad-Maschinen zur Verfüllung des Materials trotz deutlich geringerem Energieverbrauch ähnlich viele Partikel emittiert, wie bei der Ausbringung in der Forstwirtschaft. Nicht berücksichtigt wurden dabei allerdings die Aschepartikelemissionen, die bei Ausbringung per Hubschrauber mit dem Wind weitergetragen werden, statt sich im Waldgebiet abzusetzen.

Der Vergleich der Kosten für die Aschebeseitigung und –verwertung zeigt, dass die Beseitigungswege deutlich teurer sind, als alle Verwertungswege. Auch hier muss zwar berücksichtigt werden, dass bei Verwertung der Aschen in Land- und Forstwirtschaft trotzdem ein Drittel der Aschemenge beseitigt werden muss. Das ändert jedoch nichts daran, dass die Verwertung in Forst- und Landwirtschaft über die Gutschriften<sup>2</sup> für den Düngemittelwert der Asche die kostengünstigsten Varianten darstellen.

Um die Auswirkungen verstärkter Verwertung in Land- und Forstwirtschaft auf die Bilanzen der Prozessketten zu betrachten, wurden die über Betreiberangaben errechneten KEA, Partikelemissionen und Kosten der Entsorgung mit zwei Optionen verglichen. Zum einen mit der maximal möglichen Verwertung in Landwirtschaft und

---

<sup>2</sup> dabei wurden mit den errechneten Düngewert die Kosten für Aufbereitung und Transport gemindert; eine Zuzahlung bei Verwertung in Landwirtschaft von Seiten der Landwirte wurde, weil sie wenig wahrscheinlich ist, ausgeschlossen

Bergversatz, zum anderen mit der maximal möglichen Verwertung in Forstwirtschaft und Bergversatz. Für die Eignung der Aschen wurde angenommen, dass sich nur Feuerraumaschen aus unbehandeltem Holz zur Verwertung als Sekundärrohstoffdünger oder Kalkersatz eignen. Für die Feinst- und Zyklonaschen, die bei der Verwertung in Land- und Forstwirtschaft übrig bleiben, und für Aschen aus der Verbrennung von kontaminierten Hölzern wurde angenommen, dass sie vollständig auf Sondermülldeponien entsorgt werden. Für Aschen aus behandeltem Holz und nicht nach Fraktionen getrennt anfallende Asche aus unbehandeltem Holz wurde angenommen, dass sie im Bergversatz verwertet wird.

In Abbildung II-47 wurden die KEA- Werte der Ascheentsorgung nach diesen drei Optionen einander gegenüber gestellt. Bei maximaler Verwertung in Landwirtschaft und Bergversatz steigt der KEA im Vergleich zur Entsorgung nach Betreiberangaben – d.h. zumeist Entsorgung auf Deponien – vor allem bei den kommunalen Feuerungsanlagen an, z.T. auf über das Doppelte. Bei Verwertung in der Forstwirtschaft in maximalem Umfang steigt der KEA durch den noch höheren Energiebedarf der Ausbringung noch stärker an. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die Verwendung von Schleuderstreuern anstelle von Hubschraubern bei der Ausbringung deutlich weniger Energie aufgewendet werden müsste. Darüber, wie oft welches Verfahren zur Kalkung angewandt wird, ist für ganz Baden-Württemberg keine Statistik vorhanden.

Die in Abbildung II-48 dargestellten Emissionen für die drei Entsorgungsoptionen verhalten sich entsprechend den KEA- Werten. Beim Vergleich der Kosten in Abbildung II-49 zeigt sich, dass bis auf wenige Ausnahmen durch die Verwertung in Land- und Forstwirtschaft z.T. erheblich kostengünstigere Ascheverwertung möglich wäre. Insbesondere bei großen Aschemengen durch mineralreiche Holzsortimente wie Landschaftspflegematerial lässt sich durch die Verwertung in der Landwirtschaft rein rechnerisch eine Reduktion der Entsorgungskosten auf etwa die Hälfte erreichen.

Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Verwertung als Sekundärrohstoffdünger in der Landwirtschaft bislang noch vor rechtlichen Hindernissen steht. Um als Sekundärrohstoffdünger im Sinne des Düngemittelgesetzes anerkannt zu werden, müsste der Nachweis gebracht werden, dass die Zusammensetzung der Aschen nur in genau definierten, engen Bereichen schwankt und garantiert werden kann. Dies ist jedoch bei den Aschen wegen der geringen Mengen und den großen Schwankungen der Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe nicht möglich. Der Einsatz als Kalkersatz im Wald ist dagegen ohne rechtliche Probleme möglich. Mittel- und langfristige Auswirkungen auf das Ökosystem Wald werden derzeit noch geprüft.

Auf das Gesamtergebnis der Prozessketten haben die verschiedenen Verwertungsoptionen für die Asche nur einen sehr geringen Einfluss. KEA und Emissionen der



Ascheentsorgung/-verwertung tragen kaum zum Gesamt-KEA oder den Gesamtemissionen bei. Die Kosten der Ascheentsorgung lassen sich nur dann spürbar beeinflussen, wenn relativ große Mengen an Asche anfallen und zugleich die Verwertungsoption in Land- oder Forstwirtschaft aufgrund der energetischen Nutzung von unbehandelten Hölzern gegeben ist. Vergleicht man die hier berechneten Wärmegestehungskosten der Prozessketten in den Abbildungen II-17 und II-42, so ergibt sich durch die Verwertung der dafür geeigneten Aschen in der Landwirtschaft lediglich für Metzgingen eine erkennbare Reduktion der Kosten.

## **8 Exkurs I: Energiesystemanalyse der energetischen Holznutzung**

Um die Ergebnisse der Prozesskettenberechnung in den Gesamtzusammenhang des Landes Baden-Württemberg zu stellen, wurde eine Energiesystemanalyse durchgeführt. Aus den bereits in Kapitel 3.3.1 der Methodik und Vorgehensweise erläuterten Gründen wurde hier der Fokus auf das Energiesystem der Stromerzeugung gelegt.

### **8.1 Charakteristika des Modells und betrachtete Szenarien**

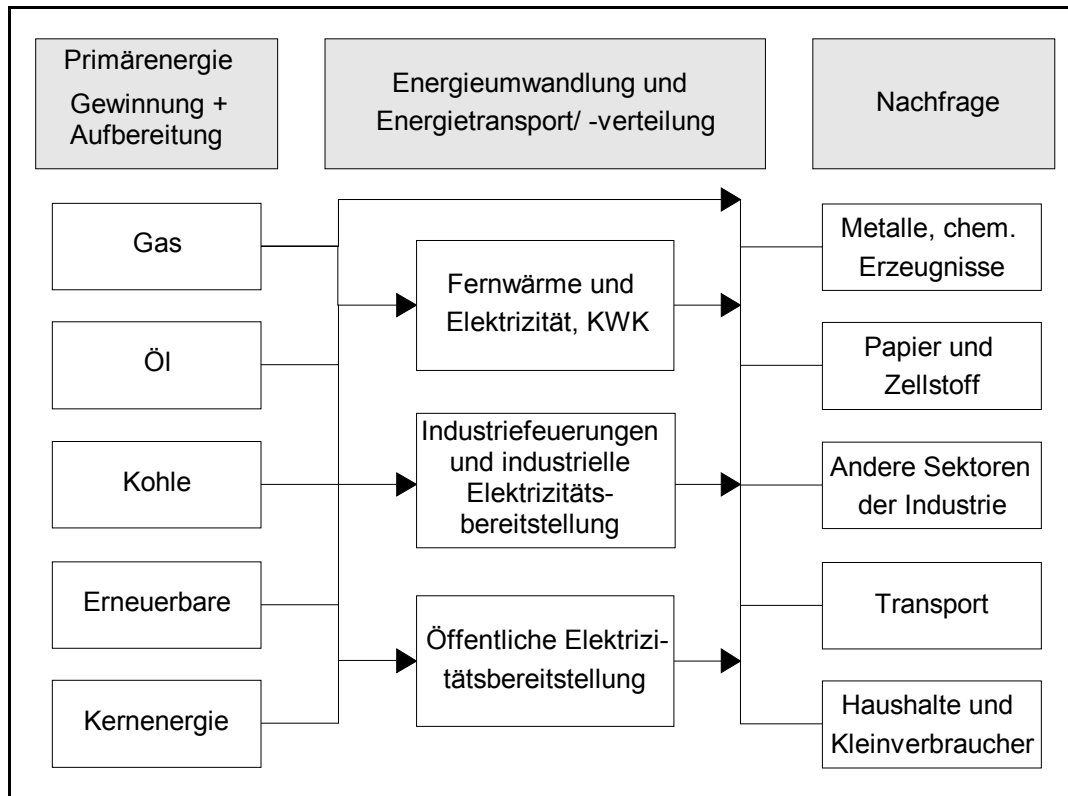
Für die Analyse der Einsatzmöglichkeiten von Holzbrennstoff im Sektor öffentlicher Energieversorgung, insbesondere im Hinblick auf die Konkurrenzfähigkeit in den kommenden Jahren, kam das Stoff- und Energieflussmodell PERSEUS-Reg<sup>2</sup> (PROGRAM PACKAGE FOR EMISSION REDUCTION STRATEGIES IN ENERGY USE AND SUPPLY) zum Einsatz [RENTZ ET AL 01A]. Darin wird auf der Grundlage der linearen Programmierung das zu untersuchende Energieversorgungssystem – hier Baden-Württemberg - in Form eines linearen Restriktionssystems auf der Basis der einzelnen Technologien für Kraftwerke, Energietransport und –verteilung sowie nachfrageseitige Anlagen abgebildet. Die Energie- und Stoffströme innerhalb des zu analysierenden Energiesystems werden durch die Verbindung der einzelnen Technologien mit Hilfe von Energie- und Stoffflüssen dargestellt. Die Struktur des Energiesystems ist in Abbildung 8-1 skizziert. Es wird für den gesamten räumlichen und zeitlichen Bilanzraum eine Zielfunktion aufgestellt, welche durch die Nebenbedingungen, wie z.B. dem Verlauf des Energiebedarfs oder der Preisentwicklung für die Brennstoffe, in ihrem Lösungsraum eingegrenzt wird. Die in diesem Lösungsraum optimalen Parameter bilden das Ergebnis der Modellrechnungen, wobei üblicherweise eine Minimierung der gesamten diskontierten Systemausgaben, die erforderlich sind, um eine vorgegebene Nachfrage zu befriedigen, erfolgt.

Ausgangspunkt der Modelluntersuchungen war das in der Basisperiode 1996-2000 existierende Versorgungssystem in der Region Baden-Württemberg, welches durch den bestehenden Kraftwerkspark, die Energieimporte und –exporte sowie die bestehende Nachfrage charakterisiert werden kann. Als Optionen zur zukünftigen Systementwicklung standen neben verschiedenen fossilen Kraftwerkstypen auch Anlagen auf Basis regenerativer Energieträger wie Wasserkraft, Solarstrahlung und Biomasse zur Verfügung. Für die energetische Holznutzung wurde dabei

unterschieden zwischen Anlagen zur reinen Holzverbrennung und Zufeuerungsanlagen, deren Hauptbrennstoff Steinkohle durch einen maximal 25 %-igen Holzanteil ergänzt werden konnte. Zudem wurde unterschieden nach Anlagen für den ausschließlichen Einsatz unbehandelter Hölzer und Anlagen, welche behandelte Hölzer (hier: Hölzer der Kategorien A2 und A3/4 zusammengefasst) verwerten können, wobei für letztere angenommen wurde, dass sie nach der 17. BImSchV genehmigt und betrieben werden müssen (berücksichtigte Optionen für Holzfeuerungsanlagen siehe Anhang III, Tabelle III-1).

Für die Entwicklung der Preise der Energieträger wurde eine Entwicklung (in Anlehnung an Abschätzungen in [PROGNOS 00]) angenommen, bei der bis etwa 2010 der Erdgaspreis deutlich niedriger bleibt als der für Steinkohle, um dann allerdings aufgrund der hohen Nachfrage und damit verbundenen Erschließung weiter entfernter Quellen stark anzusteigen. Für die Holzpreise wurden mittlere Werte aus vorhandenen Literaturangaben und Aussagen von Betreibern gebildet (vgl. auch Abbildung II-40, Anhang II) und angenommen, dass diese wie die Potenziale der verfügbaren Holzsortimente über den betrachteten Zeitraum bis 2030 konstant bleiben würden. Als bedeutende energiepolitische Rahmenbedingung wird der vereinbarte Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie in die Modellierung integriert [BMU 00]. Dabei wird für baden-württembergische Kernkraftwerke eine ab dem Jahr 2000 verbleibende Strommenge von 587,84 TWh angesetzt, die beliebig zwischen den Kraftwerken aufgeteilt werden kann. Es wird allerdings unterstellt, dass keine Übertragung von Produktionsrechten zwischen baden-württembergischen Kernkraftwerken und Anlagen in anderen Bundesländern erfolgt.

Im Rahmen der Untersuchung der Nutzungsmöglichkeiten für Holz in der Stromversorgung der Region Baden-Württemberg wurden zwei grundlegende Fälle näher betrachtet. Im ersten Fall, der als Marktszenario bezeichnet werden kann, ist den Akteuren die Holznutzung zur Stromerzeugung freigestellt, während im zweiten Fall, dem Förderszenario, die Nutzung des gesamten verfügbaren Holzpotenzials als Förderziel vorgegeben ist. Da heute den Kraftwerksbetreibern der Holzeinsatz freigestellt ist, kann das Marktszenario als Referenzfall angesehen werden. Dabei wurde eine weitere Unterscheidung hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Kraftwerkstechnologien getroffen: Es wurde unterschieden zwischen dem Fall, dass die Holznutzung nur in reinen Biomassefeuerungen erfolgt und der Möglichkeit, Holz auch zu bis zu 25 % in Steinkohlefeuerungen verwertet werden kann.



**Abbildung 8-1:** Struktureller Aufbau von regionalen Energie- und Stoffflussmodellen

## 8.2 Ergebnisse der Modellberechnungen mit Perseus-Reg<sup>2</sup>

Die Entwicklung des Strommarktes in Baden-Württemberg wird in den kommenden Jahren hauptsächlich durch den Kernausstieg und die Preisentwicklung von Erdgas und Kohle bestimmt. Nach den Ergebnissen der Energiesystemanalyse (ohne weitere Förderung der Holzbrennstoffe) wird der Markt für Stromerzeugung bis in etwa zum Jahr 2015 dominiert von Gasfeuerungsanlagen. Danach wird Steinkohle der günstigste Energieträger und somit dominierend für den Markt.

Die Ergebnisse des PERSEUS-Reg<sup>2</sup> Modells zeigen, dass ohne Berücksichtigung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes nur eine Form der energetischen Nutzung von Holzbrennstoffen gegenüber den konventionellen Stromerzeugungsanlagen konkurrenzfähig ist: die Mitverbrennung behandelte r Gebrauchthölzer in Kohlefeuerungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung. Für die Holzmitverbrennung in Steinkohlekraftwerken zeigt sich in Abbildung 8-2, dass der für die Wirtschaftlichkeit entscheidende Parameter der jeweilige Holzpreis ist, während für die Steinkohle in den kommenden Jahren ein weitgehend konstantes Niveau zu erwarten ist [PROGNOS 00]. So wird mit der Mitverbrennung von behandeltem Gebrauchtholz und

Landschaftspflegeholz ein Stromgestehungspreis erzielt, der bereits heute auf dem Strommarkt konkurrenzfähig ist. Reine Biomassefeuerungsanlagen haben dagegen weitaus höhere Stromgestehungskosten (bis zu 10 Ct/kWh) und sind daher ohne die durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz garantierten Stromeinspeisevergütungen nicht wirtschaftlich. Grund dafür sind die im Vergleich zu Steinkohleheizkraftwerken deutlich höheren spezifischen Investitionen der Biomassefeuerungsanlagen.

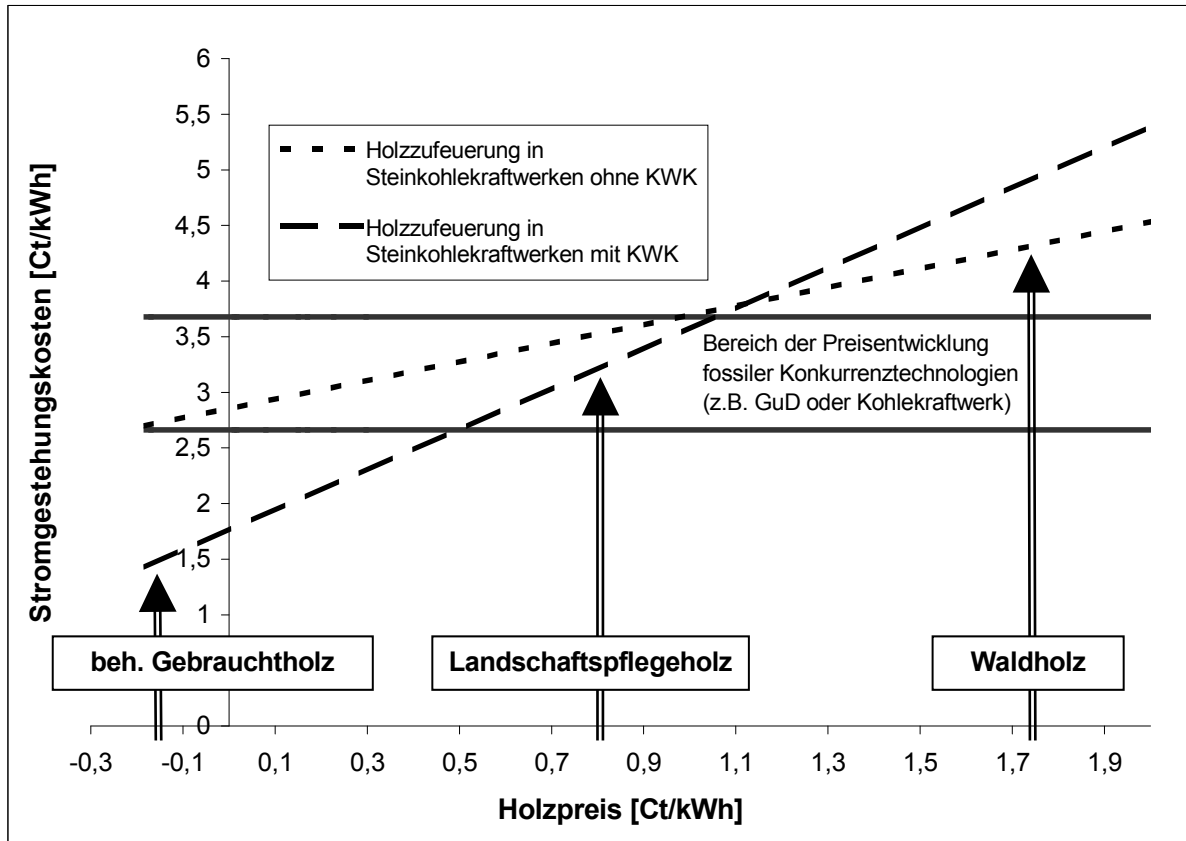
Die Entwicklung der Emissionen, die sich aus den verschiedenen Szenarien der Energiesystemanalyse für Baden-Württemberg ergeben, sind in Anhang III in den Abbildungen III-1 bis III-4 für Kohlendioxid, Schwefeldioxid, Stickoxide und Partikel dargestellt.

Die durch den Kernausstieg stillgelegten Kernkraftwerke werden zunächst durch fossile Kraftwerke ersetzt, woraus ohne verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen ein Anstieg der CO<sub>2</sub> Emissionen resultiert. Dieser Anstieg der CO<sub>2</sub> Emissionen kann durch die Nutzung der Holzbrennstoffe in Baden-Württemberg um maximal 6 % verringert werden.

Mittelfristig würde ohne Holzförderung die Erdgasnutzung dominieren. Eine Verdrängung der Erdgasnutzung durch verstärkte Förderung der Mitverbrennung von Holz in Steinkohlefeuerungen bringt zugleich eine Förderung dieser Steinkohle-nutzung mit sich. Daraus ergibt sich mittelfristig ein Anstieg der Kohlendioxid und Schwefeldioxid. Langfristig dagegen lassen sich mit der Förderung der Holzmitverbrennung diese Emissionen jedoch mindern, da damit Steinkohle durch Holz substituiert wird.

Die Emissionsfaktoren für Stickoxide sind für reine Biomassefeuerungsanlagen deutlich höher, als für die Mitverbrennung in Steinkohlekraftwerken und für Erdgaskraftwerke. Somit ergeben sich für den Fall, dass lediglich reine Biomassefeuerungsanlagen angewandt werden, die höchsten Emissionsprognosen. Wird jedoch die Mitverbrennung zugelassen, so ergeben sich Minderungen der Stickoxidemissionen des Gesamtsystems von zeitweise bis zu 10 %.

Bezüglich der Partikelemissionen stellt sich die Situation so dar, dass Holzfeuerungen höhere Emissionsfaktoren aufweisen als zukünftige Kohle- oder Erdgasfeuerungen. Dies bedeutet, dass im Fall dass keine holzbefeuerten Anlagen genutzt werden, die spezifischen Partikelemissionen am geringsten sind. Mit zunehmender Nutzung von Steinkohle und Holz ergeben sich höhere Emissionswerte. Auch Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken führt – auch über den Anstieg des Steinkohleanteils an der Gesamtversorgung – zu den höchsten spezifischen Partikelemissionen.



**Abbildung 8-2:** Zusammenhang Stromgestehungskosten zu Holzpreis bei Zufuehrung in Kohlekraftwerken

Für die Nutzung von Holzbrennstoffen zur Stromerzeugung festhalten lassen sich folgende Punkte:

- Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist der Brennstoffpreis des jeweiligen Holzsortiments.
- Der Beitrag zur Minderung der Kohlendioxid- und Schwefeldioxid- Emissionen durch Holznutzung beträgt maximal 6 %.
- Mit verstärkter Holznutzung müssen gegenüber den konventionellen Techniken erhöhte Emissionen an Stickoxiden und Partikel in Kauf genommen werden.

## 9 Exkurs II: Kanzerogene Emissionen durch Holznutzung in Baden-Württemberg

Aus dem vorangegangenen Kapitel wurde bereits deutlich, dass die energetische Holznutzung unter bestimmten Voraussetzungen wohl wirtschaftlich sein kann, zugleich aber mit erhöhten Emissionen von Stickoxiden und Partikeln verbunden ist. In der Diskussion um die Nachhaltigkeit der energetischen Holznutzung spielen jedoch nicht nur die Massenschadstoffe eine Rolle. Insbesondere Emissionen krebserzeugender Spurenstoffe, wie Arsen, Benzol, Cadmium, Polyzyklischen Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Dioxine/Furane (PCDD/F), sind bei Holzfeuerungsanlagen in erhöhtem Maß zu beobachten.

In [RENTZ ET AL 00B] wurde für alle relevanten Quellensektoren eine Abschätzung der krebserzeugenden Spurenstoffe für Baden-Württemberg vorgenommen, die folgendes ergab:

**Tabelle 9-1:** Emissionen krebserzeugender Spurenstoffe in Baden-Württemberg 1994/96 [RENTZ ET AL 00B]

Quellen-sektor	Arsen [kg/a] 1996	Benzol [t/a] 1994	Cadmium [kg/a] 1996	Benzo(a) pyren [kg/a] 1996	PCDD/F [g I-TE/a] 1994
<b>WärmeKW</b>	<b>344 (148-790)</b>	k.A.	<b>19 (10-44)</b>	6	Mit Industrie- feuerungen: 0,4
Steinkohle	336 (142-775)		13 (6-31)		
Heizöl S	3 (1-10)		3 (1-10)		
Sonstige	5		3		
<b>Hausbrand gesamt</b>	<b>39 (13-160)</b>	<b>473 (154-1.553)</b>	<b>68 (30-198)</b>	<b>890 (276-3.291)</b>	<b>1,3 (0,6-2,5)</b>
Heizöl EL	23 (5-113)	337 (105-1.052)	23 (5-113)	45 (11-226)	0,2 (0,1-0,3)
Holz	9 (2-40)	33 (7-148)	40 (20-80)	780 (200-3.000)	0,8 (0,4-1,6)
Sonstige	7	20	5	65	0,06-0,6
<b>IndustrieKW</b>	<b>62 (22-154)</b>	k.A.	<b>24 (9-63)</b>	<b>6 (1-30)</b>	s. WärmeKW
Steinkohle	36 (12-91)		1 (0,4-3)	k.A:	
Heizöl EL	2 (0,4-9)		2-(0,4-9)	Heizöl EL+S: }	
Heizöl S	13 (4-39)		13 (4-39)	5 (1-27)	
Holz	5 (1-9)		5 (1-9)	0,4 (0,06-3)	
Sonstige	5		3	k.A.	
Verkehr	3	4.211 (2.175-6.370)	3	1.065 (533-1.598)	0,6
Industrie	20 (10-48)	51	83 (30-232)	20	8,2 (3,1-23)

Quellen- sektor	Arsen [kg/a] 1996	Benzol [t/a] 1994	Cadmium [kg/a] 1996	Benzo(a) pyren [kg/a] 1996	PCDD/F [g I-TE/a] 1994
Brände	k.A.	k.A.	k.A.	21 (19-22)	1,5 (0,6-6,2)
Summe	468 (196-1.155)	4.652 (2.358-7.641)	197 (82-540)	2.008 (855-4.967)	12,0 (5,3-32,7)
Anteil Holzfeuerung	3 %	0,7 %	23 %	39 %	7 %

Hohe Beiträge zu Emissionen krebserzeugender Stoffe zeigen sich vor allem bei Cadmium und PAK – hier dargestellt anhand der Schlüsselkomponente Benzo(a)pyren – von denen ein Viertel bis ein Drittel durch Holzfeuerungsanlagen verursacht wird.

Zu beachten ist dabei, dass bei Cadmium über 88 %, bei Benzo(a)pyren über 99 % der Emissionen aus Holznutzung durch Hausbrandfeuerungen erzeugt werden, in denen im Allgemeinen keine Emissionsminderungsmaßnahmen installiert sind.

Auf die Ursachen dieser Emissionen und beeinflussende Parameter wird im Folgenden näher eingegangen.

### **9.1 Emissionen von Arsen- und Cadmium und ihren Verbindungen aus Holzfeuerungen**

Arsen und Cadmium werden mit dem Brennstoff in die Feuerung eingebracht und werden durch die hohe Flüchtigkeit der elementaren Substanz ebenso wie ihrer Verbindungen bei thermischen Prozessen freigesetzt. Wie in Tabelle 4-11 in Kapitel 4 anhand der Schadstoffgehalte für verschiedenste Holzsortimente gezeigt wurde, sind beide Spurenstoffe bereits im unbehandelten Waldholz vorhanden. Während die Hauptmengen an Arsen jedoch über den Eintrag mit anorganischen Holzschutzmitteln erfolgt (vgl. Kapitel 4.2.2.2) und somit die Gehalte in Gebrauchthölzern entsprechender Herkunft deutlich höher sind als die des Waldholzes, ist der überwiegende Anteil von Cadmium bereits im unbehandelten Waldholz vorhanden (Ursachen dieses Phänomens wurden bereits in Kapitel 4.2.2.1 diskutiert).

In Tabelle 9-2 sind Emissionsfaktoren und Metallgehalte verschiedener Holzsortimente aufgeführt.



**Tabelle 9-2:** Emissionsfaktoren<sup>1</sup> und Metallgehalte für Holz [RENTZ ET AL 00B]

Schadstoff	Emissionsfaktor [g/TJ]	Metallgehalt [mg/kg Holz]	Quelle
Arsen naturbelassenes H. Holzwerkstoff	<0,35 35-175	<0,1 1-5	[MARUTZKY U. SEEGER 99]
Arsen (naturbel.) Rohgas Reingas	2,11 7,24		[FRIEß U. HUBER 98]
Arsen bei 200 kg Staub/TJ	2,2	Zyklonasche: 11	[FRIEß U. HUBER 98]
Arsen Grenzwert Holzwerkstoffe <sup>2</sup> Obstpaletten	70 7	2 0,21	[RAL 97], [LFUBAY 98]
Arsen /Cadmium Dauerbrandöfen (naturbel. Holz) Kachelöfen (naturbel. Holz) Kamine, Kaminöfen (naturbel. Holz) Heizkessel (naturbel. Holz) Badeöfen, Herde (naturbel. Holz) Unterschubfeuerung (naturbel. +Resth.) Unterschubfeuerung Restholz	(As / Cd) 0,03 / 1,91 0,19 / 0,88 0,03 / 1,91 0,50 / 4,60 0,03 / 1,91 6,60 / 3,05 14,3 / 6,75		[BLANK ET AL 99]
Arsen naturbel. Restholz behandeltes Alt- und Restholz	< 14 < 14 - 600	<0,4 <0,4 - 17,0	[BOCKELMANN ET AL 95]
Cadmium naturbel. Restholz behandeltes Alt- und Restholz	4 0,510-1,59 2,11 - 2,95 < 14 – 28 < 14 - 300	<0,4 - 0,8 <0,4 - 8,9	[BUWAL 95] [EPA 93] [FRIEß U. HUBER 98] [BOCKELMANN ET AL 95]

Ein erheblicher Anteil der Schwermetalle und ihrer Verbindungen lagert sich an Fein- und Feinstpartikeln an und kann daher je nach Emissionsminderungstechnik aus dem Abluftstrom abgeschieden werden.

<sup>1</sup> bei Angaben über Metallgehalte im Holz: Emissionsfaktor berechnet mit 50 % Anteil im Rauchgas und 14,5 MJ/kg Holz(werkstoff)

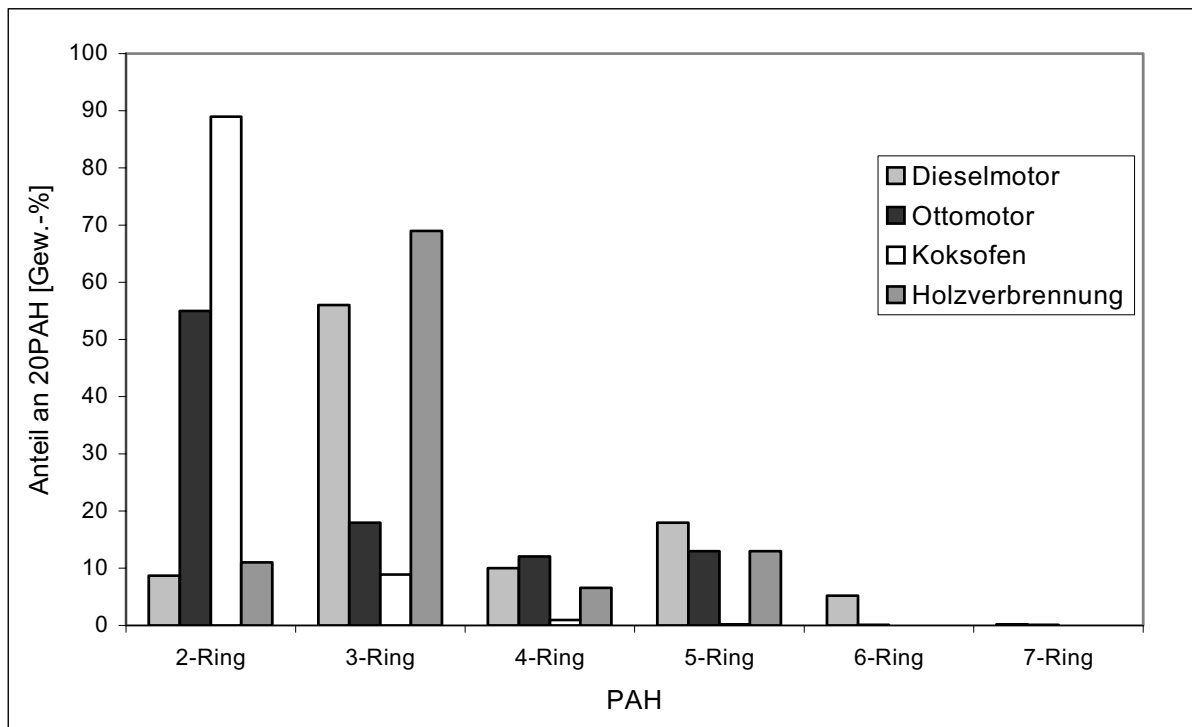
<sup>2</sup> empfohlener Maximalwert für die Verbrennung von Holzwerkstoffen nach dem RAL-Gütezeichen

## **9.2 Emissionen von Benzol und PAK aus Holzfeuerungen**

Im Gegensatz zu den Schwermetallemissionen sind Benzol und PAK Produkte unvollständiger Verbrennung, die im Verlauf des Feuerungsprozesses entstehen und somit sowohl über Primärmaßnahmen, die eine vollständige Verbrennung fördern, als auch Sekundärmaßnahmen gemindert werden. Mögliche Primärmaßnahmen wären dabei etwa eine veränderte Strömungsführung der Verbrennungsabgase, um bessere Durchmischung mit der Verbrennungsluft zu gewährleisten, gestufte Luftzufuhr, Maßnahmen zur Erhöhung der Verweilzeit der Abgase im Bereich hoher Temperaturen, sowie in manchen Fällen die Zugabe von Oxidationskatalysatoren (vgl. Kapitel 5.2.2.2.1).

Benzol ist eine leichtflüchtige, aromatische Substanz, die besonders bei Verbrennungs- und Verdunstungsvorgängen im Verkehr und Gebrauch von Lösemitteln emittiert wird. Der Anteil der Emissionen aus Holzfeuerungsanlagen spielt gegenüber diesen Quellen nur eine untergeordnete Rolle.

Unter der Bezeichnung polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wird eine ganze Gruppe von Verbindungen verstanden, die sowohl leicht- als auch schwerflüchtig sind und aus mindestens zwei kondensierten Aromatenringen, oft mit Methyl- und anderen Seitengruppen kombiniert, bestehen. Die stofflichen Eigenschaften variieren je nach Anzahl der Aromatenringe und Art und Anzahl der Seitengruppen. In Verbrennungsabgasen liegt ein Teil der PAK gasförmig, der überwiegende Teil jedoch an Partikel kondensiert bzw. adsorbiert vor.



**Abbildung 9-1:** Source Fingerprints verschiedener PAH- Emissionsquellen [KHALILI ET AL 95] (20PAH: 2-Ring: Naphthalen, 3-Ring: Acenaphthalen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Reten, 4-Ring: Fluoranthen, Pyren, Benz(a)anthracen, Chrysen, Triphenylen, 5-Ring: Cyclopenta(c,d)perylen, Benzo(b, k)fluoranthen, Benzo(a,e)pyren, Dibenzo(ghi)perylen, 6-Ring: Indeno(1,2,3-cd)pyren, Benzo(ghi)pyren, 7-Ring: Coronen)

In Abbildung 9-1 sind für verschiedene Verbrennungsquellen die typischen „fingerprints“ der dabei emittierten PAK- Substanzen dargestellt. Im Fall der Holzfeuerungsanlagen überwiegen mit fast 70 % die Substanzen mit 3 kondensierten Aromatenringen. Vom Standpunkt des kanzerogenen Risikos her sind jedoch die schwerflüchtigen Substanzen die eigentlich relevanten: Benzo(a)pyren, Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen, Dibenz(a,h)anthracen, Chrysen und Indeno(1,2,3-cd)pyren werden vom IARC als kanzerogene Substanzen eingestuft.

In Tabelle 9-3 sind Emissionsfaktoren für Benzol und Benzo(a)pyren aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund der bisher geringen Zahl direkter Messungen von Benzol an Holzfeuerungen diese Emissionen nur über Verhältnisse zu flüchtigen Kohlenwasserstoffemissionen insgesamt (VOC) bzw. organischen Emissionen (als Gesamt-Kohlenstoff „Gesamt-C“ angegeben) abgeleitet werden konnten. Ebenso wird im Zusammenhang mit PAK eine sehr unterschiedliche Auswahl der gemessenen Substanzen getroffen, die den Vergleich des Summenparameters PAK aus verschiedenen Messungen schwierig macht. Daher kann lediglich über die Messung der Schlüsselkomponente Benzo(a)pyren und mithilfe von Verhältnis-

faktoren (vgl. Tabelle 9-4) auf die Mengen an kanzerogenen Emissionen geschlossen werden.

**Tabelle 9-3:** Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen [RENTZ ET AL 00B]

Schadstoff	Bemerkungen	Emissionsfaktor [g/TJ]	Quelle
Benzol <sup>1</sup> (VOC)	industrielle Feuerungen nach UBA	5.000-10.000 (100.000)	[BAUMBACH U. ANGERER 93]
	industrielle Feuerungen (andere Autoren)	65-14.000 (1.300-140.000)	
	Kleinverbraucher nach UBA	20.000-40.000 (400.000)	
	Kleinverbraucher (andere Autoren)	5.000-400.000 (100.000 - 4.000.000)	
Benzol <sup>1</sup> (Gesamt-C)	Zentralheizkessel – Durchbrand	24.850 - 49.700 (Gesamt-C: 497.000)	[IVD 88]
	Zentralheizkessel – Unterbrand	15.550-31.100 (Gesamt-C: 311.000)	
	Offener Kamin - Durchbrand	38.200-76.400 (Gesamt-C: 764.000)	
BaP	Eichenholz	0,143	[KHALILI ET AL 95]
BaP	Konventionelle Feuerstätten	138	[EPA 98A]
	F. mit Minderungsmaßnahmen	207	
BaP	Kleinanlagen	0,5	[BAUMBACH U. ANGERER 93]
	Anlagen mit 1 MW	1.000	
	industrielle Feuerungen	0,06-30	
	Kleinverbraucher	0,5-1000	
BaP	Verbrennung von Nadelholz mit - offener Brennkammertür - geschlossener Brennkammertür	14	[MARUTZKY U. SEEGER 99]
		4	
BaP	Abgasgehalte CO > 2 g/m <sup>3</sup>	91,45	[SCHMOECKEL U. STREIT 99]
	Abgasgehalte CO < 2 g/m <sup>3</sup>	<0,2759	

**Tabelle 9-4:** PAH- Profile für verschiedene Quellen in Baden-Württemberg nach [EEA 99]

Quelle	BaP [kg/a]	BbF- Faktor [EF/EF(BaP)]	BbF [kg/a]	BkF-Faktor [EF/EF(BaP)]	BkF [kg/a]	IcdP-Faktor [EF/EF(BaP)]	IcdP [kg/a]
Hausbrand - Holz eigene Absch. 1996	780	1,2	936	0,4	312	0,1	78
Industriefeuerungen - Holz, eigene Absch. 1996	0,4	1,2	0,48	0,4	0,16	0,1	0,04

Da die schwerflüchtigen PAK zumeist wie die Schwermetalle an Partikel adsorbiert bzw. als kondensierbare Abgasbestandteile vorliegen, ist auch hier die effektivste Sekundärmaßnahme zur Emissionsminderung die möglichst weitreichende Abscheidung der feinen Partikel aus dem Abgasstrom.

### 9.3 Emissionen von Dioxinen/ Furanen aus Holzfeuerungen

Dioxine und Furane entstehen bei thermischen Prozessen, bei gleichzeitiger Anwesenheit von Chlorverbindungen – welche im Fall der Holzfeuerungsanlagen mit dem Brennstoff eingetragen werden – und Kohlenwasserstoffradikalen, wie sie bei unvollständigen Verbrennungen auftreten. Sie entstehen in einem bestimmten Temperaturfenster, werden bei höheren Temperaturen also wieder zerstört. Die Temperaturführung der Prozesse hat also einen entscheidenden Einfluss auf die Mengen an PCDD/F, die entsteht.

Chlorgehalte von Holzsortimenten sind in Tabelle 4-11 aufgeführt und zeigen, dass behandelte und insbesondere mit PVC beschichtete Gebrauchthölzer um ein vielfaches höhere Chlorgehalte aufweisen, als etwa Waldhölzer.

Emissionsfaktoren für Dioxine und Furane sind in Tabelle 9-5 zusammengefasst.

**Tabelle 9-5:** PCDD/F- Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen in [ $\mu\text{g I-TE/TJ}$ ] [RENTZ ET AL 00B]

Bemerkungen	Emissionsfaktor	QUELLE
Heizkessel	34,3-47,0	[BRÖKER ET AL 94B]
Offener Kamin	12,6-68,6	
naturbelassenes Holz	<70	[ZUBERBÜHLER ET AL 96]
Spanplatten	700	
imprägniertes Holz	7.000-12.000	
Offener Kamin	5,2-86,2	[QUAß ET AL 97]
Ofen	36,6-64,8	
naturbelassenes Holz (Cl-Gehalt 50ppm)	3,3-19,3	[DETZEL ET AL 98]
mit 30 % Papier (Cl-Gehalt 80ppm)	31,7-62,1	
mit 5 % PVC (Cl-Gehalt 9.000ppm)	389-697	
alle Modelle	24	[BUWAL 95]

Bemerkungen	Emissionsfaktor	QUELLE
Dauerbrandöfen (naturbel. Holz)	21,2	[BLANK ET AL 99]
Kachelöfen (naturbel. Holz)	9,4	
Kamine (naturbel. Holz)	56,6	
Kaminöfen (naturbel. Holz)	17,4	
Heizkessel (naturbel. Holz)	51,0	
Badeöfen (naturbel. Holz)	41,6	
Herde (naturbel. Holz)	37,0	
Schachtfeuerung (naturbel. +Restholz)	819,0	
Einblasfeuerung (naturbel. +Restholz)	74,0	
Unterschubfeuerung (naturbel. +Resth.)	273,2	
Vorofenfeuerung (naturbel. +Restholz)	1.168,7	
Schachtfeuerung Restholz	461,5	
Einblasfeuerung Restholz	352,4	
Unterschubfeuerung Restholz	352,4	
Vorofenfeuerung Restholz	321,6	

Neben der Kontrolle des Chloreintrags über eine Vorauswahl der entsprechenden Brennstoffsortimente sind hier Primärmaßnahmen der Verbrennungssteuerung und Regelung zur Emissionskontrolle besonders wichtig. Da die entstehenden PCDD/F ebenfalls an Partikeln adsorbieren, kann aber eine effektive Partikelabscheidung auch hier Wirkung zeigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zur Minderung von Emissionen kanzerogener Spurenstoffe strikte Eingangskontrollen der verwendeten Brennstoffe und derer Zusammensetzung, Primärmaßnahmen zum möglichst vollständigen Ausbrand und eine effektive Staubabscheidung die wirksamsten Maßnahmen sind. Im Fall von kleinen Feuerungen ohne Emissionsminderungstechnik, wie sie im Bereich der Hausfeuerungsanlagen oder kleiner Industriefeuerungen üblich sind, muss jedoch eine erhöhte Belastung an kanzerogenen Spurenstoffen in der Luft in Kauf genommen werden. Daher wäre es ratsam, solche Anlagen nicht in Gebieten zu installieren, in denen die Immissionsbelastung durch hohes Verkehrsaufkommen oder Industrieaktivitäten mit hohen Emissionen bereits sehr stark ist.

## **10 Exkurs III: Energetische Holznutzung im Rahmen der Lokalen Agenda 21 am Beispiel der Gemeinde Stutensee**

Ein zentrales Element zur Umsetzung des Konzepts der „Nachhaltigen Entwicklung“ stellen seit einigen Jahren die „Initiativen der Kommunen zur Unterstützung der Agenda 21“, kurz Lokale Agenda 21- Initiativen, dar. Mit diesem Ansatz sollen möglichst viele Menschen zu Beiträgen zur Nachhaltigen Entwicklung, insbesondere in ihrem direkten Umfeld angeregt werden. So wird aus der schwer fassbaren, unüberschaubaren Aufgabe der globalen Nachhaltigkeit eine Möglichkeit, direkt erlebter Umweltzerstörung eigenständig entgegenzutreten und Chancen für eine nachhaltigere Entwicklung zu ergreifen.

In diesem Zusammenhang spielt die energetische Holznutzung eine besondere Rolle. Zum einen handelt es sich dabei um eine Technik, die besonders für dezentrale Energieversorgung effektive Lösungen bringt. Zum anderen sind es oft die Kommunen selbst, die derzeit noch große Reserven an Holzressourcen ungenutzt lassen und somit für eine nachhaltigere Entwicklung zur Verfügung hätten.

Die Stadt Stutensee arbeitet derzeit eine Lokale Agenda 21 aus, in der ebenfalls das Ziel der nachhaltigen Entwicklung insbesondere durch nachhaltige Energieversorgung für die Stadt erreicht werden soll. Dabei wurde eine Zusammenarbeit mit dem französischen Gemeindeverbund La Petite Pierre initiiert, mit dem Ziel, bei konkreten Problemlösungen im Rahmen des Lokalen Agenda 21 Prozesses Synergien zu nutzen. Da die Landschaft beider Gemeinden durch ausgedehnte Wälder gekennzeichnet ist, liegt es nahe, verstärkte stoffliche und energetische Nutzung der Holzressourcen ins Auge zu fassen. In [RENTZ ET AL 00] wurden daher zunächst die Potenziale an Holzressourcen, sowie deren mögliche Nutzungsbereiche untersucht.

Rahmendaten zur Stadt Stutensee sind in Anhang IV, Tabelle IV-1 zusammengefasst. Danach handelt es sich bei Stutensee um eine Kleinstadt, für die in den kommenden Jahren mit stark steigenden Einwohnerzahlen durch Zuzug aus dem Umland gerechnet wird. Der überwiegende Teil der Arbeitnehmer ist im produzierenden Gewerbe bzw. in Handwerksbetrieben des Metallgewerbes tätig, wobei auch das Baugewerbe und der Dienstleistungssektor eine große Rolle spielen.

Mit über 42 % bzw. 1963 ha verfügt die Gemarkung über einen relativ großen Anteil an Waldfläche. Diese ist jedoch aufgeteilt in den Stadtwald (245,6 ha) und einem Anteil des Staatswaldes Karlsruhe-Hardt innerhalb der Gemeindegrenzen von Stutensee (1647,2 ha) [RENTZ ET AL 00].

Im Gebäudebestand überwiegen mit ca. 44 % des Bestandes Wohnhäuser, die in den sechziger und siebziger Jahren erbaut wurden, wobei durch anhaltende Bautätigkeit auch der Anteil der jüngeren Gebäude bei gut einem Drittel liegt.

### **10.1 Bilanzierung des Holzaufkommens in Stutensee**

Um die Möglichkeiten der Nutzung der Holzressourcen in Stutensee zu untersuchen, wurde zunächst das Holzaufkommen für Waldholz, Landschaftspflegeholz, Industrierestholz und Holz aus Abfällen bilanziert.

Für das Waldholz wurde dabei über Einschlagsstatistiken und Wachstumsraten die Mengen an stofflich nutzbarem Derbholz einerseits und für energetische Nutzung geeignetes „Energieholz“ andererseits ermittelt. Gerade die Potenziale des letzteren werden derzeit nicht vollständig genutzt. Dabei ist zu beachten, dass für Holz aus dem Stadtwald und aus dem Staatswald Karlsruhe-Hardt grundsätzlich sehr unterschiedliche Bedingungen gegeben sind. Während z.B. das Energieholz aus dem Stadtwald Stutensee zum Selbstkostenpreis zur Verfügung stünde, wäre für die Nutzung des Holzes aus dem Staatswald ein Liefervertrag mit marktgerechten Preisen nötig [RENTZ ET AL 00].

An Landschaftspflegeholz wurden die Mengen erfasst, die vom Bauhof der Stadt gesammelt werden, sowie die Mengen, die von privaten Haushalten auf den Häckselplätzen angeliefert werden. Für die energetische Nutzung des Holzanteils am Landschaftspflegeholz für eine Nahwärmeversorgung einiger öffentlicher Gebäude der Stadt laufen bereits seit einiger Zeit Planungen. Entscheidendes Hindernis gegen diese Pläne sind jedoch derzeit noch bestehende Lieferverträge für diese Mengen, welche verpflichtungsgemäß an die Kompostierungsanlage des Landkreises abgeführt werden müssen und somit zumindest kurz- und mittelfristig nicht zur Verfügung stehen.

Für die Abschätzung der Industrierestholzmengen aus ortsansässigen Industrie- und Handwerksbetrieben wurden neben den Angaben der Betriebe selbst Statistiken und Schätzungen von Restanteilen an verwendeten Rohstoffen Mengen herangezogen. Die Befragung der Betriebe ergab jedoch, dass diese Resthölzer meist vollständig zur Deckung des eigenen Energiebedarfs verwendet werden und meist sogar dafür nicht ausreichen.

Die Holzanteile in Abfällen wurden über Schätzwerte von Holzanteilen im Sperrmüll einerseits bzw. über Holzanteile im Gebäudeabbruch und Sanierungs-, Modernisierungsmaßnahmen andererseits berechnet. Gerade für Althölzer aus Gebäudeabbruch und Baumaßnahmen kann davon ausgegangen werden, dass hierbei bereits eine weitgehende Verwertung stattfindet, da die Trennung von



Abfällen auf Baustellen inzwischen standardmäßig durchgeführt wird [RENTZ ET AL 00].

In Tabelle 10-1 sind die jeweiligen Mengen, die sich aus der Bilanzierung der Holzsortimente der Stadt Stutensee ergeben, und ihre derzeitige Nutzung zusammengefasst.

**Tabelle 10-1:** Holzaufkommen in der Stadt Stutensee aus [RENTZ ET AL 00]

Holzsortiment	Mengen pro Jahr	derzeitige Nutzung
Waldholz - Derbholz	aus dem Stadtwald: 6050 FM <sup>1</sup> Stammholz 6472 FM Industrieholz anteilig geschätzte Mengen aus dem Staatswald: ca. 63800 FM Stammholz ca. 42700 FM Industrieholz	stoffliche Nutzung
Waldholz – „Energieholz“	aus dem Stadtwald: ca. 1.000-1.200 FM aus dem Staatswald: ca. 5.515 FM	bislang keine Nutzung  Nutzung bislang: 1.670 FM
Landschaftspflegeholz	ca. 5000 Sm <sup>3</sup> entspricht ca. 2,65-6,64 GWh <sup>2</sup>	Kompostierung
Restholz	Sägewerk, Zimmereien, Schreinereien, Möbelhersteller: insgesamt ca. 1 GWh	eigene energetische Nutzung
Holz im Abfall	aus Sperrmüll: 0,87 GWh aus Abbruch: 0,5 GWh aus Renovierungs/Modernisierungsmaßnahmen: 4,7 GWh	vermutlich bereits weitgehende Nutzung

## 10.2 Mögliche Nutzung der Holzressourcen

Um die Potenziale energetischer Holznutzung zu ermitteln, wurde zunächst der Wärmebedarf in Wohngebäuden, öffentlichen Gebäuden und Gewerbebetrieben des bestehenden Bestandes, sowie im Fall der Wohngebäude für gemäß des Flächen-

<sup>1</sup> FM: Festmeter – Definition siehe Glossar

<sup>2</sup> je nach Wassergehalt

nutzungsplans bis 2010 vorgesehener zukünftiger Siedlungen berechnet – Ergebnisse sind in Tabelle 10-2 zusammengefasst.

**Tabelle 10-2:** Gegenwärtiger und künftiger Wärmebedarf in Stutensee [RENTZ ET AL 00]

Gebäudeart	nähere Bezeichnung	Wärmebedarf pro Jahr
Wohngebäude	Bestand: 1999	116.030 GWh/a
	davon Fernwärme	0,4 %
	Öl	84,4 %
	Gas	5 %
	Strom	7,3 %
	Holz/Kohle/Sonstige	3,1 %
öffentliche Gebäude	städtische Gebäude	11,2 GWh/a
öffentliche Gebäude	landeseigene Gebäude, Kirchen, Pfarrhäuser, Pflegeheim etc.	ca. 0,64-0,97 GWh/a
Gewerbebetriebe	Groß/Einzelhandel, Kraftfahrzeughandel, Tankstellen	ca. 4,5 GWh/a
Gewerbebetriebe	Gewerbegebiete	26,6 GWh/a
	davon Blankenloch Süd I	72,7 %
	Blankenloch Nord I	14,5 %
	Friedrichstal	11,1 %
	Spöck	1,7 %
Wohngebäude	künftige Bebauung in Anlehnung an [FNP 2010]: Neubausiedlungen entsprechend Wohnflächen von 255.470 m <sup>2</sup> , davon Buchenfeld/Friedrichstal 18,8 %, Vierundzwanzig-Morgen-Acker/Spöck 11,5 %, Nördlich der Eggensteiner Straße/Blankenloch 10,5%, Zehnmorgenäcker/Blankenloch 10,7%	14,9 GWh/a

Eine verstärkte Nutzung von Holzfeuerungen kann durch Veränderungen der bestehenden Beheizungsstruktur bestehender Wohn- und Industriegebäude oder auch durch den Einsatz der Holzenergie in Neubaugebieten erfolgen.

Die Nutzung von Holz zur Wärmeerzeugung in den bestehenden Wohngebäuden war in den vergangenen Jahren rückläufig. So wurde in neuen Gebäuden seit 1988 keine Feststoffkessel mehr eingebaut. Auch in älteren Gebäuden nimmt ihre Zahl ab. Nach Aussagen eines örtlichen Heizungsbauers wurden in den vergangenen Jahren

Holzfeuerungen nur mehr ausgebaut und stillgelegt. Gründe hierfür sind in der bislang mangelnden Infrastruktur zu Brennholzversorgung und im gegenüber Öl- oder Gasnutzung erhöhten Lagerflächenbedarf zu suchen. Während Öl und Gas frei Haus geliefert werden, wurde Brennholz bislang hauptsächlich über Flächenlose im Wald erworben, von wo es selbsttätig geschlagen, zerkleinert und ins Haus transportiert werden musste. Zeit- und Arbeitsaufwand dieser Beschaffungsmethode schrecken jedoch heutige Hausbesitzer ab. In Neubaugebieten spricht ebenfalls der größere Lagerflächenbedarf des Brennstoffs Holz gegen seinen Einsatz. Ebenso spielen auch die erhöhten Investitionen, etwa eines kombinierten Betriebs mit Holz und Öl von ca. 4000 € und der zusätzliche Aufwand durch die vorgeschriebene Überwachung durch den Schornsteinfeger eine Rolle in der Entscheidung.

Die räumliche Konzentration des Wärmebedarfs in manchen Neubaugebieten, Industriegebieten oder im Bereich öffentlicher Gebäude legt die Errichtung örtlicher Nahwärmenetze mit entsprechender gemeinsamer Wärmeversorgung über eine Holzfeuerungsanlage, ggf. kombiniert mit weiteren Spitzenlastkesseln oder einem BHKW nahe. Für Neubaugebiete kann sich dabei die Situation auftun, dass durch die Errichtung besonders energiesparender Niedrigenergiehäuser bzw. Passivhäuser der Wärmebedarf der Gebäude so niedrig wird, dass die Installation eines Nahwärmenetzes gegenüber individueller Versorgung nicht mehr wirtschaftlich ist.

Dahingegen bestehen für die Versorgung von Hallenbad, Gesamtschule und Mehrzweckhalle bereits Pläne für eine Holzfeuerungsanlage im Nahwärmeverbund. Bei diesen Planungen allerdings zeigt sich, dass das Für und Wider letztlich mit der langfristigen Verfügbarkeit günstigen Holzbrennstoffs entschieden wird. Da das in diesem Fall vorgesehene Landschaftspflegeholz durch andere rechtliche Verpflichtungen nicht zur Verfügung steht, wurden die Planungen für die Holznutzung bislang zurückgestellt.

### **10.3 Weitere Chancen und Anknüpfungspunkte zu La Petite Pierre**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die größten Potenziale im Bereich des *Wärmebedarfs der Wohngebäude* liegen. In einem ersten Schritt sollte eine Zielgröße im Hinblick auf den künftigen Anteil von Holz an der Energiebedarfsdeckung gefunden werden. Hier können Erfahrungen aus La Petite Pierre als Anhaltspunkt dienen.

Handlungsfelder: In bestehenden Gebäuden könnte die Beibehaltung und / oder Modernisierung von Holzkesseln unterstützt werden. Da der Holzverbrauch privater Haushalte über Waldholz aus der Umgebung gedeckt wird, könnten so die dort vorhandenen Potenziale besser genutzt werden. Das größte Hemmnis ist dabei die

aufwändige Beschaffung des Holzes durch die Selbstwerber. Es sollten daher Ansätze gefunden werden, die Bereitstellung des Holzes zu verbessern bzw. zu vereinfachen. Weiterhin sollte der Informationsstand zu Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit moderner Holzheizungen verbessert werden.

Maßnahmen: Zur Förderung der Holzenergie muss ein transparenter Brennstoffmarkt mit einer gesicherten Versorgung der Verbraucher hergestellt werden. Gleichzeitig muss ein ausreichend großer Absatzmarkt für einen Handel vorliegen. Erforderliche Maßnahmen müssen daher nicht auf die Gemeindeebene beschränkt bleiben. Zu diskutieren wäre ein zentrales Angebot bereits abgelagerten Holzes, das direkt zu Heizzwecken genutzt werden kann. So könnte z. B. über eine Holzbörse für Privatleute ein Möglichkeit zur Vermarktung von Holz geboten werden und ein Anreiz geschaffen werden, über den Eigenbedarf hinaus Waldholz bereitzustellen. Beteiligte an einer Umsetzung sind neben den Bürgern die Forstwirtschaft, Heizungsbauer, Schornsteinfeger und der lokale Brennstoffhandel. Lösungsansätze sind in diesem Kreis zu erarbeiten, was gemeinsam mit Vertretern von La Petite Pierre erfolgen könnte. Die Erfolgskontrolle sollte anhand der Anzahl der neu installierten bzw. modernisierten Holzfeuerungen erfolgen. Hier könnte durch eine Initiative der örtlichen Schornsteinfeger die Datenlage verbessert werden. Die Beheizungsstruktur der privaten Haushalte wurde seit 1987 nicht mehr erhoben. Weiterhin könnte eine Informationsinitiative durch die Baubehörde gestartet werden, die die Antragsteller für eine Baumaßnahme über die Einsatzmöglichkeiten der Holzenergie informiert.

Im Bereich der *öffentlichen Gebäude* hat sich gezeigt, dass hier einzelne Großverbraucher eine ausreichende Wärmenachfrage bieten, um eine Versorgung über Holzenergie zu realisieren. Weiterhin konnte durch entsprechende Vorgaben bei der Planung bereits ein Neubaugebiet durch ein Nahwärmenetz verbunden werden, das grundsätzlich auch unter Einbeziehung einer Holzfeuerung versorgt werden könnte.

Bei *Gewerbebetrieben* hat sich gezeigt, dass nur die Unternehmen des Holzbe- und verarbeitenden Gewerbes über Holzfeuerungen verfügen. Die innerbetrieblich anfallenden Reststoffe sind zumeist nicht ausreichend, um den Wärmebedarf insgesamt zu decken.

Handlungsfelder: Die größeren der ausgewiesenen Neubau- und Gewerbegebiete bieten eine ausreichende Wärmenachfrage, um eine zentrale Nahwärmeversorgung zu realisieren. Gerade aufgrund des erwarteten Zuwachses im Gebäudebestand von Stutensee ist ein energiesparender und umweltverträglicher Ausbau anzustreben, um die Umweltbelastungen nicht proportional mit dem Zubau ansteigen zu lassen.

Gerade bei der Realisierung von Neubauten sowohl bei privaten Haushalten als auch im Gewerbe kann durch Planungsvorgaben der Behörden ein starker Einfluss genommen werden. So könnten Vorgaben für jene Neubau- bzw. neue Gewerbe-

gebiete erarbeitet werden, die eine ausreichende Wärmenachfrage erwarten lassen. In Stutensee ist dies aufgrund der erwarteten Expansion in den nächsten Jahren von besonderer Bedeutung. Um den Anstieg der Umweltbelastung zu begrenzen, sollte die Niedrigenergiebauweise konsequent weitergeführt werden. Hier wären Informationsinitiativen in Kooperation mit Architekten und Planungsbüros denkbar. Da die Unternehmen des Holzgewerbes ihren Wärmebedarf nicht vollständig mit innerbetrieblich anfallenden Reststoffen decken können, könnte z. B. eine Teilnahme an regionalen Reststoffbörsen initiiert werden.

Aufgrund der geringeren Einwohnerzahl ist in La Petite Pierre voraussichtlich im öffentlichen und gewerblichen Bereich eine ausreichende Wärmenachfrage vorhanden, um Heizzentralen auf Holzbasis zu realisieren. Hier stellt der Tourismus (Hotels) den wichtigsten Sektor dar. In einem nächsten Schritt sind sinnvolle Einsatzmöglichkeiten in La Petite Pierre zu prüfen, wobei die in Stutensee gemachten Erfahrungen bei der Planung einer solchen Anlage genutzt werden könnten. Derzeit wird in Wingen sur Moder der Einsatz einer Holzfeuerung für mehrere öffentliche Gebäude (Behindertenheim, Laliquemuseum) diskutiert. Die Evaluierung dieses Projektes sollte in die Kooperation einbezogen werden.

## 11 Schlussfolgerungen und Konsequenzen für politische Handlungsträger

### 11.1 Nutzung Erneuerbarer Energien, $CO_{2fossil}$ -Einsparung

Die Einsparung fossiler Primärenergieträger ist durch die Nutzung der vorhandenen Potenziale an Alt- und Resthölzern möglich, wobei der Energieaufwand für die Holzbereitstellung und die Ascheentsorgungs- oder -verwertungsmaßnahmen einen geringen Anteil hat. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) über die gesamte Prozesskette der Holzenergienutzung ist bezogen auf die produzierte Wärmemenge in etwa im gleichen Bereich der KEA der entsprechenden konventionellen Vergleichssysteme. Die Nutzung der Holzenergie zur Bereitstellung von Nah-, Fernwärme und Strom ist meist auch mit einem Einsatz an fossiler Energie zur Abdeckung der Spitzenlasten bzw. Grund- und Spitzenlasten verbunden. Der Anteil an erneuerbarer Energie an dem gesamten kumulierten Energieaufwand hängt davon ab, zu welchem Anteil die Holzenergie am Gesamtenergieinput beteiligt ist. Während bei Systemen mit Holzfeuerungen zur Deckung des Grundlast-Wärmebedarfs der Anteil an erneuerbarem KEA für die betrachteten Beispiele zwischen 45 und 90 % liegt, sinkt dieser Anteil für die Verwendung von Holzkesseln zur Mittellastdeckung auf 30 bis 55 %.

Welche Mengen an fossilen Kohlendioxid-Emissionen durch Nutzung von Holzenergie vermieden werden, hängt davon ab, inwieweit auf den zusätzlichen Einsatz an fossilen Energieträgern verzichtet wird. So wird mit Holzenergiesystemen mit Holzkesseln zur Grundlastdeckung etwa 50 % der Kohlendioxid-Emissionen des konventionellen Vergleichssystems eingespart, bei Holzkesseln zur Mittellastdeckung sind es 20 bis 40 %. Die maximale Vermeidung von fossilen Kohlendioxid-Emissionen ist mit Industrieheizkraftwerken in Holzverarbeitenden Betrieben möglich. Durch hohe Effizienz der Brennstoffausnutzung und günstige Konditionen bei der Brennstoffbereitstellung und den Betriebsbedingungen kann hier der Einsatz fossiler Energieträger auf ein Minimum reduziert werden.

- **Sinnvolle Einsatzbereiche liegen für unbehandelte Holzsortimente im Nah- und Fernwärmebereich in kommunalen Einrichtungen, Siedlungen etc., für Industrieresthölzer in der Holzbe- und verarbeitenden Industrie (Wärme, Prozessdampf und Strom), sowie für behandelte/kontaminierte Gebrauchthölzer in der Wärme- und Stromerzeugung in größeren, mit entsprechender Rauchgasreinigung ausgestatteten Heizkraftwerken.**

- **Entscheidend für das Ausmaß der Einsparungen ist, dass der Anteil des Energiebedarfs, der für die Spitzenlast- und Grundlastabdeckung mit fossilen Energieträgern bestritten wird, gering gehalten wird.**
- **Nicht relevant für die Energiebilanz ist der Energieaufwand für Holzbereitstellung und Ascheentsorgung – unabhängig von der jeweils gewählten Verfahrensweise.**

## **11.2 Emissionen durch die Nutzung der Holzenergie**

Die spezifischen Staub- und Stickoxid- Emissionen liegen bezogen auf die produzierte Wärmemenge für die Holzenergienutzung deutlich höher als für die konventionellen Vergleichssysteme. Daneben werden auch krebserzeugende Spurenstoffe, insbesondere Cadmium und PAK in erhöhtem Maße emittiert. Die Staub- Emissionen hängen stark davon ab, welche Staubminderungsmaßnahmen getroffen werden. Gerade die sekundären Staubminderungsmaßnahmen haben zugleich positiven Einfluss auf die Emissionen der krebserzeugenden Spurenstoffe. In Tabelle 11-1 werden die spezifischen Investitionen für verschiedene Staubminderungsmaßnahmen mit den damit durchschnittlich erreichten Reingaskonzentrationen den spezifischen Investitionen für den gesamten Holzkessel (mit Luftzufuhr, Zufuhreinrichtungen für den Brennstoff, Rauchgasreinigung und Ascheaustrag) gegenüber gestellt. Ein Vergleich der Zahlen zeigt, dass für eine effektive Staubabscheidung auch entsprechend höhere Investitionen in Kauf genommen werden müssen. Zu beachten ist dabei, dass der Anteil der Investitionen für den Holzkessel an den Gesamtinvestitionen für die Nah- bzw. Fernwärmeversorgung bei ca. 20-35 % liegt. Bezogen auf die Gesamtinvestition ergibt sich also für die Installation einer effektiveren Staubminderung im Gegensatz zum bei Kleinanlagen üblichen Multizyklon eine Erhöhung der Investition um etwa 10 %. Nach Aussagen von Betreibern spricht gegen die Installation von Gewebefiltern, Elektroabscheidern und Rauchgaskondensationsanlagen noch häufig der Platzbedarf. Soll für einen bestehenden Gebäudekomplex die Öl- oder Gasheizung durch einen Holzkessel ersetzt werden, so ist meist in den vorhandenen Heizungsräumen nicht genug Platz für Gewebefilter oder Elektroabscheider. Für die Nutzung der Kondensationswärme, die durch die Rauchgaskondensationsanlagen gewonnen werden kann, ist zudem ein Niedertemperaturwärmenetz nötig, welches nur in neueren Gebäuden üblicherweise vorhanden ist. Für die Konzeption einer Anlage sind somit die lokalen Gegebenheiten von wesentlicher Bedeutung.

Von den Holzenergiesystemen mit Feuerungsanlagen < 1 MW<sub>th</sub> Feuerungswärmeleistung werden im Vergleich zu den konventionellen Energiebereitstellungssystemen

höhere Kohlenmonoxid- Emissionen verursacht. Die CO- Emissionen aus Prozessketten mit größeren Holzanlagen liegen jedoch im gleichen Bereich, wie die der ausschließlich fossilen Energienutzung.

**Tabelle 11-1:** Vergleich von Staubminderung und spezifischer Investition von Staubabscheidern, Zahlen für 1 MW<sub>th</sub> nach [FNR 00]

	spezifische Investition [DM/kW <sub>th</sub> ], %- der spez. Holzkessel- Invest.	Holzkessel gesamt [DM/kW <sub>th</sub> ]	Reingaskonzentration [mg/m <sup>3</sup> ]
Multizyklon	30 (15%)	200	120
Gewebefilter	80 (29%)	280	10
Elektroabscheider	80 (29%)	280	30
Rauchgaskondensation	90 (31%)	290	60

- **Mit der Nutzung der Holzenergie sind im Vergleich zu Gas/Ölanlagen erhöhte Emissionen an Stickoxiden und Partikeln, sowie krebserzeugenden Spurenstoffen zu erwarten.**
- **Partikelemissionen lassen sich durch effektivere Staubabscheidungsapparate begrenzen. Deren Einsatz ist jedoch nicht nur durch die erhöhten Investitionen, sondern auch durch Nebeneffekte, wie Platzmangel oder Nutzungsmöglichkeit der entstehenden Kondensationswärme begrenzt.**
- **Insbesondere bei kleineren Feuerungsanlagen im häuslichen Bereich ist der Einsatz von Sekundärmaßnahmen aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich. Der Einsatz solcher Anlagen sollte also nur in Gebieten geringer Immissionsbelastungen erfolgen.**

### **11.3 Ökonomische Aspekte der Holzenergienutzung und deren Förderung**

Die geringsten spezifischen Investitionen bezogen auf den Holzinput lassen sich mit der Mitverbrennung von Holz in Kohlekraftwerken und mit Industrieheizkraftwerken in holzverarbeitenden Betrieben erzielen. Bei Anlagen zur Fernwärmeversorgung und Kleinanlagen zur Nahwärmeversorgung im kommunalen Bereich liegen die spezifischen Investitionen entsprechend höher. Einen erheblichen Anteil der Investitionen wird dabei für die Neuinstallation und Verlegung von Nahwärmenetzen benötigt.



Die investitionsabhängigen Kosten tragen mit einem Anteil von 55 bis 64 % wesentlich zu den Wärmegestehungskosten bei. Einen weiteren Beitrag liefern die Brennstoffkosten, die mit etwa 25 % ebenfalls einen erheblichen Einfluss haben. Die Ascheentsorgungskosten liegen dagegen mit  $< 5$  % der Gesamtkosten nicht im relevanten Bereich. Eine Erhöhung dieser Kosten durch verschärfte Deponieanforderungen hätte somit keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtsituation.

Die für die betrachteten Beispiele berechneten Wärmegestehungskosten liegen für die Kleinanlagen mit 4,6 bis 7,1 Ct/kWh<sub>th</sub> in einer relativ großen Bandbreite. Einfluss auf diese Schwankungen haben die unterschiedlich hohen Investitionen (bedingt durch bereits vorhandene oder komplett neu zu installierende Wärmenetze) und unterschiedlich hohe durchschnittliche Holz- Brennstoffkosten. Im Vergleich zu den Wärmegestehungskosten für Fernwärme aus konventionellen Anlagen – mit bereits bestehenden Fernwärmenetzen - mit etwa 0,77 bis 1,5 Ct/kWh sind die Wärmegestehungskosten für die Kleinanlagen sehr viel höher. Lediglich mit den Industrieheizkraftwerken mit Holznutzung kann zu vergleichbaren Kosten Wärme produziert werden.

Aufgrund der relativ hohen Wärmegestehungskosten für die Nah- und Fernwärmeversorgung auf der Grundlage der Holznutzung und wegen des hohen Anteils der investitionsabhängigen Kosten erscheint somit eine Förderung der Holzenergie über Investitionszuschüsse sinnvoll. Diskutiert wird derzeit, welche Formen der Förderung zur möglichst effektiven Nutzung der bereitgestellten finanziellen Mittel führen können. So wurde bei der Förderung durch einen prozentualen Zuschuss zur Gesamtinvestition in Bayern beobachtet, dass hierdurch zu unnötig hohen Investitionen für z.B. bauliche Maßnahmen verleitet wurde. Die Förderung nach installierter Leistung hingegen kann dazu führen, dass Anlagen mit unnötig hoher Leistung gebaut werden, die dann nicht optimal ausgelastet werden können. Eine Alternative dazu wird derzeit mit dem Programm zur Bewältigung der „Lothar“- Sturmschäden in der Schweiz verwirklicht. Hier werden einmalige Zuschüsse bezogen auf die jährlich erzeugte Wärmemenge (90 bzw. 150 SFr /MWh) gewährt, was zu optimal ausgelegten Anlagen führen soll. Aufgrund der hohen Investitionen für den Ausbau von Nahwärmenetzen ist auch hier eine Förderung sinnvoll, wobei auf eine ausreichende Netzauslastung geachtet werden muss [RUTSCHMANN 00], [KRAPF 00].

Da der Einfluss der Holz- Brennstoffkosten auf die Wärmegestehungskosten relativ hoch ist, ist insbesondere die Auswahl der verwendeten Holzsortimente von Belang. Die höchsten Holzpreise werden mit etwa 51 €/t für Waldholz gezahlt, gefolgt von Gebrauchtholz, dessen Preis je nach Altholzklasse zwischen Zuzahlungen für die Entsorgung von bis zu -61 €/t bis hin zu 15 €/t für die unbehandelte, bereits zerkleinerte Fraktion reicht. Für Industrieresthölzer, Sägeresthölzer und Grüngut wird derzeit zwischen 15 und 26 €/t bezahlt, während Rinde bei Preisen von etwa 13 €/t

liegt. Zu beachten ist dabei, dass durch die Konkurrenz der stofflichen Verwertung in Spanplatten-, Zellstoff- und Papierindustrie die unbehandelten Alt- und Restholzfraktionen unter Umständen durch steigende Aktivitäten in diesen Industriezweigen in Zukunft nicht mehr zur energetischen Verwertung zur Verfügung stehen [MARUTZKY 00]. Durch den Bau großer Heizkraftwerke können zudem durch die Verknappung des Angebots auch die Preise für Gebrauchtholz sprunghaft ansteigen. Bei der Verwendung von Grüngut und Rinde ist mit erhöhten Ascheentsorgungskosten zu rechnen, da hier besonders hohe Ascheanteile bzw. Anteile an mineralischen und sonstigen Verunreinigungen zu erwarten sind. Zudem ist gerade das Grüngut sehr großen, z.T. jahreszeitlich bedingten Schwankungen in der Zusammensetzung, Feuchte und dem Heizwert unterworfen, was zu häufigeren Betriebsstörungen führen kann. Der durch den geringeren Heizwert des Grünguts und evtl. Ausfälle bei Störungen geringere Input an erneuerbarer Energie wird durch entsprechend höheren fossilen Input ausgeglichen. Der Energieaufwand für die Holz-Bereitstellung ist für Waldholz wesentlich höher, als für alle anderen Holzsortimente. Bezogen auf die gesamte Prozesskette spielt jedoch auch dieser erhöhte Energieaufwand für die Bereitstellung eine untergeordnete Rolle.

- **Die relativ hohen Investitionen für die Holzenergienutzung v.a. im Nahwärmebereich sind ein entscheidender wirtschaftlicher Faktor, der derzeit gegen die Nutzung der Holzpotenziale spricht.**
- **Eine Investitionsförderung ist daher sinnvoll, allerdings nur dann, wenn dabei zugleich auf eine effektive Nutzung der vorhandenen Mittel geachtet wird. Kriterien für eine sinnvolle Holzenergienutzung im Nahwärmebereich wurden z.B. von [KRAPF 00] oder [RUTSCHMANN 00] erarbeitet.**
- **Der Preis der jeweils eingesetzten Holzsortimente ist von großer Bedeutung. Durch die derzeit sehr instabile Marktlage sind längerfristige Verträge – besonders für große Holzbedarfsmengen – schwer zu bekommen. Eine Ausnahme bilden dabei die direkt in der eigenen Kommune gesammelte Landschaftspflegematerialien bzw. Grüngut oder zu Sonderkonditionen erhältliche Waldhölzer aus dem gemeindeeigenen Wald.**
- **Bei der Förderung von Projekten ist daher zu prüfen, ob sowohl die Belieferung mit Brennstoff, als auch die Abnahme der Wärme von Beginn an und langfristig sichergestellt werden können.**

## **11.4 Holzenergienutzung zur Stromerzeugung im bestehenden Energiesystem Baden-Württemberg**

Die Berechnungen mit dem Energiesystemmodell für Baden-Württemberg werden von den Folgen des Kernenergieausstiegs auf die Versorgungsstruktur geprägt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Wahl der Energieträger für die Stromerzeugung, wobei Holz in Konkurrenz zu Erdgas und Kohle steht, die Brennstoffpreise das ausschlaggebende Kriterium darstellen.

Unter den aktuellen Rahmenbedingungen sind für die Stromerzeugung (ohne Berücksichtigung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes) bereits die billigsten Holzsortimente, wie behandeltes Altholz, eine wettbewerbsfähige Alternative zu Erdgas und Kohle. Dies allerdings nur, wenn diese Holzsortimente in Kohlekraftwerken zugefeuert werden dürfen. Reine Biomasseanlagen sind über den gesamten Analysezeitraum bis 2030 ohne Förderung nicht konkurrenzfähig. Für die Zukunft wird eine deutliche Erhöhung der Gaspreise erwartet, wodurch dann auch nach und nach weitere Holzsortimente konkurrenzfähig werden.

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)<sup>1</sup> leistet einen entscheidenden Beitrag zur Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugungsanlagen. Unter den derzeitigen Marktbedingungen sind gemäß dem Ergebnis des Energiesystemmodells auch Kohlekraftwerke mit Holzmitverbrennung nicht wirtschaftlich, wenn sie keine KWK betreiben.

Wird die Zufeuerung in Kohlekraftwerken zugelassen und werden diese Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung betrieben, so sind zur weitgehenden Nutzung der vorhandenen Holzpotenziale Subventionen von ca. 1-1,5 Ct/kWh nötig, um den „Holzstrom“ konkurrenzfähig zu machen. Dabei wird allerdings mit der Holznutzung zugleich die Steinkohlenutzung subventioniert, da unter diesen Vorgaben das Holz ausschließlich in Kohlekraftwerken mitverbrannt würde. Während mittelfristig mit dieser verstärkten Steinkohlenutzung ein Anstieg der Emissionen an CO<sub>2fossil</sub> und SO<sub>2</sub> verbunden wäre, ist langfristig eine Senkung dieser Emissionen um 6 % bzw. im Fall der NO<sub>x</sub>-Emissionen sogar um 18 % möglich. Die Partikelemissionen steigen jedoch in jedem Fall an, sobald Holz genutzt wird. Bei Mitverbrennung in Steinkohlekraftwerken werden dabei sogar maximale Emissionen im Vergleich zum Referenzfall erreicht.

Für die weitgehende Nutzung der Holzpotenziale zur Stromerzeugung in Baden-Württemberg mit reinen Biomassefeuerungen wären Subventionen in der Größenordnung von 6 Ct/kWh nötig.

---

<sup>1</sup> unter der Voraussetzung bereits bestehender Wärmenetze

Die Kohlendioxid- Emissionsminderungen durch die Nutzung von Alt- und Restholz zur Stromerzeugung liegen maximal im Bereich von 6 % im Verhältnis zur weiterhin vorwiegenden Nutzung fossiler Energieträger unter der Vorgabe des Kernenergieausstiegs.

- **Durch den Kernenergieausstieg wird langfristig gesehen Steinkohle zum wichtigsten Energieträger. Dadurch steigen die Emissionen an Kohlendioxid und Staub stark an. Diese Entwicklung kann durch Holznutzung allein nicht ausgeglichen werden.**
- **Es gibt derzeit eine bereits ohne Förderung wirtschaftliche Variante der Stromerzeugung aus Alt- und Restholz: die Mitverbrennung behandelter Gebrauchthölzer in Steinkohlekraftwerken mit Kraft- Wärme- Kopplung; dies ist allerdings unter dem Vorbehalt zu sehen, dass die Marktsituation für Gebrauchthölzer derzeit sehr instabil ist und langfristige Verträge kaum zustande kommen.**
- **Mit einer Förderung der Mitverbrennung wäre mit relativ geringem Aufwand die weitgehende Nutzung der vorhandenen Holzpotenziale möglich.**
- **Durch die gleichzeitig damit verbundenen Förderung der Steinkohleverstromung steigen die Emissionen mittelfristig sogar an; positive ökologische Effekte sind erst langfristig zu erwarten.**
- **Reine Biomassefeuerungen bedürfen deutlich höherer Fördersummen als die Mitverbrennung, führen jedoch auch zu größeren Minderungen an Emissionen.**
- **Für die Wirtschaftlichkeit der Holznutzung ist der Betrieb unter Kraft-Wärme-Kopplung ein entscheidender Faktor.**
- **Erhöhte technische Anforderungen an die Verbrennung behandelter Hölzer (17. BImSchV) haben laut den Ergebnissen des Modells keinen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Holznutzung im Gesamtsystem; dabei ist jedoch zu beachten, dass diese erhöhten Investitionen in der Einzelfallentscheidung ein ausschlaggebender Punkt gegen die Holznutzung sein können.**

## 11.5 Aktuelle Tendenzen

Nachfolgend werden einige aktuelle Themen erläutert, die teilweise nur am Rande Gegenstand dieser Arbeit waren, deren weitere Entwicklung die Holzenergienutzung jedoch beeinflussen wird.

- *Standardisierung der Holzbrennstoffe:* Zurzeit wird für die Normierung der Holzbrennstoffe eine EU- Norm erarbeitet, die zugleich auch die Brennstoffanalysemethoden standardisieren wird. Ziel dabei ist, für die Holzbrennstoffe ähnliche Normen zu entwickeln, wie sie für fossile Energieträger üblich sind, um die Qualität des jeweiligen Brennstoffs sicherzustellen. Da die Einflussnahme auf Qualitätsmerkmale von Holz, wie z.B. Feuchte oder Aschegehalt sehr aufwändig oder unmöglich ist, wird der Trend jedoch vermutlich nicht dahin gehen, dass etwa Gebrauchtholzaufbereiter oder Forstämter versuchen, bestimmte, ausgewählte Holzqualitäten dauerhaft zu gewährleisten. Vermutlich wird eher durch die standardisierten Analysemethoden mehr Transparenz für die Qualität der angebotenen Holzsortimente, ohne die Bereitstellung dieser Sortimente jedoch zu beeinflussen. Das Wissen um die Eigenschaften der vorliegenden Brennstoffe kann jedoch zu größeren Differenzierungen bei den Holzpreisen führen.
- *Nutzung von Landschaftspflegematerial:* Während Straßenbegleitgrün für die energetische Nutzung allein deshalb uninteressant ist, weil das Material zu weit verteilt und eine Sammlung zu aufwändig ist, wird von den Kommunen und den Betreibern von Häckselplätzen in letzter Zeit verstärkt nach einer möglichen energetischen Verwertung des Grünguts aus privaten Haushalten bzw. größeren öffentlichen Grünflächen geforscht. Dieses Material wird an zentralen Punkten z.T. von Privatpersonen, z.T. von der kommunalen Müllabfuhr angeliefert und bislang überwiegend zu Kompost verarbeitet, welcher jedoch selbst nur schwer absetzbar ist. Zu möglichen Aufbereitungsschritten für das Material (Abtrennung der Blätter und des Feinanteils) und daraus abgeleiteten, genauer differenzierten Potenzialen an Grüngut laufen derzeit Untersuchungen<sup>2</sup>.
- *Pellets, Briketts:* Die Möglichkeit eines weitgehend wartungs- und störungsfreien Betriebs mit Pelletfeuerungen macht diese vor allem für den Gebrauch in dezentralen Anlagen, insbesondere beim Hausbrand interessant. In Baden-Württemberg ist jedoch der Markt für Pellets und Pelletfeuerungskessel zunächst noch im Entstehen begriffen. Dadurch sind auch Informationen über Bezugsquellen, Qualitäten und dergleichen nur schwer erhältlich. Briketts sind

---

<sup>2</sup> [GROLL 00]: Projekt über Potenziale und die Logistikkette des Grünguts der Fa. A+S Häcksel und Kompost GmbH, gefördert von der Bundesstiftung Umwelt

dagegen für moderne Holzfeuerungen nicht mehr interessant, da sie keine Vorteile hinsichtlich des Ausbrands und damit hinsichtlich der Emissionen bieten und trotzdem aufwändig herzustellen sind. Angewendet werden Brikettiermaschinen noch dort, wo noch Stückholzkessel älteren Datums z.B. in Schreinereien vorhanden sind. Für diese kann mit den oft ebenfalls relativ alten Brikettiermaschinen das anfallende feine Restholz des Betriebs zu handhabbaren Stücken verpresst werden.

- *Verknappung der Holzpotenziale:* Es wird derzeit sowohl für die unbehandelten, als auch für die behandelten Holzsortimente eine Verknappung der Potenziale bzw. ein Anstieg der durchschnittlichen Holzpreise prognostiziert. Während bei den unbehandelten Holzsortimenten der Grund dafür in der zunehmenden Konkurrenz in der stofflichen Verwertung (Papier-, Zellstoff-, Holzwerkstoffindustrie) liegt, wird für die behandelten bzw. kontaminierten Holzsortimente befürchtet, dass durch den Bau großer Holzheizkraftwerke entsprechend große Mengen Hölzer aus der jeweiligen Region bzw. im überregionalen Markt abgezogen werden.
- *Ascheentsorgung:* Die möglichst weitgehende Nutzung von Aschen aus der Verbrennung unbehandelter Holzsortimente in Forstwirtschaft und Landwirtschaft als Ersatzdünger bzw. Ersatzkalk findet großes Interesse. Während für die Verwertung in der Forstwirtschaft in zahlreichen Ausbringversuchen bereits mittel- und langfristige Folgen untersucht werden, scheint die Verwendung des Reststoffs in der Landwirtschaft derzeit weniger sinnvoll. Der Trend weg von der Verwertung von Reststoffen in der Nahrungsmittelproduktion lassen einen solchen Verwertungsschritt als nur schwer umsetzbar erscheinen.
- *Neugestaltung der TA Luft:* Für die Überarbeitung der TA Luft hatte zum Ergebnis, dass die Grenzwerte für Staubemissionen für kleinere Anlagen von derzeit 150 mg/m<sup>3</sup> herabgesetzt wurden. Die Folge davon ist, dass für die Mehrzahl der Anlagen v.a. im gewerblichen Bereich, die bislang mit Multizyklonen als einziger Staubabscheidemaßnahme betrieben wurden, eine Nachrüstung erforderlich wird. In Baden- Württemberg haben laut Emissionserklärungen von 1996 ca. 50 Anlagen (35% der mit Holz betriebenen Feuerungen in Baden-Württemberg) Staubemissionskonzentrationen über 100 mg/m<sup>3</sup> und müssen voraussichtlich durch die Verschärfung der Anforderungen umgerüstet werden. Dies bedeutet eine signifikante Änderung der Anlagenstruktur in diesem Bereich.
- *Vergasung, Stirling-Motor:* Für diese noch in der Entwicklung befindlichen Techniken sind inzwischen einige Pilotprojekte und Versuchsanlagen in Betrieb. Langfristige Betriebserfahrungen existieren dafür jedoch nicht.
- *Absorptionskältemaschinen:* Die Wirtschaftlichkeit der mit Holz betriebenen Heiz(kraft)werke hängt sehr stark damit zusammen, wie hoch die Auslastung der

Anlage auch im Sommer ist. Eine mögliche Abhilfe gegen Abschaltungen der Anlagen in den Sommermonaten wäre der Betrieb von Absorptionskältemaschinen, welche aus der ausgekoppelten Wärme Kälte erzeugen könnten. Aufgrund der niedrigen Strompreise und niedrigerer Investitionen für die entsprechenden Anlagen werden jedoch derzeit die Kompressionskältemaschinen bevorzugt verwendet.

### **11.6 Anmerkungen zur Förderung von Wärmebereitstellung aus Holzfeuerungsanlagen**

- Die investitionsabhängigen Kosten eines Holzheizwerkes haben einen entscheidenden Anteil an den Kosten solcher Anlagen. Für eine verstärkte Nutzung der Holzenergie ist also die Investitionsförderung weiterhin erforderlich.
- Ein wesentlicher Teil der Investitionen ist dort, wo noch keine Nahwärmenetze bestehen, für deren Installation erforderlich. Zur Unterstützung der energetischen Holzverwertung wäre daher auch die Förderung des Ausbaus von Nah/ Fernwärmenetzen wichtig. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass nur solche Netzabschnitte gefördert werden, die eine gewisse Auslastungsuntergrenze nicht unterschreiten. Die Förderung von Nahwärmestrecken zu weit von der Dorfgemeinschaft abgelegenen Einzelhäusern wäre z.B. nicht sinnvoll.
- Evaluationen verschiedener Förderprogramme haben gezeigt, dass die Kriterien für die Förderung und die Höhe der Fördersumme wichtige Faktoren dafür sind, ob die Mittel im Endeffekt sinnvoll eingesetzt werden. Überdimensionierungen von z.B. Brennstoffsilos oder Feuerungskessel sollten vermieden werden, um die Wirtschaftlichkeit der Projekte nicht zu gefährden. Zum einen können dafür aus Evaluationen zahlreicher Projekte ableitete Kennzahlen verwendet werden. Daneben muss jedoch beachtet werden, dass die Gestaltung der Anlagen sehr stark vom Einzelfall abhängig ist. Daher – und um typische Fehlerquellen zu vermeiden – ist auch eine intensive Begleitung der Holzenergieprojekte bereits in der Planungsphase sinnvoll.
- Bei der Brennstoffversorgung mit Holz sind Holzpreis, Versorgungssicherheit und Qualität des Materials wichtig. Die Brennstoffkosten spielen eine entscheidende Rolle für die Wirtschaftlichkeit der Anlagen, weshalb z.B. kommunale Projekte, bei welchen ausschließlich auf die eigenen Waldholzreserven zurück gegriffen wird, oft schlechtere ökonomische Daten aufweisen. Zugleich muss jedoch die Versorgungssicherheit gewährleistet sein, was dann ein Problem werden könnte, wenn ausschließlich das jeweils auf dem Markt verfügbare billigste Holzsortiment zugekauft werden soll. Dabei können z.B. bei starker Konkurrenz der stofflichen

Verwerter Enpässe auftreten. Längerfristige Lieferverträge zumindest für einen Teil der Brennstoffversorgung sind daher unabdingbar. Mangelnde Qualitäten des Brennstoffs, was Heizwert, Wassergehalt, Aschegehalt usw. angeht, können nicht nur zu technischen Problemen führen, sondern haben auch hohe Emissionsfrachten zur Folge und sind daher ökologisch ungünstig. Zudem gewinnt mit steigendem Aschegehalt auch die Ascheentsorgung als ökonomischer Faktor an Bedeutung. Insbesondere bei vorwiegender Verwendung von Landschaftspflegeholz sind vergleichsweise hohe Emissionsfrachten zu beobachten und die Kosten der Ascheentsorgung liegen hier im Gegensatz zu denen anderer Anlagen im relevanten Bereich.

- Eine Möglichkeit sowohl Brennstoffkosten als auch Versorgungssicherheit und Qualität zu erreichen, ist die Verwendung einer möglichst großen Bandbreite an Holzsortimenten. So kann z.B. mit dem Waldholz und dem Landschaftspflegeholz aus der eigenen Kommune ein Grundstock an Brennstoff genutzt werden, für den die Versorgung gesichert ist. Dazu kann je nach Marktlage weiterer Brennstoff von Gebrauchtholzaufbereitern oder Sägewerksbetreibern zugekauft werden, um die Kosten für den Brennstoff niedrig zu halten. Durch fachmännische Auswahl der Sortimente kann dadurch auch aus der Brennstoffbandbreite heraus ein Gemisch gleichbleibender Qualität zusammengestellt werden. Nachteilig bei dieser Art der Brennstoffbeschaffung ist jedoch der hohe Arbeitsaufwand.
- Die Anforderungen an die Rauchgasreinigungstechnik bzw. an die Emissionsgrenzwerte sollten vor allem dort hoch angesetzt werden, wo große Emissionsfrachten zu erwarten sind. Dies ist dort der Fall, wo überwiegend minderwertige Brennstoffe eingesetzt werden oder generell große Mengen an Holz verbrannt werden. Bei generell sehr feuchtem Brennstoff können z.B. durch eine Rauchgaskondensation zugleich die Emissionen gemindert als auch der Energieinhalt des Holzes effektiver genutzt werden.



## Glossar

atro	Abkürzung für "absolut trocken". Biomasse in absolut trockenem (d. h. wasserfreiem) Zustand kann nur durch künstliche Trocknung erreicht werden. Synonym wird auch der Begriff "wasserfrei" (wf) verwendet. [BIZ 00]
Brusthöhen- durchmesser BHD	Durchmesser eines Baumstammes in 1,30 m Höhe.
Derbholz	Oberirdische Holzmasse ab 8 cm (früher 7 cm) Zopfstärke mit Rinde. Das bei der Fällung am Stock bleibende Schaftholz zählt nicht dazu. [BIZ 00]  Nicht-Derbholz ist Holz mit einem Durchmesser von unter 8 cm mit Rinde aus Kronen und Ästen
Durchforstung	Unter Durchforstung versteht man eine forstwirtschaftliche Maßnahme, bei der zugunsten der „Zukunftsbäume“ (aufgrund Gesundheit und Qualität ausgewählte Bäume, die zur Ausbildung möglichst starker Stämme gefördert werden sollten) schwächere Bäume gefällt werden (Schwachholz)
Festmeter (fm)	In der Forst- und Holzwirtschaft übliche Maßeinheit für die Holzmasse (Stammholz), die dem Rauminhalt eines Kubikmeters (m <sup>3</sup> ) entspricht. [BIZ 00]
Feuchte u	Anteil des im Brennstoff enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse, bezogen auf die Masse des wasserfreien Brennstoffes. [BIZ 00] Für den Zusammenhang der Feuchte u mit dem Wassergehalt x gilt: $u = x/(1-x)$ ;
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	Dabei werden die bei der Verbrennung auftretenden Wärmeverluste, v.a. Abgasverluste erfasst. Die Abgasverluste entstehen durch hohe Abgastemperaturen infolge unvollständiger Verbrennung [Verscheure 98]
H1, H2, H3	Einteilung der Gebrauchthölzer nach Behandlung bzw. Kontamination (vgl. Kapitel 2.1.3): H1 – unbehandeltes Holz; H2 - Behandelte Holzabfälle ohne schädliche Verunreinigungen ; H3- Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen
Hackgut	Maschinell zerkleinertes Holz mit und ohne Rinde bis zu einer maximalen Stücklänge von 15 cm. [BIZ 00]

Hartholz	Holz mit einer mittleren Darrdichte größer 550 kg/m <sup>3</sup> (Eiche, Buche, Birke, Ulme, Esche, Ahorn, Schwarzkiefer) [BIZ 00]
Industrieholz	Industrieholz ist Holz, das aufgrund seiner Eigenschaften - dünn, krumm oder z.B. durch Fäulnis beschädigt - nicht gesägt werden kann. Bretter, Kanthölzer oder Latten können daraus nicht gefertigt werden. In hochmodernen Industrieanlagen wird das Holz daher mechanisch zerkleinert und teilweise durch eine chemische Behandlung weiter zerlegt. Die so gewonnenen Holzstückchen, Holzfasern und der Zellstoff werden dann zur Herstellung von Holzplatten (Spanplatten, Faserplatten u.s.w.) unterschiedlichster Ausprägung und Qualität sowie zur Produktion von Papier verwendet. [Forst-Rh-Pf 00] Mindestzopf: 8 cm; Mindestlänge: 2 m [Verscheure 98]
Industrierestholz	Industrierestholz fällt als Produktionsrückstand bei der Holzbe- und -verarbeitung an. Es handelt sich um meist unbehandelte stückige Holzteile wie Holzschnitzel, Kappholz oder Ablängstücke aus Massivholz, Schwarten und Spreißel. Industrierestholz fällt vor allem bei Zimmereien, Schreinereien, Möbel- und Fertighausherstellern an. [BIZ 00]
Jahresdauerlinie für Wärmebedarf	Graphische Darstellung der Summenhäufigkeit der Wärmeleistung, die anzeigt, wie lange eine bestimmte Wärmeleistung jährlich auftritt bzw. überschritten wird. [BIZ 00]
Kappholz	Kurze Holzstücke (mit oder ohne Rinde), die beim Abschneiden der Enden von Rund- oder Schnittholz anfallen. [BIZ 00]
KEA	Kumulierter (Primär-) Energieaufwand: Summe aller aufzuwendenden Primärenergien, die zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Gutes oder einer Dienstleistung nötig sind. Dabei wird der KEA meist differenziert nach dem Anteil an erneuerbarem, fossilem und nicht-fossilem Primärenergieaufwand. Da viele Umweltauswirkungen direkt mit dem damit aufzuwendenden Energieinput verbunden sind, wird der KEA oft als Indikator einer „Kurz- Ökobilanz“ verwendet, bei der die Umweltrelevanz eines Gutes oder einer Dienstleistung anhand der KEA- Werte vorabgeschätzt wird.

Kessel- Wirkungsgrad	Dieser Wirkungsgrad berücksichtigt außer den Abgasverlusten zusätzlich die Wärmeverluste, die der Heizkessel durch Strahlung an den umgebenden Raum abgibt. Die Strahlungsverluste sind abhängig von der mittleren Temperatur des Kesselwassers, der Umgebungstemperatur, der Größe der Kesseloberfläche und der Qualität der Wärmedämmung der Kesseloberfläche. Bei neuzeitlichen Kesseln betragen sie aufgrund der guten Wärmedämmung nur 0,5-2% [Verscheure 98]
Lignin	Ein hochpolymerer, aromatischer Pflanzenstoff, der in verholzenden Pflanzen die Räume zwischen den Zellmembranen ausfüllt und zu Holz werden lässt (Lignifizierung bzw. Verholzung). Auf diese Weise entsteht ein Mischkörper aus druckfestem Lignin und zugfester Zellulose. Lignin ist noch an andere Polysaccharide (Polyosen) gebunden. [BIZ 00]
lutro	Abkürzung für "lufttrocken": Gleichgewichtszustand zwischen Holzfeuchtigkeit und relativer Luftfeuchtigkeit, also kein statischer Zustand, sondern wechselnd, je nach Wechsel der relativen Luftfeuchtigkeit. Holz mit ca. 15-25 % Feuchte bzw. 13-20 % Wassergehalt
Maschinenwege	In steileren, nicht mehr schlepperbefahrbar Waldgebieten zur Durchforstung/Ernte angelegte befestigte Wege, im Abstand von 80 bis 130 m, Breite mindestens 3,5 m [Booth 97]
Nutzungsgrad	Der Nutzungsgrad ist der über eine Zeitspanne (meist ein Jahr) gemittelte Kessel-Wirkungsgrad. Dabei gehen außer dem Kessel-Wirkungsgrad noch die Zahl der Vollbenutzungsstunden, die Betriebsbereitschaftsstunden und die Betriebsbereitschaftsverluste ein. Er sagt also aus, welcher Anteil des Brennstoffverbrauchs innerhalb einer bestimmten Zeitspanne in Nutzwärme umgewandelt wird. Er lässt sich hier aus dem Verhältnis von Holzenergieeinsatz (Energie-Input) zu produzierter Nutzwärme bzw. elektrischer Energie (Energie-Output) innerhalb des definierten Zeitraums berechnen. [Verscheure 98]
Organic Rankine Cycle (ORC)	Thermodynamischer Kreisprozess zur Stromerzeugung, bei dem organische Stoffe als Kreisprozessmedium eingesetzt werden (anstelle von Wasser) [BIZ 00]

Palettenholz	Schwache Nadelholzabschnitte - Durchmesser ab 10cm und Längen zwischen 2,4 m und 3,6 m - können in technisch sehr modern ausgestatteten Sägewerken durch Einsatz der sogenannten Profilspaner- oder Profilierspanertechnik bereits zu dünnen Vollholzteilen gesägt werden. Diese Produkte werden überwiegend zur Herstellung von Paletten und Verpackungen verwendet. Laubholz wird im Gegensatz zu Nadelholz wegen der stärkeren Krümmung erst ab einem Durchmesser von ca. 20cm in Sägewerken verarbeitet. Aus dünnem Laubholz werden Teile für Paletten oder Fertigparkett gesägt. [Forst-Rh-Pf 00]
Potenzial, erschließbares	Das wirtschaftlich erschließbare Potenzial beschreibt den Anteil des wirtschaftlichen Potenzials, der unter realen Bedingungen erschlossen werden kann. Deshalb ist das erschließbare im Regelfall kleiner als das wirtschaftliche Potenzial. Es kann dann größer sein, wenn durch administrative Maßnahmen (z. B. Förderprogramme) eine Möglichkeit zur Nutzung regenerativer Energien unterstützt wird. [BIZ 00]
Potenzial, technisches	Das technische Potenzial beschreibt den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen nutzbar ist. Zusätzlich dazu werden die gegebenen strukturellen und ökologischen Restriktionen sowie gesetzliche Vorgaben berücksichtigt, da sie letztlich auch - ähnlich den technisch bedingten Eingrenzungen - "unüberwindbar" sind. Es beschreibt damit den zeit- und ortsabhängigen, primär aus technischer Sicht möglichen Beitrag einer regenerativen Energie zur Deckung der Energienachfrage. Da es wesentlich durch die technischen Randbedingungen bestimmt wird, ist es im Unterschied beispielsweise zu dem wirtschaftlichen Potenzial deutlich geringeren zeitlichen Schwankungen unterworfen. Das technische Potenzial wird immer in absoluten Werten angegeben, d. h., dass der heute bereits genutzte Anteil der jeweiligen Energieform darin enthalten ist. [BIZ 00]

Potenzial, theoretisches	Das theoretische Potenzial beschreibt das in einer gegebenen Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot (z. B. die in der gesamten Pflanzenmasse gespeicherte Energie). Es wird allein durch die gegebenen physikalischen Nutzungsgrenzen bestimmt und markiert damit die Obergrenze des theoretisch realisierbaren Beitrages zur Energiebereitstellung. Wegen unüberwindbarer technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Schranken kann das theoretische Potenzial meist nur zu sehr geringen Teilen erschlossen werden. Ihm kommt deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit erneuerbarer Energien keine praktische Relevanz zu. [BIZ 00]
Raummeter (rm)	In der Forst- und Holzwirtschaft übliches Maß für 1 Kubikmeter aufgesetztes oder geschichtetes Holz unter Einschluss der Luftzwischenräume. Gelegentlich wird für Industrie- und Brennholz auch die Bezeichnung "Ster" oder "Schichtraummeter" verwendet. [BIZ 00]
Reisholz	Oberirdisches Holz mit weniger als 8 cm (früher 7 cm) Stärke in Rinde [BIZ 00]
Rücken, Rückegassen	Unter Rücken wird der Transport des Holzes vom Bestandesrand (an den das Holz vom Ort des Fällens vorgeliefert wurde) über die Rückegasse und den Waldweg zum Lagerplatz (Polterplatz bei ganzen Stämmen) verstanden; Rückegassen werden vor der ersten Durchforstung angelegt, sie haben i.d.R. eine Länge von 20-40m und eine Breite von 3,5 m, um das Befahren mit landwirtschaftlichen Schleppern zu ermöglichen [Booth 97]
Rugel, Spälter	Stückholz mit einer Länge von 1 m. [BIZ 00]
Rundholz	Holz, das sich durch Querschneiden von Stamm und Ästen ergibt. [BIZ 00]
Scheitholz	Bei der Aufteilung des Stammholzes in nutzbare Abschnitte bleiben oft Reststücke übrig, die als Scheitholz genutzt werden
Schichtholz	Sortiment aus Rund- und/oder Spaltholz, das nach Masse oder Stapelvolumen gemessen wird. [BIZ 00]
Schwachholz	Unter Schwachholz wird der Anfall aus Erst- und Zweidurchforstungen verstanden, der einem Brusthöhendurchmesser- Bereich von etwa 10 bis 25 cm entspricht [Booth 97]

Schwarten	Beim Einschneiden von Rundholz anfallende Randzonen [BIZ 00]
Schwellenholz	Mindestzopf: 30 cm; Mindestlänge: 3 m [Verscheure 98]
Spreißel	Beim Besäumen von Schnittholz anfallende Teile, die Reste der Rundholzoberfläche mit oder ohne Rinde zeigen. [BIZ 00]
Stamm	Vom Wurzelstock getrennter, gezopfter und entasteter Schaft. [BIZ 00] Mindestzopf (Laubholz): 30 cm; Mindestzopf (Nadelholz-Profilspaner) 14 cm; Mindestlänge: 3 m [Verscheure 98]
Stock	Teil am unteren Ende des Baumstammes, der den Übergang zum Wurzelteil darstellt. Stockholz wird als gebogenes Holz für spezielle Anwendungen genutzt.
Umtriebszeit	Zeitraum zwischen Bestandesgründung und Einschlag. Der Zeitraum kann unterschiedlich lang sein für ein und dieselbe Holzart. Er hängt ab vom ökonomischen Optimum und kann schon bei abnehmendem Dickenwachstum erfolgen; Für Schnittholz übliche Umtriebszeiten: Fichte: 60-100 Jahre; Kiefer: 80-100 Jahre; Buche: 120 Jahre; Eiche: 150-200 Jahre [Speckels 00]
Volllastbenutzungsdauer	Quotient aus der jährlich erzeugten Energie (z. B. Wärmemenge) und der Nennleistung einer Anlage zur Energieumwandlung. [BIZ 00]
Wassergehalt x	Anteil des im Brennstoff enthaltenen Wassers, angegeben in Prozent der Masse, bezogen auf die Masse des wasserhaltigen Brennstoffes. [BIZ 00] Für den Zusammenhang zwischen Wassergehalt x und Feuchte u gilt: $x = u/(1+u)$ ;
Weichholz	Holz mit einer mittleren Darrdichte bis 550 kg/m <sup>3</sup> (Fichte, Tanne, Kiefer, Lärche, Erle, Weide und Pappel) [BIZ 00]
Zopf, Zopfstärke	Für die stoffliche Verwertung nicht geeigneter Teil der Krone eines Baumes. Nach Fällen des Baumes wird der Zopf bei einem Durchmesser von 8 cm (Zopfstärke) abgetrennt, also „abgezopft“.

## Literaturverzeichnis

- [ACHAUER 00] Herr Achauer, Fa. A+S Altholzverwertung; Persönliche Mitteilung vom 12.10.2000
- [ANDERL ET AL 00] Anderl, H.; Mory, A., Zotter, T.: BioCoComb-Vergasung von Biomasse und Mitverbrennung von Gas in einem Kohlestaubkessel; VGB Kraftwerkstechnik Nr.3 (2000), S. 68-74
- [BAUMBACH U. ANGERER 93] Baumbach, G.; Angerer, M.: Schadstoffemissionen gewerblicher und industrieller Holzverbrennung, Erfassung des Standes der Technik und Möglichkeiten zur Emissionsminderung; Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), KfK-PEF 103, 1993
- [BELTON U. STEWART 02] Belton, V.; Stewart, T. J.: Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA); Kluwer Academic Publishers 2002.
- [BERGHOFF 98] Berghoff, R.: Verwertungskonzept des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen für Holzabfälle und die Umsetzung in die Praxis; Vortrag im Rahmen des VDI-Seminars Stand der Feuerungstechnik für Holz, Holzabfälle und Biomasse, 3./4. Dezember 1998, Salzburg
- [BGL 00] Bundesverband Güterfernverkehr und Logistik e.V.: Herr Schwichtenberg: Persönliche Mitteilung vom 22.08.2000
- [BILITEWSKI 95] Bilitewski, B. (Hrsg.): Altholzseminar, 1. Abfall- und Altlastenkolloquium am 12. Mai 1995 in der Technischen Universität Dresden; Dietz, M.: Erfahrungen eines Anlagenbetreibers bei der thermischen Nutzung von Restholz, TU Dresden Institut für Siedlungs- und Industrieressourcenwirtschaft
- [BIZ 00] Biomasse-Informations-Zentrum (BIZ) des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart; Internetseite: <http://www.biomasse-info.net>; Stand 29. Mai 2000
- [BLANK ET AL 99] Blank, V.P.; Wickert, B.; Obermeier, A.; Friedrich, R.: Erstellung eines Emissionskatasters für Feuerungsanlagen in Haushalten und Kleinverbrauch; Umweltbundesamt, Forschungsbericht 104 02 830, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, 1999.

- [BMU 99] Bundesministerium für Umwelt: Pressemitteilung 124/99 vom 15.08.1999: Missbrauch bei Mülleinlagerung unter Tage unterbinden – Einlagerung nur bei Nachweis der Umweltverträglichkeit; URL: <http://www.bmu.de/presse/bmu/pm167.htm>
- [BMU 00] Bundesministerium für Umwelt (Hrsg): *Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000*. <http://www.bmu.de/atomkraft/konsens01.htm>.
- [BOCKELMANN ET AL 95] Bockelmann, C.; Pohlandt, K.; Marutzky, R.: Konzentration ausgewählter Elemente in Holzsortimenten: Chlor, Fluor und Schwermetalle; Holz als Roh- und Wertstoff, 53 (1995), S. 377-383.
- [BOOTH 97] Booth, Herbert: Forsttechnik- Schwachholzernte; Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL) (Hrsg.); Rendburg- Osterröfeld 1997
- [BR 97] Baustoff Recycling und Deponietechnik (BR): Forus- Technik für Briesen; BR Nr. 8-9 (1997), S. 26-29
- [BR 98B] Baustoff Recycling und Deponietechnik (BR): Holzrecycling und Schnitzelverarbeitung; BR Nr. 9 (1998), S. 18-20
- [BRAGAGNOLO 00] Bragagnolo, G.: Stadtwerke Metzingen, Persönliche Mitteilungen, November 2000
- [BRÖGELMANN 00] Brögelmann; Holzwärme Müllheim GmbH: Persönliche Mitteilung vom 26.07.2000
- [BRÖKER ET AL 94] Bröker, G.; Geueke, K.-J.; Hiester, E.; Niesenhaus, H.: Emissionen von PCDD/F aus Hausbrandfeuerungen; Staub- Reinhaltung der Luft, Band 54 (1994), S. 283-288.
- [BRÖKELAND 00] Brökeland, R.: Beifeuerung von Biomasse in Kohlekraftwerken; Tagungsband des Fachkongresses im Rahmen der Bayern Regenerativ 2000 „Stromerzeugung aus Biomasse“, Messezentrum Augsburg, 14. 07.2000
- [BUWAL 95] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Handbuch Emissionsfaktoren für stationäre Quellen, Bern 1995
- [CARMEN 00] Centrales Agrar- Rohstoff- Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk C.A.R.M.E.N. e.V.: Informationsblätter, Rimpar
- [DELLER 00] Herr Dr. Deller, Landwirtschaftliche Untersuchungsanstalt Karlsruhe: Persönliche Mitteilung vom 24.08.2000



- [DETZEL ET AL 98] Detzel, A.; Patyk, A.; Fehrenbach, H.; Franke, B.; Gingrich, J.; Lell, M.; Vogt, R.: Investigations of emissions and abatement measures for persistent organic pollutants in the Federal Republic of Germany; Umweltbundesamt Research Report 295 44365, UBA-FB 98-115/e, 1998.
- [EEA 99] European Environmental Agency (EEA): Joint EMEP/Corinair Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Second Edition 1999; URL: <http://themes.eea.eu.int/showpage.php/state/air?pg=40512>; Stand: März 2000.
- [EFFELS 00] Deutsches Institut für Bautechnik, Herr Dr. Effels: persönliche Mitteilung vom 15.08.2000
- [EICHELBERGER 00] Fa. Eichelberger: Persönliche Mitteilung zu Transportkosten von unzerkleinertem Gebrauchtholz und Hackschnitzel vom 31.08.2000
- [EPA 93] US-EPA Environmental Protection Agency: Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Cadmium and Cadmium Compounds, September 1993.
- [EPA 98] US-EPA: Environmental Protection Agency: Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Polyorganic Matters; EPA-454/R-98-014, Research Triangle Parc, North Carolina 1998
- [EUWID 03] Europäischer Wirtschaftsdienst EUWID: „Verwerter-Ankaufspreise für Altholz April 2003“, Nr. 18, 29. April 2003, S. 15
- [EUWID 03A] Europäischer Wirtschaftsdienst EUWID: „Vier Biomassekraftwerke sparen 500.000 t CO<sub>2</sub>“, Nr. 17, 22. April 2003, S. 8
- [FELLER ET AL 99] Feller, S.; v. Webenau, B.; Weixler, H.; Krausenboeck, B.; Göldner, A.: Teilmechanisierte Waldhackschnitzel- Bereitstellung; Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) Bericht Nr. 21, April 1999; URL:<http://www.lwf.uni-muenchen.de/veroef/veroef99/lwfber21/autoren.htm>
- [FDFREIBURG 00] Forstdirektion Freiburg: Energetische Verwertung von Holz – Potenzialuntersuchung Baden-Württemberg – Elsass; Zwischenbericht Az.: 8650.99, Freiburg, Februar 2000
- [FLAMME U. WALTER 98] Flamme, S.; Walter, G.: Gebraucht- und Restholzsituation in NRW; Baustoff Recycling und Deponietechnik BR, Nr. 10 (1998), S. 11-13
- [FNP 2010] Nachbarschaftsverband Karlsruhe; Planungsstelle Stadtplanungsamt Karlsruhe: Flächennutzungsplan 2010; Vorentwurf (Stand 4/1999), 1999.
- [FNR 00] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Leitfaden Bioenergie; Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen; Gülzow 2000

- [FORSTABSATZ-FONDS 98] FORSTABSATZFONDS (Hrsg.): Holzenergie für Kommunen – Ein Leitfaden für Initiatoren, Materialien zu Wald, Holz und Umwelt, Bonn 1998
- [FORST-RH-PF 00] Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz: Homepage: URL: <http://www.wald-rlp.de/1holz.htm>; Stand: 27.7.2000
- [FRIEß U. HUBER 98] Frieß, H.; Huber, S.: Emissionen bayrischer Biomassefeuerungsanlagen – Ergebnisse einer Grundsatzuntersuchung; Bayrisches Landesamt für Umweltschutz 1998; URL: <http://www.bayern.de/LFU/luft/biofeuer/> Stand: November 1999
- [GAEGAUF 00] Gaegauf, C.: Partikelemissionen verschiedener Holzfeuerungen; Tagungsband zum 6. Holzenergie-Symposium „Luftreinhaltung, Haus-Systeme und Stromerzeugung“, Nussbaumer, T. (Hrsg.); 20. Oktober 2000 Zürich
- [GEGUSCH 01] Gegusch, H.: Entsorgung von Altholz – Die Regelungen der geplanten Altholzverordnung; Vortrag im Rahmen des VDI-Seminars 433621 „Prioritäre Abfallströme Klärschlamm/Holz/Ersatzbrennstoffe/Tiermehl“, 15./16.2.2001, Neuss
- [GÖRG 97] Görg, H.: Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen; Darmstadt, Technische Hochschule, Disseration, 1997.
- [GROLL 00] Herr Groll, Fa. A+S Häcksel- und Kompost GmbH, Persönliche Mitteilung vom 19.10.2000
- [GSB 00] Gesellschaft zur Entsorgung von Sondermüll in Bayern mbH, Betrieb Gallenbach: S. Grabmeier: Persönliche Mitteilung vom 18.08.2000
- [GSES 00] Glückauf Sondershausen, Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH (GSES): Herr Dr. Wilde: Persönliche Mitteilung vom 28.08.2000
- [GSF 97] GSF: Forschungszentrum für Umwelt- und Gesundheit GmbH: Erforschung von Handlungsmöglichkeiten für ökologisches Wirtschaften; Projekt-Nr. 07 OWI 03, Phase A: Zustandsanalyse des für die Bauwirtschaft relevanten Ressourcenverbrauches (ökologische und ökonomische Relevanz); Vorabzug der Endfassung, München 1997.
- [HAMMEL 00] Hammel Recyclingtechnik GmbH: Persönliche Mitteilung zu Emissionsdaten aus bei Holzaufbereitung verwendeten Dieselmotoren, 27.10.2000.

- [HEIN ET AL 96] Hein, K.; Spliethoff, H.; Siegle, V.; Heinzel, T.: Verfeuerung von Biomasse als Option zur Minderung der energieverbrauchsbedingten CO<sub>2</sub>- Emissionen; Jahrbuch der Universität Stuttgart, 1996; URL: <http://uni-stuttgart.de/wechselwirkungen/ww1996/hein.htm> Stand 02.11.2000
- [HEINLOTH 00] Heinloth, K.: Notwendigkeit energiepolitischen Handelns aufgrund der anschwellenden Risiken von Klimakatastrophen, Tagungsband des 9. Symposium „Festbrennstoffe aus Biomasse und umweltfreundliche Energietechnik“ Kloster Banz, 23./24.11.2000
- [IBS 00] IBS Ingenieurbüro Schuler GmbH: Wärmeerzeugung mit modernen Holzfeuerungsanlagen; IBS- Informationsblätter; Persönliche Mitteilungen;
- [IHB 03] IHB Internationale Holzbörse: Luft für Holzkraftwerke wird dünner, URL: [http://www.ihb.de/de/news\\_details.html/a:1:i:0;s:5:12537](http://www.ihb.de/de/news_details.html/a:1:i:0;s:5:12537);}, Stand: 23. April 2003
- [INFO-ENERGIE 98] Informationszentrum Energie, „Heizen mit der Biomasse Holz“, 1998
- [IVD 88] Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Abteilung Reinhaltung der Luft, Universität Stuttgart: Schadstoffemissionen von Kleinfeuerungen; IVD Stuttgart, Bericht Nr. 11, 1988
- [KALTSCHMITT U. REINHARDT 97] Kaltschmitt, M.; Reinhardt, G.A.: Nachwachsende Energieträger: Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung; Vieweg Verlag Braunschweig – Wiesbaden, 1997.
- [KHALILI ET AL 95] Khalili, N. R.; Scheff, P.A.; Holsen, T.M.: PAH Source Fingerprints for Coke Ovens, Diesel and Gasoline Engines, Highway Tunnels and Wood Combustion Emissions; Atmospheric Environment, Vol. 29 (1995), No. 4, S. 533-542.
- [KINDLER ET AL 00] Kindler, H.; Ehrenstraßer, H.; Schmidt, W.: Altholzmitverbrennung in einem Braunkohlekraftwerk; Tagungsband der VGB-Tagung „Kraftwerk 2000“, Oktober 2000
- [KLENK 98] Klenk, M.: Feuerungsanlage mit Kraft-Wärme- Kopplung, Abschlussbericht UBA 70 441-1/4 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Juli 1998
- [KOLB ET AL 98] Kolb, M.; Franssen, B.; Gschwind, T.: Zugabe von Asche aus Holzkraftwerken in den Faulturm von Kläranlagen; EntsorgungsPraxis, Nr. 9 (1998) S. 35-36

- [KRAPF 00] Krapf, G. : Evaluierung von Biomasseheizwerken – Kennzahlen für die Planung zukünftiger Projekte; Tagungsband zum 8. Symposium des C.A.R.M.E.N. e.V. „Nachwachsende Rohstoffe auf dem Weg ins 21. Jahrhundert“ am 3./4. Juli 2000, Würzburg, S. 69-83
- [KREISCHER 00] Kreischer: Fa. USEG Holzrecycling GmbH, Karlsruhe, Persönliche Mitteilung vom 25. Mai 2000.
- [LAUNHARDT ET AL 99] Launhardt, T.; Hartmann, H.; Link, H.:Emissionsuntersuchungen an bayrischen Zentralheizungsanlagen für Holzhackgut; Tagungsband des 2. Stuttgarter Holzfeuerungs-Kolloquium am 21. 09.1999, IVD-Bericht Nr. 43-1999, Stuttgart 1999
- [LFU 99] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Anlagen zur Aufbereitung von Holzabfällen in Baden-Württemberg, Erhebung, Stand August 1999, Karlsruhe 1999
- [LFUBAY 98] Bayrisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Untersuchung von Altholz aus Altholzaufbereitungsanlagen in Bayern, München 1998.
- [LKLÖRRACH 97] Abfallwirtschaft Landkreis Lörrach: Abfallgebühren – Baden-Württemberg; Ergebnisse der Umfrage 1997; DeponieOnline; URL: <http://www.deponieonline.de/index2.htm>, Stand 16.08.2000
- [MAIER 00] B. Maier Zerkleinerungstechnik GmbH, Bielefeld: Informationsblätter zu Referenzanlagen
- [MARUTZKY 00] Marutzky, R.: Potenziale an Holzbrennstoffen aus dem forstlichen Bereich, der Sägeindustrie und Gebrauchtholz; Tagungsband des VDI-Seminars „Strom und Wärme aus Biomasse- Biogas“, Freiberg, 9./10.11.2000
- [MARUTZKY U. SEEGER 99] Marutzky, R.; Seeger, K.: Energie aus Holz und anderer Biomasse; DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinfelden-Echterdingen 1999
- [MAXIT 00] Bastian, P., Fa. Maxit Baustoff- und Kalkwerk Mathis GmbH: Schriftliche Mitteilung vom 06.09.2000.
- [MEINHARDT ET AL 00] Meinhardt, N.; Lenz, R.; Nürk, G.: Energieholz in Baden-Württemberg – Potenziale und derzeitige Verwertung; Diplomarbeit an der Fachhochschule Nürtingen, Fachbereich Landespflege; 2000
- [MEYER 97] Meyer, W.: Holzeinsatz im Holzrahmen- und Holztafelbau: schriftliche Mitteilung des BDF, 1997; In: Informationsdienst Holz, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung: Ökobilanzen Holz; ISSN-Nr. 0466-2114; München, 1997.

- [MLR 99] Ministerium Ländlicher Raum: Schwörer Haus – Mitverbrennung externer Biomassen in einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage; Endbericht des Pilotvorhabens mit Beteiligung von Heinrich (Fichtner GmbH&Co. KG, Stuttgart), Bohner (SchwörerHaus KG, Oberstetten), Kemmerer, Thumm (Forstamt Lichtenstein, Kleinenstingen; Forstlicher Stützpunkt Pfronstetten); Petermann (Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege Tübingen); Göggel (Amt für Landwirtschaft Münsingen); Walz (Bau- und Entsorgungsbetriebe der Stadt Reutlingen); Söll (Straßenmeisterei Gauingen); Vetter (Institut für umweltgerechte Landbewirtschaftung Müllheim); Bechteler (Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg); April 1999
- [NOGER U. PLETSCHER 00] Noger, D.; Pletscher, E.: Der EMPA-Ascheschnelltest für die Beurteilung von Holzaschen aus Stückholzfeuerungen für naturbelassenes Holz und Feuern im Freien; Müll und Abfall, Nr. 3 (2000), S. 126-137
- [OBERNBERGER 90] Obernberger, I.: Verwendungsmöglichkeiten von Aschen aus Hackgut- und Rindenfeuerungen; Diplomarbeit, eingereicht am Institut für Verfahrenstechnik der TU Graz, 1990.
- [OBERNBERGER 94] Obernberger, I.: Mengen, Charakteristik und Zusammensetzung von Aschen aus Biomasseheizwerken; Tagungsband zum Symposium Sekundärrohstoff Holzasche, 15./16.09.1994, Institut für Verfahrenstechnik, Graz
- [OSER ET AL 00] Oser, M.; Nussbaumer, T.; Schweizer, B.; Mohr, M.; Figi, R.: Untersuchung der Einflüsse auf die Partikelemissionen in einer Unterschubfeuerung; Tagungsband zum 6. Holzenergie-Symposium am 20.10.2000 „Luftreinhaltung, Haus-Systeme und Stromerzeugung; Nussbaumer, T. (Hrsg.); ETH Zürich 2000
- [OTT 97] Ott, M.: Biomassemitverbrennung in Heizkraftwerken – eine Möglichkeit der effizienten CO<sub>2</sub>- Minderung; Elektrizitätswirtschaft, Jahrgang 96 (1997), Heft 24; S. 1455-1460
- [POHLANDT ET AL 94] Pohlandt, K.; Marutzky, R.; Bahadir, M.: Zusammensetzung, Verwertung und Entsorgung von mineralischen Rückständen aus der Verbrennung unbehandelter und behandelter Hölzer; Dissertation an der Technischen Universität Carolo- Wilhelmina zu Braunschweig; 1994
- [POHLANDT ET AL 96] Pohlandt, K.; Gering, C.; Nell, U.; Rumpf, S.: Einsatz von Holzasche in Wäldern; WKI-Kurzbericht Nr. 44/1996, Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Institut Holzforschung, Braunschweig, 1996
- [PROGNOS 00] Prognos AG (Hrsg.): Energiereport III, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2000, S. 204

- [QUAß ET AL 97] Quaß, U.; Fermann, M.; Bröker, G.: Materialien No. 43, Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans in Europe; Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen 1997.
- [RAL 97] Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.: Recyclingprodukte aus Gebrauchtholz, Gütesicherung RAL-GZ 428, November 1997.
- [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98] Rakemann, W.; Zibulski, H.-D.: Aufbereitung von Alt- und Resthölzern; Baustoff Recycling und Deponietechnik BR, Nr. 7-8 (1998), S. 6-10
- [REMMERS 00] Remmers, R.: 25 MW Holzkraftwerk mit stationärer Wirbelschichtfeuerung in Cuijk (NL); Tagungsband zum 6. Holzenergie-Symposium am 20.10.2000 „Luftreinhaltung, Haus-Systeme und Stromerzeugung; Nussbaumer, T. (Hrsg.); ETH Zürich 2000
- [RENTZ ET AL 00A] Rentz, O.; Wietschel, M.; Dreher, M.; Böhringer, C.; Bräuer, W.; Kühn, I.; Bergmann, H.: *Neue umweltpolitische Instrumente im liberalisierten Energiemarkt*. Karlsruhe: BWPLUS, 2000.
- [RENTZ ET AL 00B] Rentz, O.; Karl, U.; Peter, H.; Wolff, F.: Konzeption zur Verbesserung der Emissionsdatenerfassung für krebserzeugende Spurenstoffe in Baden-Württemberg; Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, März 2000
- [RENTZ ET AL 97] Rentz, O., Wietschel, M., Ardone, A, Fichtner, W., and Lüth, O.: *Perseus: Modellentwicklungsstand, Anwendungsfälle und Perspektiven*. In: Hake, S. F. and Markewitz, P.: *Modellinstrumente für CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien*. Jülich: Forschungszentrum Jülich Zentralbibliothek, 1997, S. 223-240.
- [RENTZ ET AL 99] Rentz, O.; Sasse, H.; Karl, U.: Analyse der künftigen Entsorgung der Klärschlämme in Baden-Württemberg durch Mitverbrennung; Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Universität Karlsruhe; Projekt Wasser-Abfall-Boden (PWAB) gefördert durch das Land Baden-Württemberg, Förderkennzeichen PD 97 190; 1999
- [RENTZ ET AL 00] Rentz, O.; Karl, U.; Skok, J.; Wolff, F.: Die Nutzung von Holz als Baustoff und erneuerbare Energiequelle im Rahmen des grenzüberschreitenden Lokalen Agenda 21 Prozesses der Kommunen Stutensee und La Petite Pierre; Bericht im Auftrag der Stadt Stutensee, gefördert durch das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung, Universität Karlsruhe, 2000.

- [RENTZ ET AL 01A] Rentz, O.; Wietschel, M.; Dreher, M.: Neue umweltpolitische Instrumente im liberalisierten Strommarkt, Beitrag BWPLUS-Statuskolloquium 28.02 – 01.03.01, Karlsruhe: Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe (TH), erscheint 04/2001.
- [RENTZ ET AL 01B] Rentz, O. ; Karl, U.; Wolff, F.; Dreher, M.; Wietschel, M.: Energetische Nutzung von Alt- und Restholz in Baden-Württemberg, Endbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Februar 2001
- [RÖSCH 96] Rösch, C.: Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Baden-Württemberg; Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Technik und Umwelt, Wissenschaftlicher Bericht FZKA 5857, 1996
- [RUCKENBAUER U. HOLZNER 94] Ruckenbauer, P.; Holzner, H.: Pflanzenbauliche Aspekte einer Holzascheausbringung auf Acker- und Grünland; Tagungsband zum Symposium Sekundärrohstoff Holzasche, 15./16.9.1994, Technische Universität Graz.
- [RUTSCHMANN 00] Rutschmann, C.: „Lothar- Programm“ der Schweiz, 9. Symposium Festbrennstoffe aus Biomasse und umweltfreundliche Energietechnik, Kloster Banz, 23./24.11.2000
- [SANDER U. ANDRÉN 97] Sander, M.-L.; Andrén, O.: Biofuel Ash as Fertilizer in Salix Plantations: Nutrient Uptake and Woody Biomass Production; Swedish University of Agricultural Sciences, Doctoral Thesis, Uppsala 1997
- [SBW 00] SBW Sonderabfallentsorgung Baden-Württemberg GmbH, Stuttgart; Herr Hascher: Persönliche Mitteilung vom 16.08.2000
- [SCHÄFER 03] Schäfer, C.: Aktuelle Vorschriften zur Entsorgung von Holzaschen; Beitrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg im Rahmen des 4. Stuttgarter Holzfeuerungskolloquiums am 8. April 2003, Institut für Verfahrenstechnik u. Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart, Bericht Nr. 51-2003, S. 53 ff.
- [SCHAFFER 02] Schaffer, A.: Ecological Input-Output Analysis, ECOLIO – A Model for conventional and ecological Key Sector Analysis in Germany; Karlsruher Beiträge zur wirtschaftspolitischen Forschung, Rothengatter und Kowalski (Hrsg.), Band 13, Karlsruhe 2002

- [SCHAUMANN U. WALTER 96] Schaumann, G.; Walter, J.: Untersuchung der Nutzung von Holz und Holzabfällen für den Einsatz in Energiesystemen in Rheinland-Pfalz; Forschungsprojekt der Transferstelle für Regenerative Energiesysteme, neue Werkstoffe und neue Verfahren, Fachhochschule des Landes Rheinland-Pfalz, Abteilung Bingen (TSB); 1996
- [SCHMIDT U. PAULSEN 99] Schmidt, R.; Paulsen, W.: Fa. Eisenwerk Baumgarte Bielefeld: Altholzverbrennung in der stationären Wirbelschichtfeuerung; 1999
- [SCHMOECKEL U. STREIT 95] Schmoeckel, G.; Streit, A.: Emissionen organischer Stoffe bei der Holzfeuerung; Bayrisches Landesamt für Umweltschutz 1995; URL: <http://www.bayern.de/LFU/luft/holzfeuer/index.html> Stand: November 1999
- [SCHNEIDER 97] Schneider, E.: Steinkohlenflugasche in Normung und Richtlinie – Anmerkungen zur DIN EN 450 und DafStb-Richtlinie; Beton Nr. 7 (1997), S. 397-399
- [SCHWEINLE 00A] Schweinle, J.: Analyse und Bewertung der forstlichen Produktion als Grundlage für weiterführende forst- und holzwirtschaftliche Produktlinien-Analysen; Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Nr. 184, Kommissionsverlag Max Wiedebusch Hamburg, 2. Auflage 2000
- [SCHWEINLE 00B] Schweinle, J.: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg, Persönliche Mitteilung vom 13.09.2000
- [SEEGER ] Seeger, K.; Hess. Lichtenau: Wassergekühlte Rostfeuerung für Holzabfälle, Amand Umwelttechnik Lockwitz GmbH: Baustoffrecyclingzentrum, Dresden-Lockwitz
- [SERUP ET AL 99] Serup, H.; Falster, H.; Gamborg, C.; Gundersen, P.; Hansen, L.; Heding, N.; Houmann Jakobsen, H.; Kofman, P.; Nikolaisen, L.; Thomsen, I.: Holz als Energieträger, 2. Auflage, Center für Biomasse-Technologie; Dänische Energiebehörde EnergiOplysningen, DK-Virum, 1999
- [SIX 00] Six, J.: Mitverbrennung von Altholz/Ersatzbrennstoffen in Industriekraftwerken; VDI-Tagung „Energetische Verwertung von Abfällen“ am 28.-29.06.2000 in Mannheim
- [SRD 00] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Struktur- und Regionaldatenbank, URL: <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de>, Stand: Dezember 2000.
- [STALA 00] Internetseite des Statistischen Landesamts Baden-Württemberg; URL: <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de> , Stand: 25.08.2000



- [STEINMANN 95] Steinmann, P. : Possibilités d'économies dans les projets de chauffages automatique au bois – Une approche statistique ; Association suisse pour l'énergie du bois ASEB, Programme d'encouragement pour le bois, Energie 2000 ; Genf 1995
- [STENGLER 00] Stengler, E.: Arbeitsgemeinschaft der Sonderabfall-Entsorgungsgesellschaften der Länder (AGS); Stellungnahme zu den Arbeitsentwürfen BergversatzVO (Stand 8.6.2000) und BergversatzVwV (Stand 23.5.2000); URL: <http://www.umwelt.de/ags/pm230500.html> Stand 16.08.2000
- [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98] Stockinger, H.; Obernberger, I.: Systemanalyse der Nahwärmeversorgung mit Biomasse; Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, Band2; dbv- Verlag für die Technische Universität Graz, 1. Auflage September 1998, ISBN 3-7041-0253-9
- [TEXTOR 00] Textor, B., Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, schriftliche Mitteilung vom 25.07.2000.
- [TOBLER U. NOGER 94] Tobler, H.P.; Noger, D.: Beurteilung und Entsorgung der festen Rückstände von Altholzfeuerungsanlagen; Müll und Abfall Nr. 6 (1994), S. 333-344
- [UBA 00] Pfeiffer, F.; Struschka, M.; Baumbach, G.: Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher; Umweltbundesamt 14/00, Forschungsbericht 295 46 364; Berlin, Mai 2000
- [UMEG 99] UMEG Gesellschaft für Umweltmessungen und Umwelterhebungen mbH, Karlsruhe: Feinstaubuntersuchungen an Holzfeuerungen, Teil II: Bereich Industriefeuerungen > 1 MW; Abschlussbericht zum Werkvertrag 43-98.03, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Juli 1999
- [UMWELT-ONLINE 00] Umwelt-online: Düngemittelverordnung vom 4. August 2000 (BGBl. I 1999 S.1758); URL: <http://www.umweltschutzrecht.de/recht/lebensmt/dmv1.html> vom 3.8.00
- [UMWELTSERVICE 00] Umweltservice Stoltenberg+ Partner, Köln: Branchennews: Nach Österreich stuft nun auch Frankreich Bergversatz als Beseitigung ein; URL: <http://www.umweltservice.de/news/2000/112.html> Stand: 22.04.2000
- [VDI 3462] VDI-Richtlinie 3462: Emissionsminderung Holzbearbeitung und –verarbeitung – Verbrennen von Holz und Holzwerkstoffen ohne Holzschutzmittel; VDI Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 3

- [VERSCHEURE 98] Verscheure, P.: Holz-Hackschnitzel Lieferkonzept für die Heizanlagen Mülheim und Neuenburg; Diplomarbeit an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs- Universität Freiburg i. Breisgau; Referent: Prof. Dr. G. Becker, Koferent: Prof. Dr. M. Becker; 1998
- [VHE 00] Schweizerische Vereinigung für Holzenergie Vhe: Heizwerte und Kennzahlen; URL: <http://www.vhe.ch/brennstoff/heizw.html> Stand: 11.05.00
- [VHE 96] Schweizerische Vereinigung für Holzenergie Vhe: Wie lassen sich beim Bau automatischer Holzfeuerungen die Kosten reduzieren?; Holz-Zentralblatt vom 06.12.1996
- [VIK 00] Jakobs, F.: Dow-Jones-/VIK-Strompreisindex für März 2000; VIK-Mitteilungen 2-2000, S. 54
- [WAGNER U. HASLER 98] Wagner, D.; Hasler, P.: Kleinschnitzelfeuerung mit optimiertem Verbrennungskonzept und Kompaktwärmetauscher; Tagungsband zum 5. Holzenergie-Symposium am 16.10.1998, „Innovationen bei Holzfeuerungen und Wärmekraftkopplung“; Nussbaumer (Hrsg.), ETH Zürich; 1998
- [WALBAUM U. SCHLIZIO 98] Walbaum, B.; Schlizio, H.: Verwertung von Abfällen in Versatzbergwerken; Achte Duisburger Recyclingtage, Agst, J. (Hrsg.); S.374-383, Moers 1998
- [WEIßKOPF 97], [WEIßKOPF ET AL 97] Weißkopf, M.: Altholzverwertung – Technik und Kosten im Vergleich; Baustoff Recycling und Deponietechnik (BR), Nr. 8-9 (1997), S. 5-11  
Weißkopf, M.; Rühmann, R.; Zibulski, D.: Erarbeitung und Analyse praktischer und theoretischer Grundlagen zur Altholzaufbereitung; Diplomarbeit an der Fachhochschule Köln, Abteilung Gummersbach; Mai 1997
- [WIENHAUS U. BÖRLITZ 95] Wienhaus, G., Börtitz, S.: Orientierende Untersuchungen über den Spurenelementgehalt in Gebrauchtholz sowie in Holz- und Aktivkohlen; Holz als Roh- und Werkstoff: European journal of wood and wood products; 53 (1995), Nr. 4, S. 269-272
- [ZADLER 98] Zadler, S.: Hintergrunddossier – Die zweifelhaften Erfolge der Verwertung in Deutschland; Beispiel: Abfälle als Bergversatz; Öko-Institut; URL: <http://www.oeko.de/deutsch/umwelt/dosberg.htm> Stand: 14.01.1998
- [ZIBULSKI 00] Zibulski, Hazemag & EPR GmbH, Dülmen, Persönliche Mitteilung vom 18.10.2000
- [ZILLESSEN 95] Zillessen, C.: Einsatz von Kraftwerksreststoffen als Baustoff im

- untertägigen Steinkohlenbergbau; VGB Kraftwerkstechnik 75 Heft 4, (1995), S. 394-397
- [ZIPF 00] Zipf, J.; Firma Econzept Energieplanung GmbH, Freiburg: Persönliche Mitteilung November 2000
- [ZOLLNER ET AL 97] Zollner, A.; Häberle, K.-H.; Kölling, C.; Gulder, H.-J.; Schubert, A.; Dietrich, H.-P.; Remler, N.: Holzaschenverwertung im Wald; LWF-Bericht Nr. 14, Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft; URL: <http://www.lwf.uni-muenchen.de> (Stand: 3.8.00) Bericht von 1997
- [ZUBERBÜHLER ET AL 96] Zuberbühler, U.; Angerer, M.; Baumbach, G.; Vatter, J.; Hagenmaier, H.; Abgasemissionen an gewerblichen und industriellen Holzfeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV (<1 MW); Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, Band 56 (1996), S. 415-418).



# **Anhang**

**Anhang I – Charakterisierung der Prozessketten**

**Anhang II – Ergebnisse der Prozesskettenberechnung**

**Anhang III – Daten und Ergebnisse zum Energiesystemmodell**

**Anhang IV – Rahmendaten zur Stadt Stutensee**

# Anhang I – Charakterisierung der Prozessketten

## I.1 Charakterisierung von Holz

**Tabelle I-1:** Qualitätsmerkmale von Holzarten und ihre wichtigsten Auswirkungen  
[STOCKINGER U. OBERNBERGER 98]

Qualitätsmerkmal	wichtigste Auswirkungen
<b>chemisch-stoffliche Merkmale</b>	
Wassergehalt	Lagerfähigkeit, Heizwert, Lagerverluste, Selbstentzündung, Anlagenauslegung
Heizwert, Brennwert	Brennstoffausnützung, Anlagenauslegung
Elementgehalte: - Chlor Cl - Stickstoff N - Schwefel S - Kalium K  - Magnesium Mg, Calcium Ca, Phosphor P - Schwermetalle - Fremdstoffe (Steine, Metallteile etc.)	HCl-, Dioxin-/Furanemissionen, Korrosion NO <sub>x</sub> -, N <sub>2</sub> O- Emissionen SO <sub>x</sub> - Emissionen, Korrosion Korrosion an Überhitzerflächen, Senkung des Ascheerweichungspunktes, Aerosolbildung Erhöhung des Ascheerweichungspunktes, Ascheverwertung Schadstoffemissionen, Ascheverwertung Verschleiß von Anlagenteilen, Austragsschwierigkeiten, Notwendigkeit der Ascheaufbereitung
Aschegehalt	Partikelemissionen, Ascheverwertung/ -entsorgung, Anlagentechnik
Ascheerweichungspunkt	Anlagenbetriebssicherheit, Anlagentechnik, Anlagenregelung
Pilzsporen	Gesundheitsrisiken bei der Brennstoffmanipulation
<b>Physikalische Merkmale</b>	
Dichte, Schüttdichte	Transport- und Lageraufwendungen, Logistikplanung, Abrechnungsverfahren bei Brennstoffhandel
Teilchen- bzw. Einzeldichte	Feuerungseigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate)
Abmessung, Form, Größenverteilung	Förder- und Feuerungstechnik, Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Betriebssicherheit in der Förderung, Trocknungseigenschaften, Staubbildung
Feinanteil	Lagerdichte, Transportverluste, Staubbildung, Partikelemissionen
Abriebsfestigkeit (bei Presslingen)	Qualitätsänderung beim Umschlag, Entmischung, Feinanteil

**Tabelle I-2:** Angaben zu Heizwerten der Holzsortimente in der Literatur

Quelle	Brennstoff, Material	Wasser- gehalt x [Gew.-%]	Heizwert Hu [kWh/kg]	Heizwert [kWh/Sm <sup>3</sup> ]	Bemerkungen
[MLR 99]	Waldholz, Nadelholz: Tannengipfel und Jungbestandspflege	41,73-49	2,37-2,839 Ho: 2,858- 3,322	745-920	Analysenergebnis SchwörerHaus 273-324 kg/Sm <sup>3</sup>
[VHE 00]	Waldholz, Fichte/Tanne	20 33,3 42,9 50	3,0-3,5 2,75-3,25 2,5-3,0 2,25-2,75	600-700 550-650 500-600 450-550	Schüttdichte: 200 kg/Sm <sup>3</sup>
[VHE 00]	Waldholz, Schlagabraum: Dolden, Äste	20 33,3 42,9 50	k.A.	500-650 450-600 400-550 350-500	
[LWF 98]	Waldholz, Fichte	53,05 (Mittelwert) 49,3-54,6	2,12	670	Versuchsreihe; Schüttdichten: Mittelw: 325 kg/Sm <sup>3</sup> 299-355 kg/Sm <sup>3</sup>
[ANDERL ET AL 00]	Fichtenrinde Lärchenhackgut Lärchensägespäne	33,3-37,5 25,9 28,6-33,3	1,72-2,28 3,03 2,28-2,92	650 900 730	280-380 kg/Sm <sup>3</sup> 300 kg/Sm <sup>3</sup> 250-320 kg/Sm <sup>3</sup>
[VERSCHEURE 98]	Waldholz Kiefer Ind.holz Lärche mit Zwl. Industrieholz Lärche	52 47 47	2,20 2,52 2,50	715 740 700	325 kg/Sm <sup>3</sup> 294 kg/Sm <sup>3</sup> 280 kg/Sm <sup>3</sup>
[MLR 99]	Waldholz, Laubholz: Jungbestandspflege	25,55	3,558 Ho: 3,986	1.224	Analysenergebnis SchwörerHaus 344 kg/Sm <sup>3</sup>
[VHE 00]	Waldholz, Buche	20 33,3 42,9 50	3,52-3,89 3,33-3,70 3,15-3,52 2,96-3,33	950-1.050 900-1.000 850-950 800-900	Schüttdichte: 270 kg/Sm <sup>3</sup>
[VERSCHEURE 98]	Waldholz Buche mit Zwl.  Waldholz Buche/Eiche Waldholz Eiche/Tanne	29-37  39 41	3,09  2,80 2,78	1.180- 1.270 1.120 1.000	380-404 kg/Sm <sup>3</sup>  400 kg/Sm <sup>3</sup> 360 kg/Sm <sup>3</sup>
[MLR 99]	Industrierestholz aus holzverarb. Industrie,	50,79	2,147		Analysenergebnis

Quelle	Brennstoff, Material	Wasser- gehalt x [Gew.-%]	Heizwert Hu [kWh/kg]	Heizwert [kWh/Sm <sup>3</sup> ]	Bemerkungen
	Hackschnitzel		Ho: 2,634		SchwörerHaus
[MLR 99]	Rinde	58,6	1,389 Ho: 1,899		Analysenergebnis SchwörerHaus
[MLR 99]	Späne, Schleifstaub	8,08	4,667 Ho: 5,02		Analysenergebnis SchwörerHaus
[VHE 00]	Briketts aus Spänen, Sägemehl (Fichte/Tanne)	k.A.	4,8-5,2	k.A.	
[MLR 99]	Landschaftspflege- material aus 5 verschiedenen Quellen	20,33-55,20	1,804- 3,845 Ho: 2,305- 4,233	529-1.327	Analysenergebnis SchwörerHaus 293-345 kg/Sm <sup>3</sup>
[MLR 99]	Straßenpflegegehölz	45,60	2,125 Ho: 2,586		Analysenergebnis SchwörerHaus
[MLR 99]	Strauch- und Baumschnitt	42,28	2,486 Ho: 2,935		Analysenergebnis SchwörerHaus



**Tabelle I-3:** Berechnung des Energieinputs für die Anlagenbeispiele (kursiv: eigene Rechnung bzw. Annahmen)

Anlagenbeispiel	Brennstoffe	Anteil am Holz-Durchsatz [Gew.-%]	Wassergehalt x [Gew.-%]	Energieinhalt einzeln [kWh/kg]	Energieinhalt einzeln [kWh/Sm <sup>3</sup> ]	Holz-Durchsatz	Energieinput	
Gemeinde Bodnegg	Industrierestholz (Fi/Bu) <sup>1</sup>	6	35	2,95	906 (307 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Industrierestholz (Fi)	19	35	3,02	749 (248 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Industrierestholz (Bu)	45	35	3,02	749 (248 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Gebrauchtholz (Bu)	9	35	3,02	749 (248 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Gebrauchtholz (Fi/Bu)	3	13	4,18	832 (199 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Waldrestholz (Fi/Bu)	6	30	3,23	908 (281 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Grünschnitt	3	42 [MLR 99]	2,49 [MLR 99]	797 (320 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Sägewerkrestholz (Fi/Bu)	8	35	2,95	906 (307 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Sägemehl	2	8 [MLR 99]	4,67 [MLR 99]	1.868 (400 kg/Sm <sup>3</sup> )		1.703 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 439 t/a	1.351,5 MWh/a
	<b>gesamt</b>			<b>3,08</b>				
Metzingen	Waldrestholz (Fi)	19	30	3,30	924 (280 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Grünschnitt Herbst	51	50	1,04	400 (385 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	Grünschnitt Winter/Frühjahr	30	15	3,33	750 (226 kg/Sm <sup>3</sup> )			
	<b>gesamt</b>						2.000 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 600 t/a	1.289,6 MWh/a
Gemeinde Hohentengen	Waldholz (Fi/Bu)	100	30	3,23	908 (281 kg/Sm <sup>3</sup> )			
						1.200 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 337,2 t/a	1.089,6 MWh/a	

<sup>1</sup> Annahme: Gewichtsanteile Fichte/Buche = 1:1

Anlagen- beispiel	Brennstoffe	Anteil am Holz- Durchsatz [Gew.-%]	Wassergehalt x [Gew.-%]	Energieinhalt einzelne [kWh/kg]	Energieinhalt einzelne [kWh/Sm <sup>3</sup> ]	Holz- Durchsatz	Energie- input
Stadt Nagold	Waldhackschnitzel (Fi) <sup>2</sup>	80	28,6-31,0 (30)	3,30	925 (280 kg/Sm <sup>3</sup> )	1.200 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 310,8 t/a	1.084 MWh/a
	Einwegpaletten (Fi)	20	13	4,27	752 (176 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	gesamt			3,49	903,9 (259 kg/Sm <sup>3</sup> )		
Gemeinde Dunningen	Waldrestholz (Fi/Bu)	70-80 (75)	30	3,23	908 (281 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Grünschnitt	10	42 [MLR 99]	2,49 [MLR 99]	797 (320 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Industrierestholz (Fi/Bu)	15	35	2,95	906 (307 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	gesamt			3,11	898,8 (289 kg/Sm <sup>3</sup> )		
Landkreis Heilbronn	naturbelassenes Holz (Fi/Bu)	50	35	2,95	906 (307 kg/Sm <sup>3</sup> )	830 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 239,9 t/a	746,0 MWh/a
	Landschaftspflegeholz (Fi/Bu)	50	42 [MLR 99]	2,49 [MLR 99]	797 (320 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	gesamt			2,72	854,1 (314 kg/Sm <sup>3</sup> )		
						4.000 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 1.256 t/a	3.416,4 MWh/a

---

<sup>2</sup> Annahme: 100% Fichtenholz

Anlagen- beispiel	Brennstoffe	Anteil am Holz- Durchsatz [Gew.-%]	Wassergehalt x [Gew.-%]	Energieinhalt einzelnen [kWh/kg]	Energieinhalt einzelnen [kWh/Sm <sup>3</sup> ]	Holz- Durchsatz	Energie- input
Holzwärme Müllheim	Waldholz Buche (mit Zw.l.) <sup>3</sup>	53,6	29-37	3,09	1.212,5 (380-404; Ø 393 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Waldholz Buche/Eiche	18,4	39	2,80	1.120 (400 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Waldholz Kiefer	11,9	52	2,20	715 (325 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Waldholz Eiche/Tanne	4,1	41	2,78	1.000 (360 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Industrieholz Lärche (mit Zwl.)	10,9	47	2,52	740 (294 kg/Sm <sup>3</sup> )		12.912 MWh/a
	Industrieholz Lärche	1,9	47 (max.: 60)	2,50	700 (280 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	<b>gesamt</b>				2,87	(min.: 850) 1.076 (375 kg/Sm <sup>3</sup> )	12.000 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 4.500 t/a
Fernheizwerk Rotenbachtal	Industrierestholz (F/Bu) <sup>4</sup>	83	28,6	3,31	907 (274 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Rinde (F/Bu)	17	35	3,11	995 (321 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Grünschnitt	0,5	42 [MLR 99]	2,49 [MLR 99]	797 (320 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	<b>gesamt</b>			3,29	934 (284 kg/Sm <sup>3</sup> )	22.484 Sm <sup>3</sup> /a bzw. 6.385,5 t/a	21.000 MWh/a
Heizkraftwerk Pforzheim	Waldrestholz	14	33		12,4 MJ/kg	43.822 t/a	
	Sägenebenprodukte	21	33		bzw. 861 kWh/Sm <sup>3</sup>	ca. 61.750 Sm <sup>3</sup> Altholz;	
	Baum- u. Strauchschnitt	34	33		14,8 MJ/kg bzw. 904 kWh/Sm <sup>3</sup>	ca. 17.530 Sm <sup>3</sup> sonst.	160.000 MWh/a
	Altholz	31	22				

<sup>3</sup> mit Zwischenlagerung des Materials zwischen Aufarbeitung und Anlieferung im Heizwerk

<sup>4</sup> Annahme: Gewichtsanteile Fichte/Buche = 1:1

Anlagen- beispiel	Brennstoffe	Anteil am Holz- Durchsatz [Gew.-%]	Wassergehalt x [Gew.-%]	Energieinhalt einzel [kWh/kg]	Energieinhalt einzeln [kWh/Sm <sup>3</sup> ]	Holz- Durchsatz	Energie- input
Industriekraft- werk Baienfurt	(Rinde)	0					
	H3- Gebrauchtholz (Bahnschwellen) (Fi/Bu)	100 (bez. auf ges. Brennstoff: 30)	13	4,18	832 (199 kg/Sm <sup>3</sup> )	ca. 17.500 t/a	73.150 MWh/a
Rindenheiz- kraftwerk Oberrot	Rinde (Fi)	45	35	3,23	1.035 (321 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Industrierestholz (Fi)	45	35	3,02	749 (248 kg/Sm <sup>3</sup> )		
	Späne, Schleifstaub (Grünschnitt)	10	8 [MLR 99]	4,67 [MLR 99]	1.868 (400 kg/Sm <sup>3</sup> )	140.000 t/a	
	<b>gesamt</b>	0		3,28	971 (296 kg/Sm <sup>3</sup> )	472.973 Sm <sup>3</sup> /a	459.200 MWh/a
HKW Schwörer Haus	Rinde	45	58,6	1,389			
	Restholz	45	50,79	2,147			
	Späne <b>gesamt</b>	10	8,08	4,667 2,058		40.000 t/a	82.320 MWh/a

### ***1.1.1 Berechnung des Energieinputs der Anlagenbeispiele***

Zur Berechnung des Energieinputs mussten bei nicht vollständigen Angaben der Anlagenbetreiber Annahmen getroffen werden:

- bezüglich der Baumart: Sofern nichts anderes bekannt war, wurde ein Gemisch aus 1:1 Fichten- und Buchenholz angenommen
- bezüglich der Gewichtsanteile: fehlten hier Angaben, so wurde angenommen, dass die Brennstoffe zu gleichen Anteilen eingesetzt wurden. Für Späne und Schleifstaub wurde maximal 10 Gew.-% Brennstoffanteil berechnet.
- bezüglich der Wassergehalte: hier wurden vorwiegend die Angaben aus der Literatur (Tabellen A2 und 4-7) berücksichtigt
- bezüglich der Schüttdichte: die Umrechnungsfaktoren für die Schüttdichte sind Tabelle 4-7 entnommen bzw. zwischen den darin angegebenen Werten linear intrapoliert

Für Landschaftspflegehölzer und Sägespäne/Schleifstaub wurden mangels anderer Anhaltswerte die Analysenergebnisse aus [MLR 99] übernommen. Für die Sägespäne wurde aufgrund der feinen Körnung eine Schüttdichte von 400 kg/Sm<sup>3</sup> geschätzt.

Aufgrund der zahlreichen Abschätzungen (bezgl. Baumart, Feuchte, Schüttdichte), bei denen Werte auf der Grundlage von unter anderen Umständen durchgeführten Untersuchungen abgeleitet wurden, sind die ermittelten Heizwerte noch mit hohen Unsicherheiten behaftet. Dennoch zeigt sich, dass die Zusammensetzung und Feuchte des Brennstoffs einen erheblichen Einfluss auf den tatsächlichen Energieinput hat.

**Tabelle I-4:** Anorganische Holzschutzmittel [Marutzky u. Seeger 99], [Pohlandt et al 94]

Kurzbezeichnung	Verbindungen	Einbringmengen	Eigenschaften
B-Salze	Borsäure, Borax, Polybor	50-60 g/m <sup>2</sup> bzw. 1-4 kg/m <sup>3</sup>	nicht fixierend; gegen Bläuepilze, geringe Toxizität gegenüber Warmblütern; meist in Dachstühlen, konstruktiven Holzbauteilen
F-Salze: HF, SF	Kalium-, Ammoniumhydrogenfluoride, (Magnesium-, Kupfer-,) Zink-Fluorosilikate	50-60 g/m <sup>2</sup> bzw. 1-4 kg/m <sup>3</sup>	nicht fixierend; für Holz, das keinen direkten Kontakt zu Wasser bzw. Erdfeuchte ausgesetzt ist, gegen Basidiomyceten und Insekten; Gefahr der Korrosion bei Kontakt mit Metallen; meist in Dachstühlen, konstruktiven Holzbauteilen
CF, CFB	F als Hydrogenfluorid oder Hexafluorosilikat, C als Dichromat (Na-, K-, NH <sub>4</sub> -), Chromtrioxid, Chromsäure, B als Borsäure	3-8 kg/m <sup>3</sup>	überwiegend fixierend; C zur Fixierung der biologisch aktiven Komponenten und zur Minderung der Korrosion; gegen Pilze und Insekten; nicht für ständigen Erdfeuchte- oder Wasserkontakt geeignet
CK, CKF, CKFZ	C als (Na-, K-, NH <sub>4</sub> -) Dichromat, Chromsäure oder Chromtrioxid; K als CuSO <sub>4</sub> , CuSiF <sub>6</sub> ; Z als ZnSiF <sub>6</sub>	3-8 kg/m <sup>3</sup>	überwiegend fixierend; gegen Pilze und Insekten, Moderfäule (durch K); einsetzbar bei Erdkontakt der Hölzer
CKB	C als (Na-, K-, NH <sub>4</sub> -) Dichromat, Chromsäure oder Chromtrioxid; K als CuSO <sub>4</sub> , Borsäure	3-8 kg/m <sup>3</sup>	Einsatz wie CKF und CKA, weniger korrosiv und weniger toxisch als diese
CKA	C als (Na-, K-, NH <sub>4</sub> -) Dichromat, Chromsäure oder Chromtrioxid; K als CuSO <sub>4</sub> , CuSiF <sub>6</sub> ; A als Arsenpentoxid, Arsensäure, K-, NH <sub>4</sub> -, Na- Dihydrogen- bzw. Hydrogen-Arsenate	bis 10 kg/m <sup>3</sup>	Einsatz wie CKF und CKB
Cu-HDO	N-Cyclohexyldiazoniumdioxy-Kupfer		Ersatz für chromathaltige Holzschutzmittel
Hg-Salze	als HgCl <sub>2</sub> eingesetzt, das im Holz zu HgCl reduziert wird	0,4-0,8 kg/m <sup>3</sup>	inzwischen verboten; fest fixiert; Anwendung durch Tränken von Telefon- und E- Masten, Obst-, Wein- und Hopfenstangen

**Tabelle I-5:** Angewandte Holzschutzmitteltypen aus organischen Substanzen  
[MARUTZKY U. SEEGER 99]

Wirkstoffe	Einbringmengen [g/m <sup>2</sup> ]	Anteil der Wirkstoffe am Holzschutzmittel [%]
Phenylquecksilber-Verbindungen	200-280	0,1-0,6
TBT- Verbindungen, Aluminium-HDO	200-280	1,0-3,5
Dichlorfluanid, Endosulfan, Lindan, PCP, Fumecyclo x u.a.	200-280	0,1-5,0
Parathion	200-280	0,1-5,0
Steinkohlenteeröl	45-175	100
Teeröl-Präparate	300-400	100
Teeröl- Präparate mit Zusatz halogenorganischer Verb.	300-400	20-100 (T-Präparate) 0,1-10 (Zusätze)
Chlornaphthalin	250-350	100

## I.2 Charakterisierung der Holzaschen

**Tabelle I-6:** Ascheanfallmengen aus verschiedenen Brennstoffsortimenten

Quelle	Brennstoff	Ascheanfall [Gew.-% der Brennstoff-Trockensubstanz]
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Holz ohne Rinde	0,5...1
[VERSCHEURE 98]	Hackschnitzel ohne Rinde	0,8-1,4
[VERSCHEURE 98]	Hackschnitzel mit Rinde (Waldhackschnitzel)	1,0-2,5
[VERSCHEURE 98]	Müllheim 1998: (x = 30-50 %) 75 % Waldhackschnitzel mit Rinde 25 % Sägereihackschn. o. Rinde	0,8
[VERSCHEURE 98]	Neuenburg 1998: (x = 30%) Laubholz hackschn. mit Rinde	0,2
[VERSCHEURE 98]	Neuenburg 1998: (x = 45-55 %) Kiefern hackschnitzel mit Rinde	0,12
[MLR 99]	Waldholz Tanne	5,48
[MLR 99]	Waldholz Nadelholz (Jungbestandspflege)	2,09
[MLR 99]	Waldholz Laubholz	1,19
[MLR 99]	Pappelholz	2,06-3
[MLR 99]	Landschaftspflegeholz	0,85-14,5
[MLR 99]	Straßengehölz	14,0
[MLR 99]	Baum- und Strauchschnitt	9,98
[MLR 99]	Rinde	21,6
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Rinde, rein	3...4
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Rinde, verschmutzt	5...15
[STOCKINGER U. OBERNBERGER 98]	Rinde ab Sägewerk (ohne Verunreinigungen)	5...8 (2...5)
[VERSCHEURE 98]	Rinde	5,0...8,0
[MLR 99]	Sägespäne	0,46
[VERSCHEURE 98]	Sägespäne	0,5-1,1
[MLR 99]	Industrierestholz	6,3
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Holzwerkstoffe, unbeschichtet	0,5...3
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Holzwerkstoffe, beschichtet	1...3
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Holz, imprägniert (organisch)	0,5...2
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Holz, imprägniert (anorganisch)	2...5
[MARUTZKY U. SEEGER 99]	Gebrauchtholz	0,5...10



**Tabelle I-7:** Nährstoffgehalt in Gew.-% der Trockensubstanz der Aschen [MARUTZKY U. SEEGER 99], [RÖSCH 96], [VERSCHURE 98], [MLR 99], [ZOLLNER ET AL 97], [SANDER U. ANDRÉN 97]

Brennstoff	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Rinde (SchwörerHaus)	9,8	1,8	1,4	k.A.	0,5	k.A.
Rinde [ZOLLNER ET AL 97]	40,0	4,8	5,1	k.A.	0,5	1,8
Rinde	32,12	4,45	5,35	k.A.	k.A.	1,77
Sägespäne	28,06	7,56	5,37	k.A.	k.A.	2,35
Späne [ZOLLNER ET AL 97]	41,5	8,4	6,4	k.A.	0,4	2,7
Sägespäne (SchwörerHaus)	73,6	7,1	7,9	k.A.	0,9	k.A.
Altholz	22,0	1,9	1,7	0,2	1,1	0,4
Hackgut	38,7	6,54	4,68	k.A.	k.A.	3,57
Hackgut [ZOLLNER ET AL 97]	46,2	6,6	4,5	k.A.	0,4	3,7
Stückholz, naturbelassen	28,0	7,6	3,1	0,4	n.b.	0,8
Holz, naturbelassen	23,0	5,5	1,8	0,8	0,7	0,4
Restholz	30,0	6,2	2,6	1,0	n.b.	1,0
Industrierestholz (SchwörerHaus)	22,5	3,2	2,7	k.A.	0,4	k.A.
Sägerestholz (Neuenburg 1998)	45,15	12,25	5,56	k.A.	k.A.	3,71
Landschaftspflegeholz [MLR 99]	18,3-46,7	3,1-13,2	4,0-7,3	k.A.	0,3	k.A.
Straßengehölz [MLR 99]	9,2	4,4	2,6	k.A.	0,7	k.A.
Baum- und Strauchschnitt [MLR 99]	18,0	5,6	2,5	k.A.	0,4	k.A.
Waldholz Nadelholz [MLR 99]	20,7-40,4	5,4-28,6	7,7-11,2	k.A.	0,41	k.A.
Waldholz Nadelholz (Müllheim 1998)	67,30	6,38	6,69	k.A.	k.A.	3,18
Waldholz Laubholz [MLR 99]	39,2	22,0	4,9	k.A.	0,1	k.A.
Waldholz [SANDER U. ANDRÉN 97]	27,84	3,73	2,98	0,72	k.A.	3,67
Weidenholz [SANDER U. ANDRÉN 97]	43,51	10,24	4,97	0,31	k.A.	9,39
Pappelholz [MLR 99]	45,8-52,3	6,6-28,3	3,8-6,7	k.A.	0,1-0,3	k.A.

**Tabelle I-8:** Schadstoffbelastungen verschiedener Aschegemische in mg/kg Trockensubstanz Asche

Fraktion	Quelle/ Brennstoff	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
Aschen- gemisch	[MLR 99] Hackschnitzel, Rinde, Späne	15-17	118-244	139-234	2.320-2.930	25-54	46-58
	[MLR 99] Waldholz Tanne	8	116	75	1.220	26	61
	[MLR 99] Waldholz, Nadelholz	17	257	190	3.040	97	81
	[MLR 99] Waldholz Laubholz	5	104	61	1.040	53	40
	[MLR 99] Straßengehölz	10	91	90	1.520	38	53

[MLR 99] Landschaftspflegeholz	5-11	80-116	81-101	1.120-1.580	25-45	45-67
[MLR 99] Strauch-, Baumschnitt	7	124	109	1.500	57	51
[MLR 99] Pappelholz	28-35	115-119	86-175	1.700-2.400	27-39	33-50
Klärschlammverordnung (1997) – Werte für ausgebrachte Schlämme	10	800	900	2.500	900	200
Düngemittelverordnung (1999)	6	200	200	750	3.000	100
Bioabfallverordnung (1998)	1,5	100	150	400	100	50
Bundes-Bodenschutz-Verordnung – Vorsorgewerte für Böden	1,5	60	100	200	100	70
Ton-Lehm-Sand	1	40	70	150	60	50
	0,4	10	40	60	30	15
Bandbreite der in Österreich und der Schweiz diskutierten Richtwerte für Holzaschen [MARUTZKY U. SEEGER 99]	3-10	150-500	100-500	600-2.000	100-500	90-100

**Tabelle I-9:** Schadstoffbelastungen verschiedener Grobaschen in mg/kg TS Asche

Fraktion	Quelle/ Brennstoff	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Hg	As	Ni
Grob- asche	[ZOLLNER ET AL 97]	0,2-2	90-165	14-17	100-433	40-326	21,0	0,01	4,1	40-66
	[POHLANDT ET AL 96] Ind.restholz	<2	188	<5	k.A.	91	11	<0,3	<2	<2
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] naturbelassen	1	380	60	520	29	10	<0,5	<5	k.A.
	[TOBLER U. NOGER 94] naturbelassen	<1	130	10	200	140	k.A.	-	10	-
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] Restholz	3	170	360	500	240	25	<0,5	k.A.	k.A.
	[TOBLER U. NOGER 94] Altholz	3-83	640-1.200	1.300-5.300	1.800-22.000	230-600	k.A.	<0,5	7-40	160-190
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] Gebrauchtholz	20	1.200	2.100	6.900	1.470	21	<0,5	17	180

Fraktion	Quelle/ Brennstoff	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Hg	As	Ni
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] mit CFB <sup>1</sup> mit CFK mit CKB mit CKA	k.A.	n.b. 85.600 124.00 0 260.00 0	k.A.	k.A.	20.900 178.00 0 161.00 0 240.00 0	k.A.	k.A.	n.b. n.b. n.b. 1.10 0	k.A.
	[VERSCHEURE 98] Waldholz, Müllh./ Neuenb.	0,01- 1,52	109,8- 154,0	2,3- 25,4	80-195	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	[MLR 99] HS, Rinde, Späne	0,18- 0,22	133- 141	14- 186	140	50-137	k.A.	k.A.	k.A.	45-64
	[MLR 99] Strauch-, Baumschnitt	5	123	42	410	18	k.A.	k.A.	k.A.	51
	[MLR 99] Pappel	0,4-2	76-307	16- 286	100- 480	55-68	k.A.	k.A.	k.A.	42-51
	KlärschlammV (1997) –für ausgebrachte Schlämme	10	800	900	2.500	900	-	8	-	200
	DüngemittelV (1999)	6	200	200	750	3.000				100
	BioabfallV(1998)	1,5	100	150	400	100				50
	Bundes-Bodenschutz-V – Hintergrundwerte für Böden(Ton/Lehm/Sand)	1,5/ 1/ 0,4	60/ 40/ 10	100/ 70/ 40	200/ 150/ 60	100/ 60/ 30	-	1	-	70/ 50/ 15
	Bandbr. der in Österr. U. der Schweiz disk. Richtwerte .[MARUTZKY U. SEEGER 99]	3-10	150- 500	100- 500	600- 2.000	100- 500	12- 100	1	20	90- 100
	Richtwerte zur Beurteilung von Abfällen für den Untertage- Versatz <sup>2</sup>	100	6.000	10.00 0	15.000	6.000	-	100	1.50 0	6.000 -

<sup>1</sup> mit anorganischen Schutzmitteln behandelt: A = Arsen, B = Bor, C = Chrom, K = Kupfer, F = Fluor

<sup>2</sup> [WALBAUM 98]

**Tabelle I-10:** Schadstoffbelastungen verschiedener Zyklon- und Feinstflugaschen in mg/kg Trockensubstanz Asche

Fraktion	Quelle/ Brennstoff	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Hg	As	Ni
Flugasche/ Zyklon- asche	[ZOLLNER ET AL 97]	5-80	90-300	60-1.053	740-1.870	70-230	19,0	0,04	6,7	50-66
	[POHLANDT ET AL 96] Ind.restholz	6	266	63	k.A.	76	11	<0,3	3	<2
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] naturbelassen	9	130	21	750	43	13	<0,5	k.A.	k.A.
	[TOBLER U. NOGER 94] naturbelassen	50	90	1.800	4.400	170	k.A.	-	40	-
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] Restholz	16	230	1.200	3.700	210	18	<0,7	k.A.	k.A.
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] Gebrauchtholz	70	440	8.400	16.000	1.400	30	0,7	59	170
	[TOBLER U. NOGER 94] Altholz	66-120	290-390	9.800-13.000	13.000-23.000	350-1.500	k.A.	0,5-1	18-21	140-220
	[VERSCHEURE 98] Waldholz, Müllh./Neuenb.	21,63	187,5	251,5	1.150	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Feinst- flugasche	[ZOLLNER ET AL 97]	5-81	55-1.450	134-7.300	109-12.981	17-810	18	1,5	37	27-235
	[POHLANDT ET AL 96] Ind.restholz	16	317	351	k.A.	72	6	<0,3	6	<2
	[MARUTZKY U. SEEGER 99] Gebr.holz	460	420	50.000	160.000	400	5	<0,5	100	74
	[TOBLER U. NOGER 94] Altholz	350-630	340-520	44.000-63.000	167.000-178.000	120-490	k.A.	<0,5	1-220	43-110
	[VERSCHEURE 98] Waldholz, Müllh./Neuenb.	13,30 - 62,40	214,0-361	343,3-456,5	2.020-4.870	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	[MLR 99] (E-Filter) HS, Rinde, Späne	7	66	52	640	39	k.A.	k.A.	k.A.	40
KlärschlammV(1997)		10	800	900	2.500	-	-	-		
DüngemittelV (1993)		6	200	200	750	3.000				100

Fraktion	Quelle/ Brennstoff	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Hg	As	Ni
Bundes-Bodenschutz-V – Hintergrundwerte für Böden(Ton/Lehm/Sand)		1,5/1/ 0,4	60/ 40/ 10	100/ 70/ 40	200/ 150/ 60	100/ 60/ 30	-	1	-	70/ 50/ 15
Bandbr. der in Österr. U. der Schweiz disk. Richtwerte für Holzaschen [MARUTZKY U. SEEGER 99]		3-10	150- 500	100-500	600- 2.000	100- 500	12- 100	1	20	90- 100
Richtwerte zur Beurteilung von Abfällen für den Untertage- Versatz <sup>3</sup>		100	6.000	10.000	15.000	6.000	-	100	1.500	6.00 0-

**Tabelle I-11:** Konzentrationen an organischen Schadstoffen in Holzaschen

Aschen- fraktion	Quelle/ Brennstoff	C <sub>org</sub> [Gew.- % TS]	Cl [Gew.-% TS]	PCDD/F [ngTE/kg TS]	PAK Summe [mg/kg TS]	BaP [µg/kg TS]	PCB Summe [µg/kg TS]
Aschen- gemisch	[NOGER U. PLETSCHER 00] „Düngequalität“	k.A.	k.A.	(1-5) 3	k.A.	k.A.	k.A.
	[NOGER U. PLETSCHER 00] „erhöhter Cu- Gehalt“	k.A.	k.A.	(4-5) 4	k.A.	k.A.	k.A.
	[NOGER U. PLETSCHER 00] „erhöhter Cl-Gehalt“	k.A.	k.A.	(18-6.300) 2.800	k.A.	k.A.	k.A.
	[NOGER U. PLETSCHER 00] „erhöhter C-Gehalt“	k.A.	k.A.	(2-7) 5	k.A.	k.A.	k.A.
Grob- asche	[ZOLLNER ET AL 97] Rinde	0,2-0,9	<0,06	0,3-11,7	1,4-1,8	1,4-39,7	k.A.
	[RÖSCH 96] Rinde	k.A.	k.A.	5,08	1,6	0,015	2,2
	[ZOLLNER ET AL 97] Späne	0,2-3,4	<0,1	1,3-2,1	14,7-21,1	21,0- 40,5	k.A.
	[RÖSCH 96] Holz	k.A.	k.A.	13,83	1,49	0,003	12
	[ZOLLNER ET AL 97] Hackgut	0,2-1,9	<0,01	2,4-33,5	1,3-1,7	0,0-5,4	k.A.
	[NOGER U. PLETSCHER 00] Altholz	k.A.	k.A.	4-11	k.A.	k.A.	k.A.
Flug- asche	[ZOLLNER ET AL 97] Rinde	0,4-1,1	0,1-0,4	2,2-12,0	2,0-5,9	4,7-8,4	k.A.

<sup>3</sup> [WALBAUM 98]

Aschenfraktion	Quelle/ Brennstoff	C <sub>org</sub> [Gew.-% TS]	Cl [Gew.-% TS]	PCDD/F [ngTE/kg TS]	PAK Summe [mg/kg TS]	BaP [µg/kg TS]	PCB Summe [µg/kg TS]
	[RÖSCH 96] Rinde	k.A.	k.A.	6,35	3,68	0,007	4,1
	[ZOLLNER ET AL 97] Späne	3,2-15,3	0,1-0,6	1,5-3,7	11,2-150,9	180-670	k.A.
	[RÖSCH 96] Holz	k.A.	k.A.	18,79	104,4	0,62	9,9
	[ZOLLNER ET AL 97] Hackgut	0,3-3,1	0,1-0,5	16,3-23,3	27,6-61,0	188-880	k.A.
	[NOGER U. PLETSCHER 00] Altholz	k.A.	k.A.	730-920	k.A.	k.A.	k.A.
Feinstflugasche	[ZOLLNER ET AL 97] Rinde	0,6-4,6	0,6-6,0	7,7-12,7	137-195	900-4.900	k.A.
	[NOGER U. PLETSCHER 00] Altholz	k.A.	k.A.	1.200-3.600	k.A.	k.A.	k.A.
Klärschlammverordnung (1997)	-	-	-	100	20 <sup>4</sup>	4.000 <sup>4</sup>	-
Richtwerte für Untertageversatz <sup>5</sup>	-	-	-	10.000	200	-	-

**Tabelle I-12:** Bodenreaktion und elektrischen Leitfähigkeit der Holzaschen

Aschenfraktion	Quelle/ Brennstoff	pH (Suspension Asche/Wasser 1:2)	elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]
Aschengemisch	[VERSCHURE 98] Waldholz Müllheim	13,3	k.A.
	[VERSCHURE 98] Waldholz Nadelholz Neuenburg	13,4	k.A.
	[MLR 99] Hackschnitzel, Rinde, Späne	12,5-12,8	k.A.
	[MLR 99] Waldholz Tanne	12,5	k.A.
	[MLR 99] Waldholz, Nadelholz	12,7	k.A.
	[MLR 99] Waldholz Laubholz	12,8	k.A.
	[MLR 99] Straßengehölz	12,5	k.A.
	[MLR 99] Landschaftspflegeholz	12,2-12,8	k.A.
	[MLR 99] Strauch-, Baumschnitt	12,4	k.A.
[MLR 99] Pappelholz	12,7-12,9	k.A.	
Grobasche	[ZOLLNER ET AL 97] Rinde	12,7	8,9
	[ZOLLNER ET AL 97] Hackgut/Späne	12,8	10,2

<sup>4</sup> vorgeschlagener Grenzwert [ZOLLNER ET AL 97]

<sup>5</sup> [WALBAUM U. SCHLIZIO 98]

Aschenfraktion	Quelle/ Brennstoff	pH (Suspension Asche/Wasser 1:2)	elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]
	[VERSCHEURE 98] Waldholz Laubholz Neuenburg	13,0	k.A.
	[VERSCHEURE 98] Waldholz Müllheim	13,1	k.A.
	[MLR 99] Hackschnitzel, Rinde, Späne	12,7	k.A.
	[MLR 99] Strauch-, Baumschnitt	12,5	k.A.
	[MLR 99] Pappel	12,5	k.A.
	[TOBLER U. NOGER 94] Altholz	12-12,5	k.A.
Flugasche/ Zyklonasche	[ZOLLNER ET AL 97] Rinde	12,7	10,8
	[ZOLLNER ET AL 97] Hackgut/Späne	12,7	13,1
	[VERSCHEURE 98] Waldholz Nadelholz, Neuenburg	13,3	k.A.
	[VERSCHEURE 98] Waldholz Laubholz, Neuenburg	12,8	k.A.
	[VERSCHEURE 98] Waldholz Müllheim	13,5	k.A.
	[TOBLER U. NOGER 94] Altholz	12,5	k.A.
Feinst- flugasche	[ZOLLNER ET AL 97] Rinde	12,7	35,6
	[ZOLLNER ET AL 97] Hackgut/Späne	12,6	39,5
	[MLR 99] (E-Filter) Hackschnitzel, Rinde, Späne	12,9	k.A.
	[TOBLER U. NOGER 94] Altholz	5,5-9,0	k.A.
Waldboden [ZOLLNER ET AL 97]		< 7 (schwach sauer bis sauer)	0,75
Eluatkriterien TASie, Deponieklasse I (Inertstoffdeponie)		5,5-13	< 10
Eluatkriterien TASie, Deponieklasse II		5,5-13	≤ 50
Eluatkriterien TA Abfall, Teil I, Sonderabfalldeponie		4-13	≤ 100

## I.3 Bereitstellung von Holz

**Tabelle I-13:** In Deutschland übliche Holzernteverfahren [BOOTH 97]

	Einsatzbereich						
	Nadelholz	Laubholz	Starkholz	schwachmittelstarkes Holz	> 30% Neigung	<30% Neigung	schlecht tragfähige Böden
<b>A Gelände befahrbar und erschlossen</b>							
<b>I. Motormanuelle Standardverfahren mit gelöstem Vorrücken/Rücken</b>							
<u>Kurzholzverfahren Schwachholz:</u> manuelles Vorliefern, Rücken mit Tragschlepper	X	X	-	X	-	X	(X)
<u>Langholzverfahren Schwachholz:</u> Vorrücken mit Pferd, Rücken mit Schlepper <sup>6</sup>	X	X	-	X	(X)	X	(X)
<u>Langholzverfahren Starkholz:</u> Vorrücken/Rücken mit Forstschlepper	X	X	X	X	X	X	(X)
<b>II. Seilwindenunterstützte motormanuelle bzw. teilmechanisierte Verfahren</b>							
a) <u>ungebrochenes Vorrücken/Rücken</u>							
- seilwindenunterstütztes Fäll/Aufarbeiten/Vorrücken/Rücken	(X)	X	-	X	X	X	X
- seilwindenunterstütztes Fäll/Rücken, Kranprocessor auf der Waldstraße	X	-	-	X	X	X	X
b) <u>gebrochenes Vorrücken/Rücken:</u>							
- seilwindenunterstütztes Fäll/Aufarbeiten/Vorrücken/Rücken	(X)	X	-	X	-	X	(X)
- seilw. unterstütztes Fäll/Vorrücken:							
(i) Rücken mit Klemmbankschlepper, Processor a.d. Waldstraße oder Weitertransport zum Holzhof	X	-	-	X	-	X	(X)
(ii) Kranprocessor a.d. Erschließungslinie, Rücken mit Tragschlepper	X	(X)	-	X	-	X	(X)
<b>III. Hochmechanisierte Holzernteverfahren Vollernter</b>							
<b>B Gelände nicht befahrbar (bedingt durch unerschlossene Steillage oder wegen Vernässung, Blocküberlagerung, Gräben)</b>							
<u>kombiniertes Fäll/Aufarbeiten im 2-Mann-Seillinienverfahren mit Funkseilkran</u>	X	(X)	-	X	X	-	X

<sup>6</sup> Zangenschlepper oder landw. Schlepper mit Anbauseilwinde oder Forstschlepper



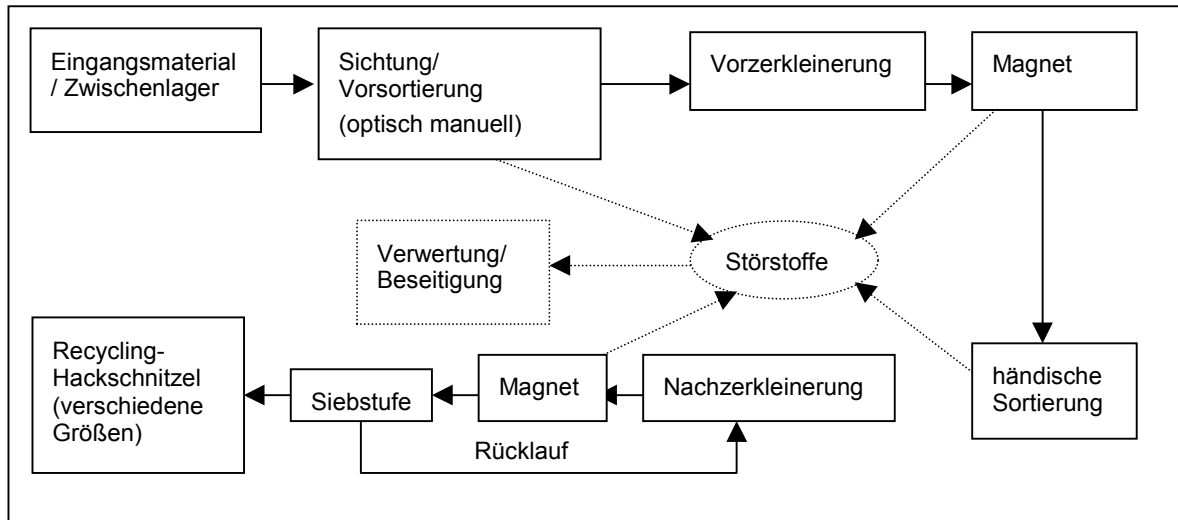


Abbildung I-1: Schema für Holzaufbereitungsanlage [FLAMME U. WALTER 98]

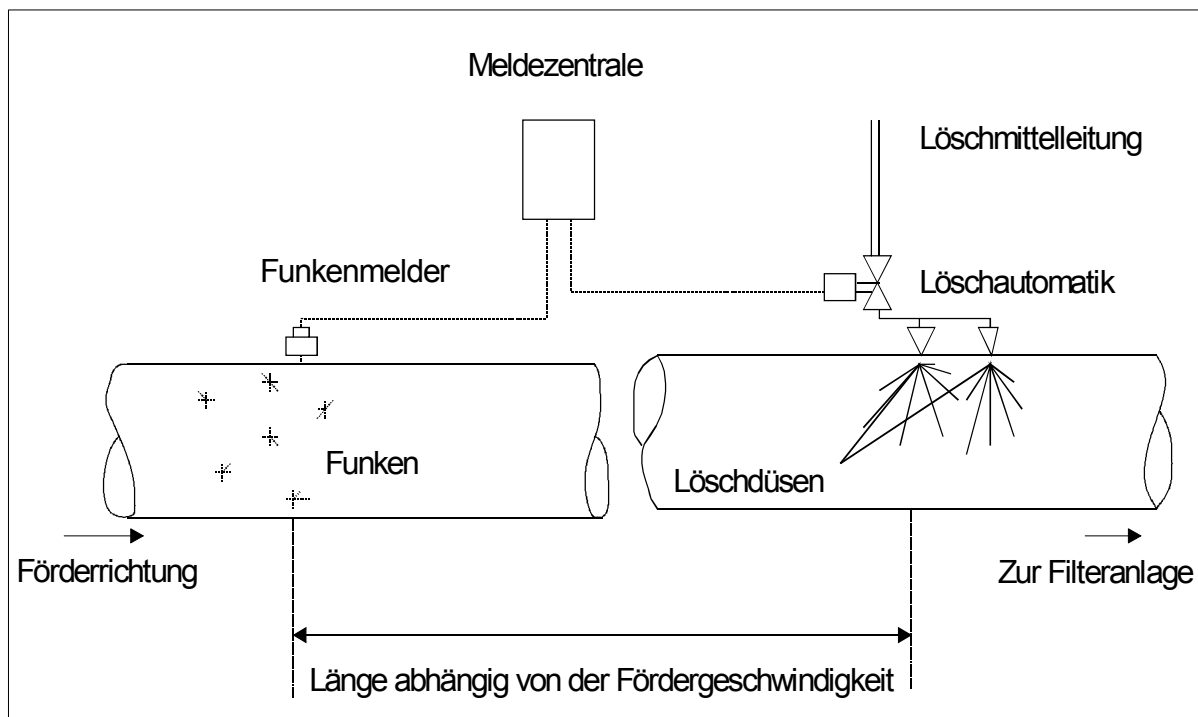
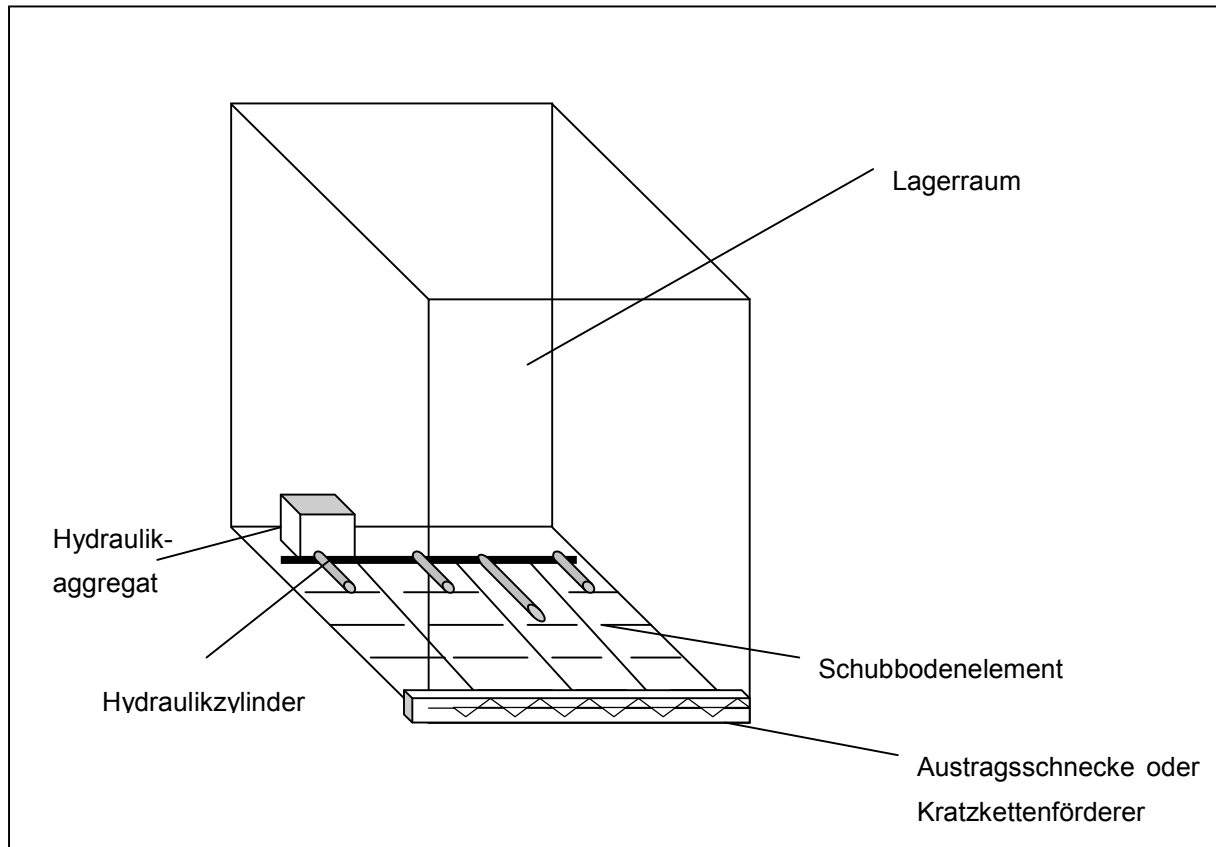


Abbildung I-2: Schema einer Funkenlöschanlage [RAKEMANN U. ZIBULSKI 98]



**Abbildung I-3:** Prinzipskizze Schubbodenlagerung [MARUTZKY U. SEEGER 99]

**Tabelle I-14:** Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen nach möglichem Aufgabematerial und Ziel- Spanlänge [WEISKOPF ET AL 97]

Zerkleinerungsgruppe	Aufgabematerial	Maschinentypen	Austragsmaterial Spanlänge	Zuführeinrichtungen	Abführeinrichtungen	Abnehmer	
I	unzerkleinertes Altholz	Rotorscheren	durchschnittlich 150-300 mm, max. 500 mm	Aufgabetrichter	Förderband, Kratzkettenförderer, Schurre	Kompostierung, Unterschub- und Rostfeuerung	
		Walzenbrecher		Aufgabetrichter, z.T. Kratzkettenförderer, Schubaufgeber			
II	vorzerkleinertes u. sortiertes Altholz 150-300 mm Kantenlänge	Prall-, horizontale Hammermühle	abhängig vom eingesetzten Siebrost, meist < 100 mm Spanlänge	Vibro- Resonanzrinne, Plattenband, Walzenzwangseinzug	Förderband, Kratzkettenförderer, Schurre, Virbrorinne	Kompostierung, Wirbelschichtfeuerung, z.T. Gegenstromvergasung	
		Prallmühle (Schredder)		Aufgabetrichter, Resonanzrinne, Kratzkettenförderer, Band			Schurre, Vibrorinne
		Trommelhacker		Vibro- Resonanzrinne, Plattenband, Walzenzwangseinzug			Förderband, Kratzkettenförderer, Schurre, Vibrorinne
III	< 80 mm Kantenlänge, kaum Störstoffe	Ein- und zweirotorige Hammermühle	abhängig vom eingesetzten Siebrost, meist 0-50 mm	Vibrorinne	Schurre und Band, Kratzkettenförderer, Vibrorinne	Spanplattenindustrie, Gleich- u. Gegenstromvergasung	
		Schlagzerspaner, Messerringzerspaner		Vibrorinne mit Elektromagnetvibratorantrieben			pneumatische Förderung mit Zyklonabscheider
IV	< 40-60 mm Kantenlänge ohne Störstoffe	Doppelstrommühle, Prallfiner	< 3 mm	Vibrorinne mit Elektromagnetvibratorantrieben	pneumatische Förderung mit Zyklonabscheider	Flugstromvergasung, Zementindustrie, Einblasfeuerung	
V	< 15-30 mm ohne Störstoffe						

**Tabelle I-15:** Kenndaten verschiedener Zerkleinerer [WEISKOPF ET AL 97]

Maschinenart	Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]			Kantenlänge des zu erzeugenden Spans [mm]							spez. Energiebedarf [kWh/t]	Anschaffungskosten gesamt für 20 t/h [T€ <sup>7</sup> ]	Anfälligkeit gegenüber Störstoffen	Verschleiß
	< 500	500-1.000	>1.000	grob vorgebrochen 150-300	vorgebrochen 60-150	Hack- schnitzel 10-60	Deck- oder Mittelschichtspan 3-30	Fein- späne < 3						
Rotorschere	X			X							5,3-42,0	k.A.	gering	sehr hoch
Ein- oder Zweiwellenbrecher (Walzenbrecher, Langsamläufer)	X			X	X						3,4-3,5	205-230	gering	gering
Prallhammermühle (Schredder)		X	X		X						8,8-21,5	128	gering	hoch
Prallbrecher		X			X						4,0-8,0	82	gering	hoch
Trommelhacker			X			X					1,1-16,4	k.A.	sehr hoch	sehr hoch
Hammermühle		X	X			X	X				k.A.	112-128	gering	hoch
Zweitortige Hammermühle		X	X			X	X				< 30	190	hoch	gering
Schlagzerspaner			X				X				19,3-37,3	304	hoch	hoch
Messerring- zerspaner			X				X				23,3-44,1	k.A.	sehr hoch	sehr hoch
Doppelstrommühle			X						X		32,1-71,1	k.A.	sehr hoch	gering

<sup>7</sup> Angaben in DM; mit 1,95583 DM/€ in Euro umgerechnet

## I.4 Feuerungstechnik und Abgasreinigung

**Tabelle I-16:** Feuerungsarten [VDI 3462]

Feuerungsart	geeigneter Brennstoff	Feuerungswärmeleistung	Vorteile	Nachteile
Durchbrandfeuerung	vorwiegend trockene, Stücke, Scheitholz	von 10 kW bis 100 kW (meist handbeschickt)	- keine Vorzerkleinerung nötig	- diskont. Brennstoffzufuhr, - schlechter Ausbrand, - Handregelung, dadurch hohe Emissionswerte
Unterbrandfeuerung	trockene Hackschnitzel, Scheitholz	von 10 kW bis 150 kW	- gleichm. Abbrand, - befriedigendes Regelverhalten	- Brückenbildung im Füllschacht
Schachtfeuerung	stückige Reste wie Scheitholz, Hackschnitzel, Späne etc.	von 20 kW bis 250 kW	- einfache Technik - keine Brennstoffaufbereitung nötig - geringe Investitionen	- Regelung nur durch Drosselung der Luftzufuhr möglich - hohe Emissionen
Unterschub-, Unterschubzyklon-Feuerung	trockene + feuchte Späne, Hackschn., <50% Staub	von 100 kW bis 5.000 kW	- einfache Technik	- Probleme durch Brennstoff im System bei Abschaltung, - diskont. Entaschung
Vorofen-, Vergaser-Feuerung	Späne, Pellets, Hackgut	von 10 kW bis 6.000 kW	- niedrige CO- und Gesamt-C-Emissionen; - geringe Rauchgasstaubgehalte	- hohe NO <sub>x</sub> -Werte
Rostf. (stationärer Rost, Vorschubrost, etc.)	unzerkl. Rinde, großstückige, feuchte Brennstoffe mit hohem Aschegehalt	ab 1.000 kW	- breites Brennstoffspektrum, - keine Vorzerkleinerung nötig	- Schlierenbildung nicht auszuschließen, - relativ hohe Investitions- und Betriebskosten
Wirbelschichtfeuerung (zirkulierende)	Späne, Hackgut	ab 5.000 kW	- niedrige NO <sub>x</sub> -Werte, - Additivzugabe möglich, - schnelle Regelbarkeit, - gute Ausbrandbed.	- hohe Investitions- und Betriebskosten, - erhöhter Ascheanfall, - erhöhte Ascheentsorgungskosten
Muffeleinblasfeuerung	Stäube, Späne	von 1.000 kW bis 8.000 kW	- gute und schnelle Regelbarkeit, - ideale Verbrennung von Stäuben, - sehr gute Emissionswerte	- empfindlich bei Brennstoffschwankungen hinsichtlich der Menge, Zus.setzung und Feuchte, - Muffel muss mit Stützbrenner auf Temp. gebracht werden
Staubfeuerung	Stäube (< 0,5mm)	bis 15.000 kW	- gute Regelbarkeit, - gute Verwertungsmögl.	- Zünd- und Stützbrenner erforderlich

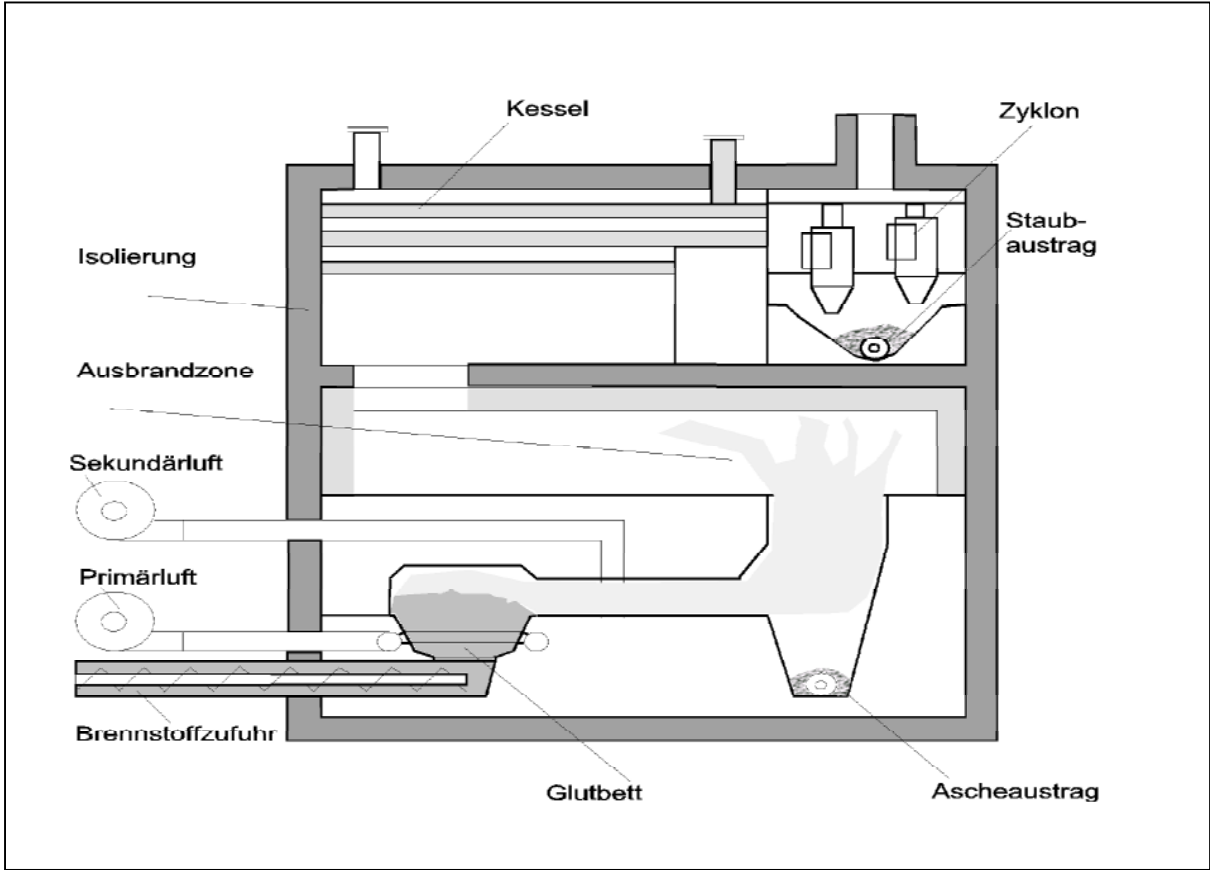
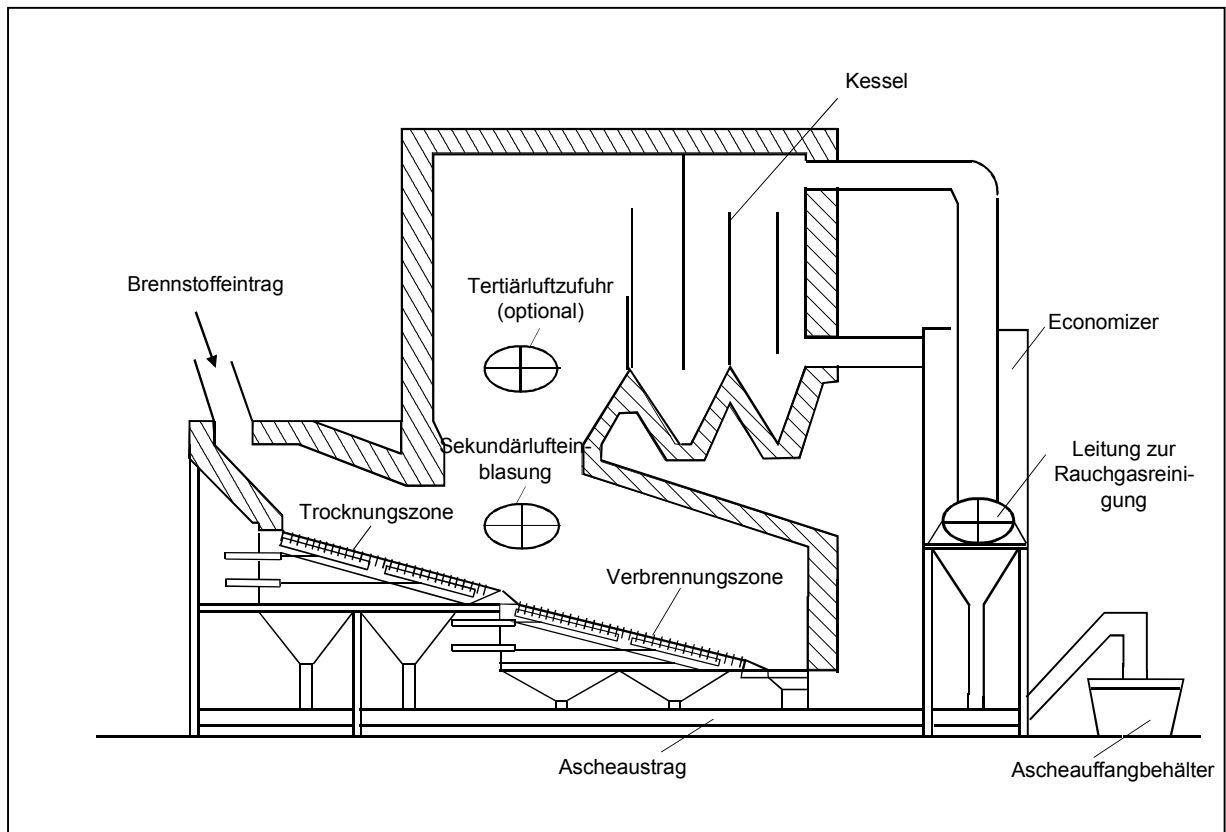
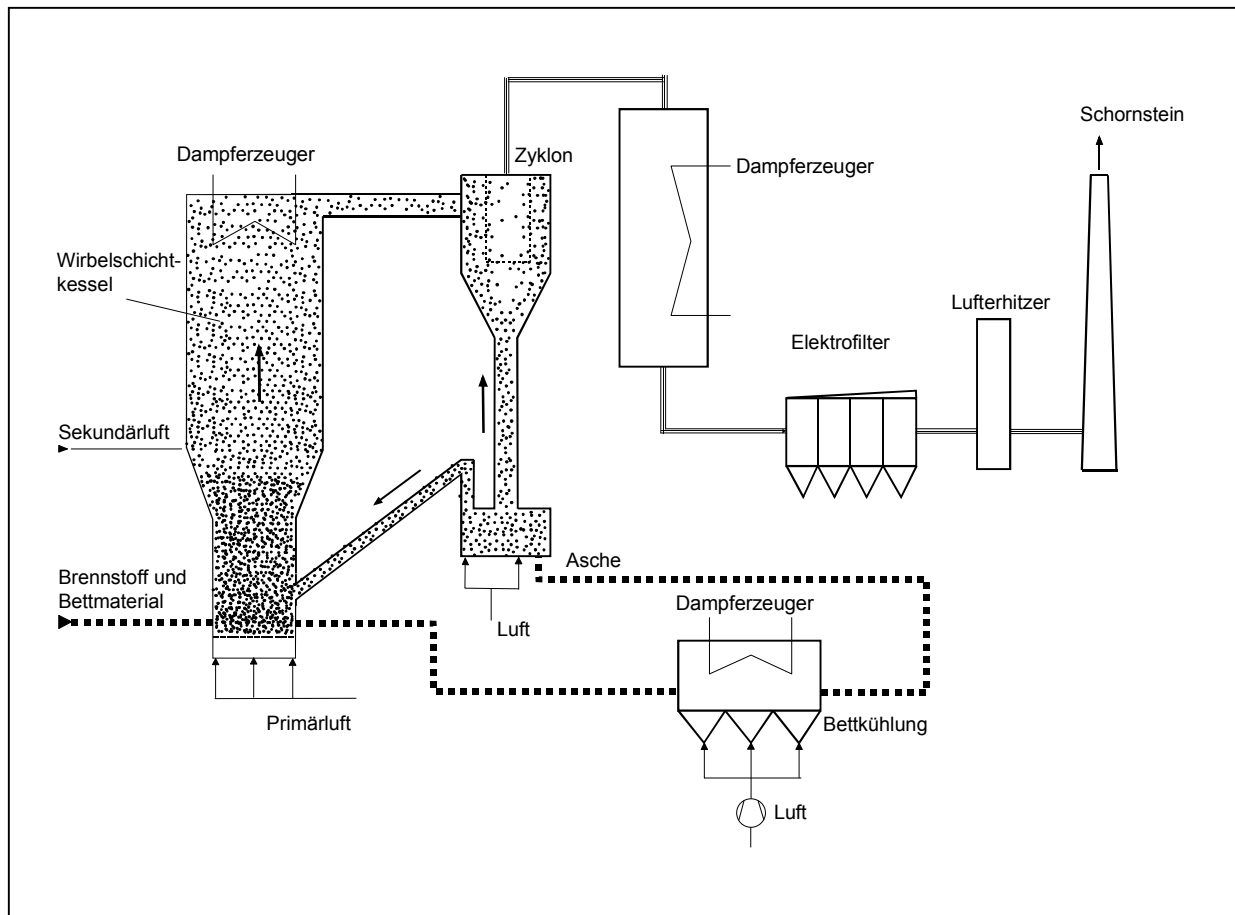


Abbildung I-4: Unterschubfeuerung

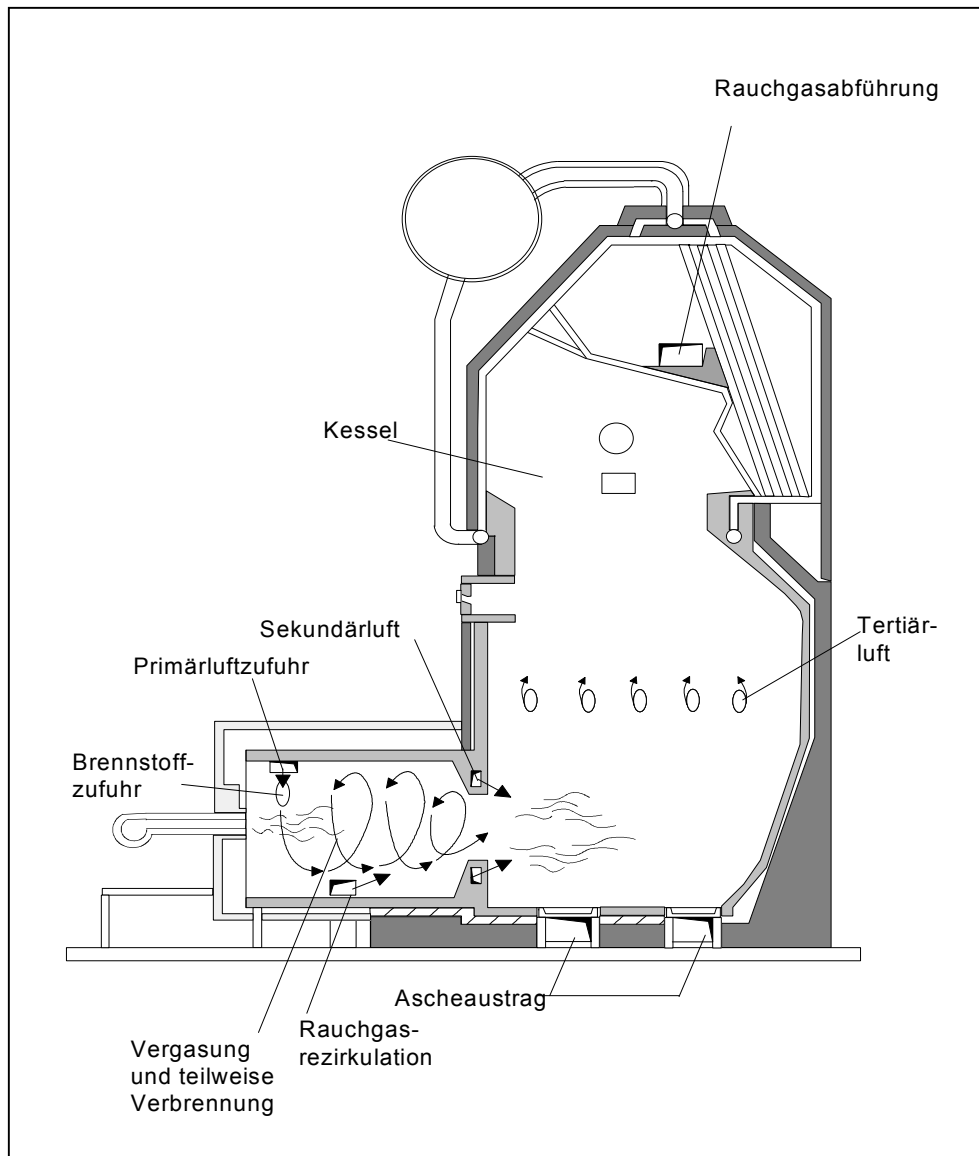


**Abbildung I-5:** Vorschubrostfeuerung

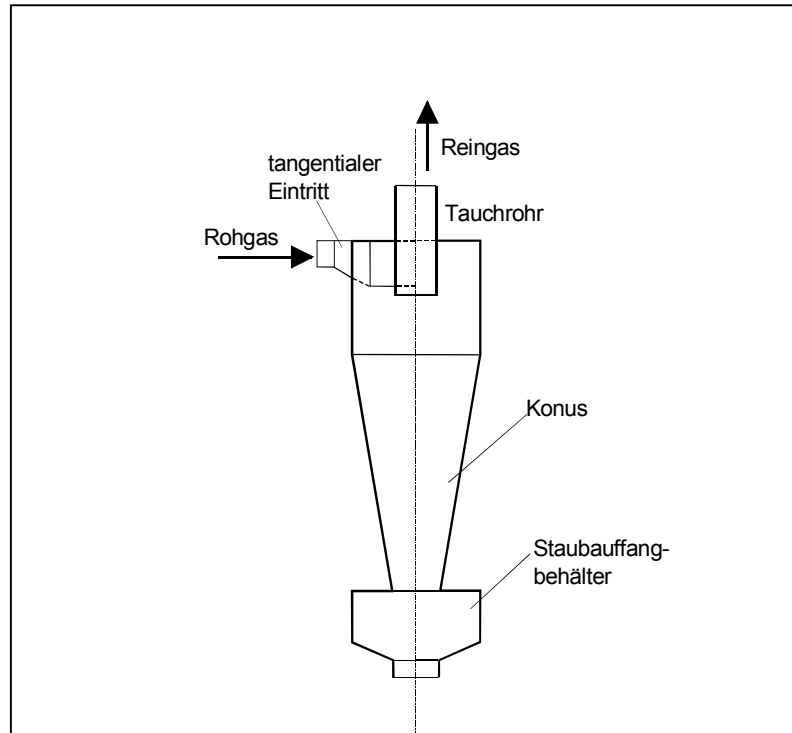


**Abbildung I-6:** Zirkulierende Wirbelschichtfeuerungsanlage

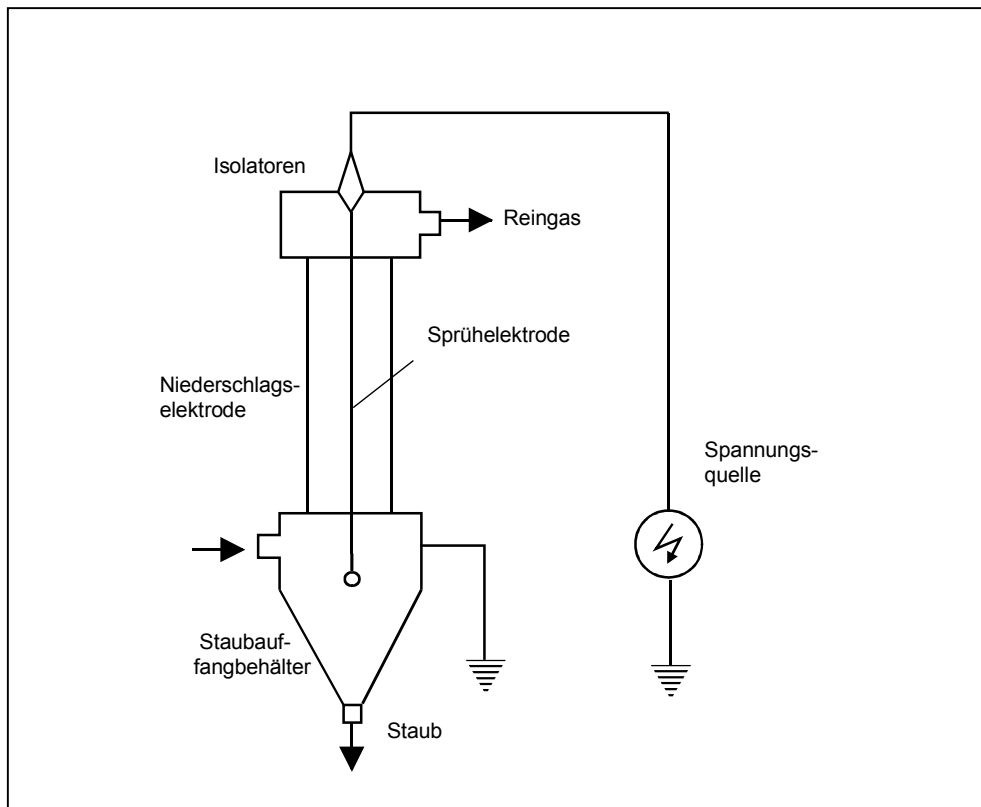




**Abbildung I-7:** Muffeleinblasfeuerung



**Abbildung I-8:** Schema eines Zyklons



**Abbildung I-9:** Schema eines Elektroabscheiders

## I.5 Charakterisierung des Teilprozesses Bereitstellung

**Tabelle I-17:** Energieaufwand für verschiedene Waldholzernteverfahren/ Durchforstungsverfahren (alle Gewichtsangaben bezogen auf t atro)

Mechanisierungsgrad Bemerkungen	Ernte + Rücken		Verarbeitung zu Hackschnitzeln		Transport zum Heizwerk		Summe Energiebedarf
	Vorgehen	Energiebedarf	Maschine	Energiebedarf	Fahrzeug, Entfernung	Energiebedarf	
vollmechanisiert, aus Ökobilanz zur forstlichen Produktion bei intensiver Bewirtschaftung Produkt: Industrieholz <sup>1</sup>	Durchforstung mit Harvestern, Rücken mit Forwardern; bei zu großem BHD: Motorsäge <sup>1</sup>	Buche: 20,4 kWh/t Eiche: 29,0 kWh/t Fichte: 38,7 kWh/t Kiefer: 40,1 kWh/t Mittelwert: 32,1 kWh/t. (alle mit Rinde)	Trommel-, Scheiben-, oder Schneckenhacker	2-5 kWh/t <sup>2</sup> 1,1-16,4 kWh/t <sup>3</sup> Mittelwert: 5 kWh/t	LKW- Transport mit Container, 10 km <sup>4</sup>	Transport: 7 kWh/t Ein- und Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	50,1 kWh/t atro (34,5-69,5 kWh/t atro)
vollmechanisiert	Durchforstung mit Harvester, Sortimentsverfahren, Rücken mit Forwarder, nach Rundholztransport Lagerung +	Fällen+ Vorliefern: 70 kWh/t Rücken: 46 kWh/t Lagerung, Trocknung: 0 <sup>4</sup>	mit Aufbauhacker, Kranbeschickung <sup>4</sup>	88 kWh/t <sup>4</sup>	Rundholztransport zum Heizwerk mit LKW, 10 km <sup>4</sup>	Transport: 17 kWh/t Ein- und Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	227 kWh/t

<sup>1</sup> [SCHWEINLE 00A]

<sup>2</sup> [BIZ 00]

<sup>3</sup> [WEISKOPF ET AL 97]

<sup>4</sup> [STOCKINGER U. OBERNBERGER 98]

Mechanisierungs- grad Bemerkungen	Ernte + Rücken		Verarbeitung zu Hackschnitzeln		Transport zum Heizwerk		Summe Energie- bedarf
	Vorgehen	Energiebedarf	Maschine	Energie- bedarf	Fahrzeug, Entfernung	Energie- bedarf	
vollmechanisiert	Trocknung <sup>4</sup>	gesamt: 116 kWh/t					
	Durchforstung mit Harvester, Rücken mit Forwarder <sup>4</sup>	Fällen+Vorliefern: 70 kWh/t Rücken: 46 kWh/t <sup>4</sup> Gesamt: 116 kWh/t	Hacken im Wald mit Aufbauhacker und Kranbeschickung <sup>4</sup>	88 kWh/t <sup>4</sup>	Hackschnitzel-Transport zum Heizwerk mit LKW, 10 km <sup>4</sup>	Transport: 7 kWh/t Ein- und Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	217 kWh/t
motomanuell	Durchforstung im Bauernwald Fällen mit Motorsäge, manuelles Vorliefern, Transport mit Traktor und Krananhänger (5km), Lagerung, Trocknung im Freien, <sup>4</sup>	Fällen: 41 kWh/t Rundholztransport: 45 kWh/t Lagerung/ Trocknung: 0 <sup>4</sup> gesamt: 86 kWh/t	Hacken am Hof/Zwischenlager Klein-Anbauhacker mit Handbeschickung <sup>4</sup>	111 kWh/t <sup>4</sup>	mit Traktor und Anhänger, 10 km <sup>4</sup>	Transport 66 kWh/t Ein-, Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	269 kWh/t
motomanuell	Durchforstung im Bauernwald: Fällen mit Motorsäge, manuelles Rücken <sup>4</sup>	Fällen: 41 kWh/t Rücken per Hand (25m):0 <sup>4</sup>	Hacken im Wald mit Klein-Anbauhacker, Handbeschickung <sup>4</sup>	111 kWh/t <sup>4</sup>	Transport mit Traktor und Anhänger <sup>4</sup>	Transport: 66 kWh/t Ein- Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	224 kWh/t
teilmechanisiert aus Angaben in <sup>4</sup> abgeleitet	Durchforstung: Fällen motomanuell, Vorliefern und Rücken mit Seilwinde/ Forwarder <sup>4</sup>	Fällen: 41 kWh/t Rücken: 16 kWh/t <sup>4</sup>	Hacken im Wald mit Aufbauhacker, Kranbeschickung <sup>4</sup>	88 kWh/t <sup>4</sup>	Transport mit LKW und Container <sup>4</sup>	Transport: 7 kWh/t Ein- Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	158 kWh/t

Mechanisierungs- grad Bemerkungen	Ernte + Rücken		Verarbeitung zu Hackschnitzeln		Transport zum Heizwerk		Summe Energie- bedarf
	Vorgehen	Energiebedarf	Maschine	Energie- bedarf	Fahrzeug, Entfernung	Energie- bedarf	
teilmechanisiert aus Angaben in <sup>4</sup> abgeleitet, mit anderem Literaturwert fürs Hacken	Durchforstung: Fällen motormanuell, Vorliefern und Rücken mit Seilwinde/ Forwarder <sup>4</sup>	Fällen: 41 kWh/t Rücken: 16 kWh/t <sup>4</sup>	Hacken: aus <sup>5</sup> für Material mit max. 55 cm Durchmesser: 40-100m <sup>3</sup> /h, 200-550 kW, 325 kg/Sm <sup>3</sup>	20 kWh/t	Transport mit LKW und Container <sup>4</sup>	Transport: 7 kWh/t Ein- Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	90 kWh/t
vollmechanisiert mit anderem Literaturwert fürs Hacken	Durchforstung mit Harvester, Rücken mit Forwarder <sup>4</sup>	Fällen+Vorliefern: 70 kWh/t Rücken: 46 kWh/t <sup>4</sup> Gesamt: 116 kWh/t	aus <sup>5</sup> für Material mit max. 55 cm Durchmesser: 40-100m <sup>3</sup> /h, 200-550 kW, 325 kg/Sm <sup>3</sup>	20 kWh/t	Hackschnitzel- Transport zum Heizwerk mit LKW, 10 km <sup>4</sup>	Transport: 7 kWh/t Ein- und Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	149 kWh/t
vollmechanisiert Hackgutproduktion aus Schlagabraum/ Restholz nach Prozessoraufarbeit ung <sup>4</sup>	Fällen, Rücken, Ausformung von Rundholz mit Harvester im Baumverfahren <sup>4</sup>	1 kWh/t <sup>4</sup>	Hacken des Schlagrücklasses mit Aufbauhacker, <sup>4</sup> Kranbeschickung <sup>4</sup>	66 kWh/t <sup>4</sup>	Transport mit LKW und Container <sup>4</sup>	Transport: 7 kWh/t Ein- Auslagern mit Radlader: 6 kWh/t <sup>4</sup>	80 kWh/t

<sup>5</sup> [MARUTZKY U. SEEGER 99]

**Tabelle I-18:** Übersicht über verschiedene Gebrauchtholzaufbereitungsanlagen und deren Energiebedarf

Endprodukte	Aufgabegut	Anlagenkomponenten	Durchsatz	installierte Leistung	Energiebedarf	Quelle
< 200 mm	nicht kontaminierte Hölzer	Aufgabe mit Radlader und Greifbagger; Sortierkabine (per Hand); Walzenbrecher+ Hammermühle oder nur Prallmühle, Klassierung mit Linearwucht-, Schwingsiebmaschine, Stromversorgung über Stromaggregate	max. 20 t/h	529-912 kWel	(mit 70% der installierten Leistung 19-32 kWh/t)	[WEIßKOPF ET AL 97]
60-100 mm und 60 mm	vorsortierter Sperrmüll, alle Altholzsortimente, beplattete Bahnschwellen	Großbrecher, Wasserbedüsung zur Staubbinding, manuelle Sortierstation, Vibrationssiebrinne, Schlagrotor, Elektro- und Permanentmagnete, Förder- und Lagertechnik, Lufttechnik/Entstaubung	max. 25 t/h	550 kWel	durchschn.: 320 kW; also 12,8 kWh/t	[MAIER 00]
5-60 mm	Industrierestholz, Sägewerksabfälle, Furnierreste, Rundholz, Kabeltrommeln, Abbruchholz	Großbrecher, Gurtbandförderer, Überbandmagnet mit Gestell, Sortierkabine, Suchspule mit Ausschleusung, Schlagrotor, Siebstation für drei Fraktionen, Absaug- und Filteranlage	15-20 t/h	550 kWel	(mit 70% der installierten Leistung 19-26 kWh/t)	[MAIER 00]
50 mm	Alt- und Restholz, Verpackungsholz	Großbrecher, Schlagrotor, Elektromagnet, Entstaubung, Fördertechnik	15-20 t/h	500 kWel	durchschn. 350 kW, also ca. 20 kWh/t	[MAIER 00]
z.B. 0-8mm 8-30mm; > 30mm	Alt- und Restholz, Verpackungsholz etc.	Großbrecher, Schlagrotor, Sieb, Elektromagnet, Entstaubung, Fördertechnik	10 t/h	400 kWel	durchschn. 170 kW, also ca. 17 kWh/t	[MAIER 00]
10-50 mm	Abbruchholz, Paletten, Sperrmüll, Spanplatten usw.	Vorsortierung von Hand, Trommelhacker, Förderbänder, Magnetabscheider, NE-Metallabscheider, Entstaubung	130.000 t/a ; ca. 30 t/h		19,4 kWh/t	[KREISCHER 00]
< 30 mm und < 10 mm	nicht kontaminiertes Holz	Aufgabe mit Radlader und Greifbagger; Sortierkabine (per Hand); Prallmühle + zweiseitige Hammermühle, Klassierung mit Linearwucht-, Schwingsiebmaschine, Stromversorgung über Stromaggregate	20 t/h	751 kWel	(mit 70% der installierten Leistung: 26 kWh/t)	[WEIßKOPF ET AL 97]

**Tabelle I-19:** Kostenrechnung für Altholzaufbereitungsanlagen mit max. Durchsatz von 20 t/h nach [WEISKOPF ET AL 97]

End- produkte	Anlagenkomponenten	Investition Maschinen	fixe Kosten <sup>6</sup> bezogen auf 45.000 t/a	variable Kosten <sup>7</sup> bezogen auf 45.000 t/a (ohne Transport)	Gesamtkosten pro t Altholz (ohne Transport)
< 200 mm	Aufgabe mit Radlader und Greifbagger; Sortierkabine (per Hand); Walzenbrecher+ Hammermühle, Klassierung mit Linearwucht-, Schwingsiebmaschine, Stromversorgung über Stromaggregate; Entstaubung mit 10.000 m <sup>3</sup> /h Abluftstrom	831.870 €, davon 31 % für Zerkleinerer	9,7 €/t Altholz davon Abschreib.+Zinsen 1,09 €/t	8,2 €/t Altholz davon Energiekosten: 1,82 €/t; Reparatur- kosten: 2,45 €/t	18 €/t Altholz
< 200 mm	Aufgabe m. Radlader und Greifbagger; Sortierkabine; Prallmühle, Klassierung m. Linearwucht-, Schwingsiebmaschine, Stromversorgung über Stromaggregate; Entstaubung mit 5.000 m <sup>3</sup> /h Abluftstrom	683.100 €, davon 12 % für Zerkleinerer	7,7 €/t Altholz davon Abschr.+Zinsen 0,37 €/t	8,7 €/t Altholz davon Energiekosten 1,19 €/t, Reparaturk.: 1,99 €/t	16 €/t Altholz
< 30 mm und < 10 mm	Aufgabe mit Radlader und Greifbagger; Sortierkabine (per Hand); Prallmühle + zweitrotorige Hammermühle, Klassierung mit Linearwucht-, Schwingsiebmaschine, Stromversorgung über Stromaggregate; Entstaubung mit 75.000 m <sup>3</sup> /h Abluftstrom	1.454.600 €, davon 38 % für Zerkleinerer	11 €/t Altholz davon Abschr.+Zinsen 2,21 €/t	12 €/t Altholz davon Energiekosten: 3,03 €/t, Reparaturk.: 3,37 €/t	22 €/t Altholz
< 30 mm u. < 10 mm	Aufgabe mit Radlader und Greifbagger; Sortierkabine (per Hand); Walzenbrecher+ Hammermühle + zweitrotorige Hammermühle, Klassierung mit Linearwucht-, Schwingsiebmaschine, Stromversorgung über Stromaggregate; 13.000 m <sup>3</sup> /h Abluftstrom	978.100 €, davon 28 % für Zerkleinerer	9,2 €/t Altholz davon Abschr.+Zinsen 1,18 €/t	10 €/t Altholz davon Energiekosten: 1,75 €/t, Reparaturk.: 3,07 €/t	19 €/t Altholz

<sup>6</sup> berücksichtigt: Abschreibung und Zinsen für Grundstück, Gebäude, Platzbefestigung u. Anlagenteile; Versicherung, Genehmigungsverf., Unvorherges., kaufmänn. Angestellte

<sup>7</sup> berücksichtigt: gewerbli. Mitarbeiter, Energiekosten, Reparaturkosten, Entsorgungskosten für mineralische Reststoffe, Kunststoffe, Metalle (negative Kosten), Sonstiges

## Anhang II – Prozessketten

### II.1 Bereitstellung von Holz

**Tabelle II-1:** Brennstoff- Bereitstellung für die Beispielanlagen

	Holz- Durchsatz [t/a]	fossiler Energiebedarf [MWh/a]	Kosten der Bereitstellung g [€/a]	Emissionen Partikel [kg/a]	Emissionen NOx [kg/a]	Emissionen SO <sub>2</sub> [kg/a]	Emissionen CO [kg/a]	Emissionen CO <sub>2fossil</sub> [kg/a]
Bodnegg	1.551	45,0	13.630	9,2	244,7	4,2	49,4	11.525
Metzingen	600	37,0	14.746	7,8	235,2	3,2	48,0	9.711
Hohentengen	337	43,2	18.103	10,1	158	3,7	46,2	11.381
Stadt Nagold	311	35,0	14.969	8,3	133	3,0	37,0	9.185
Dunningen	240	24,6	11.082	5,7	97,0	2,1	26,9	6.485
LK Heilbronn	1.256	42,4	29.219	7,5	310	3,8	55,9	10.962
HW Müllheim	4.500	580,6	243.518	136,1	2.132	50,0	621,4	153.090
FHW Rotenbachtal	6.385	127,3	163.488	22,7	706	12,9	137,4	32.524
Hkw Pforzheim	43.822	2.323,4	1.067.862	535,9	12.988	200	2.666	600.615
IKW Baienfurt	17.500	1.540,0	-599.490 <sup>1</sup>	297,5	6.405	140	1.208	406.910
RindenHKW Oberrot	140.000	2.772,0	1.213.296	574,0	14.553	217	3.213	721.644
HKW Schwörer Haus	40.000	792,0	346.656	164,0	4.158	62	918	206.184

<sup>1</sup> (Entsorgungsentgelt für Gebrauchtholz A3/A4)



## II.2 Feuerungsanlagen

Tabelle II-2: Energiebilanzen über die Feuerungsanlagen – ohne Bereitstellung des Brennstoffs und ohne Ascheentsorgung

Anlagenbeispiel	INPUT ern. Holz [MWh/a]	INPUT fossil, Öl / Gas [MWh/a]	OUTPUT erneuerbar Wärme [MWh <sub>th</sub> /a]	OUTPUT erneuerbar Strom [MWh <sub>el</sub> /a]	OUTPUT fossil Wärme [MWh <sub>th</sub> /a]	OUPUT fossil Strom [MWh <sub>el</sub> /a]	Eigen- energie- bedarf [MWh <sub>el</sub> /a]
Bodnegg	1.112	104,2	1.200	0	84,4	0	19,384
Metzingen	1.290	Heizöl EL: 24,75 Gas: 533,33	1.000	0	500	0	22,5
Hohentengen	1.090	253	820	0	205	0	15,4
Stadt Nagold	1.084	247,5	750 (700-800)	0	200,5	0	14,3
Dunningen	746	BHKW <sup>2</sup> : 1.205 Ölkessel: 148	580	0	BHKW: 640 Ölkessel: 120	427	20,1
LK Heilbronn	3.447	BHKW <sup>2</sup> : 1.661; Ölkessel: 691	2.600	0	BHKW:820; Ölkessel: 560	547	119,4
HW Müllheim	12.912	1.406	7.750	0	1.265	0	40
FHW Rotenbachtal	21.000	13.333 <sup>3</sup>	20.000	0	12.000	0	165 <sup>4</sup>
HKW Pforzheim	160.000	870.683	55.948 <sup>5</sup>	47.009	305.009	256.277	(Strom in netto)

<sup>2</sup> berechnet aus Ouput- Angaben mit  $\eta_{el}=0,354$  und  $\eta_{therm}=0,531$  für das BHKW, sowie  $\eta_{therm}=0,81$  für einen Ölkessel zur Wärmeerzeugung (Daten aus GEMIS)

<sup>3</sup> berechnet aus Ouput- Angabe mit  $\eta_{therm}=0,9$  für einen großen Ölkessel

<sup>4</sup> Annahme: da es sich hier wie beim HW Müllheim um eine Rostfeuerung handelt, wird angenommen, dass im Verhältnis zum Output der gleiche Eigenbedarf besteht

<sup>5</sup> aus Energiebilanz für den Betrieb mit fossilen Brennstoffen: Annahmen: Summe Ouput bleibt gleich und teilt sich nach Energieeinsatz der Brennstoffe auf

Anlagenbeispiel	INPUT ern. Holz [MWh/a]	INPUT fossil, Öl / Gas [MWh/a]	OUTPUT erneuerbar Wärme [MWh <sub>th</sub> /a]	OUPUT erneuerbar Strom [MWh <sub>el</sub> /a]	OUTPUT fossil Wärme [MWh <sub>th</sub> /a]	OUPUT fossil Strom [MWh <sub>el</sub> /a]	Eigen- energie- bedarf [MWh <sub>el</sub> /a]
IKB Baienfurt	73.150	Reststoffe: 32.097					
RHKW Oberrot	459.200	0	150.000 zzgl. Prozessdampf 120.480 <sup>6</sup>	35.000	0	0	5000
HKW SchwörerHaus	82.320	519,3	31.385	22.273	180	140	2.900 <sup>7</sup>

<sup>6</sup> aus Annahme über Ausnutzungsgrad: 0,65 wie bei HKW SchwörerHaus und HKW Pforzheim

<sup>7</sup> Annahme: Eigenbedarf ist 13% des elektrischen Output

**Tabelle II-3:** Emissionswerte für Kleinfeuerungen aus der Literatur (< 1MW: 13% O<sub>2</sub>, >1MW: 11 % O<sub>2</sub>)

Brennstoff, Feuerungstechnik Holzessel, FWL	Emissionsminderungsmaßnahmen	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staub [mg/m <sup>3</sup> ]	Quelle
Holzfeuerungen	Zyklon				100-150	[FNR 00]
	E-Abscheider				10-50	
	Gewebefilter				5-20	
	Rauchgaskondensation				40	
Hackschnitzelfeuerungen in Dänemark	mit Rauchgaskondensation		90 (40-140)	15 (5-30)	50 (20-90)	[SERUP ET AL 99]
Rostf. 790 kW	Zyklon+Wäscher mit Rauchgaskondensation	62	163		24,6	[IBS 00B]
Rostf. 500 kW	Zyklon	110	313	5	120	[BRAGAGNOL O 00]
Buche-HS, Unterschubf. 120 kW	Abgasrückführung, ohne Staubabscheider	14-147			89-111	[OSER ET AL 00]
Unterschubf. 300 kW	Zyklon	550			70	[IBS 00B]
„Industriekessel“ 200-500 kW		700	140	20	80	[BUWAL 95]
	„Industriekessel“ 500-1000 kW	350	140	20	80	
	„Gewerbe“ Holzschnitzelfeuerungen	300	150	20	80	
	„Gewerbe“ Restholzfeuerungen	300	250	20	80	
Hackgutfeuerungen bis 50 kW		200-1.000	141-206		26-53	[LAUNHARDT ET AL 99]
Brennstoffe: Föhre (0,07 Gew.-%N)			138			[WAGNER U. HASLER 98]
Buche (0,2 Gew.-% N)			185			
Spanplatten (2,85 Gew.-% N)			737			
Buche (x=16 Gew.-%), 50kW		156	125		31	[INFO-ENERGIE 98]
Fichte (x=35 Gew.-%), 50 kW		266	102		28	

Brennstoff, Feuerungstechnik Holzkessel, FWL	Emissionsminderungsmaßnahmen	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staub [mg/m <sup>3</sup> ]	Quelle
Waldholz, Vorofenfeuerung, 950 kW	Zyklon, Schlauchfilter	242	125	8	4,6	[FRIEß U. HUBER 98]
Waldholz, Vorofenfeuerung, 600 kW	Zyklon, E-Abscheider	817	181	12	61	
Kleinfeuerungen ab 15 kW, naturbel. + Resthölzer bzw. bei CO: naturbel. - Resthölzer		126 (16-548) - 393 (11-1.617)	110	13	63	[UBA 00]

**Tabelle II-4:** Emissionswerte für Großfeuerungen aus der Literatur (< 1MW: 13% O<sub>2</sub>, >1MW: 11 % O<sub>2</sub>)

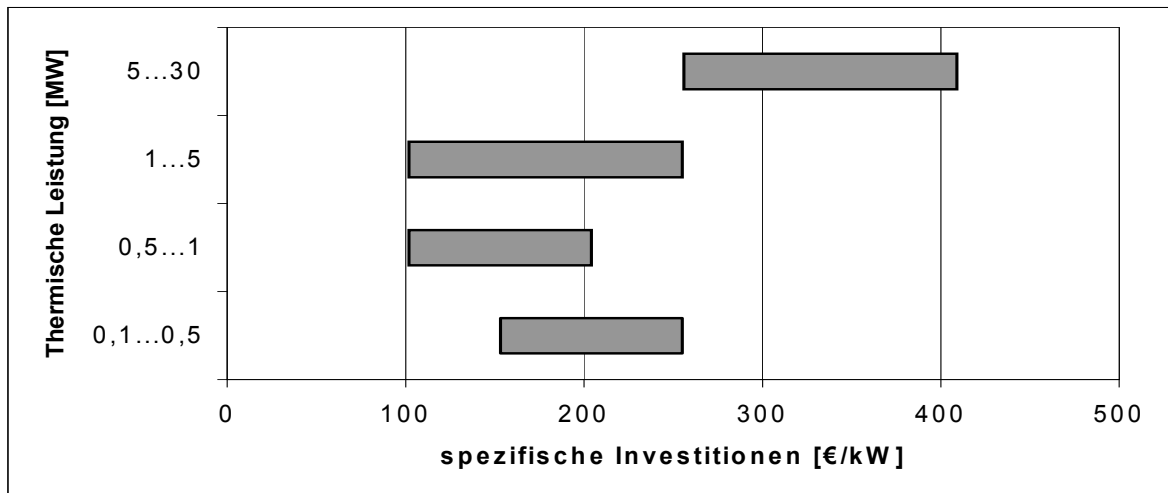
Brennstoff, Feuerungstechnik Holzkessel, FWL	Emissionsminderungsmaßnahmen	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Staub [mg/m <sup>3</sup> ]	Quelle
70 %Spanplatten, 30% naturbel. Häcksel, <i>Unterschubfeuerung</i> 1,28 MW	Zyklon	225			77	[SCHMOECKEL U. STREIT 95]
Waldholz, <i>Rostf.</i> 3 MW	Zyklon (evtl. demnächst mit E-Abscheider)	4,4	142	15	135	MÜLLHEIM
naturbel. Holz, <i>Rostf.</i> , 6,5 MW	Zyklon, E-Abscheider	1.453			30,6	[SCHMOECKEL U. STREIT 95]
Waldholz, <i>Vorschubrostf.</i> 11 MW	E-Abscheider	67	282	10	2,9	[FRIEB U. HUBER 98]
wassergekühlter Vorschubrost 5,8 MW	Gewebefilter	50-100	150-200			[SEEGER]
60% Rinde, 40% naturbel. Häcksel, <i>Rostf.</i> 13,9 MW	Zyklon, E-Abscheider	59			18,25	[SCHMOECKEL U. STREIT 95]
Produktionsrestholz, Vorschubrostf. 7,5 MW	Zyklon, E-Abscheider	50-200	260-500		<5	[BILITEWSKI 95]
Spanplattenreste, Wanderrost 73,5 MW	Gewebefilter	11,4	235		3,2	[CARMEN 00]
Rinde, Ind.restholz, <i>Rostf.</i> + <i>Einblasf.</i> 36 MW	Zyklon, E-Abscheider	176	264	6	23	OBERRROT
Industrierestholz, <i>Rostf</i> + <i>Einblasf.</i> 15 MW	Zyklon, E-Abscheider	104	227		1	[MLR 99], HOLZZENTRALBLATT 06.12.1996
Grüngut, <i>stationäre Wirbelschicht</i> 82,6 MW	DeNO <sub>x</sub> (SCR/SNCR), E-Abscheider		50	5	5	[REMMERS 00]
Gebrauchtholz, <i>stationäre Wirbelschicht</i> 35 MW	Gewebefilter	55	138	41	3	[SCHMIDT U. PAULSEN 99]
Mischfeuerung: Gebrauchtholz, Faserschlämme aus Papierherstellung, Bioschlämme, Heizöl S und EL ZWS 15 MW	Wäscher (Kalkmilch), Flugstromadsorber, Gewebefilter	50	187	1,49	3,4	[SIX 00]
Mischfeuerung: Kohle+ naturbel. Holz, ZWS 42 MW	Gewebefilter	100	75	105	8	
Mischfeuerung: Braunkohle und Holz, Zonenwanderrost, Staubfeuerung, 803 MW	SCR, E-Abscheider, Kalkwäscher	35	117	103	8	[KINDLER ET AL 00]

**Tabelle II-5: Richtwerte für spezifische Investitionen diverser Komponenten der Bautechnik einer Biomasse-Anlage [FNR 00]<sup>8</sup>**

<b>Komponente</b>	<b>Einheit</b>	<b>spezifische Investition</b>
<b>Bauwerk-Baukonstruktion (Leichtbau)</b>		
Brennstofflager	€/m <sup>3</sup>	36-66
Bereich Kessel und Maschinen	€/m <sup>3</sup>	51-77
Bereich Warte und Schaltanlage	€/m <sup>3</sup>	77-128
Bereich Büro und Sozialräume	€/m <sup>3</sup>	128-179
Keller	€/m <sup>3</sup>	205-256
<b>Bauwerk- Technische Anlagen</b>		
Geringer Umfang (z.B. beim Lager)	€/m <sup>3</sup>	ca. 10
Mittlerer Umfang (z.B. beim Kessel)	€/m <sup>3</sup>	ca. 26
Großer Umfang (z.B. Büros, Sozialräume)	€/m <sup>3</sup>	ca. 77
<b>Außenanlagen</b>		
Befestigte Flächen	€/m <sup>2</sup>	51-102
Kiesflächen	€/m <sup>2</sup>	10-26
Grünflächen	€/m <sup>2</sup>	5-20

---

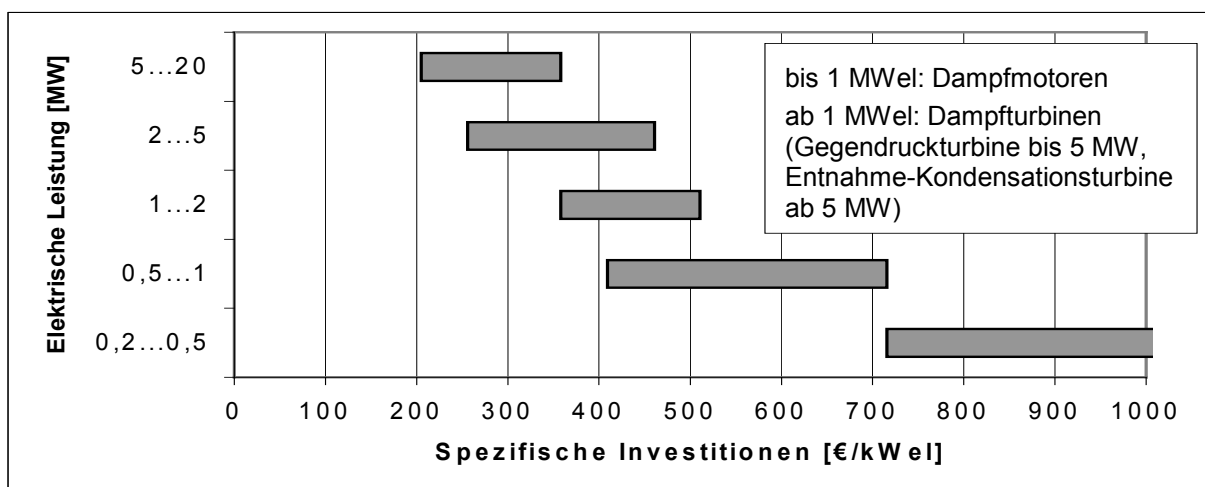
<sup>8</sup> Angaben in DM; umgerechnet in € mit 1,95583 DM/€



**Abbildung II-1:** Spezifische Investitionen von automatisch beschickten biomassebefeuerten Kesseln, fertig montiert, einschl. Beschickung, Entaschung, Luft- und Rauchgassystem und Rauchgasreinigung [FNR 00]

**Tabelle II-6:** Spezifische Preise von Entstaubungsanlagen, ab Werk [FNR 00]

Entstaubungsanlage	Thermische Leistung [MW]	Spezifische Preise [€/kW]
Multizyklon	0,1-0,5	15-26
	0,5-2	7,7-15
Gewebe-, Elektroabscheider	1-2	41-61
	2-5	31-46
	5-20	15-36
Rauchgaskondensation	1-5	46-66



**Abbildung II-2:** Spezifische Investitionen pro kWe von Dampfturbinen und –motoren, fertig montiert, einschl. Steuerung und Generator, jedoch ohne Kondensator [FNR 00]

**Tabelle II-7:** Richtwerte für den Personalbedarf zur technischen Betriebsführung von Bioenergieanlagen [FNR 00]

	<b>Personalbedarf zur technischen Betriebsführung in Personenjahren</b>
Anlagen < 1 MW Wärmeleistung	0,2-0,4
Heizwerk mit 1-5 MW Wärmeleistung	1-3
Heizwerk > 5 MW Wärmeleistung	3-5
Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit > 5 MW Wärmeleistung	4-7

**Tabelle II-8:** Kriterien für die Wirtschaftlichkeit von Biomasseheizwerken [KRAPP 00]<sup>8</sup>

<b>Benennung</b>	<b>Soll-Wert/ sinnvoll</b>	<b>Einheit</b>
<b>Abnehmerstruktur</b>		
Wärmebelegung	> 1,5 (>3)	MWh/m
Netzbelegung	>1	kW/m
<b>Wärmeerzeugung</b>		
Volllaststunden Biomasse	> 2.500	h
Anteil Biomasse am Wärmebedarf	>= 80	%
<b>Wärmeverteilung</b>		
Wärmeverlust	280	kWh/m
<b>Investitionen</b>		
biomassespezifische Anlagenteile	<= 205	€/kW
Heizzentrale	<256	€/kW
Wärmeverteilung: bez. auf Trassenmeter	< 307	€/m
Wärmeverbrauch: bez. auf	< 153	€/MWh
bauliche Maßnahmen bez. auf bebaute Fläche	< 1.534	€/m <sup>2</sup>
Volumen bez. auf umbautes	< 307	€/m <sup>3</sup>
Brennstoffbunker bez. auf	< 230	€/m <sup>3</sup>
Gesamtinvestitionen: bez. auf installierte Nennleistung	< 511	€/kW
bez. auf Wärmeverbrauch	< 383	€/MWh
<b>Heizhaus und Brennstofflager</b>		
bebaute Fläche bez. auf installierte Nennleistung	< 150	m <sup>2</sup> /MW
bez. auf Wärmeverbrauch	<= 100	m <sup>2</sup> /GWh
umbautes Volumen bez. auf installierte Nennleistung	< 700	m <sup>3</sup> /MW
bez. auf Wärmeverbrauch	<= 500	m <sup>3</sup> /GWh



Benennung	Soll-Wert/ sinnvoll	Einheit
<b>Ökonomische Berechnung</b>		
kapitalgebundene Kosten	<= 26	€/MWh
verbrauchsgebundene Kosten (Wald + Bill + Öl)	< 26	€/MWh
betriebsgebundene und sonstige Kosten	<= 6	€/MWh
Wärmegestehungskosten	ohne Erlöse	<= 51
	mit HAK + BKZ	
	mit Förderung	< 51
Hilfsenergie	2	%
Personalbedarf	<= 700	h/a
<b>Förderung</b>		
Förderung bezogen auf Energie-Input	< 128	€/MWh
Biomassezins (Fördermittel Bayer. StMELF)	>= 10	%
Biomassezins (Fördermittel gesamt)	>= 10	%

### II.3 Ascheentsorgung

**Tabelle II-9:** Angaben über Ausbringungsmengen von Holzaschen in Land- u. Forstwirtschaft

QUELLE	Pflanzenart	ausgebrachte Aschemenge (einmalig)	ausgebrachte Aschemenge pro Jahr
[ZOLLNER ET AL 97]	Forst	1- 6 t/ha pro Umtriebszeit <sup>9</sup> (Vorschlag)	10-120 kg/ha*a
[MARUTZKY U. SEEGER 99]		2-10 t/ha (pro Umtriebszeit) (Vorschlag)	20-200 kg/ha*a
[RÖSCH 96]		9-33 t/ha (pro Umtriebszeit) (Vorschlag)	90-660 kg/ha*a
[SANDER U. ANDRÉN 97]	Weiden-plantage; Kurz-umtriebs-plantage	Versuche	600-1.500 kg/ha*a
[BIOMASSE-INFO 00]	Forst	3 t/ha in 50 Jahren: Maximalwert für Holzaschen, die einen Schwermetall-grenzwert erreichen in Österreich	60 kg/ha*a
[RUCKENBAUER U. HOLZNER 94]	Forst	15 t/ha (Versuch)	150-300 kg/ha*a

<sup>9</sup> Zeitraum zwischen Bestandesgründung und Einschlag; kann unterschiedlich lang sein für ein und dieselbe Holzart; hier angenommen: zwischen 50 und 100 Jahre in Anlehnung an Umtriebszeiten für Fichten und Kiefern, welche häufiger als Laubbäume auf nährstoffarmen Böden stehen, also für die Düngung interessant sind

QUELLE	Pflanzenart	ausgebrachte Aschemenge (einmalig)	ausgebrachte Aschemenge pro Jahr
[RUCKENBAUER U. HOLZNER 94]	Weideland	3-6 t/ha (Versuch)	3.000-6.000 kg/ha*a
[BIOMASSE-INFO 00]	Grünland	750 kg/ha : Maximalwert für Holzaschen, die einen Schwermetallgrenzwert erreichen in Österreich	750 kg/ha*a
[BIOMASSE-INFO 00]	Ackerland	1.000 kg/ha : Maximalwert für Holzaschen, die einen Schwermetallgrenzwert erreichen in Österreich	1.000 kg/ha*a
[RUCKENBAUER U. HOLZNER 94]	Ackerland (Fruchtfolge: Winterweizen, Körnermais, Sojabohne, Winterweizen mit Kleeuntersaat)	3-6 t/ha (Versuche über eine Fruchtfolge, d.h. 4 Jahre)	3.000-6.000 kg/ha*a
[BUWAL 96]	Winterweizen	(berechnet aus Düngebedarf K)	1.310 kg/ha*a
[BUWAL 96]	Kartoffeln	(berechnet aus Düngebedarf K)	5.410 kg/ha*a
[BUWAL 96]	mittelintensiv genutzte Wiese im Schweizer-mittelland	(berechnet aus Düngebedarf K)	2.620 kg/ha*a

**Tabelle II-10:** Aufteilung der Anbauflächen in Baden-Württemberg 1999 [STALA 00]

	Anbaufläche in 1.000 ha	Anteil an landwirtschaftl. genutzter Fläche in Baden-Württemberg
Dauergrünland	573,7	39 %
Getreide	538,6	37 % (davon Winterweizen 37%)
Hackfrüchte, Gartengewächse, Hülsenfrüchte, Handelsgewächse	141,2	10 %
Futterpflanzen	120,1	8%
Brache	52,1	4 %
Rebland	23,6	2 %
Obstanlagen	21,1	1 %
Baumschulen	2,7	0,2%
landwirtschaftl. genutzte Fläche in Baden-Württemberg	1.473,1	100 %

**Tabelle II-11:** Entsorgungs-/Verwertungswege der Anlagenbeispiele (eigene Annahmen und Berechnungen: *kursiv*)

Anlagenbeispiel	Aschemenge e [t/a]	Ascheverwertung/ - entsorgung	Energiebedarf [kWh/a]	Partikel [kg/a]	NO <sub>x</sub> [kg/a]	SO <sub>2</sub> [kg/a]	CO [kg/a]	CO <sub>2fossil</sub> [kg/a]	Kosten [€/a]
Gemeinde Bodnegg	3,5	unbehandelt auf Hausmülldeponie	19,6	0,003	0,053	0,002	0,0105	5	268
Metzingen	50,6	<i>unbehandelt auf Hausmülldeponie</i>	283,3	0,040	0,759	0,025	0,152	68	7.890
Gemeinde Hohentengen	5,4	<i>unbehandelt auf Hausmülldeponie</i>	30,2	0,004	0,081	0,003	0,016	7	842
Stadt Nagold	7,1	unbehandelt auf Hausmülldeponie	39,7	0,006	0,106	0,004	0,021	10	1.105
Gemeinde Dunningen	7,1	<i>unbehandelt auf Hausmülldeponie</i>	39,6	0,006	0,106	0,004	0,021	10	1.104
Landkreis Heilbronn	94,2	<i>unbehandelt auf Hausmülldeponie</i>	528	0,075	1,413	0,047	0,283	127	14.690
Holzwärme Müllheim	72,6	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	1.887	0,283	5,385	0,237	1,357	505	5.813
Fernheizwerk Rotenbachtal	355,0	Bergversatzmaterial	34.793	4,260	149,114	3,195	28,048	9.147	41.570
Heizkraftwerk Pforzheim	2.728	<i>unbehandelt auf Hausmülldeponie</i>	15.274	2,182	40,912	1,364	8,182	3.682	425.335
Industriekraftwerk Baienfurt	875	<i>Sondermülldeponie</i>	43.750	4,813	124,25	4,375	24,938	12.014	210.269
Rindenheizkraftwerk Oberrot	8.288	<i>unbehandelt auf Hausmülldeponie</i>	46.413	6,630	124,32	4,144	24,684	11.189	1.292.246
Heizkraftwerk Schwörer Haus	2.368	<i>Bodensanierung in Thüringen</i>	232.064	28,416	994,56	21,312	187,072	61.012	277.259

**Tabelle II-12:** Entsorgungs-/Verwertungswege der Anlagenbeispiele Option: maximale Verwertung in Landwirtschaft und Bergversatz

Anlagenbeispiel	Asche- menge [t/a]	Ascheverwertung/- entsorgung	Energiebedarf [kWh/a]	Partikel [kg/a]	NO <sub>x</sub> [kg/a]	SO <sub>2</sub> [kg/a]	CO [kg/a]	CO <sub>2(fossil)</sub> [kg/a]	Kosten [€/a]
Gemeinde Bodnegg	3,5	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	91	0,013	0,260	0,011	0,065	24	280
Gemeinde Metzingen	50,6	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	1.315	0,197	3,754	0,165	0,946	352	4.052
Gemeinde Hohentengen	5,4	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	140	0,021	0,400	0,018	0,101	38	432
Stadt Nagold	7,1	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	184	0,028	0,526	0,023	0,133	49	568
Gemeinde Dunningen	7,1	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	184	0,028	0,525	0,023	0,132	49	567
Landkreis Heilbronn	94,2	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	2.449	0,367	6,99	0,308	1,76	655	7.546
Holzwärme Müllheim	72,6	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Sek.dünger Landwirtschaft	1.887	0,283	5,39	0,237	1,36	505	5.813
FHW Rotenbachtal	355,0	Bergversatzmaterial	34.793	4,26	149	3,20	28,0	9.147	41.570
HKW Pforzheim	2.728	Bergversatzmaterial	267.293	32,7	1.146	24,5	215	70.274	319.349
IKW Baienfurt	875	Bergversatzmaterial	85.750	10,5	368	7,88	69,1	22.544	102.450
RHKW Oberrot	8.288	Bergversatzmaterial	812.224	99,5	3.481	74,6	655	213.540	970.407
HKW Schwörer Haus	2.368	Bodensanierung in Thüringen	232.064	28,4	995	21,3	187	61.012	277.259

**Tabelle II-13:** Entsorgungs-/Verwertungswege der Anlagenbeispiele Option: maximale Verwertung in Forstwirtschaft und Bergversatz

Anlagenbeispiel	Asche- menge [t/a]	Ascheverwertung/- entsorgung	Energie- bedarf [kWh/a]	Partikel [kg/a]	NO <sub>x</sub> [kg/a]	SO <sub>2</sub> [kg/a]	CO [kg/a]	CO <sub>2fossil</sub> [kg/a]	Kosten [€/a]
Gemeinde Bodnegg	3,5	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Kalkersatz Forstwirtschaft	642	0,038	1,87	0,162	0,285	548	388
Gemeinde Metzingen	50,6	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Kalkersatz Forstwirtschaft	9.275	0,548	27,0	2,38	4,12	7.924	5.605
Gemeinde Hohentengen	5,4	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Kalkersatz Forstwirtschaft	989	0,058	2,88	0,249	0,440	845	598
Stadt Nagold	7,1	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Kalkersatz Forstwirtschaft	1.299	0,077	3,78	0,327	0,578	1.110	785
Gemeinde Dunningen	7,1	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Kalkersatz Forstwirtschaft	1.297	0,077	3,77	0,327	0,577	1.108	784
Landkreis Heilbronn	94,2	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Kalkersatz Forstwirtschaft	17.270	1,02	50,2	4,35	7,68	14.754	10.435
Holzwärme Müllheim	72,6	Zyklonasche: Sondermüll; Rostasche: Kalkersatz Forstwirtschaft	13.306	0,786	38,7	3,35	5,91	11.367	8.040
FHW Rotenbachtal	355,0	Bergversatzmaterial	34.793	4,26	149	3,20	28,0	9.147	41.570
HKW Pforzheim	2.728	Bergversatzmaterial	267.293	32,7	1.146	24,5	215	70.274	319.349
IKW Baienfurt	875	Bergversatzmaterial	85.750	10,5	368	7,88	69,1	22.544	102.450
RindenHKW Oberrot	8.288	Bergversatzmaterial	812.224	99,5	3.481	74,6	655	213.540	970.407
HKW Schwörer Haus	2.368	Bodensanierung in Thüringen	232.064	28,4	995	21,3	187	61.012	277.259

## II.4 Fossile Energieträger

**Tabelle II-14:** Bereitstellung fossiler Energieträger [GEMIS 00]

	KEA <sub>fossil</sub>	Emissionen				
		CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Staub	CO <sub>2, fossil</sub>
Einheit	MWh/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh
Steinkohle (D)	1,06	0,010	0,046	0,062	0,006	16,9
Heizöl EL	1,11	0,035	0,107	0,182	0,014	29,5
Heizöl S	1,15	0,036	0,106	0,197	0,013	38,5
Erdgas (D)	1,07	0,050	0,045	0,047	0,002	9,85

**Tabelle II-15:** Fossile Energieträger – KEA und Emissionen mit Vorketten [GEMIS 00]

	Bereitstellung KEA <sub>fossil</sub>	Feuerung KEA <sub>fossil</sub>	gesamter Prozess KEA <sub>fossil</sub>	Emissionen gesamter Prozess					
				CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Staub	CO <sub>2, fossil</sub>	
Einheit	MWh/MWh	MWh/MWh	MWh/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh
HKW Steinkohle 100 MW <sub>el</sub>	1,06	1,207	1,213	0,279	0,626	0,439	0,415	339,8	
HKW Erdgas 10 MW <sub>el</sub>	1,07	1,836	1,843	0,534	0,723	0,058	0,008	292,25	
BHKW Erdgas (Kat) 0,5 MW <sub>el</sub>	1,07	1,221	1,228	0,313	0,351	0,054	0,010	244,15	
HW Heizöl EL 10 MW <sub>th</sub>	1,11	1,233	1,343	0,126	0,332	0,681	0,032	325,8	
HW Erdgas 10 MW <sub>th</sub>	1,07	1,259	1,329	0,164	0,212	0,055	0,005	254,85	
0,6BHKW +0,4 HW Heizöl EL			1,274	0,238	0,343	0,305	0,019	276,81	
0,3BHKW +0,7 HW Heizöl EL			1,309	0,182	0,338	0,493	0,025	301,31	

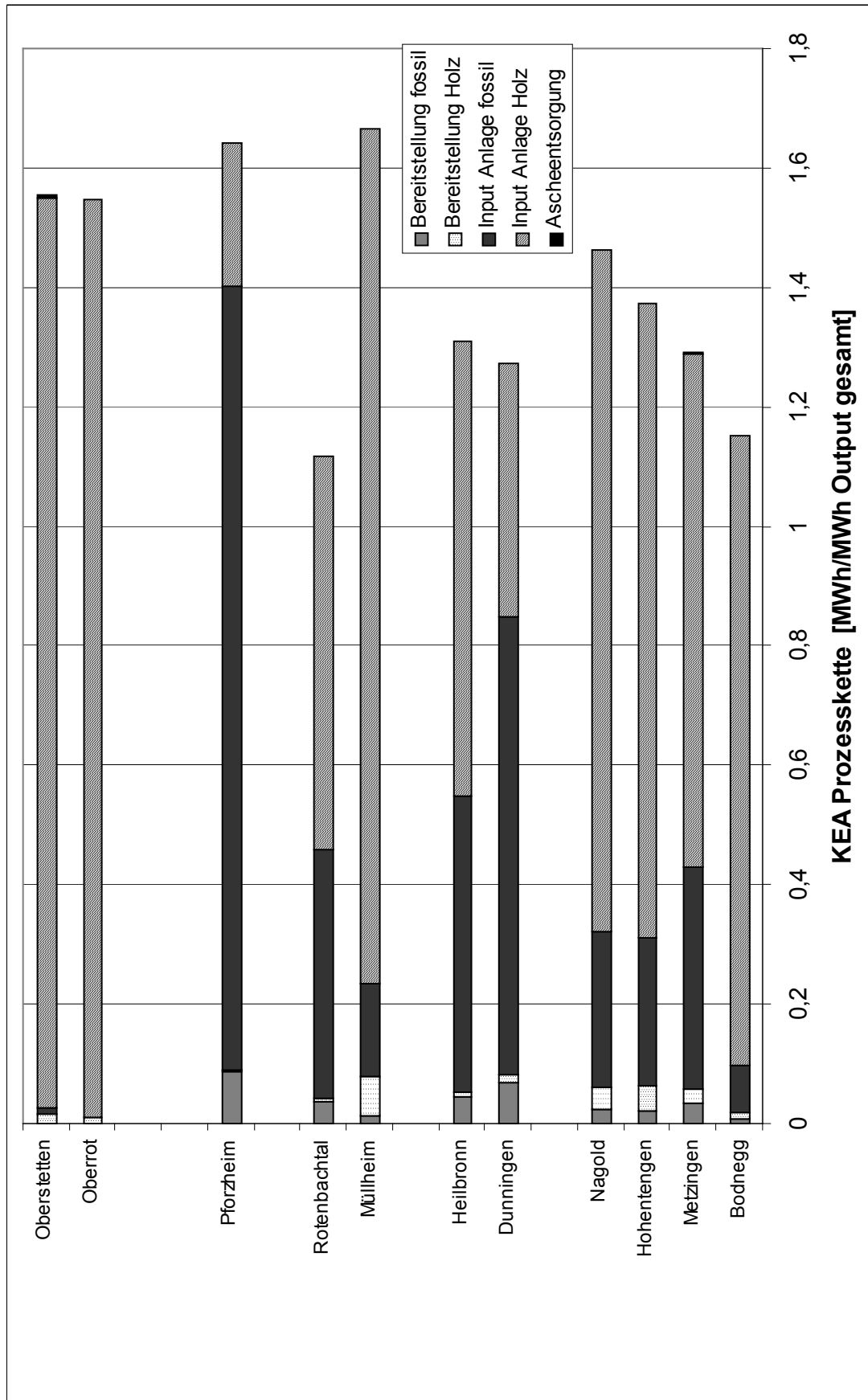


Abbildung II-3: Vergleich der KEA für die ges. Prozessketten der Beispielanlagen



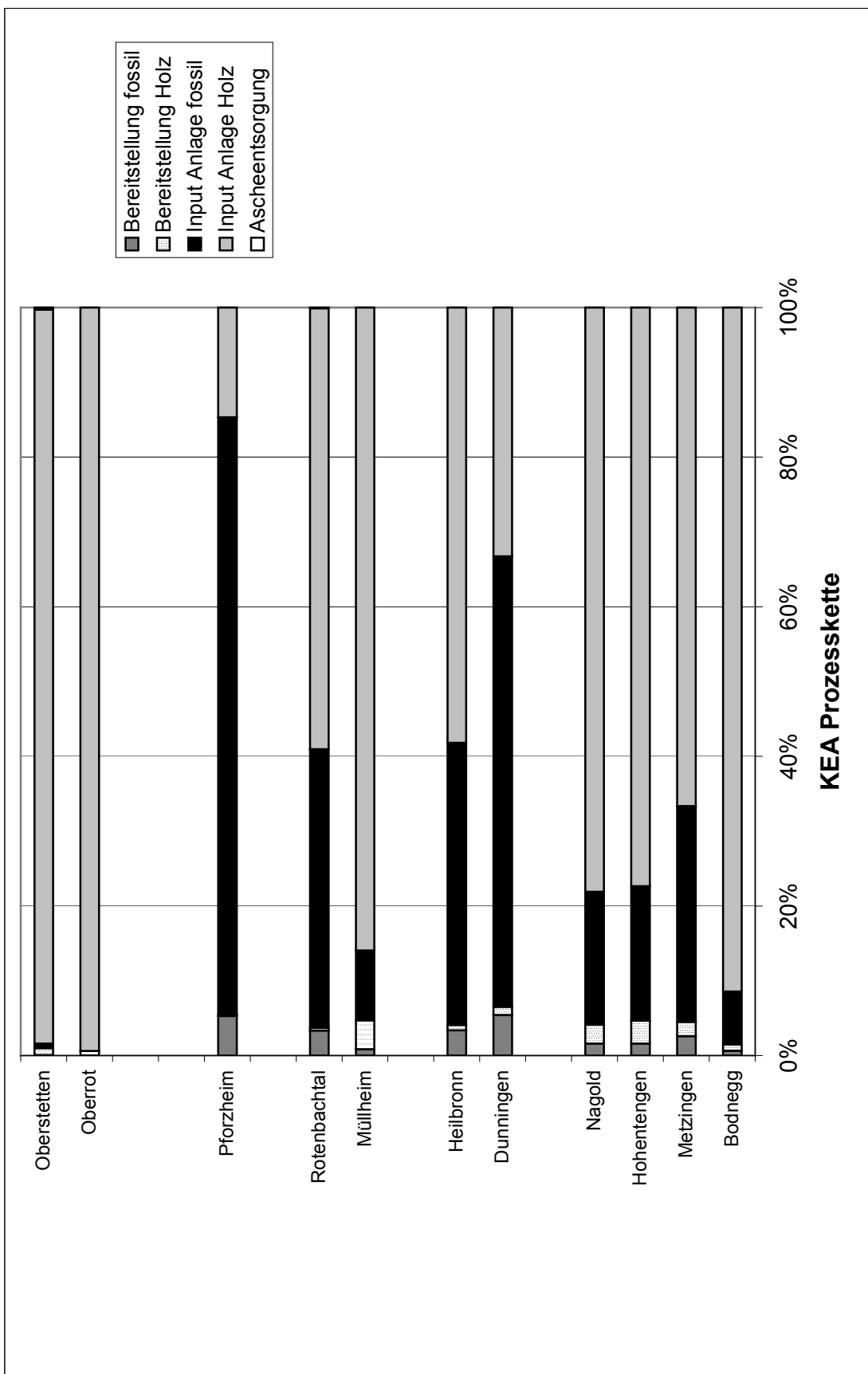


Abbildung II-4: Prozentualer Vergleich der KEA-Beträge in der Prozesskette

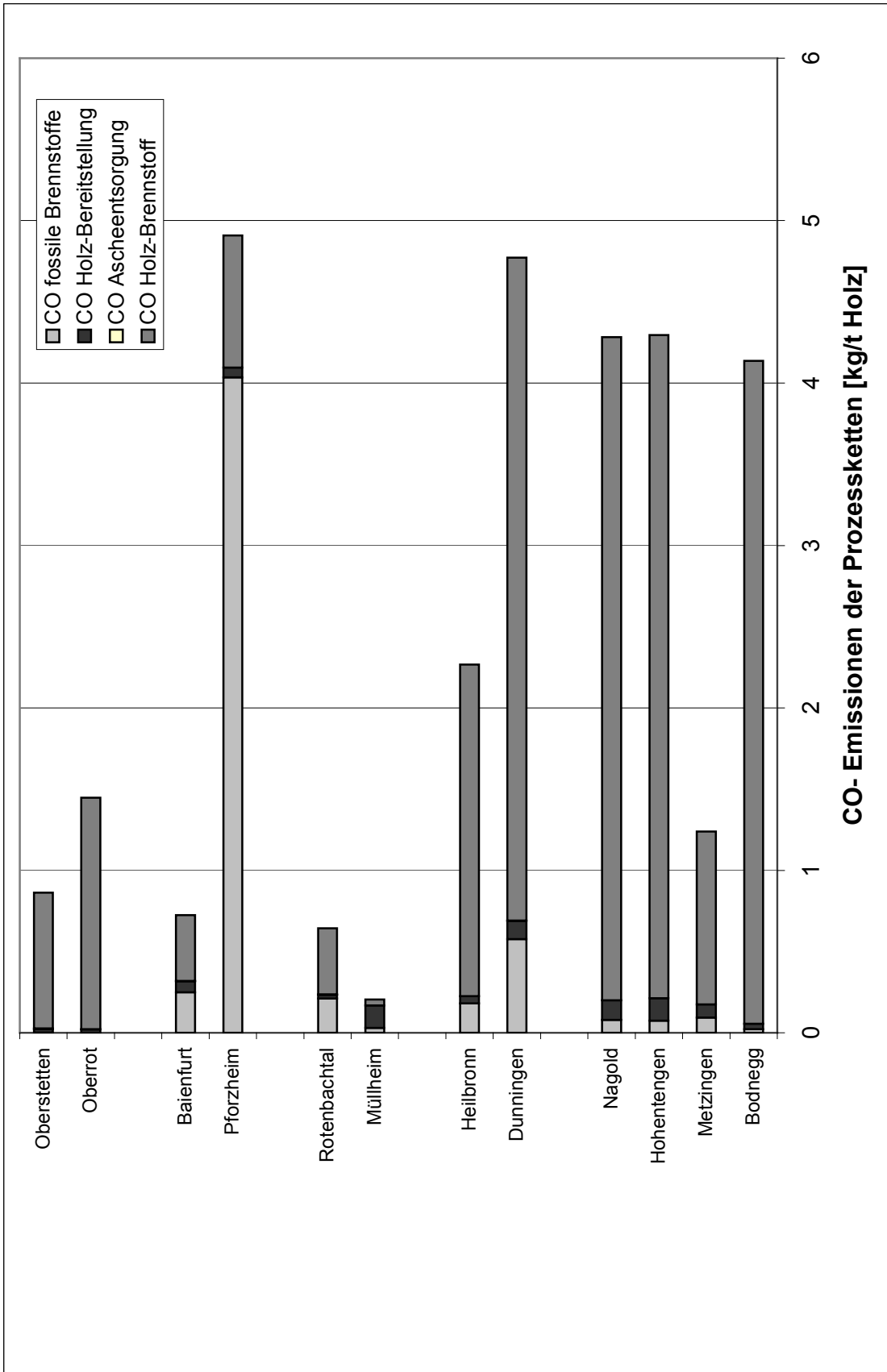
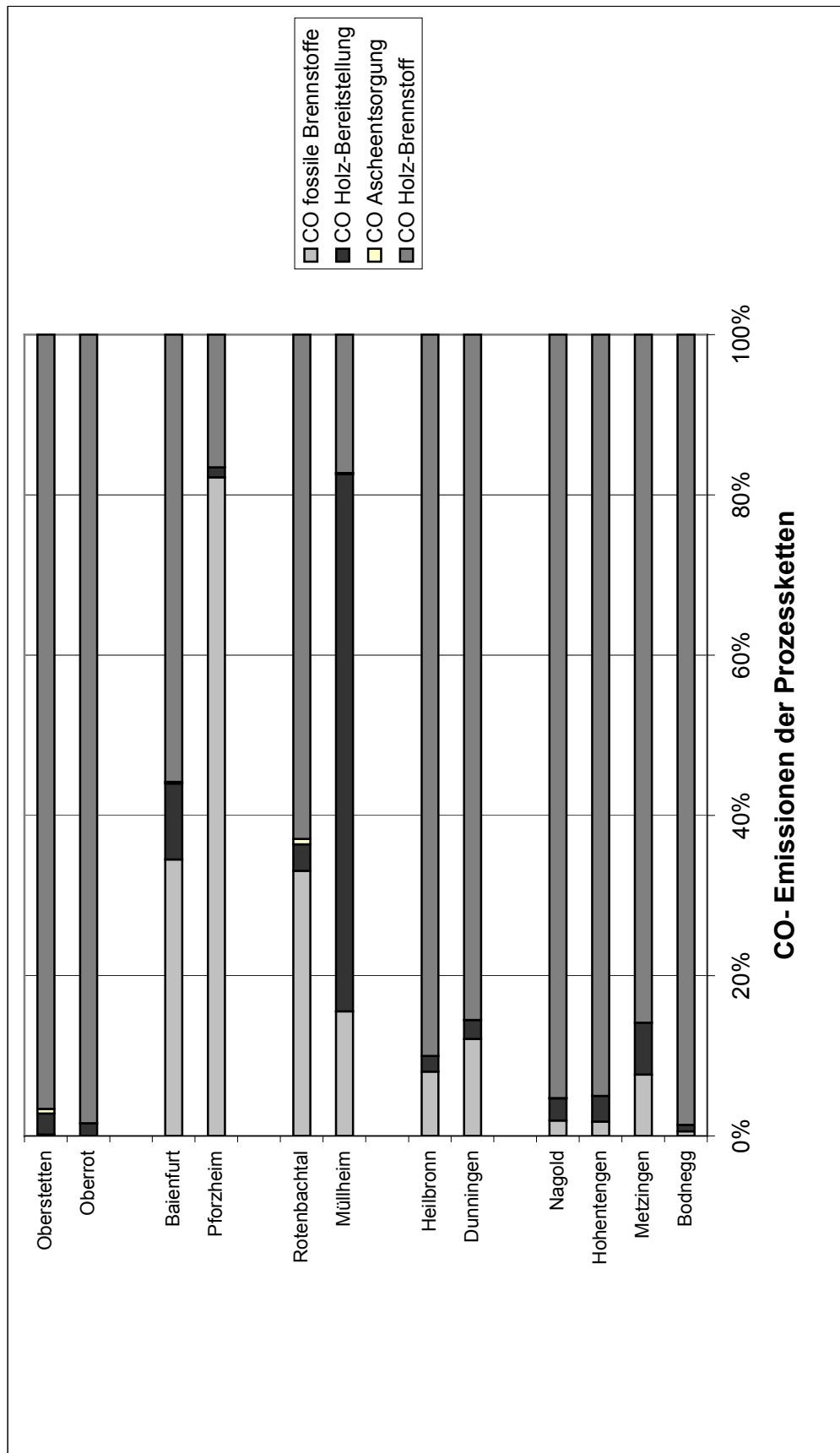


Abbildung II-5: CO-Emissionen der Prozessketten bezogen auf den Input an Holz



**Abbildung II-6:** Prozentuale Beiträge zu den CO- Emissionen bez. auf den Holz Input

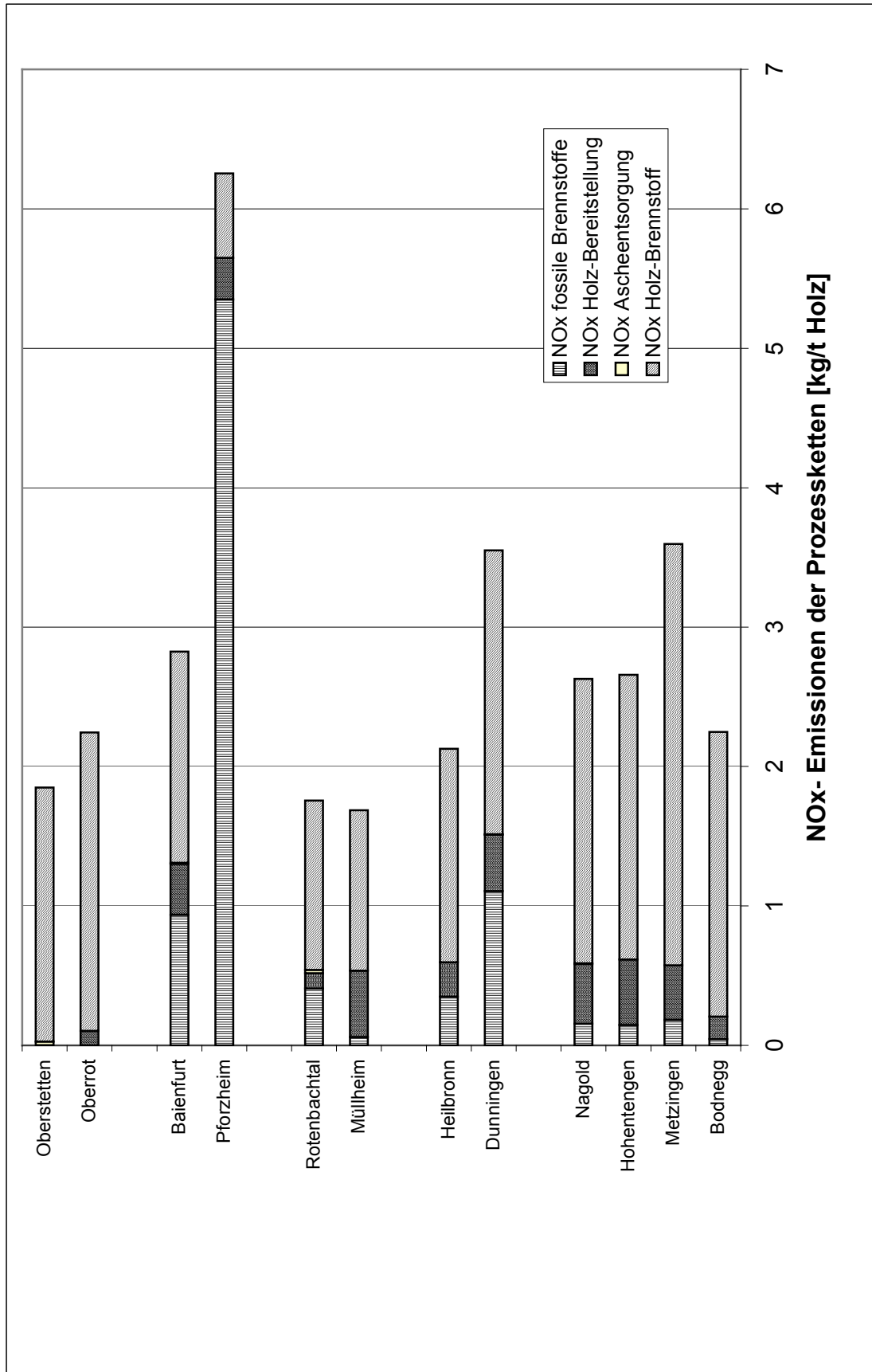


Abbildung II-7: NO<sub>x</sub>-Emissionen der Prozessketten bezogen auf den Holz-Input

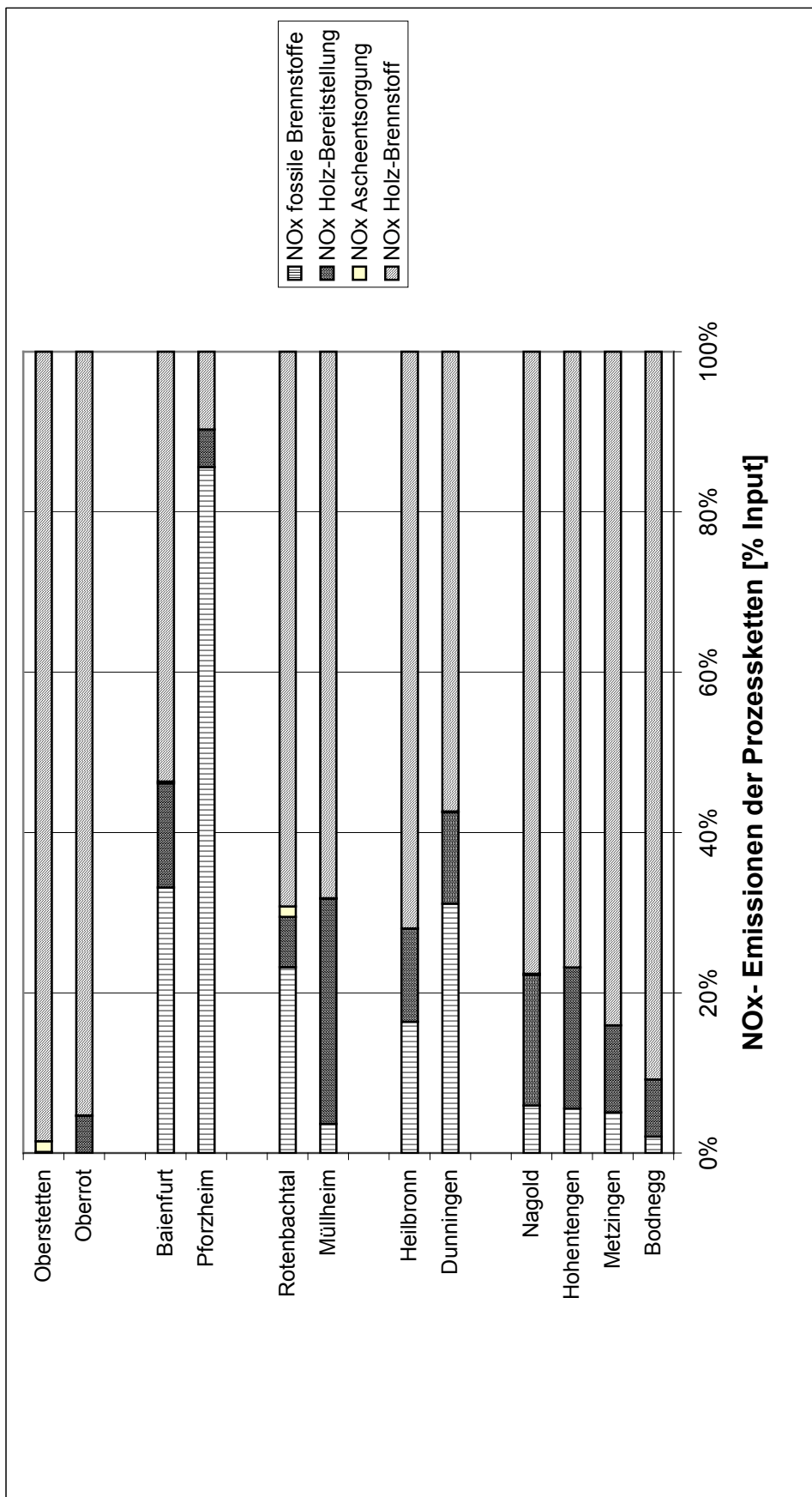


Abbildung II-8: Prozentuale Beiträge zu den NO<sub>x</sub>-Emissionen der Prozessketten bezogen auf den Holz-Input

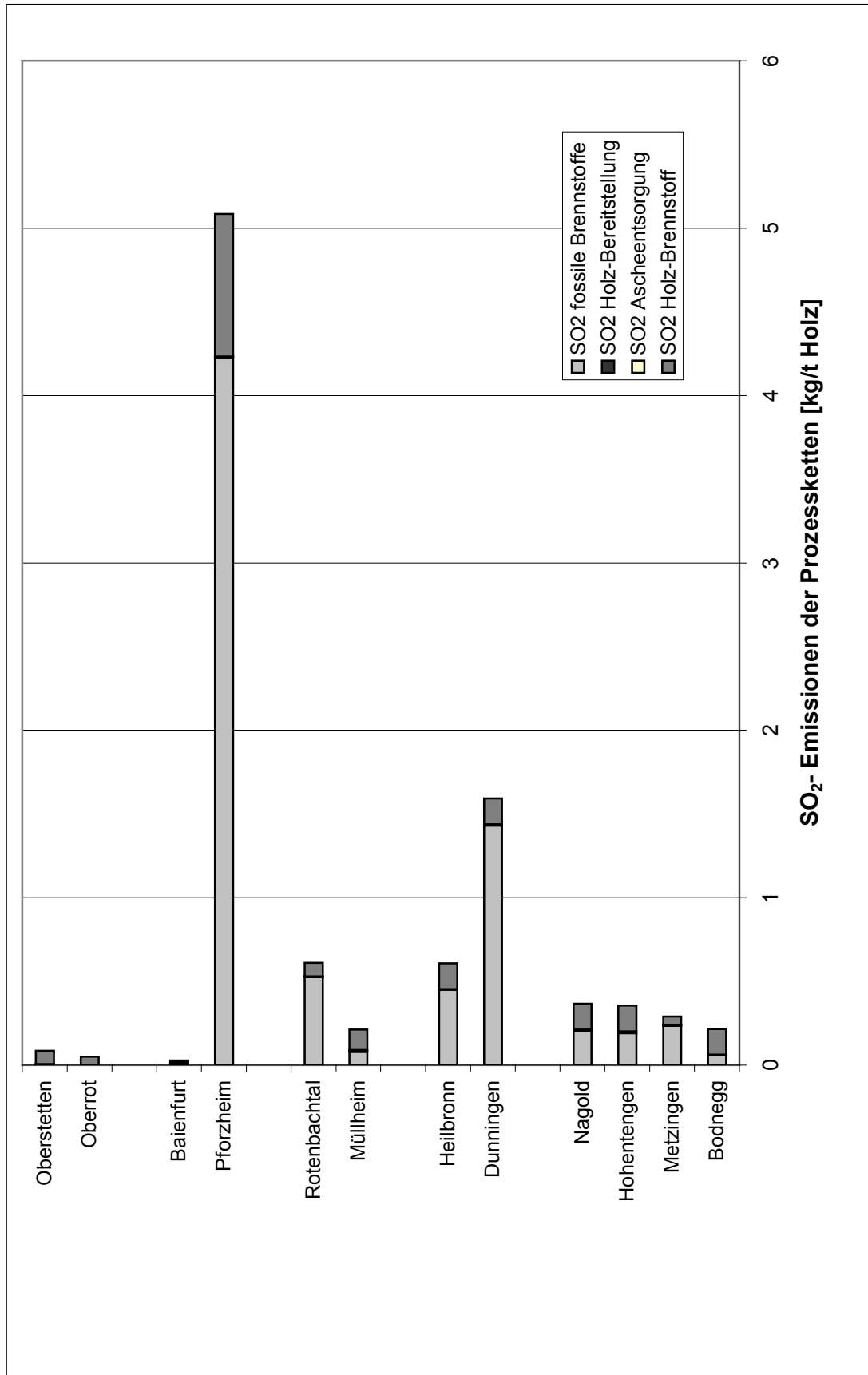


Abbildung II-9: SO<sub>2</sub>- Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz-Input

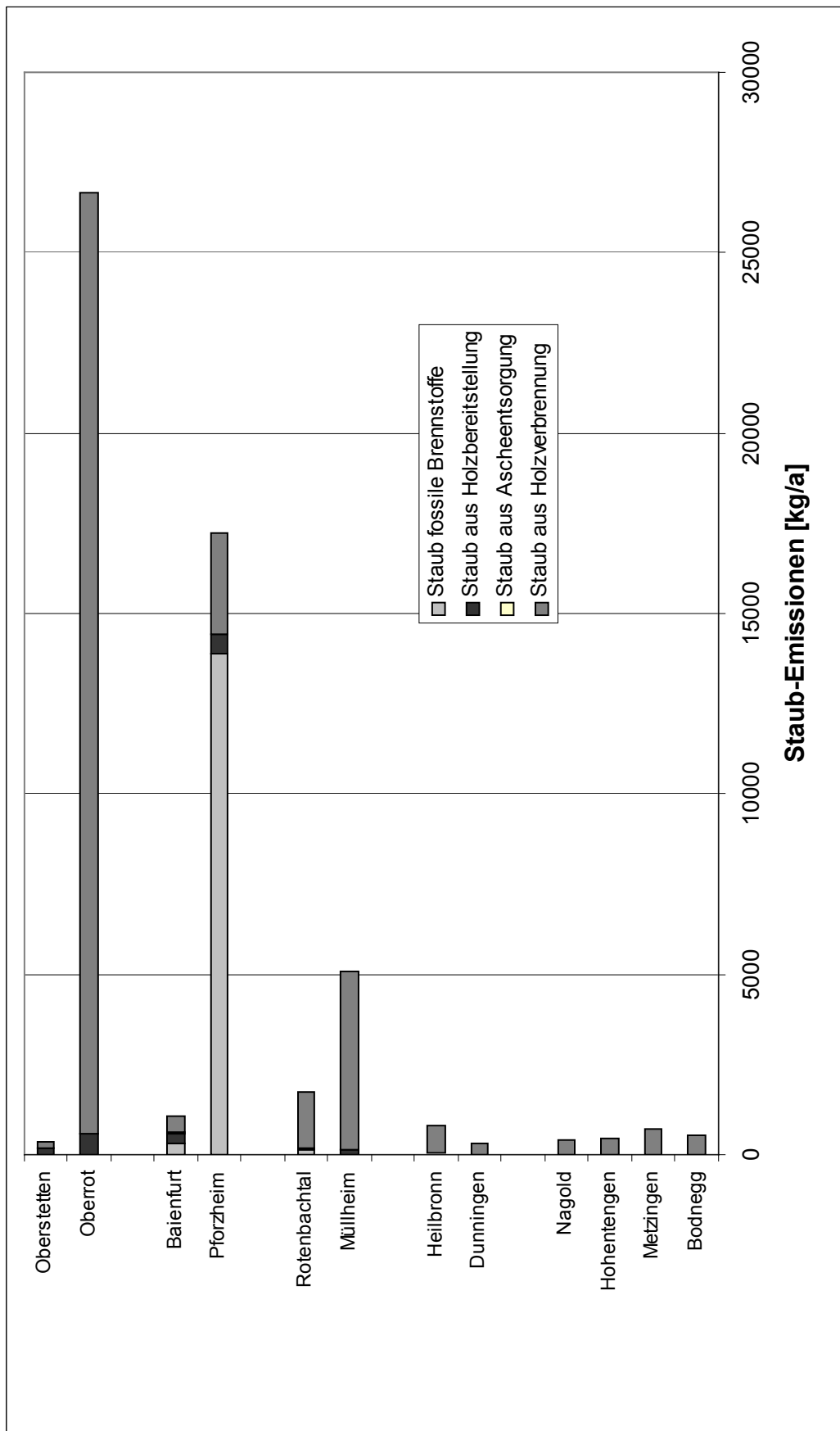


Abbildung II-10: Absolute Werte der Staub- Emissionsfrachten der Prozessketten pro Jahr

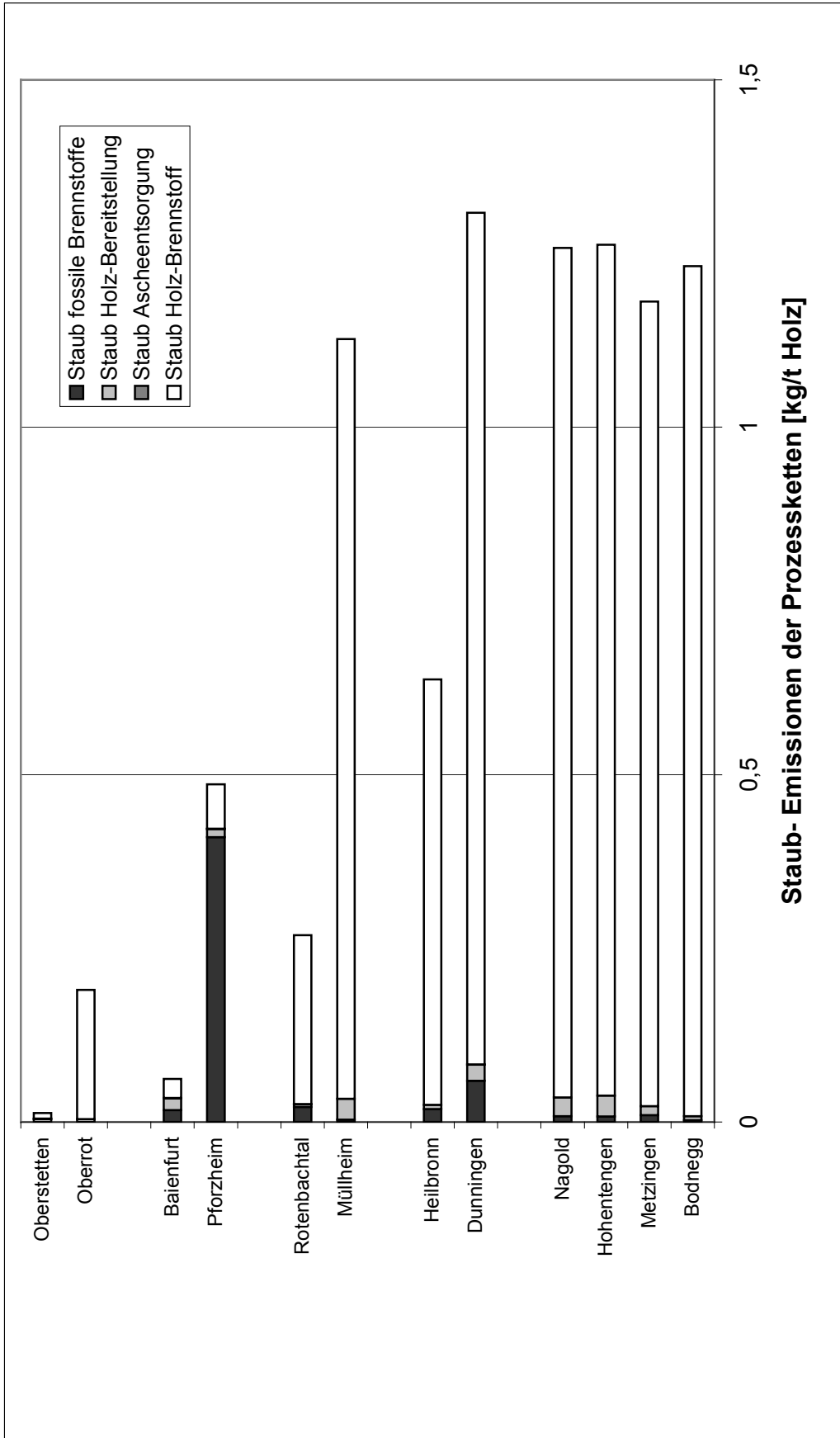
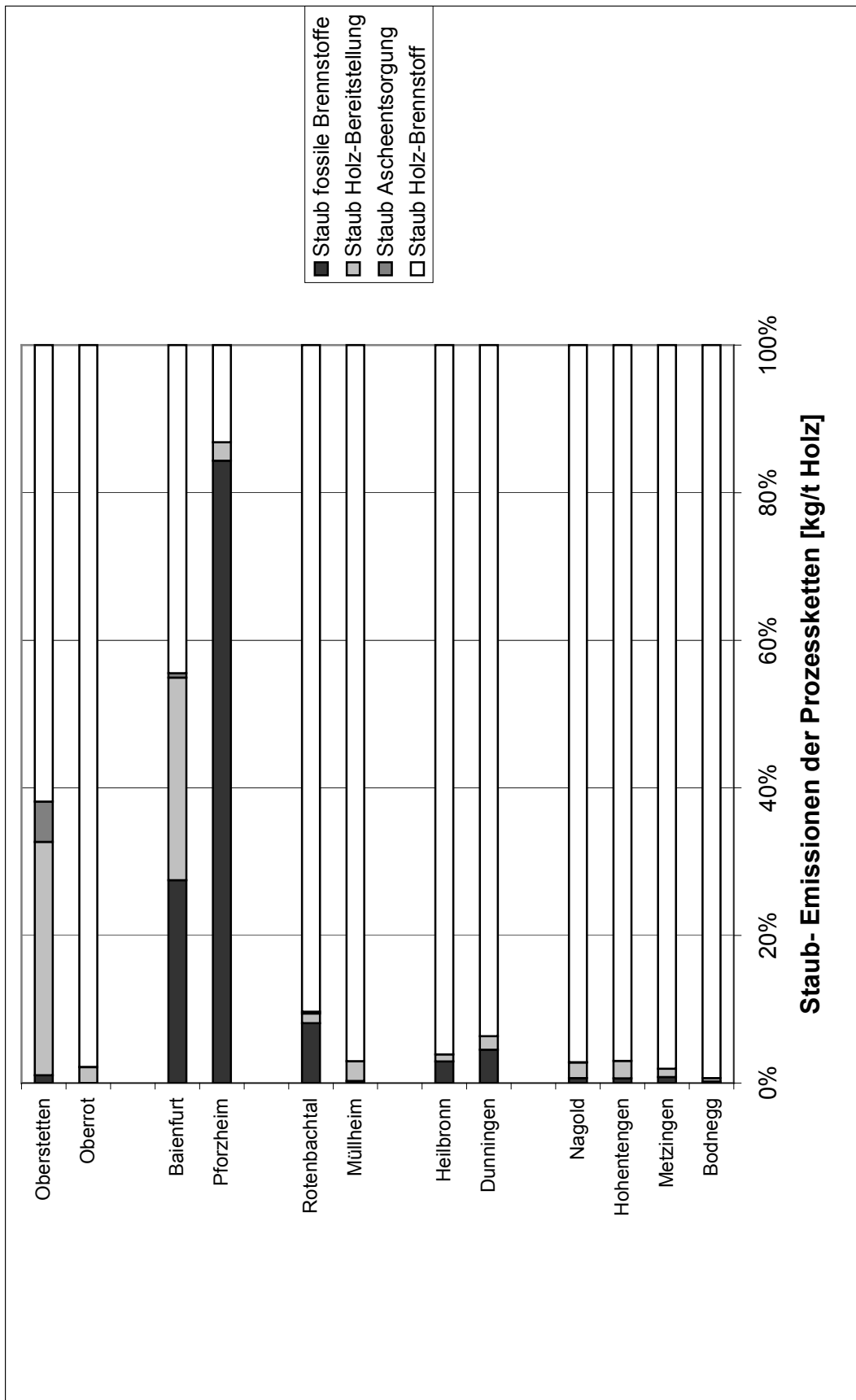


Abbildung II-11: Staub- Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz-Input





**Abbildung II-12:** Prozentuale Beiträge zu den Staub- Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz- Input

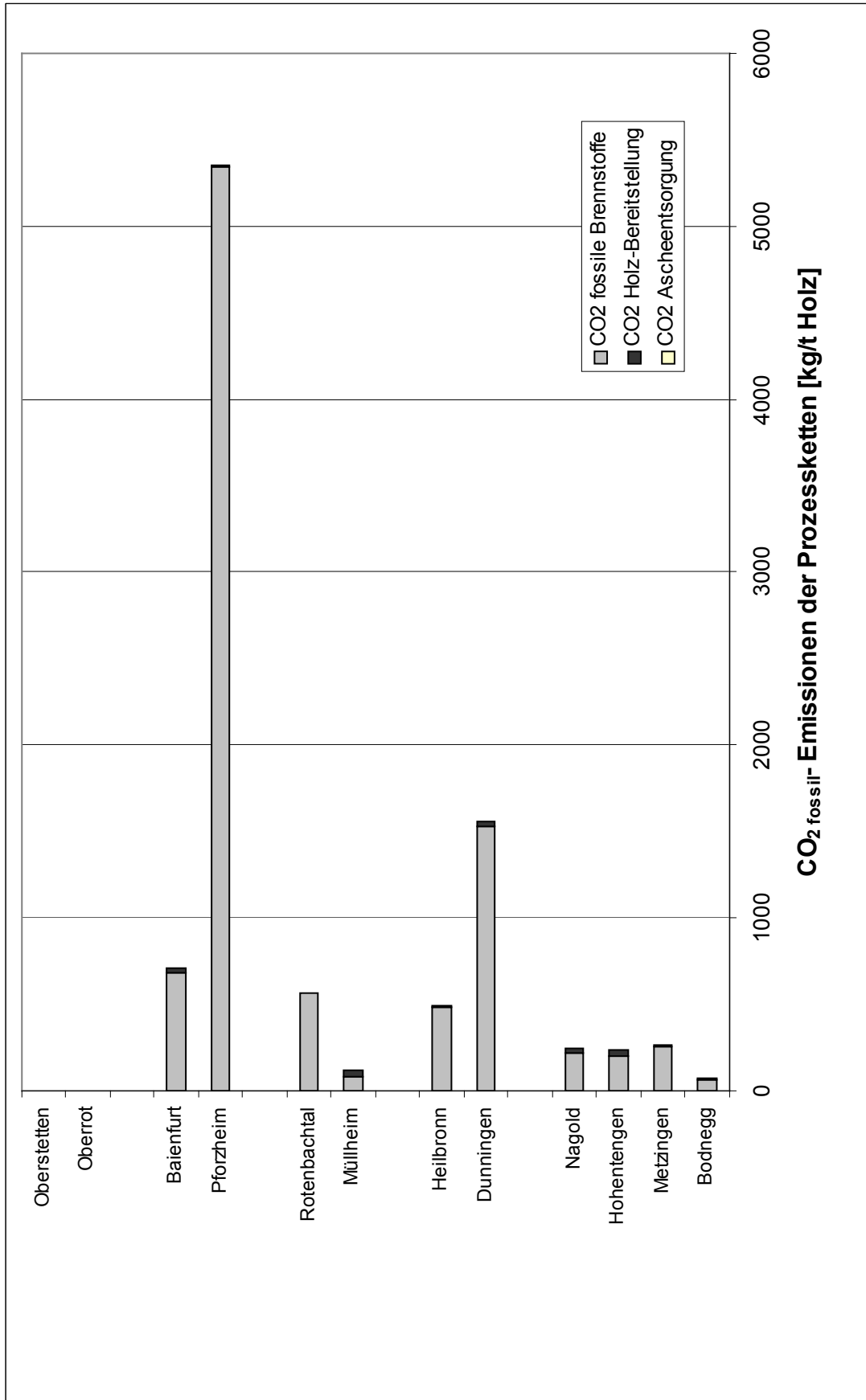


Abbildung II-13: CO<sub>2</sub> fossil- Emissionen der Prozessketten bez. auf den Holz- Input

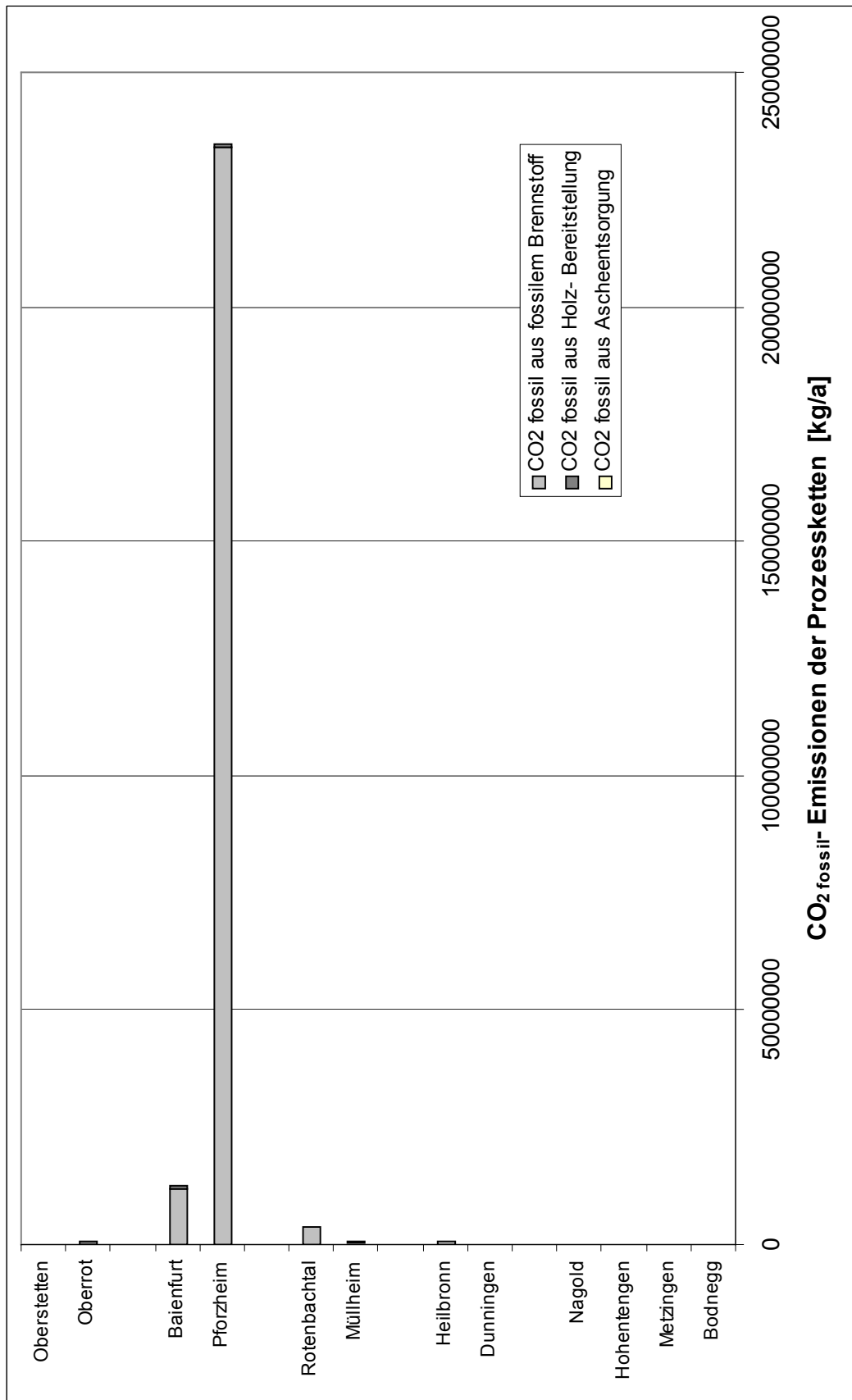
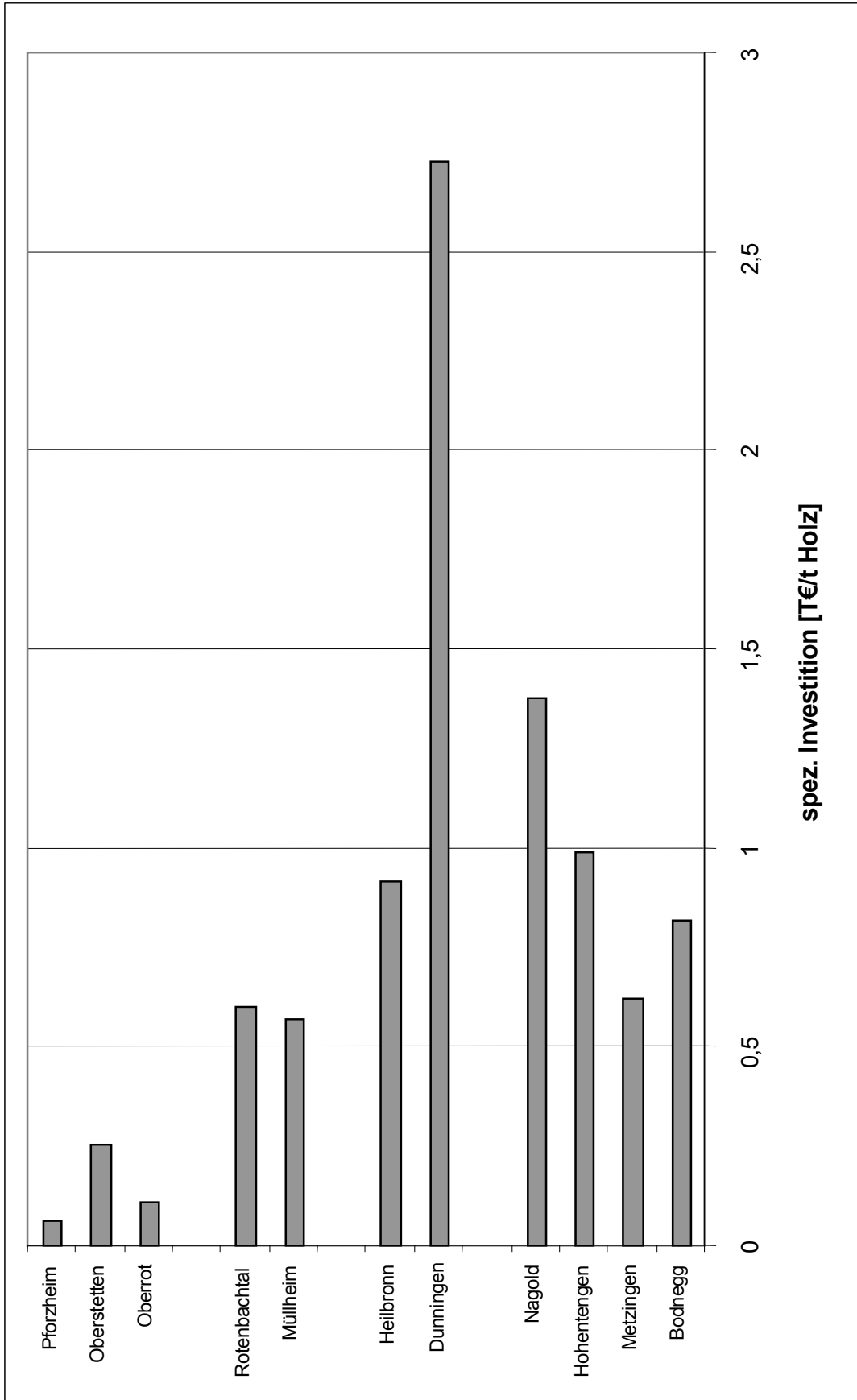
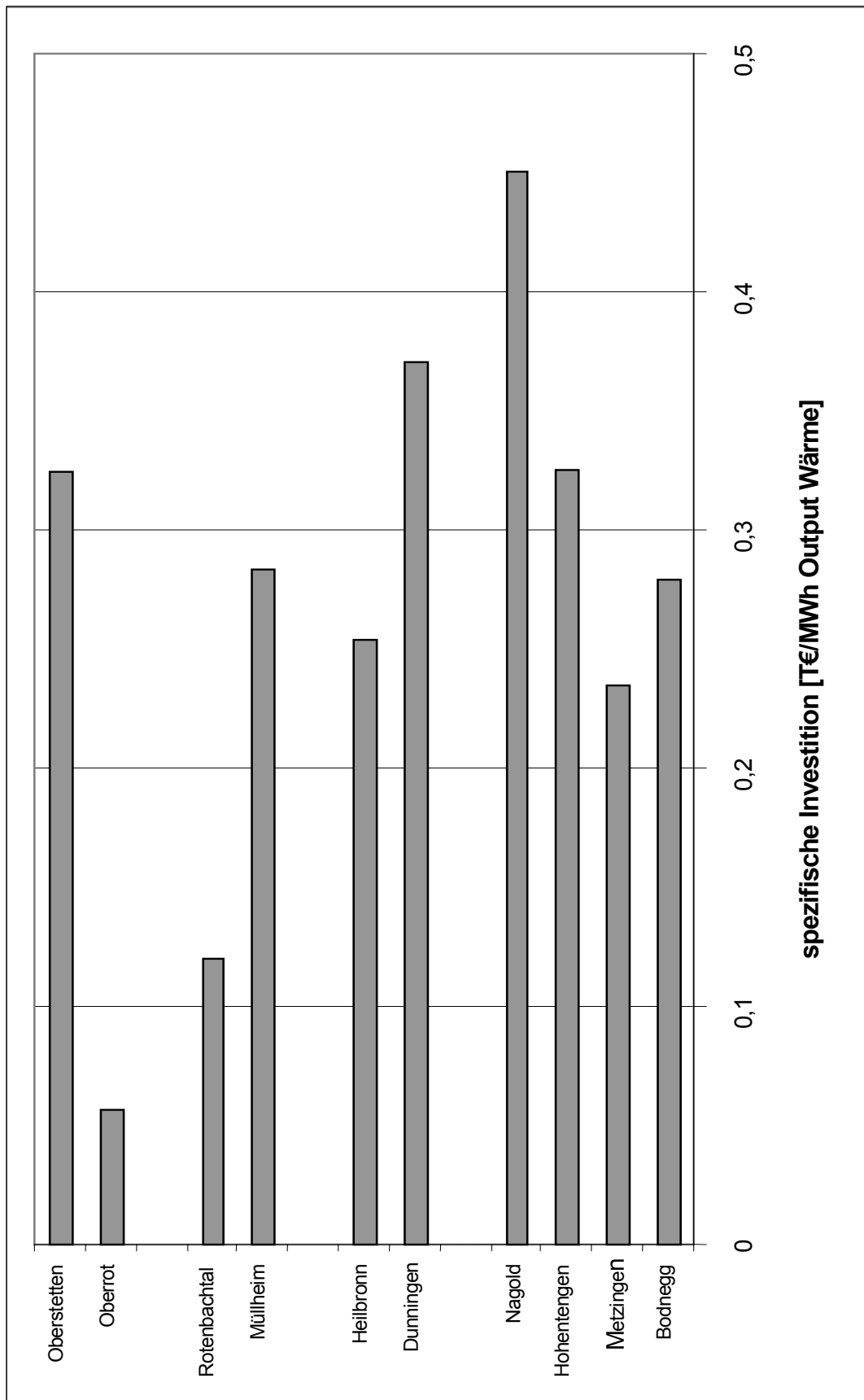


Abbildung II-14: CO<sub>2</sub> fossil-Emissionen der Prozessketten – absolute Werte pro Jahr



**Abbildung II-15:** Spezifische Investitionen der Beispielanlagen bez. auf den Holz-Input



**Abbildung II-16:** Spezifische Investitionen bez. auf den gesamten Wärme-Output

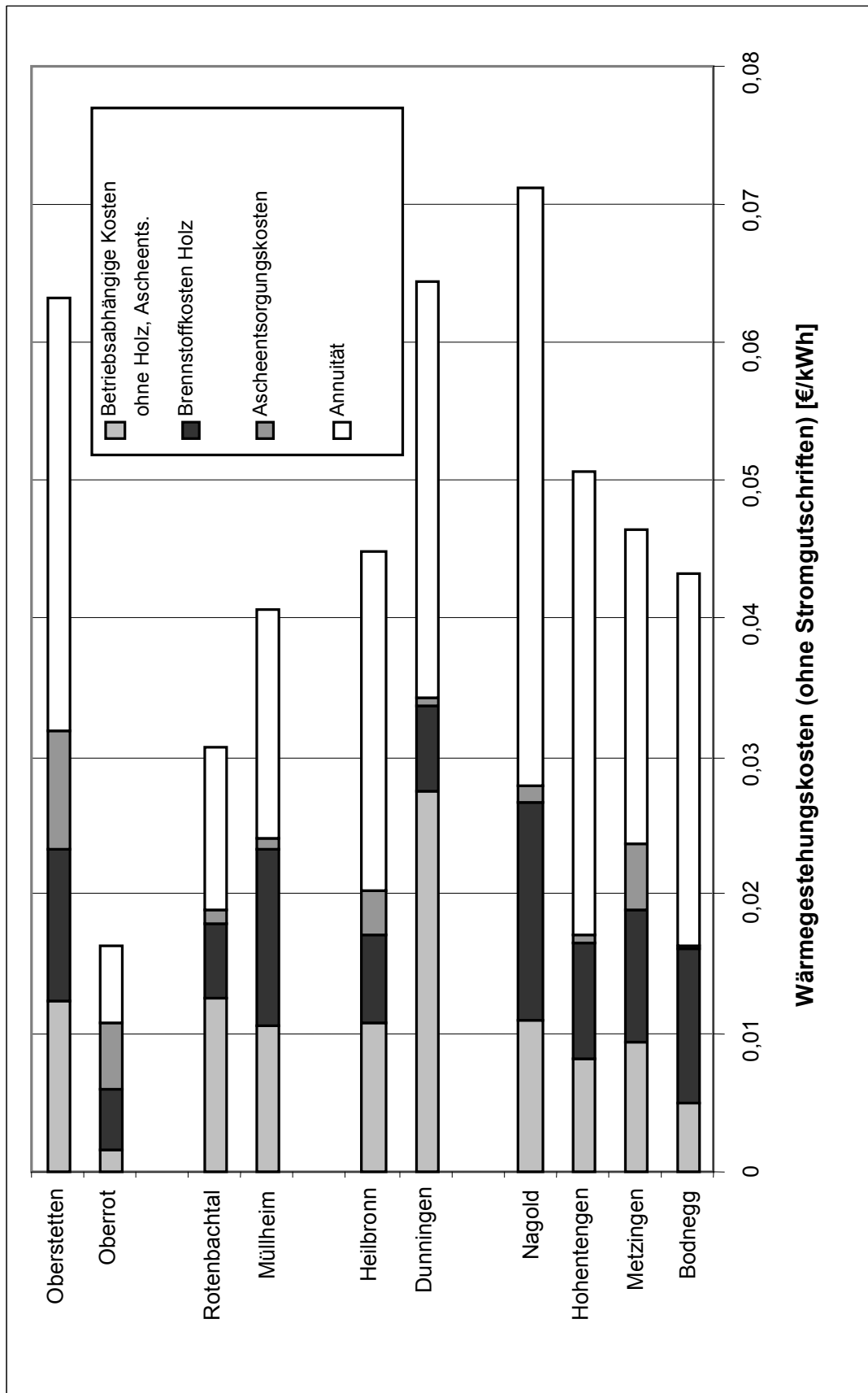
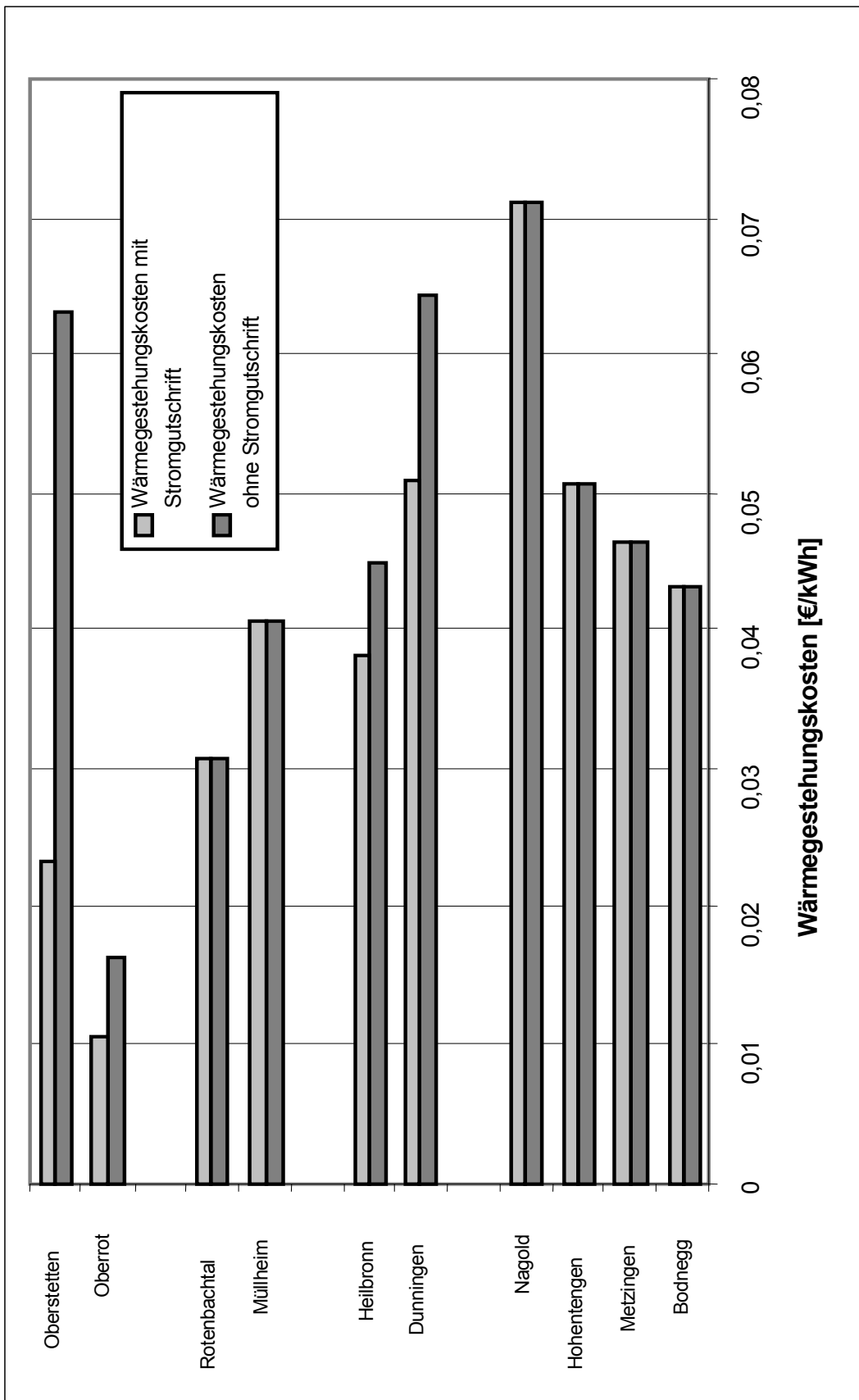


Abbildung II-17: Wärmegestehungskosten der Beispielanlagen ohne Stromgutschriften



**Abbildung II-18:** Vergleich der Wärmegestehungskosten mit/ohne Stromgutschriften

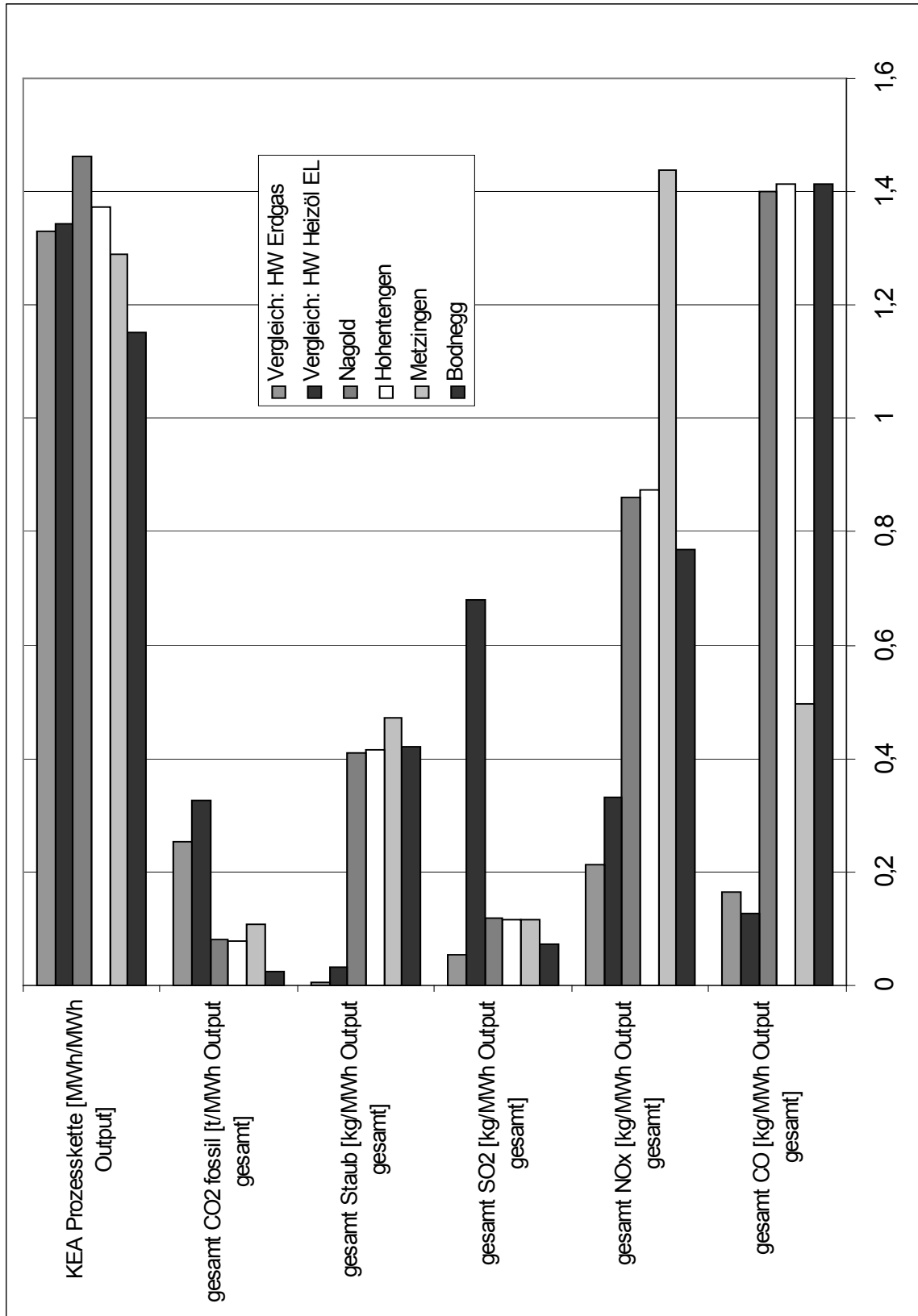


Abbildung II-19: Vergleich der Holz- Grundlast- Energiesysteme mit konventionellen Pendants



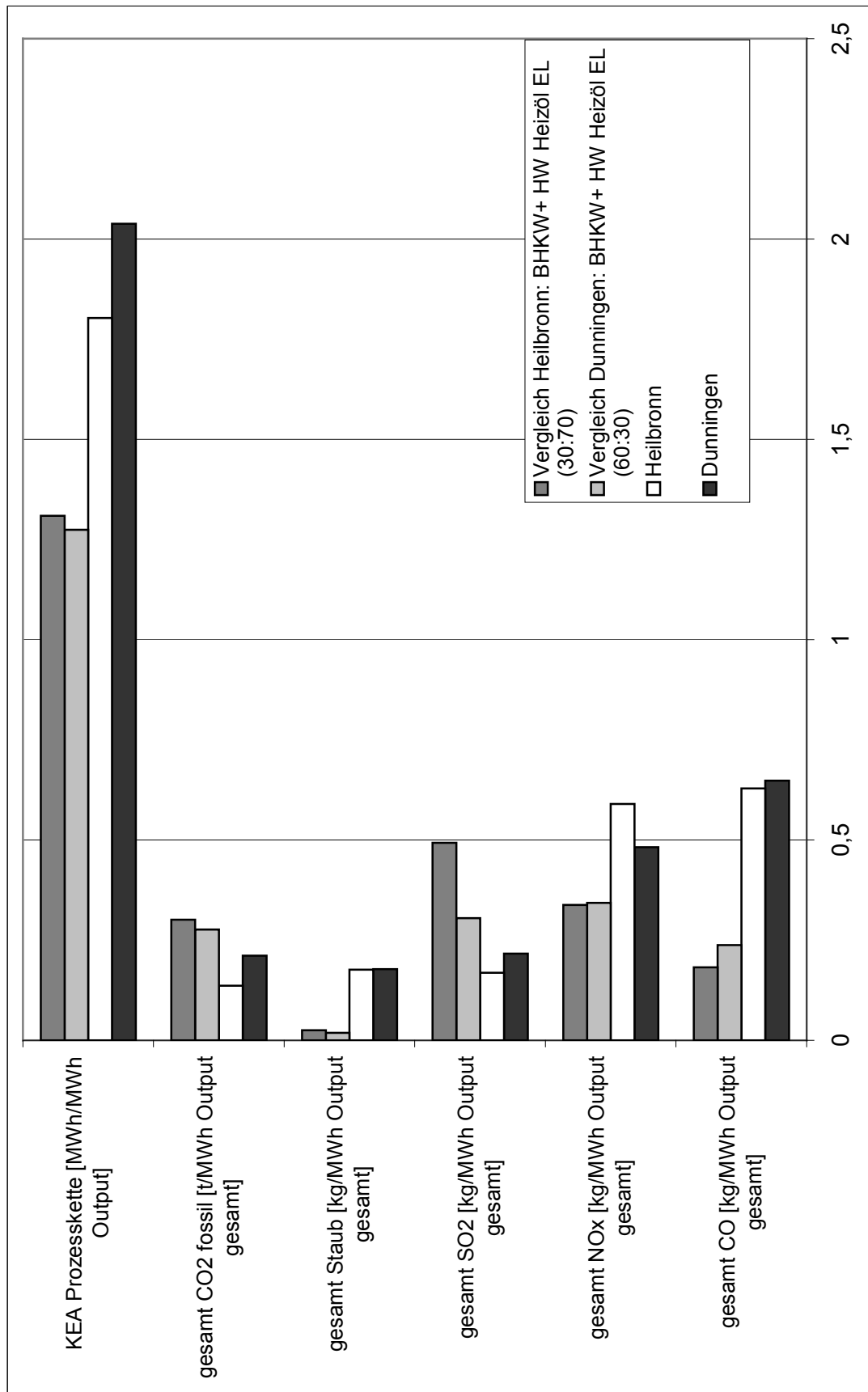
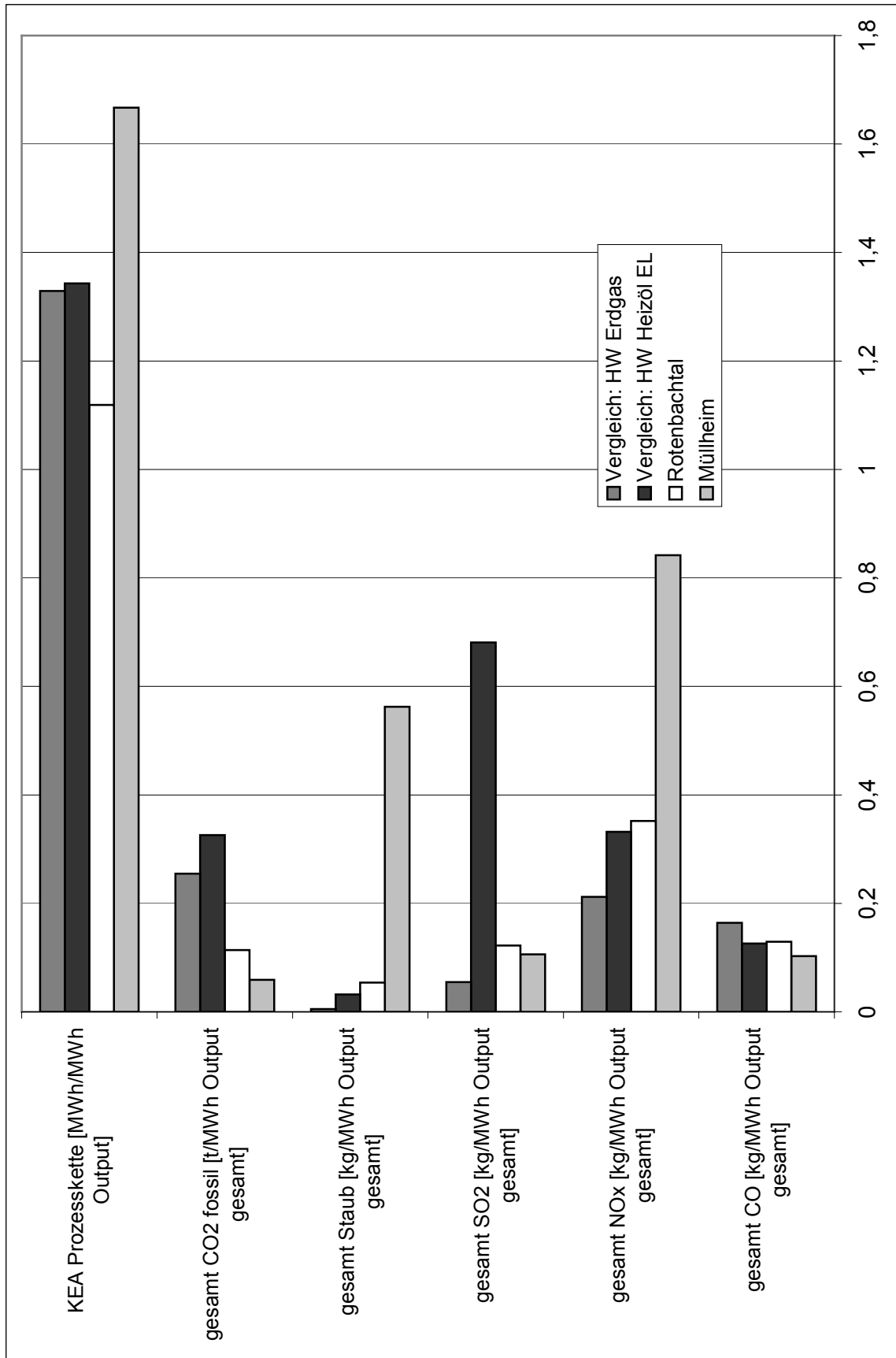


Abbildung II-20: Vergleich der Holz- Mittellast- Systeme mit konv. Pendants



**Abbildung II-21:** Vergleich der Fernheizwerke mit Holzverbrennung mit konventionellen Fernheizwerken

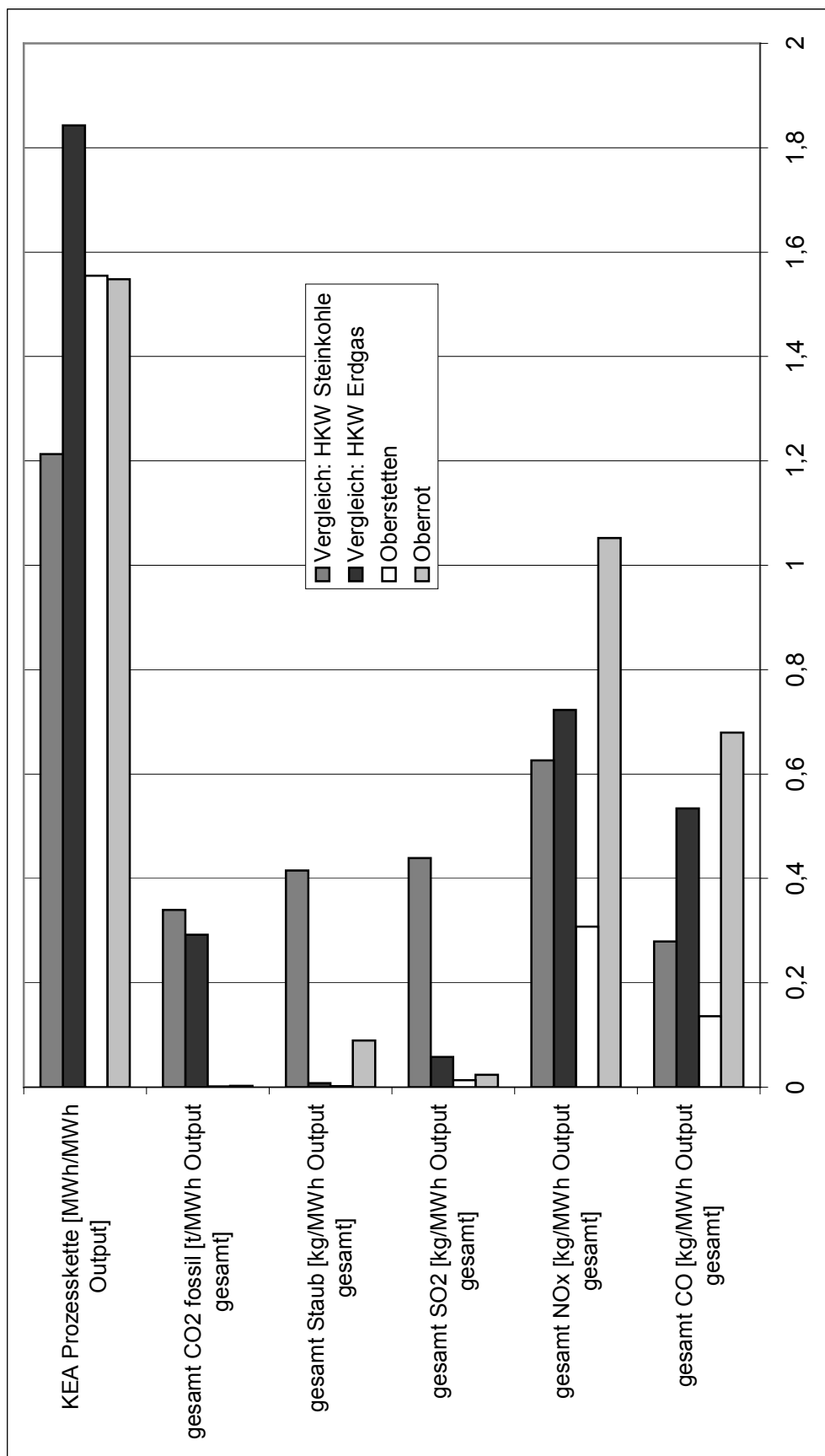
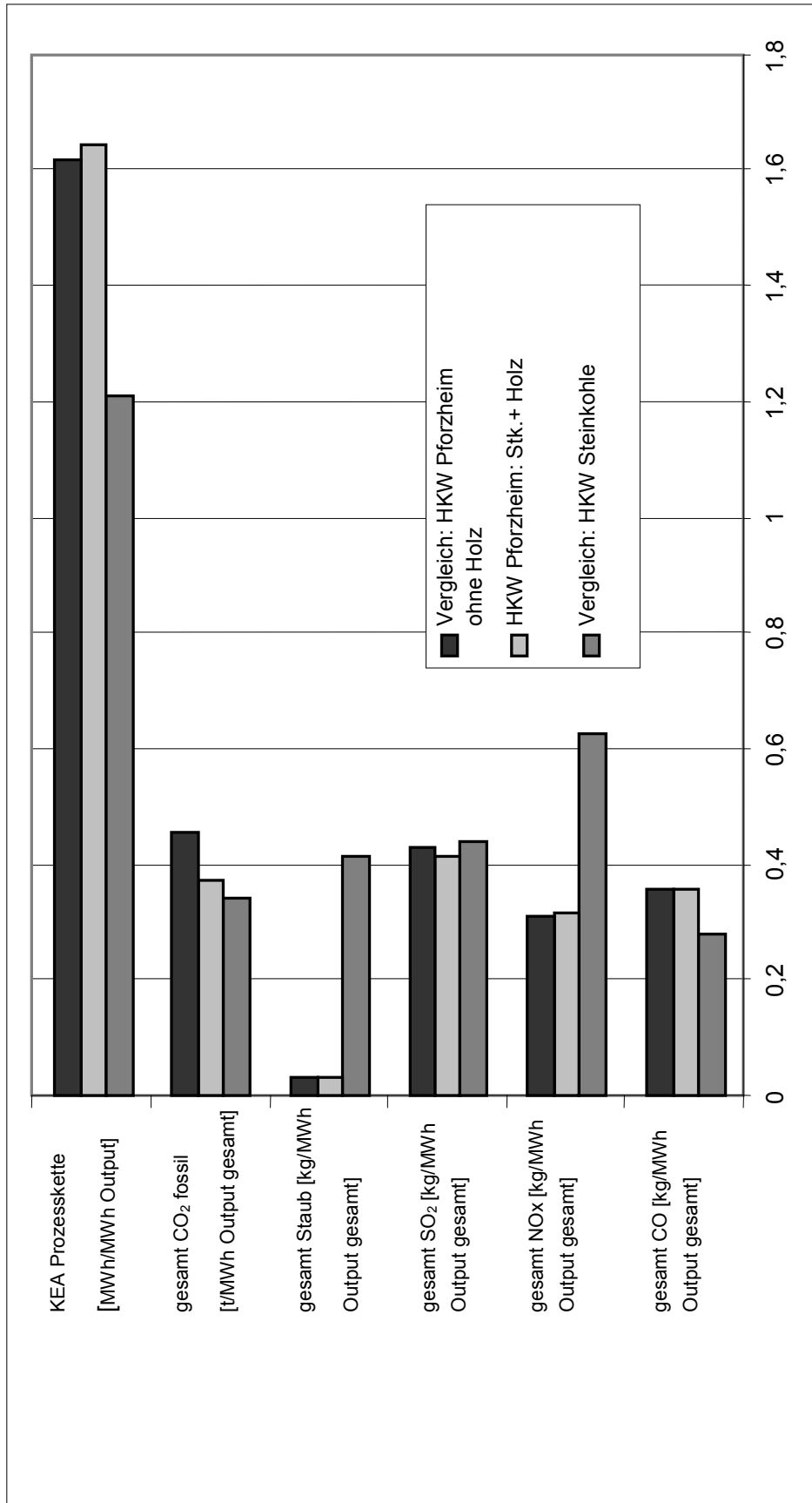
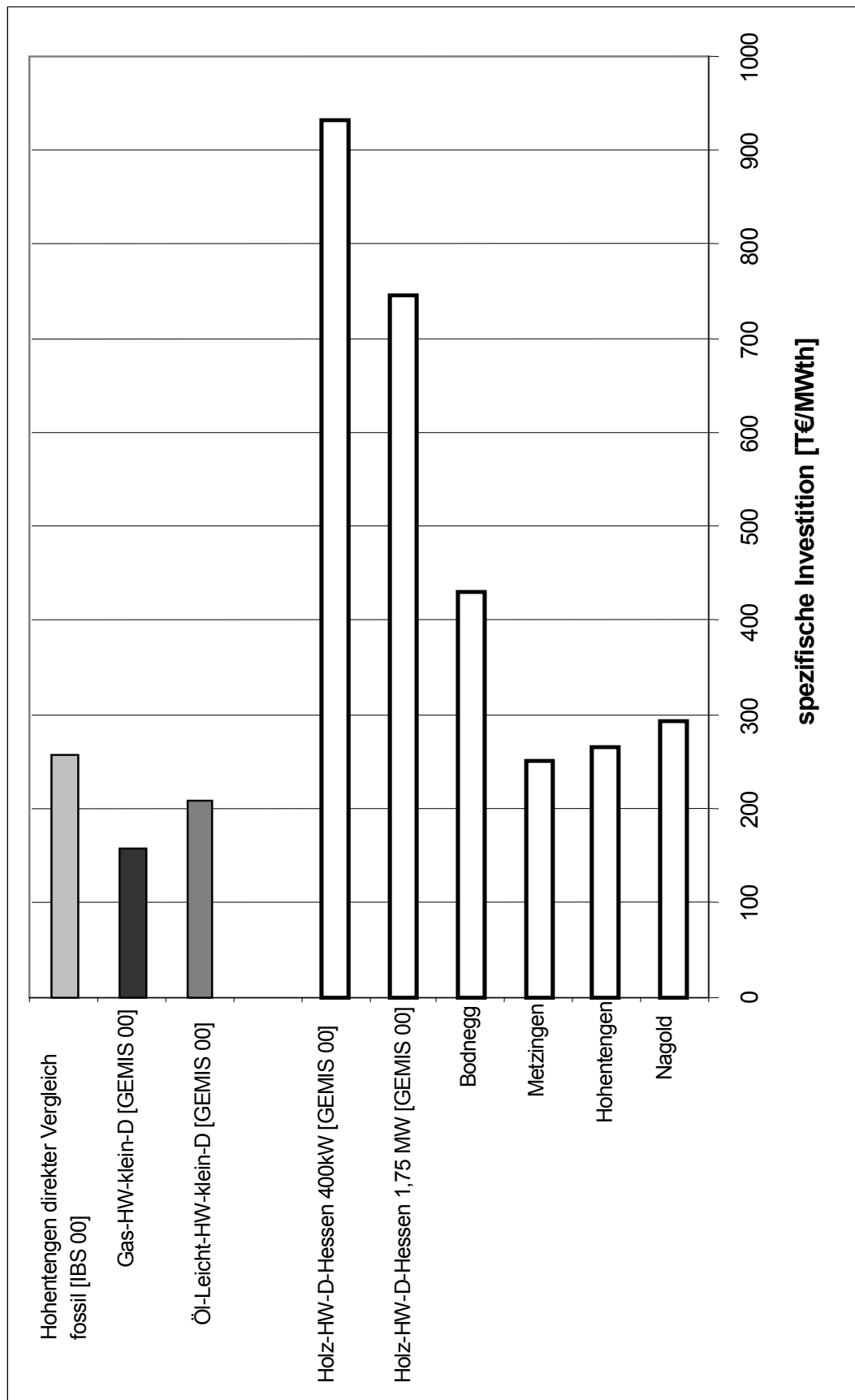


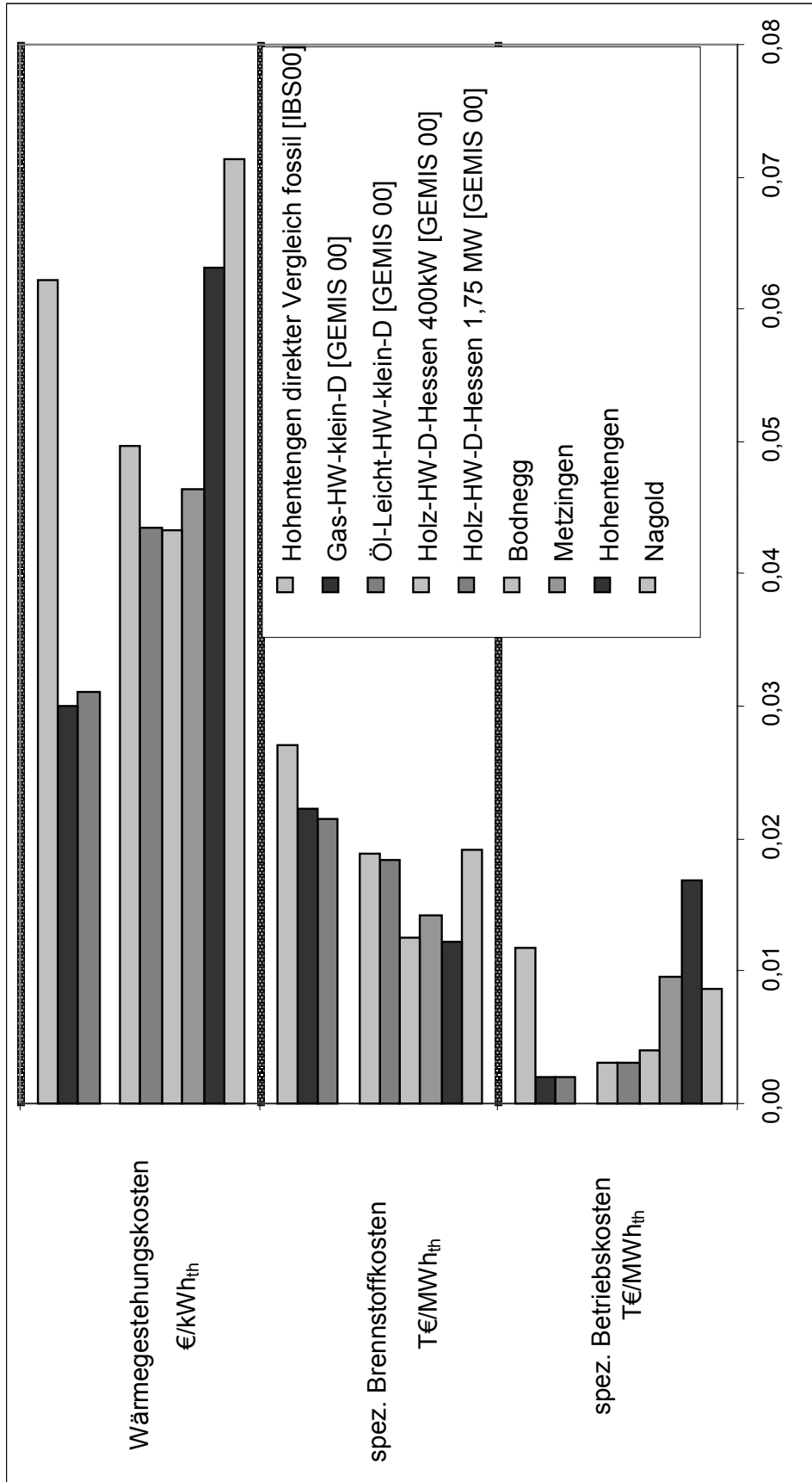
Abbildung II-22: Vergleich der Industrie- Holzheizkraftwerke mit fossilen Heizkraftwerken



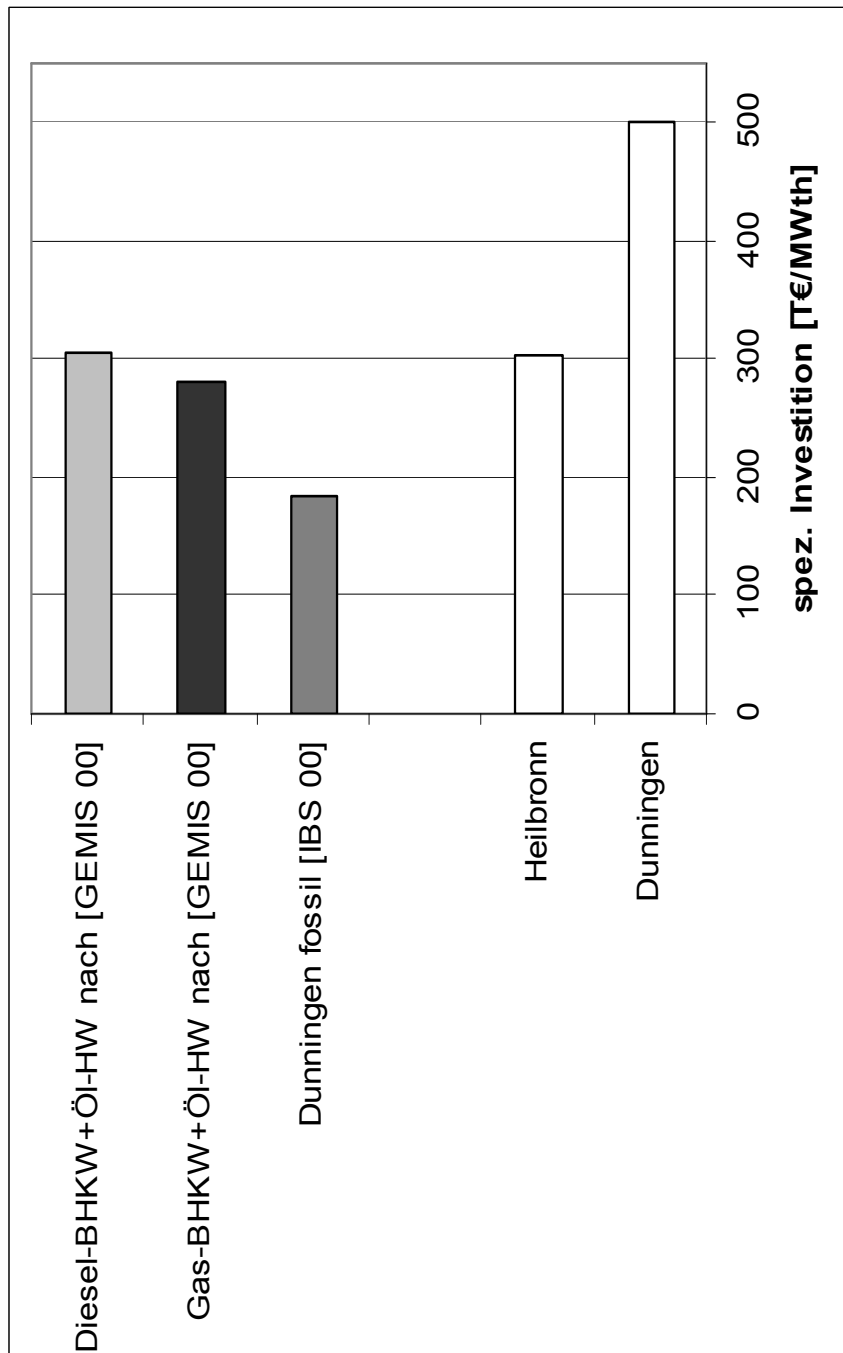
**Abbildung II-23:** Vergleich der Mitverbrennung von Holz im Heizkraftwerk Pforzheim mit dem Betrieb mit ausschließlich fossilen Energieträgern und dem Modell-HKW mit Steinkohlefeuerung aus [GEMIS 00]



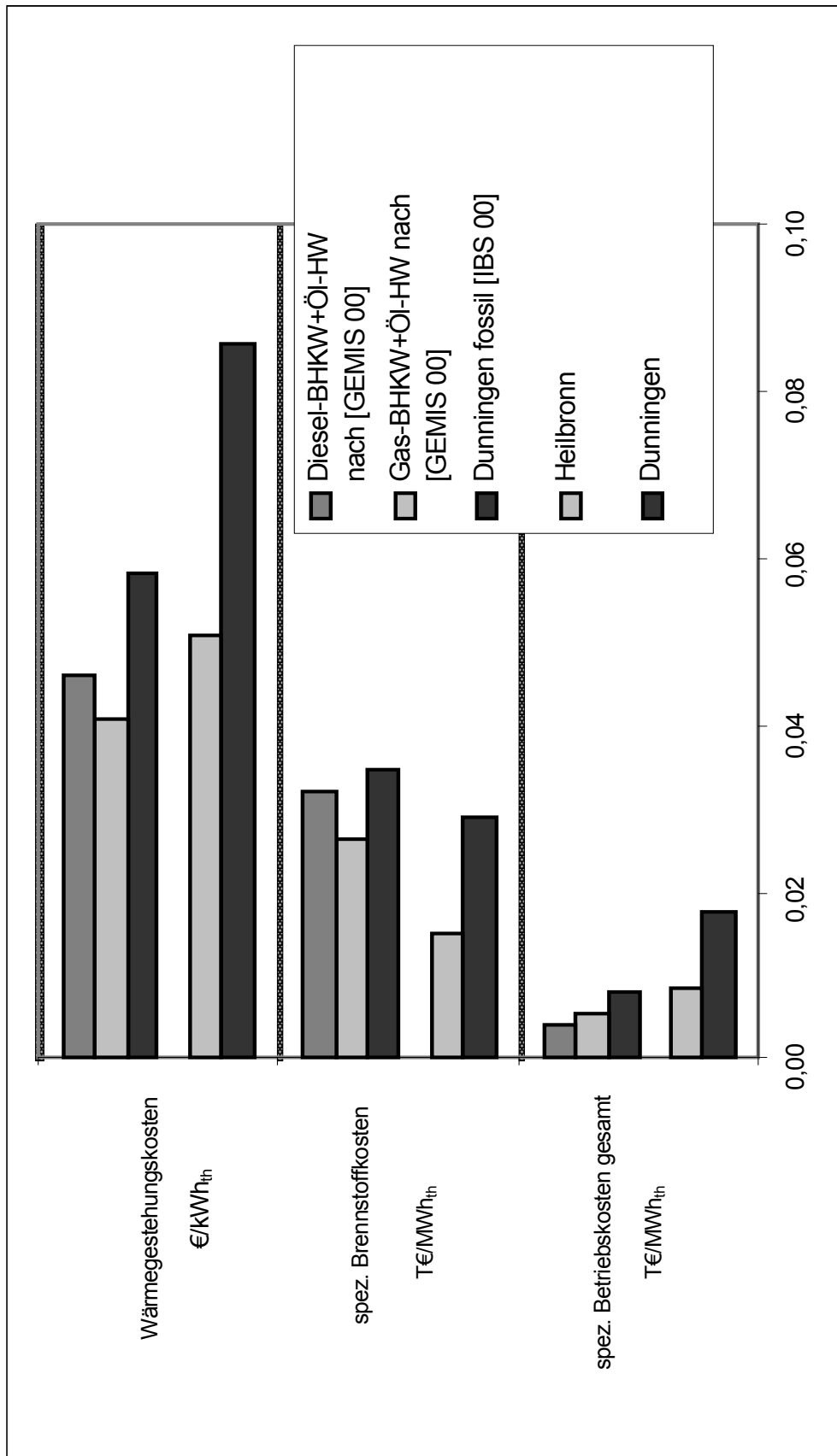
**Abbildung II-24:** Vergleich der spez. Investitionen für Holz- und fossil befeuerte Heizwerke



**Abbildung II-25:** Vergleich von Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten für Holz- und fossil befeuerte Heizwerke

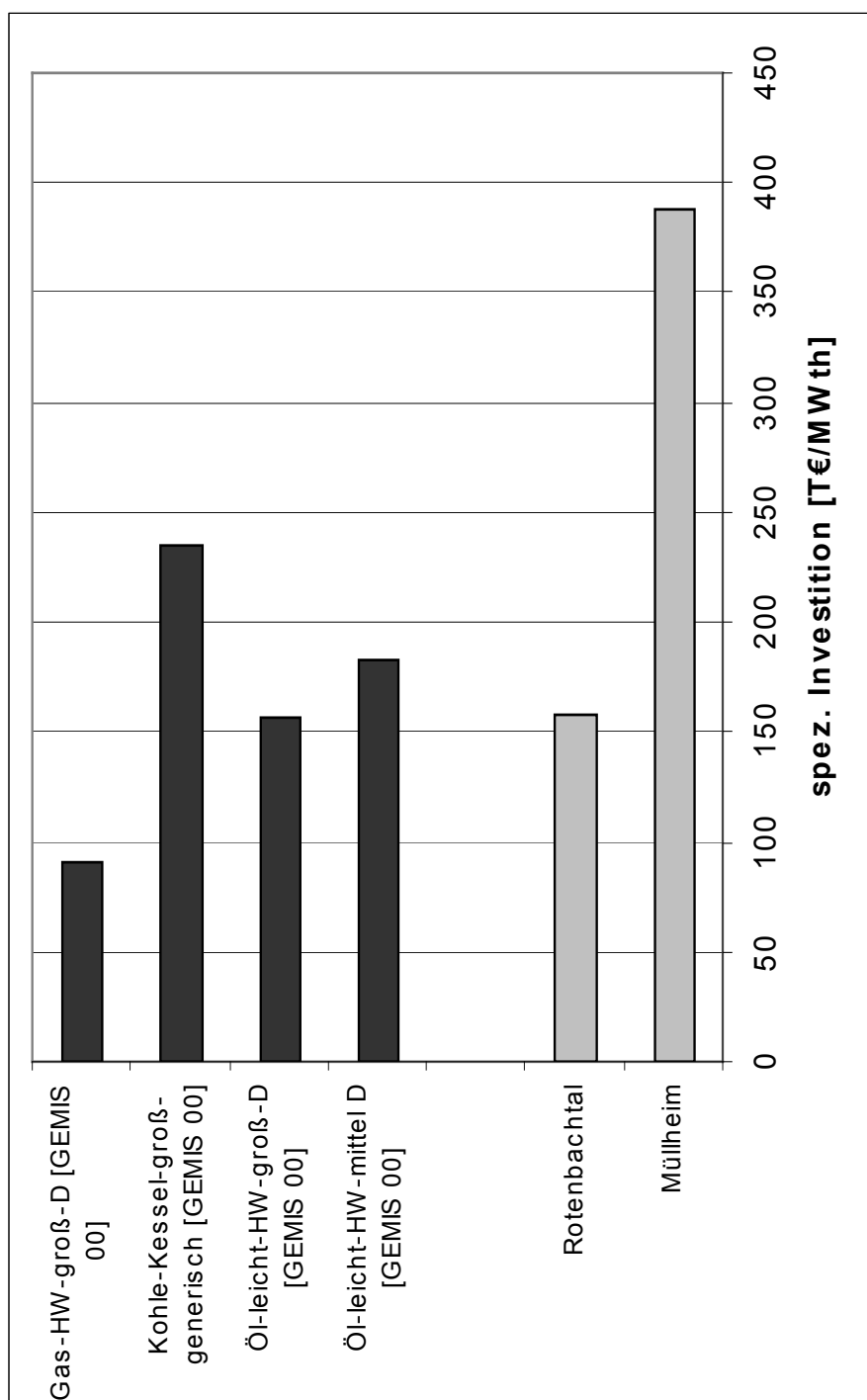


**Abbildung II-26:** Vergleich der spezifischen Investitionen für BHKW-Holzessel- Systeme und BHKW- Ökessel- Systeme

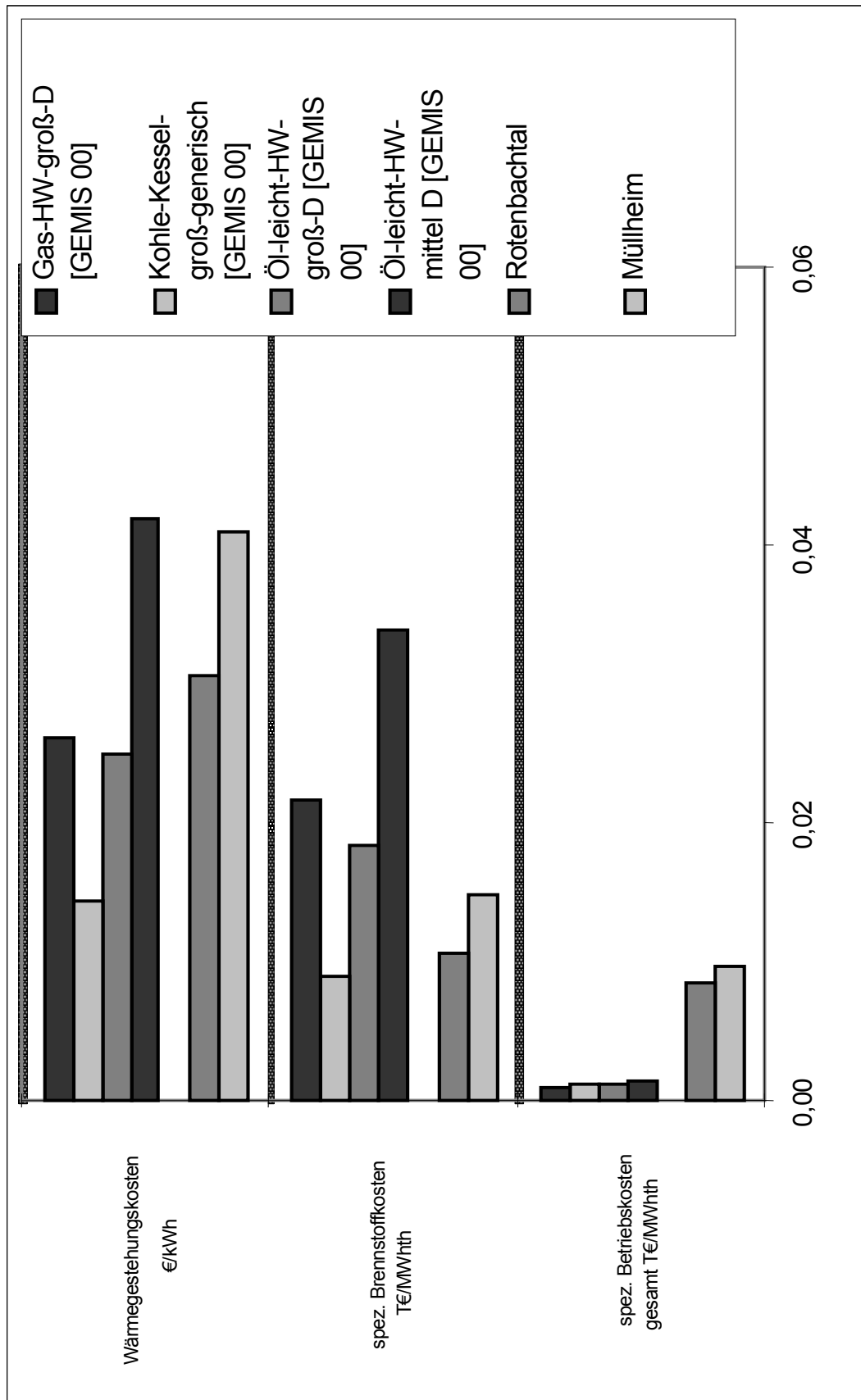


**Abbildung II-27:** Vergleich von Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten für BHKW-Holzessel- und BHKW- Ölkessel- Systeme

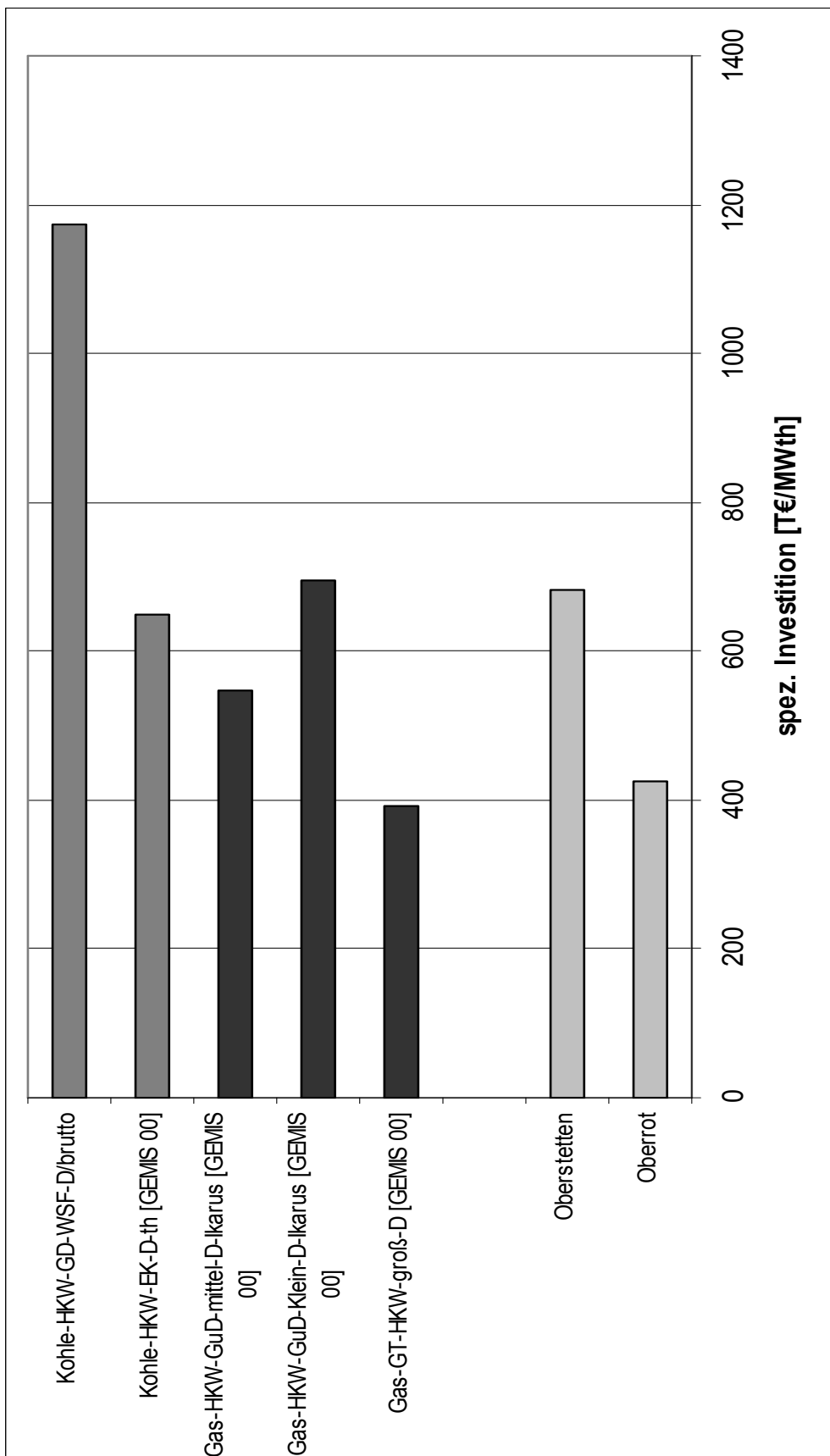




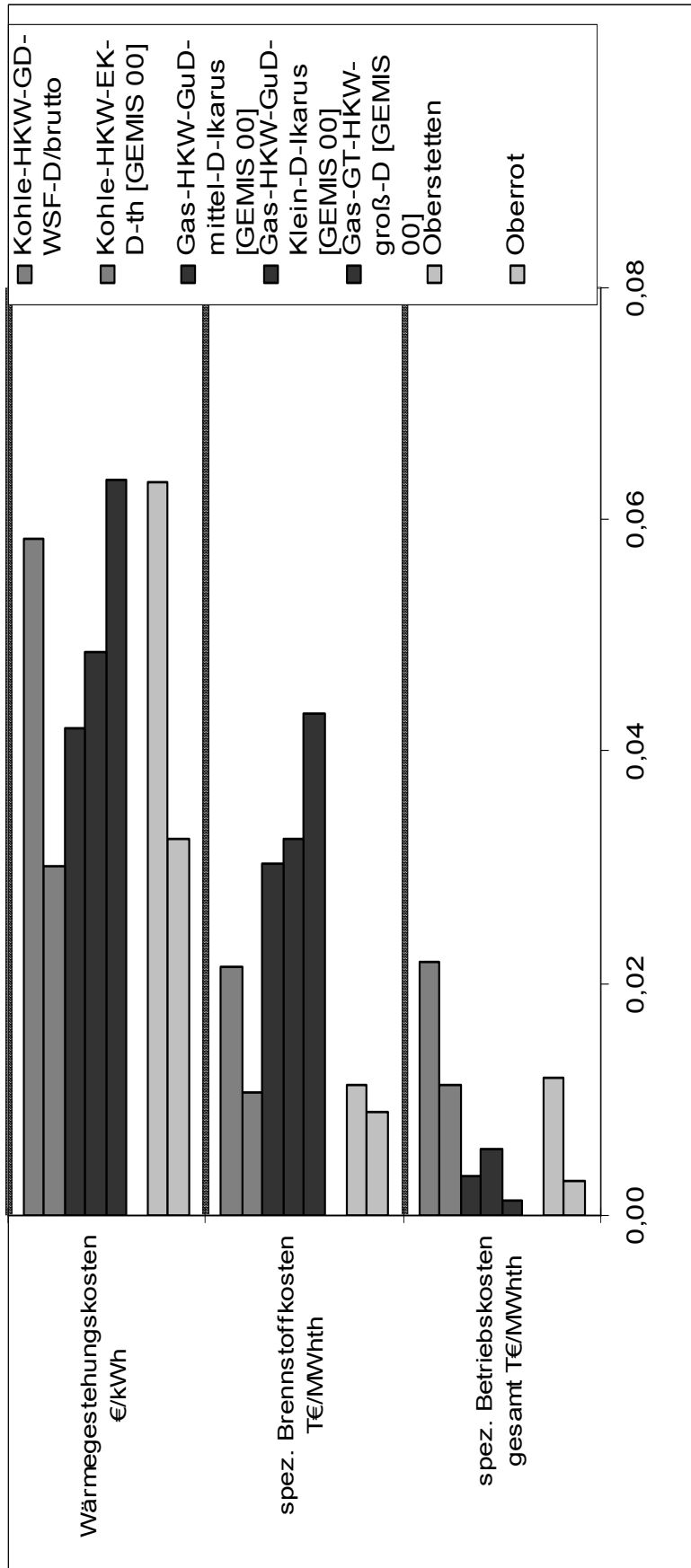
**Abbildung II-28:** Vergleich der spezifischen Investitionen für Fernwärmanlagen mit Holz und fossil befeuerte Heizwerke



**Abbildung II-29:** Vergleich der Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten für Fernheizwerke mit Holz und fossil befeuerte Heizwerke



**Abbildung II-30:** Vergleich der spezifischen Investitionen zwischen Industrieholzheizkraftwerken und fossil befeuerten HKW



**Abbildung II-31:** Vergleich der Betriebskosten, Brennstoffkosten und Wärmegestehungskosten von Holz- Industrieheizkraftwerken und fossil befeuerten HKW

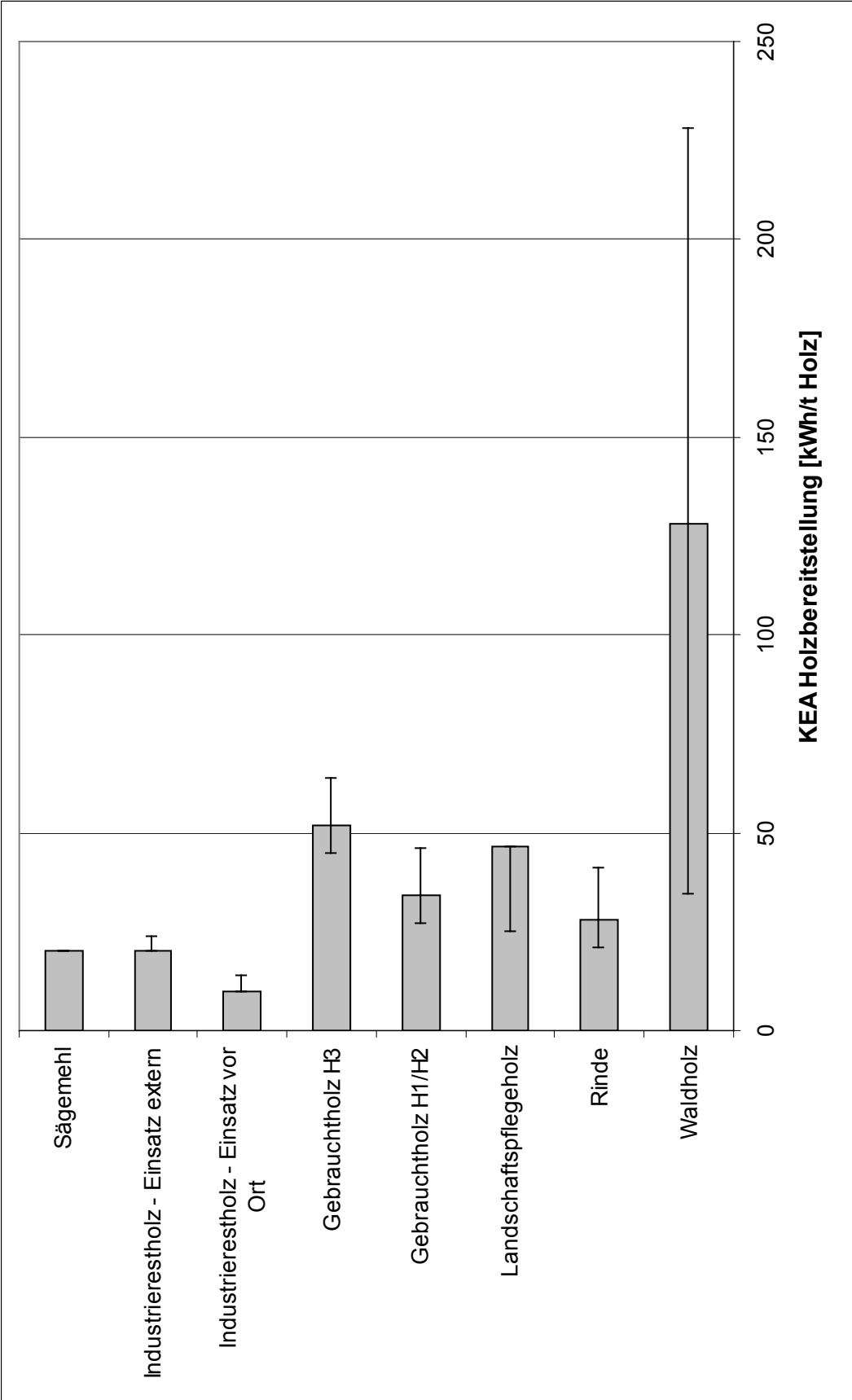
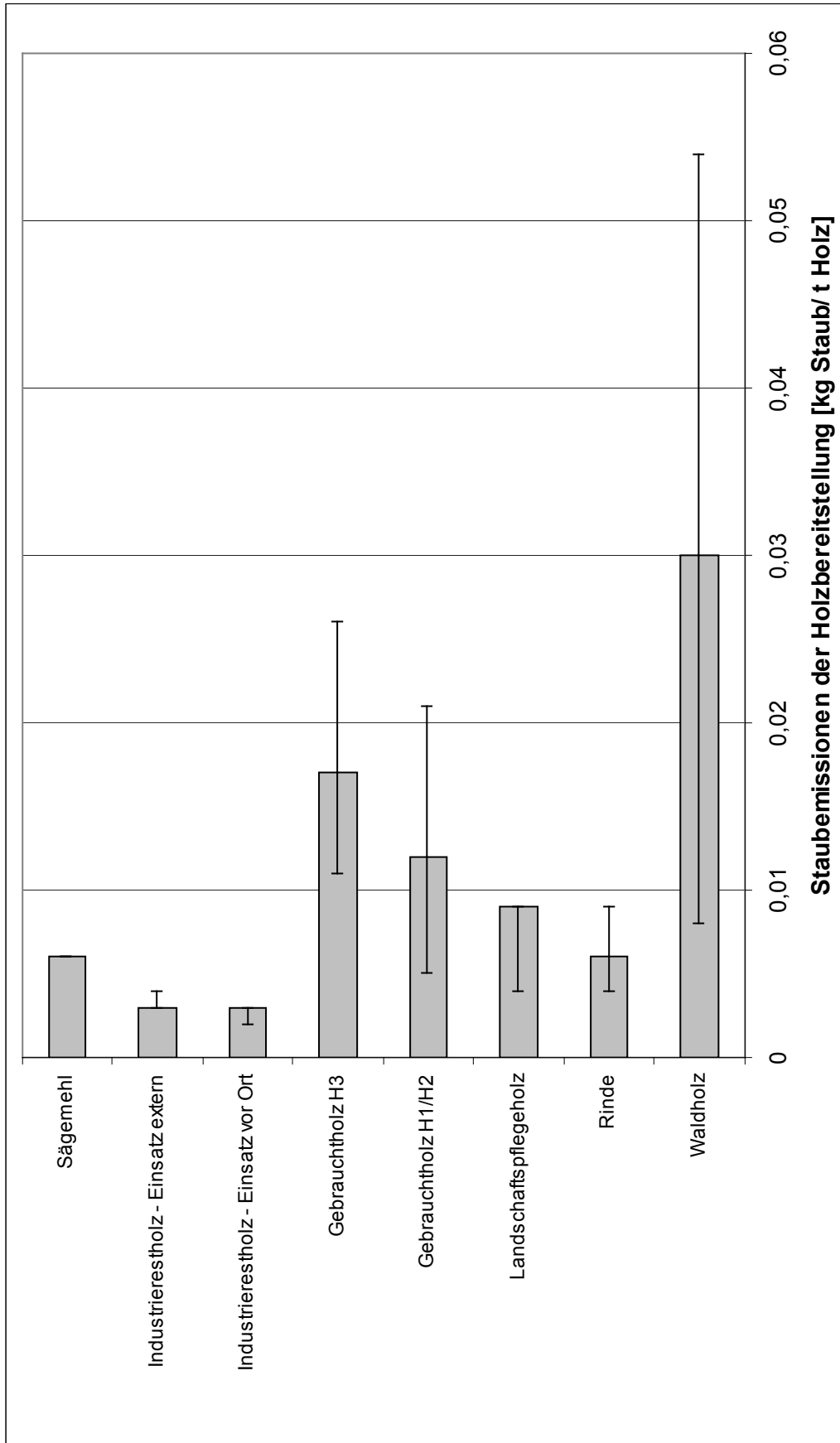


Abbildung II-32: Bandbreiten des Energiebedarfs für die Holzsortimente



**Abbildung II-33:** Bandbreite der Staubemissionen aus der Bereitstellung der Holzsortimente

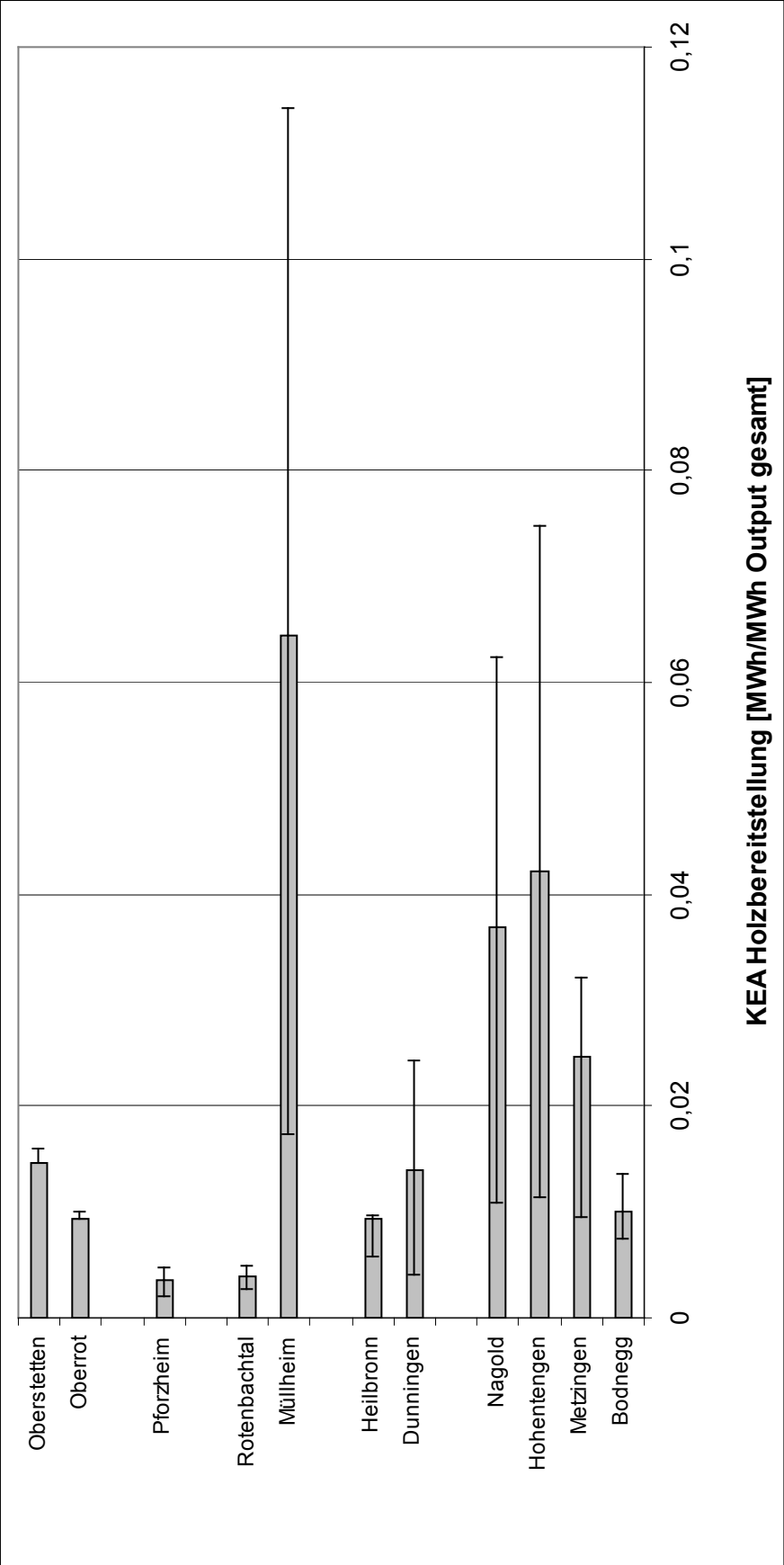
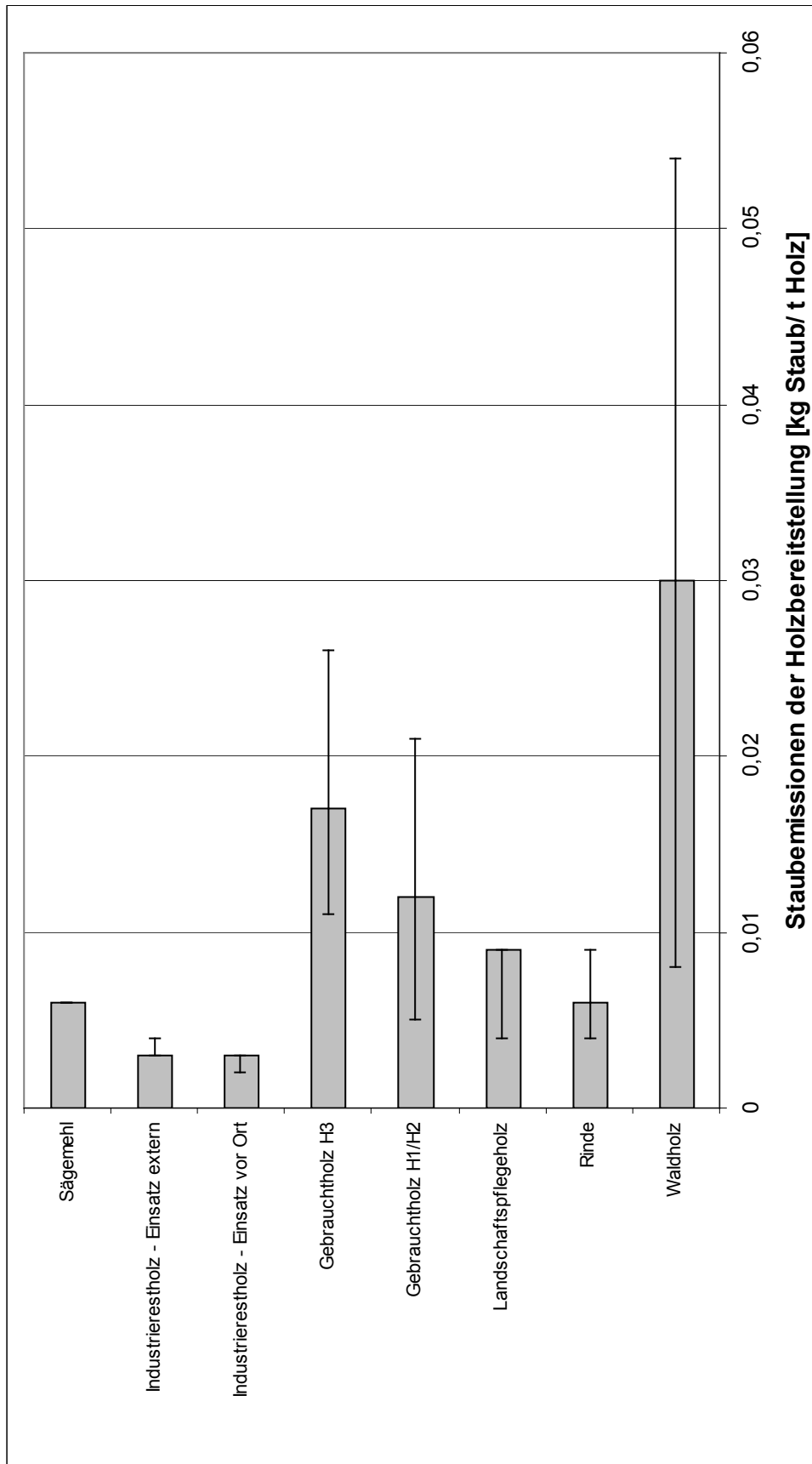


Abbildung II-34: Bandbreite des KEA Holzbereitstellung für die Prozessketten



**Abbildung II-35:** Bandbreite der Staubemissionen aus der Bereitstellung der Holzsortimente



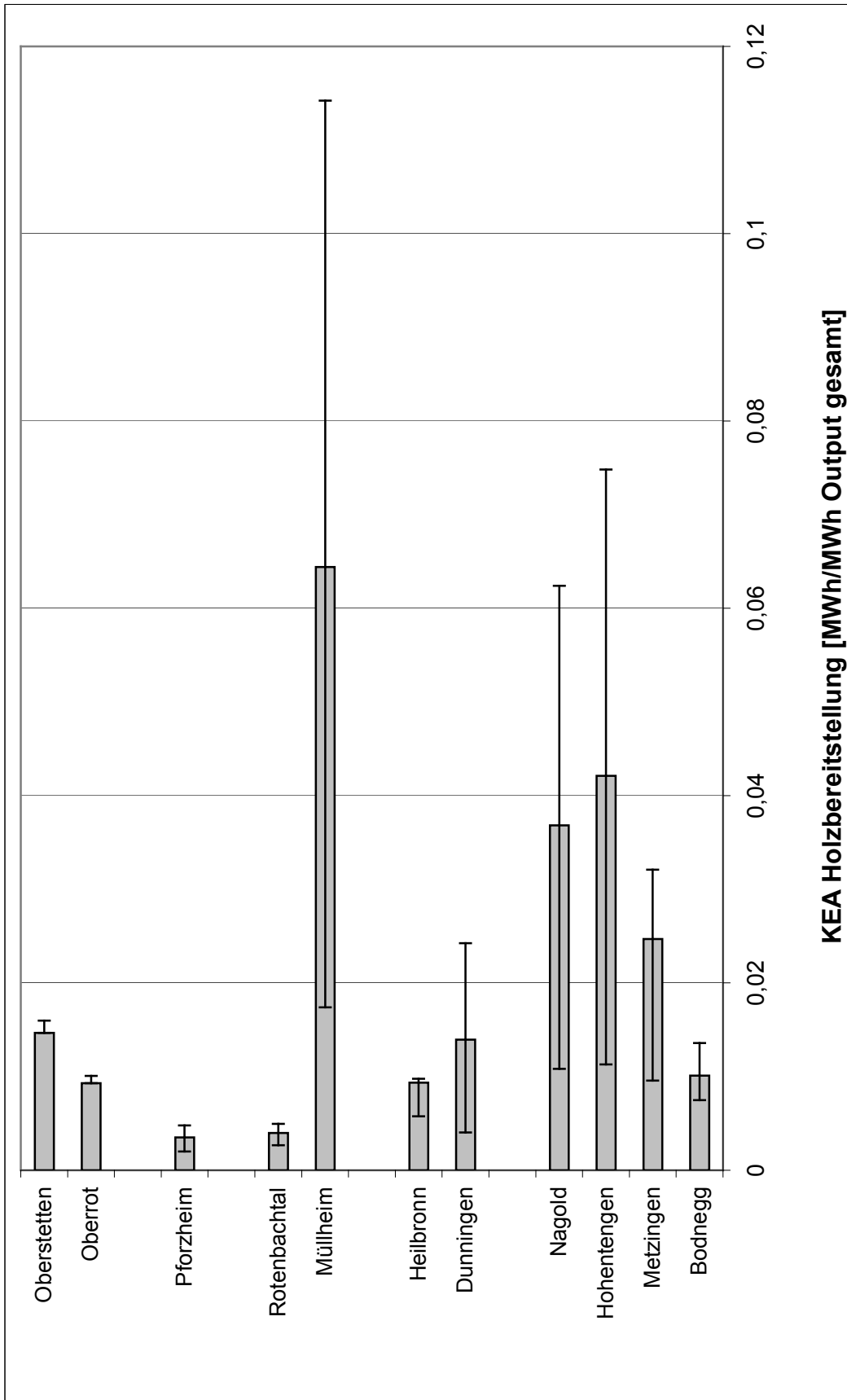
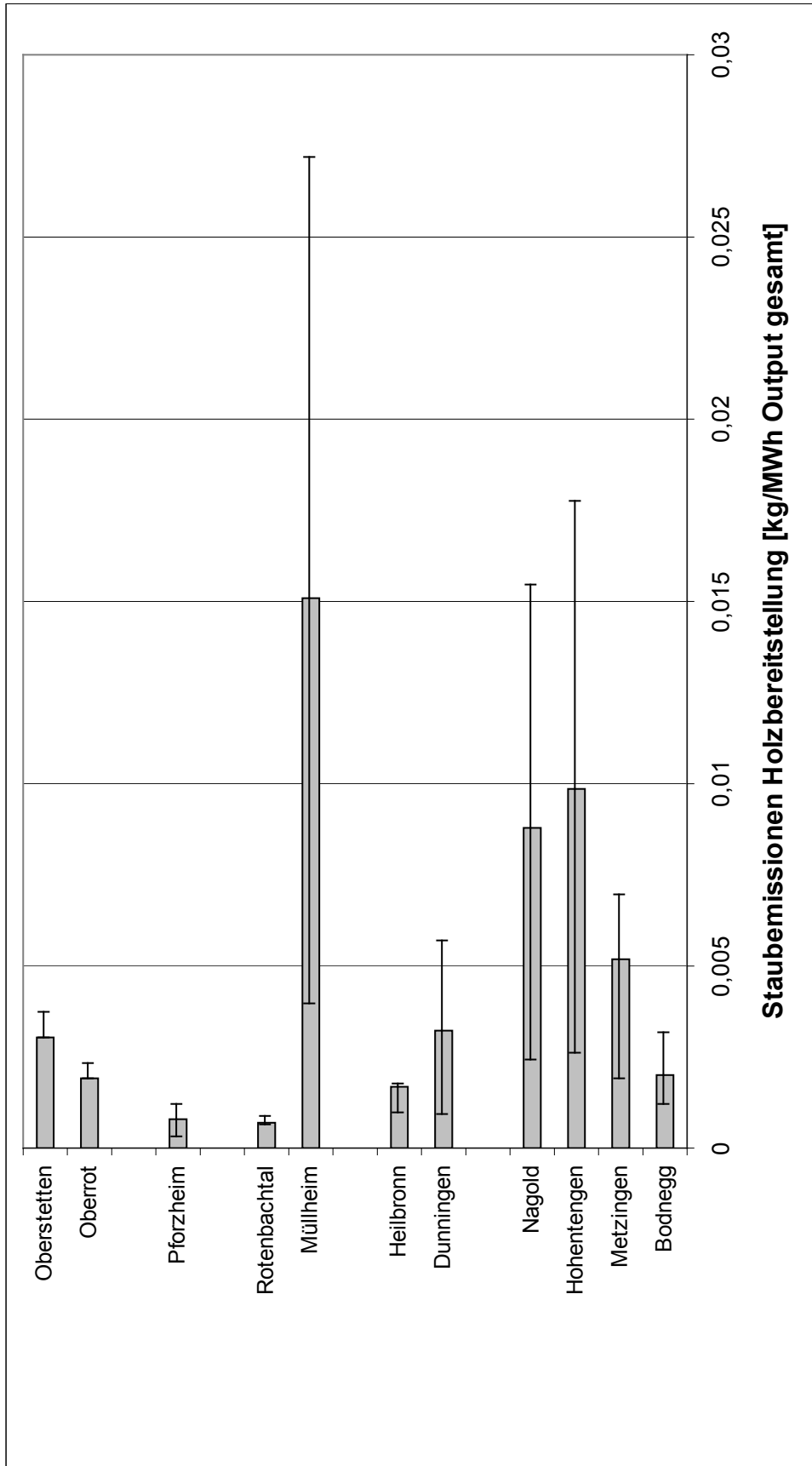
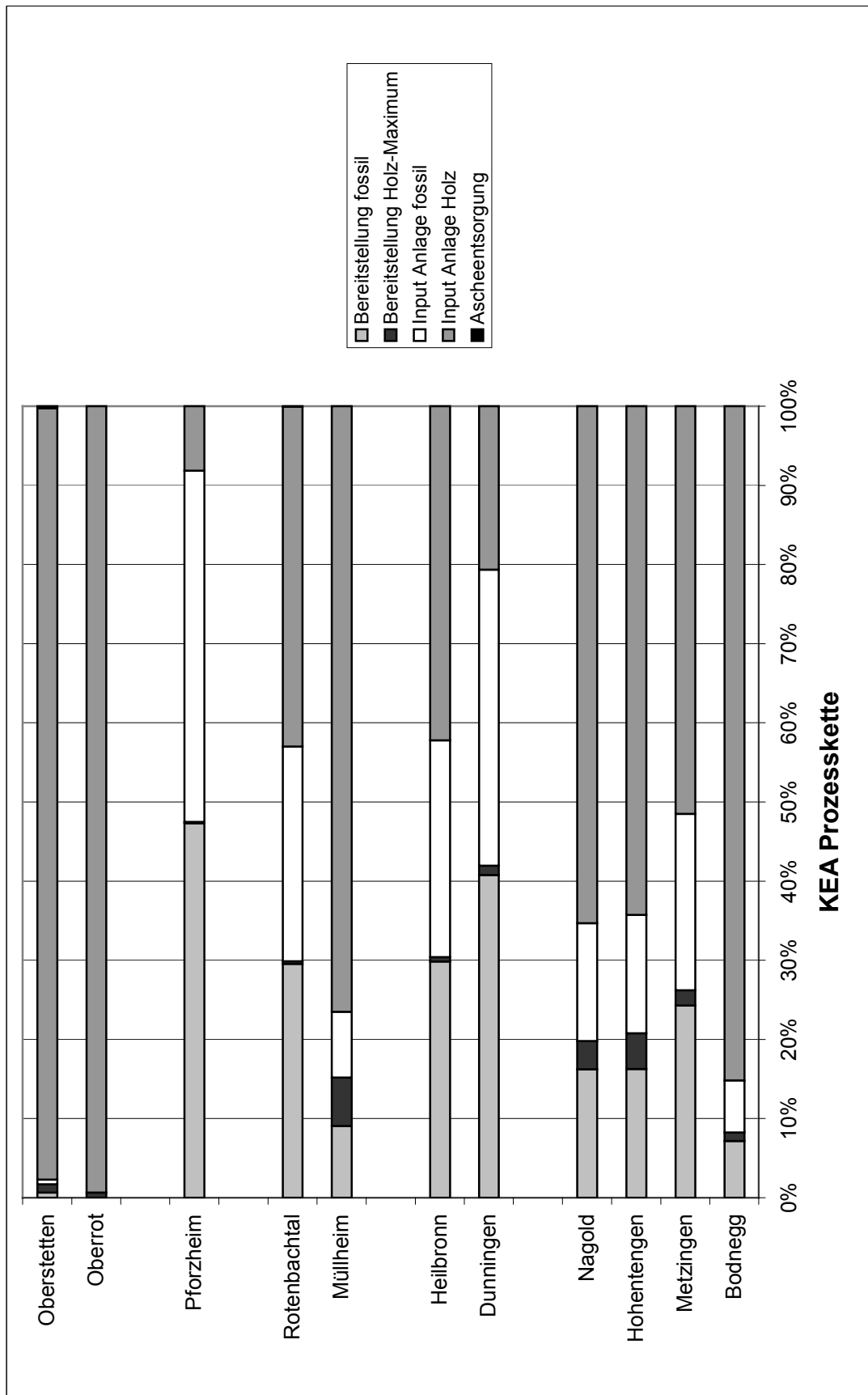


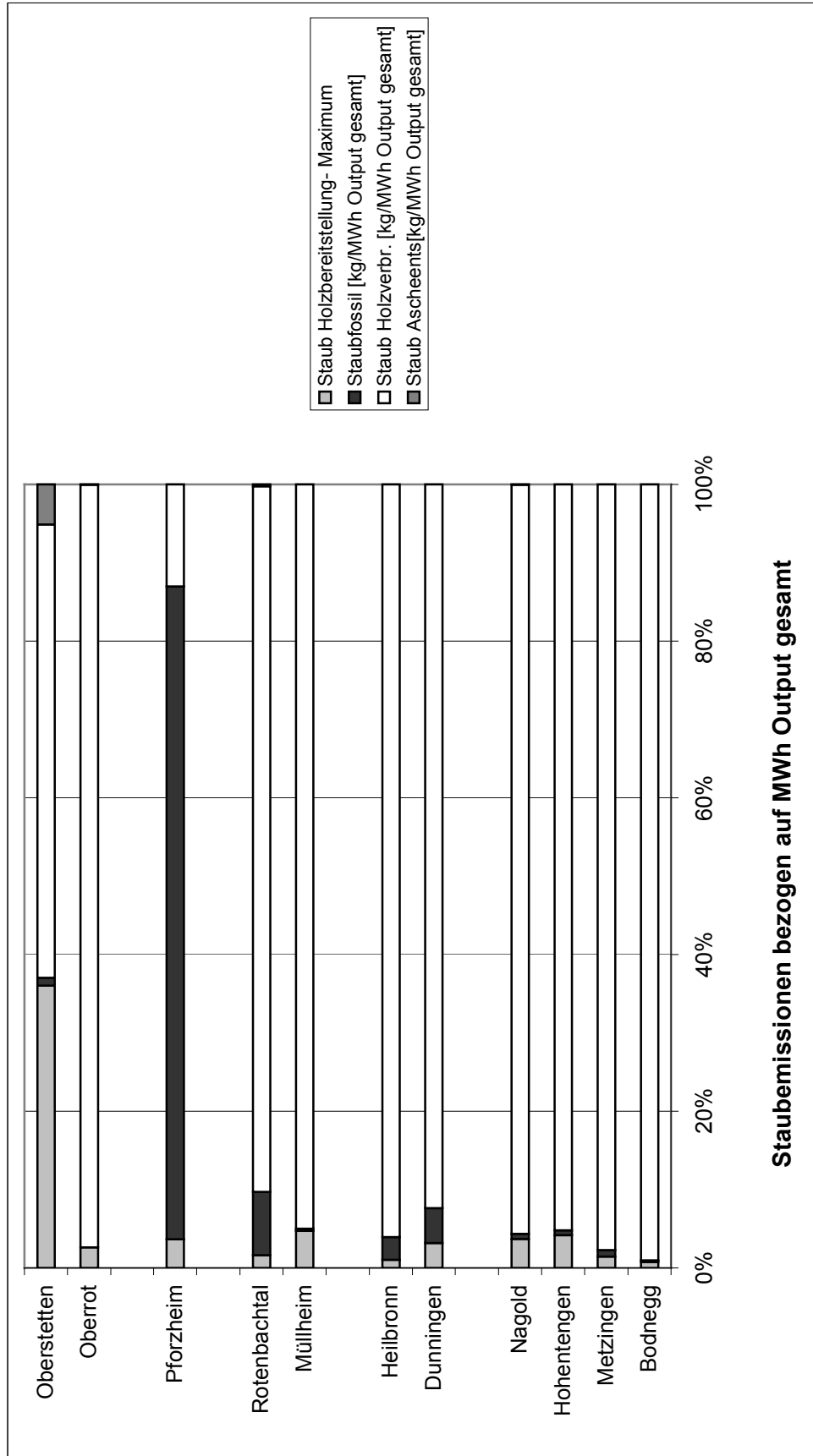
Abbildung II-36: Bandbreite des KEA Holzbereitstellung für die Prozessketten



**Abbildung II-37:** Bandbreiten der Staubemissionen aus Holzbereitstellung für die Prozesskettenbeispiele



**Abbildung II-38:** Einfluss des KEA- Holzbereitstellung auf die Prozesskette bei maximaler Abschätzung



**Abbildung II-39:** Einfluss der Staubemissionen aus der Holzbereitstellung auf die gesamte Prozesskette bei maximaler Abschätzung

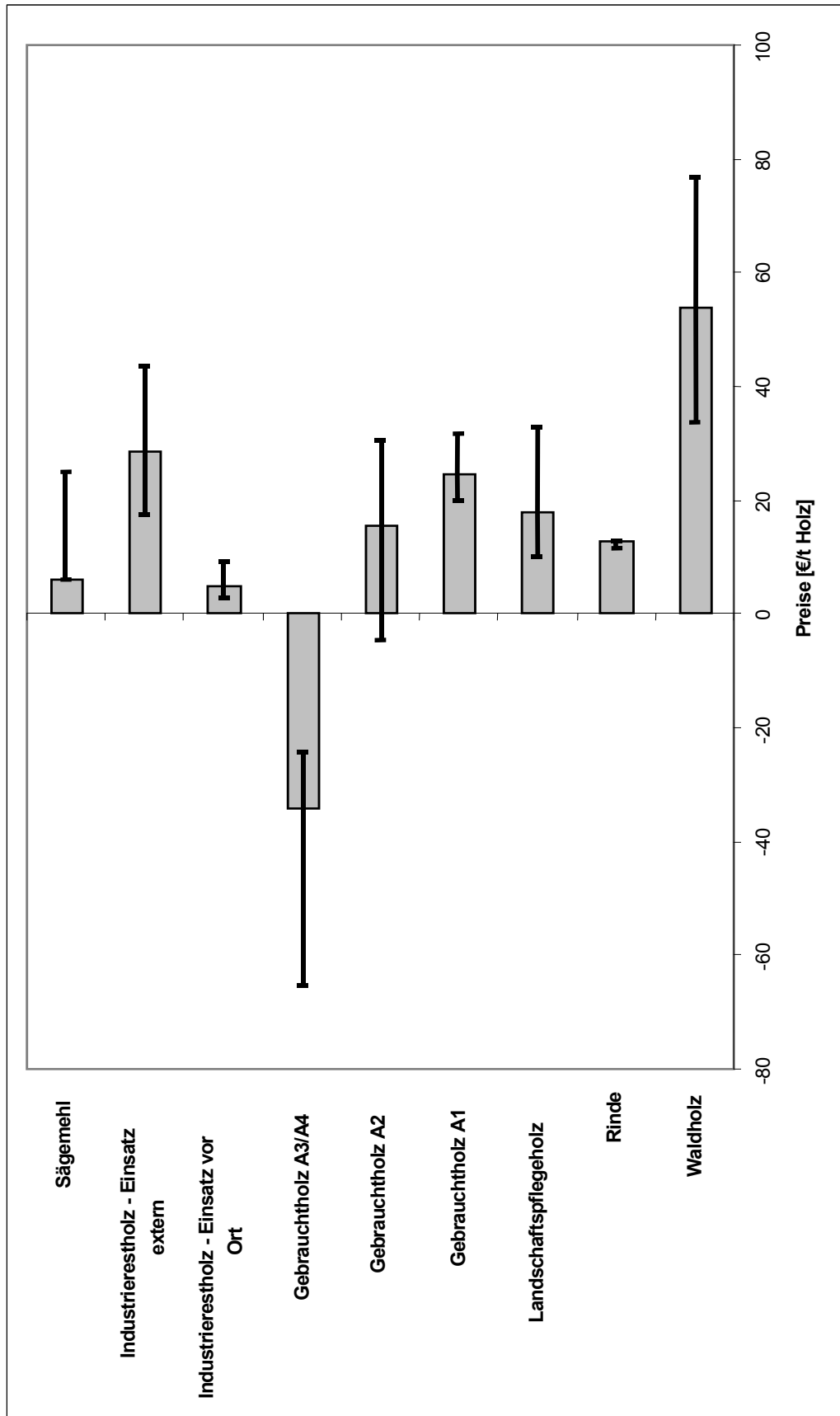
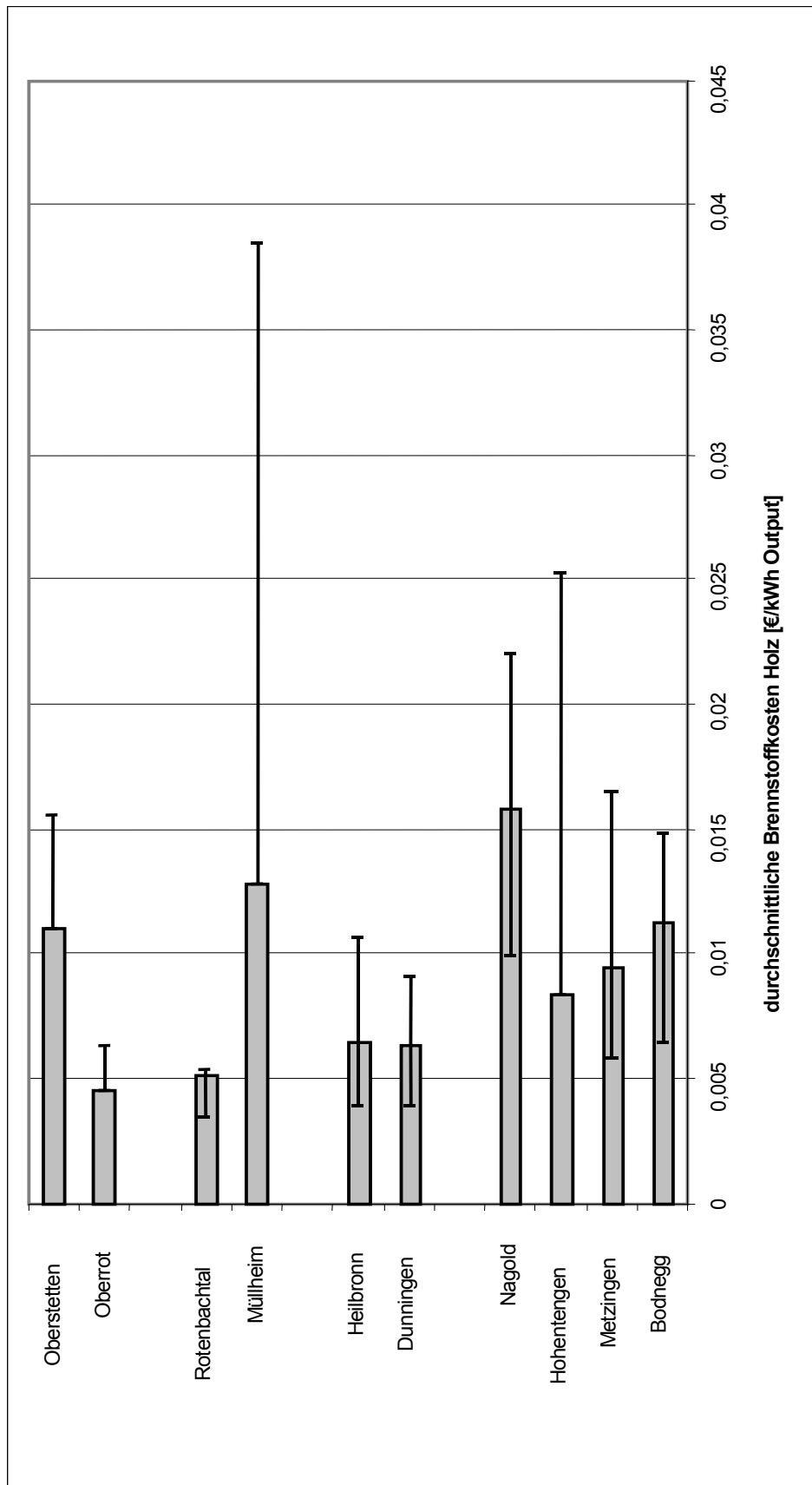
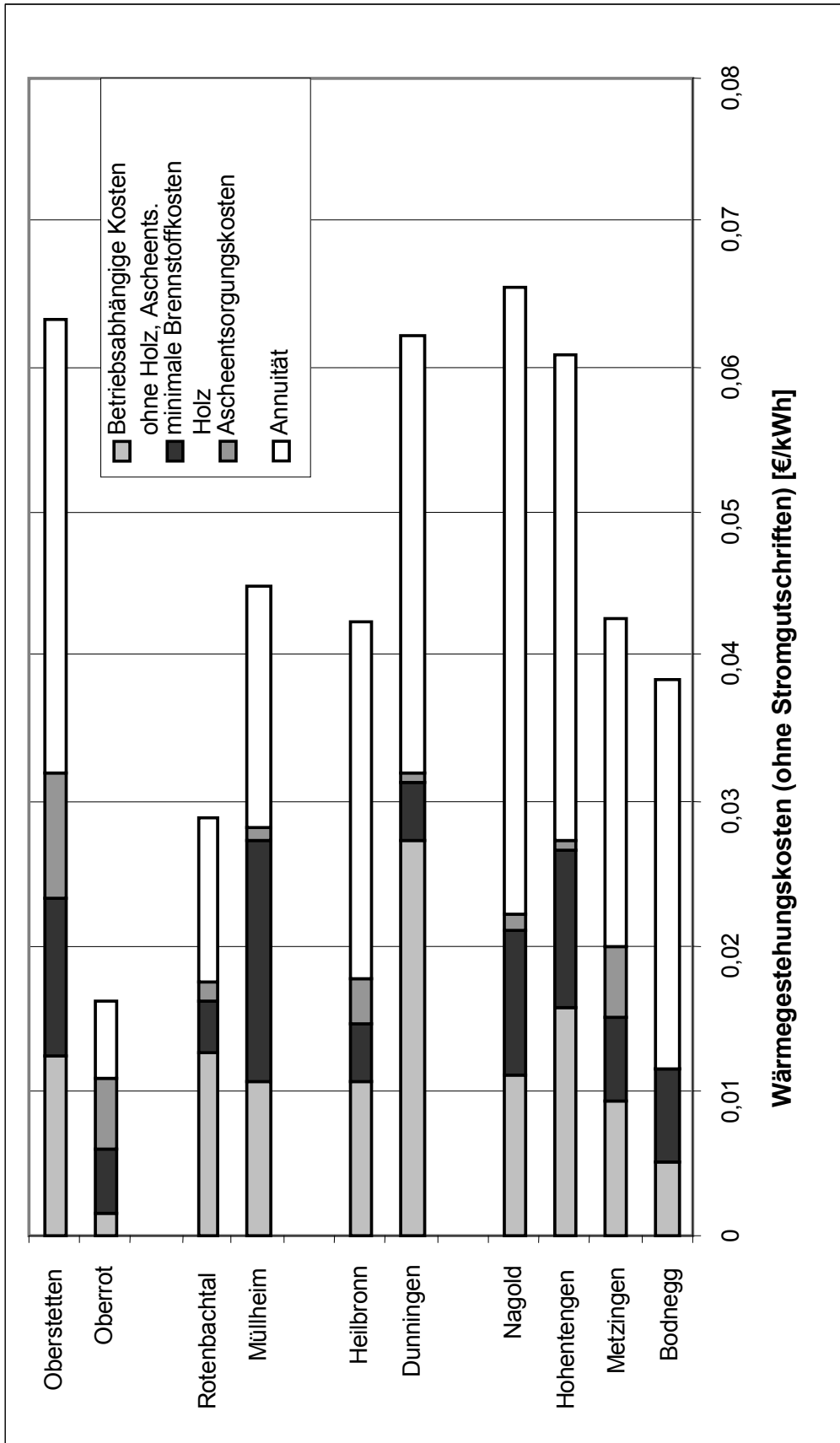


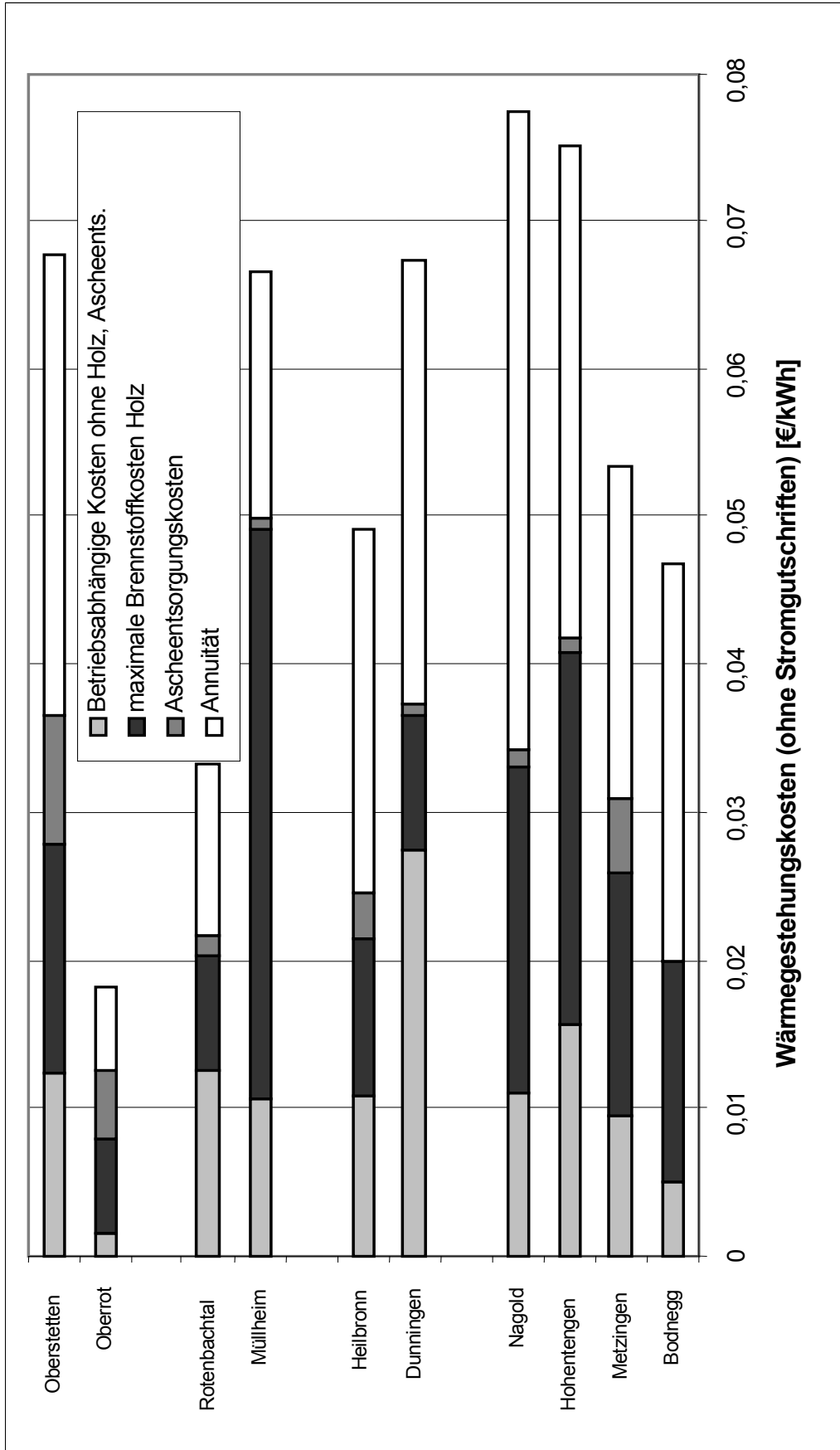
Abbildung II-40: Bandbreite der Brennstoffpreise/Kosten für Holzsortimente



**Abbildung II-41:** Bandbreiten der Brennstoffkosten für die berechneten Prozessketten



**Abbildung II-42:** Auswirkung minimaler Brennstoffkosten auf die Wärmegestehungskosten der Feuerungsanlagen



**Abbildung II-43:** Auswirkung maximaler Brennstoffkosten auf die Wärmegestehungskosten der berechneten Feuerungsanlagen



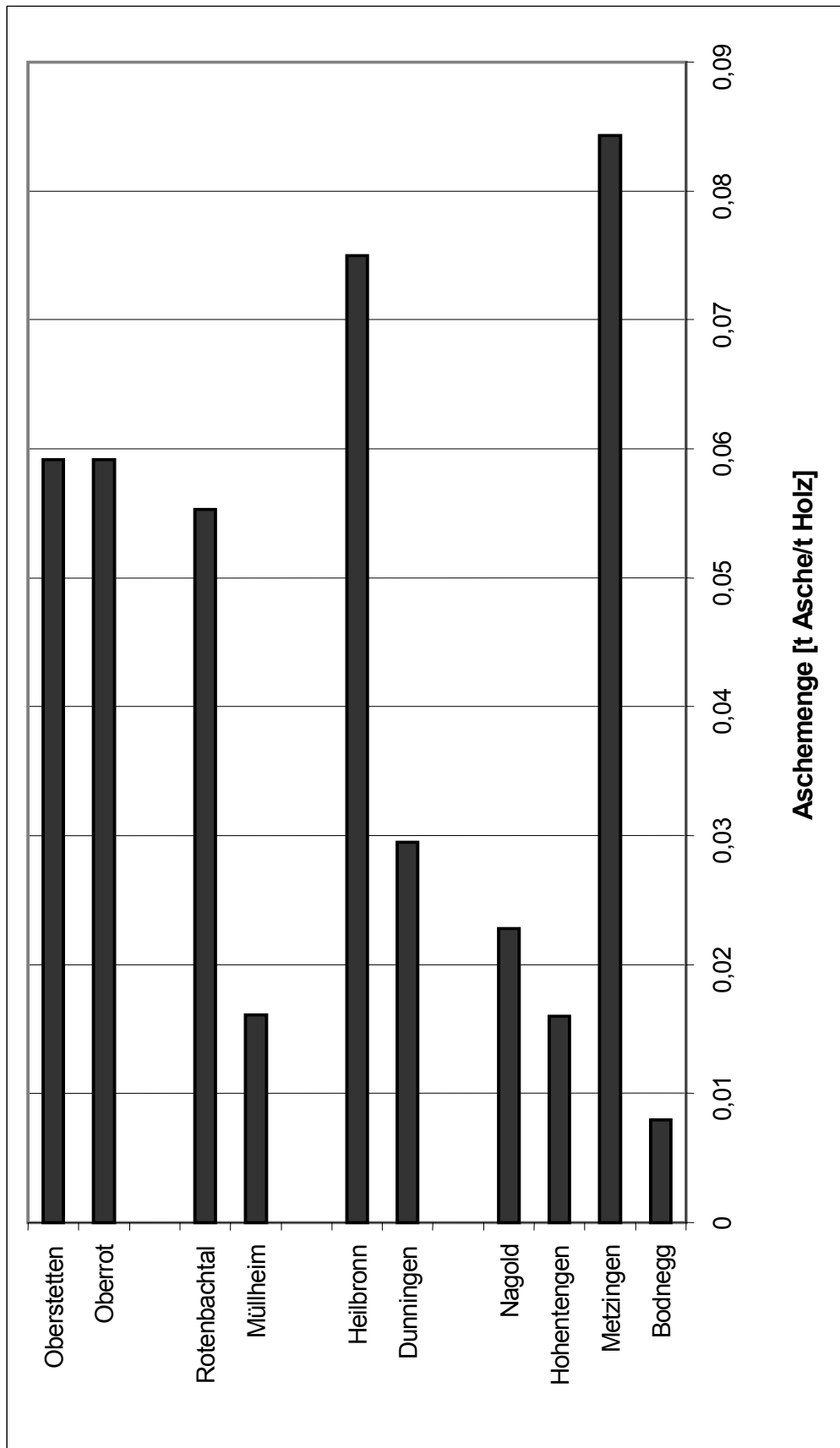


Abbildung II-44: Ascheanfall in den Feuerungsanlagen der Prozesskettenbeispiele

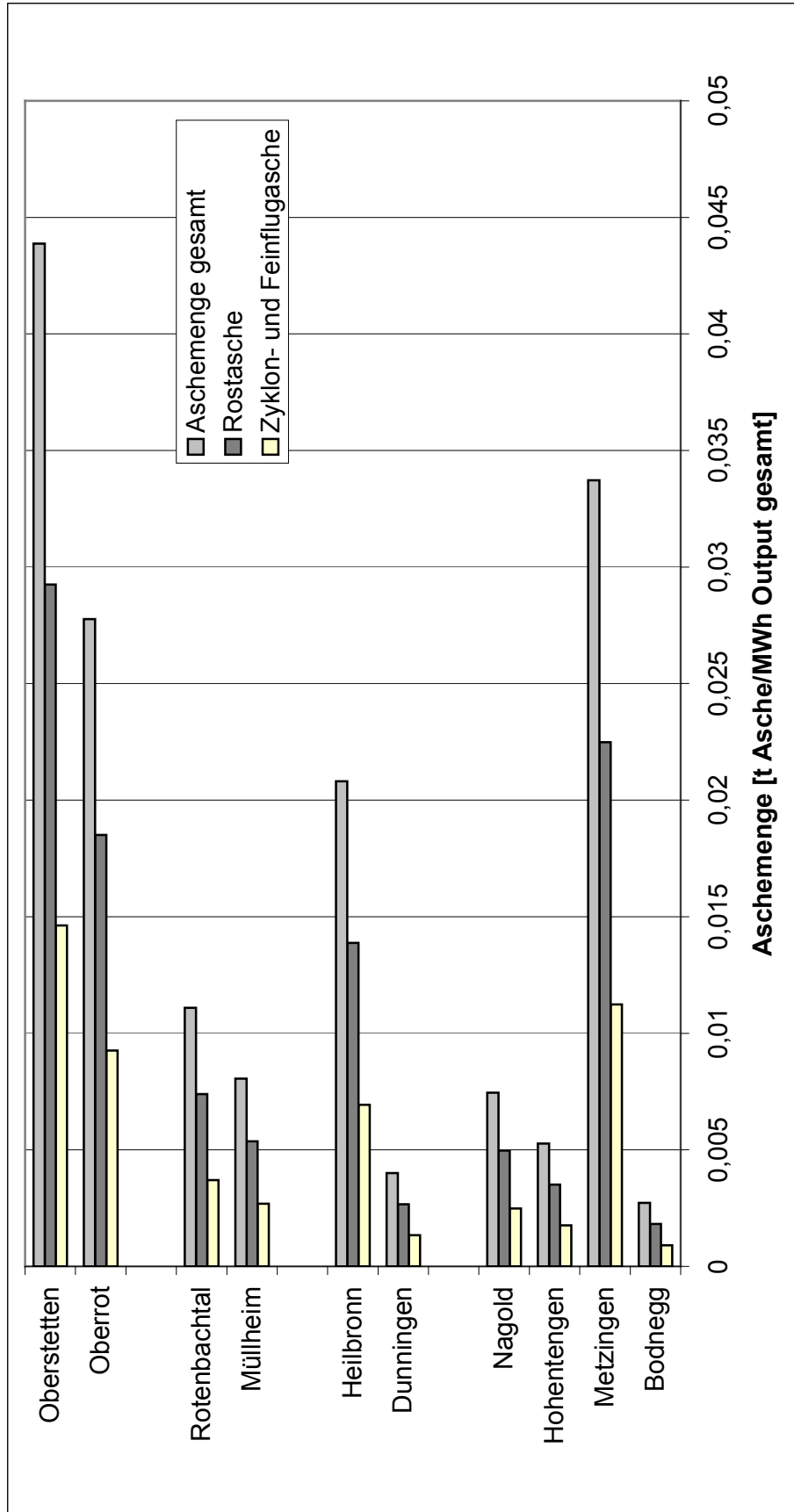
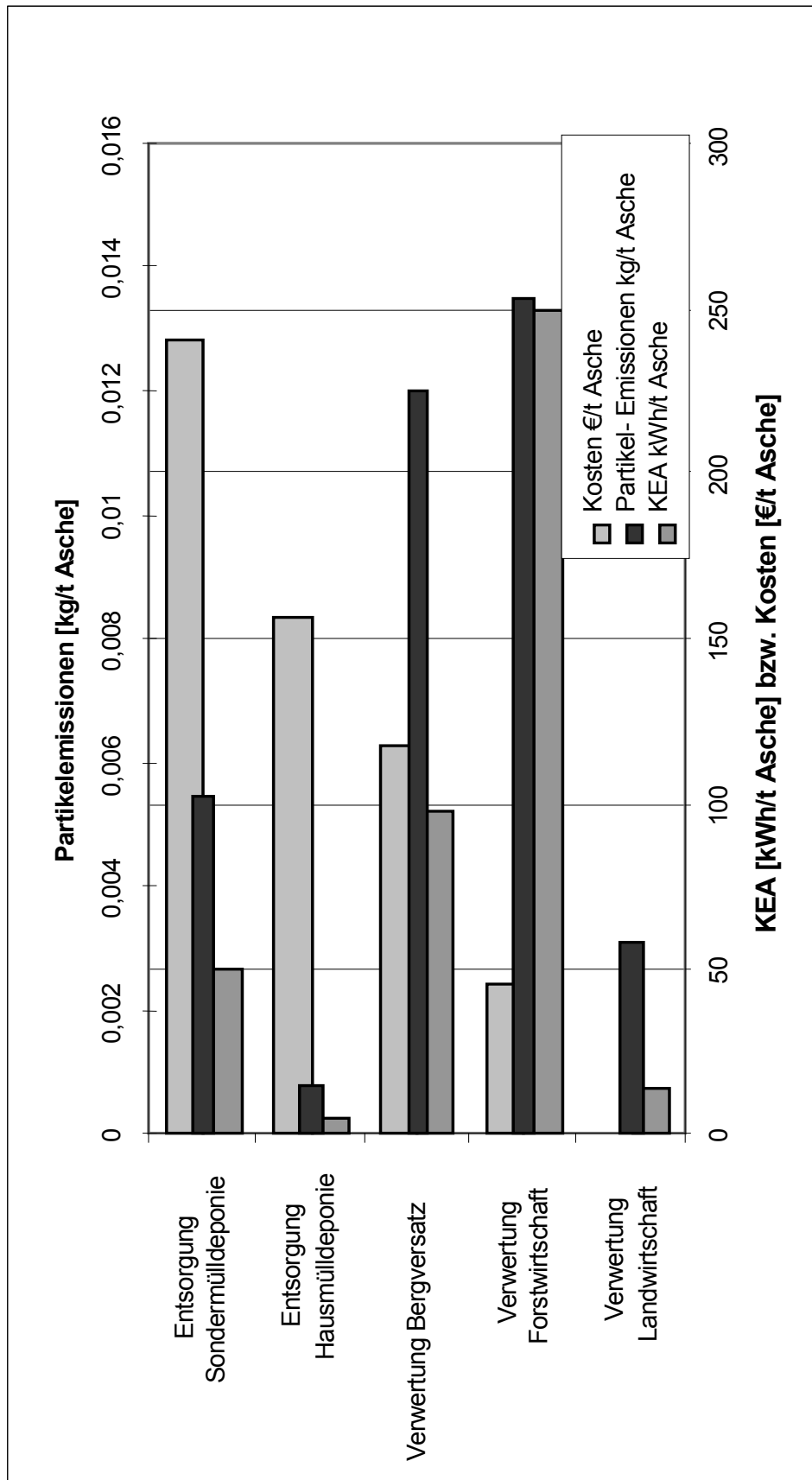


Abbildung II-45: Auf Energieoutput bezogene Aschemengen der Prozesskettenbeispiele



**Abbildung II-46:** KEA, Kosten und Partikelemissionen der verschiedenen Ascheentsorgungs- und -verwertungswege

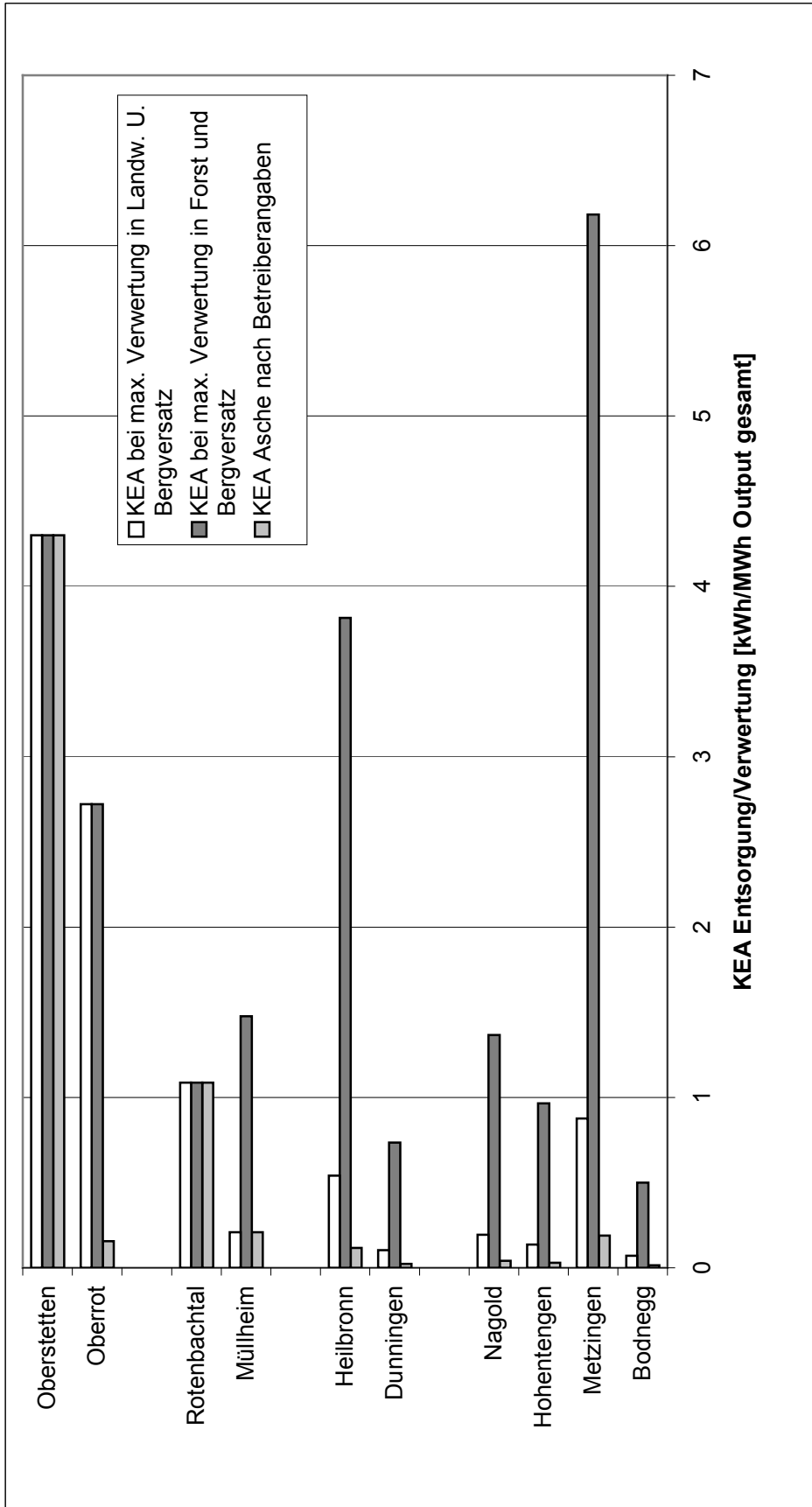


Abbildung II-47: KEA der Ascheentsorgung/-verwertung der Prozessketten unter verschiedenen Optionen

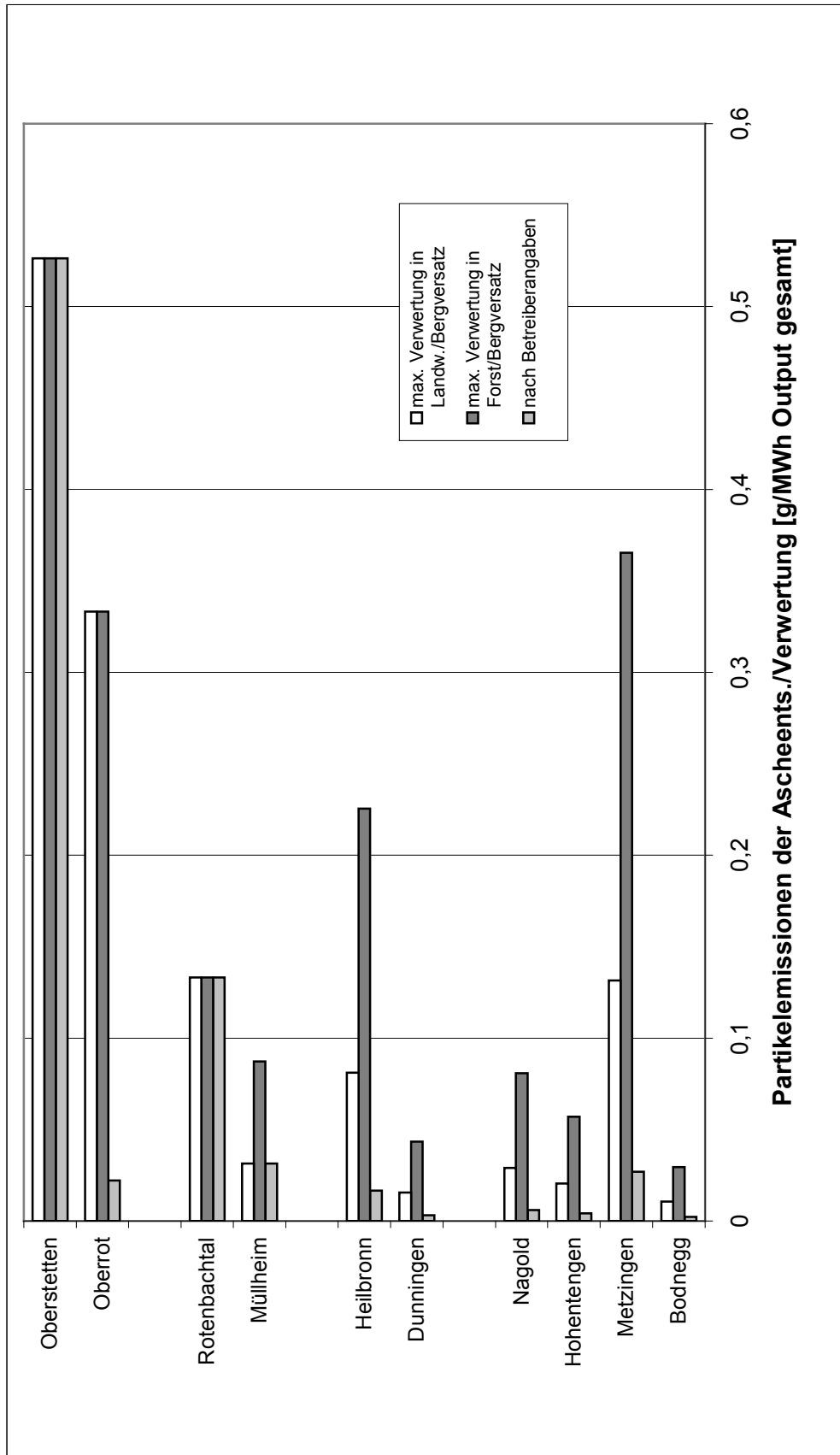
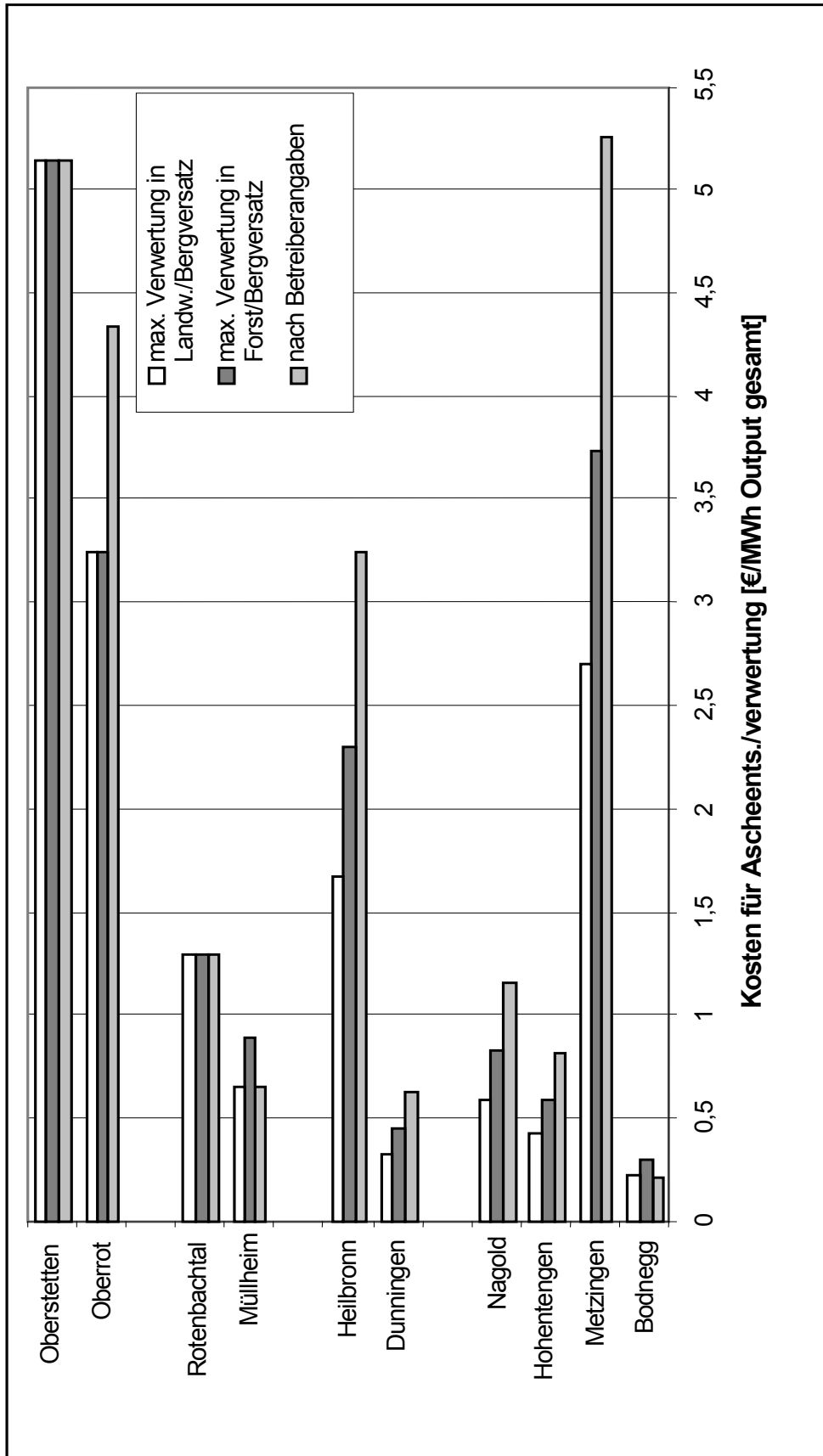


Abbildung II-48: Partikelemissionen der Ascheentsorgung/-verwertung der Prozessketten unter verschiedenen Optionen



**Abbildung II-49:** Kosten der Ascheentsorgung/-verwertung der Prozessketten unter verschiedenen Optionen

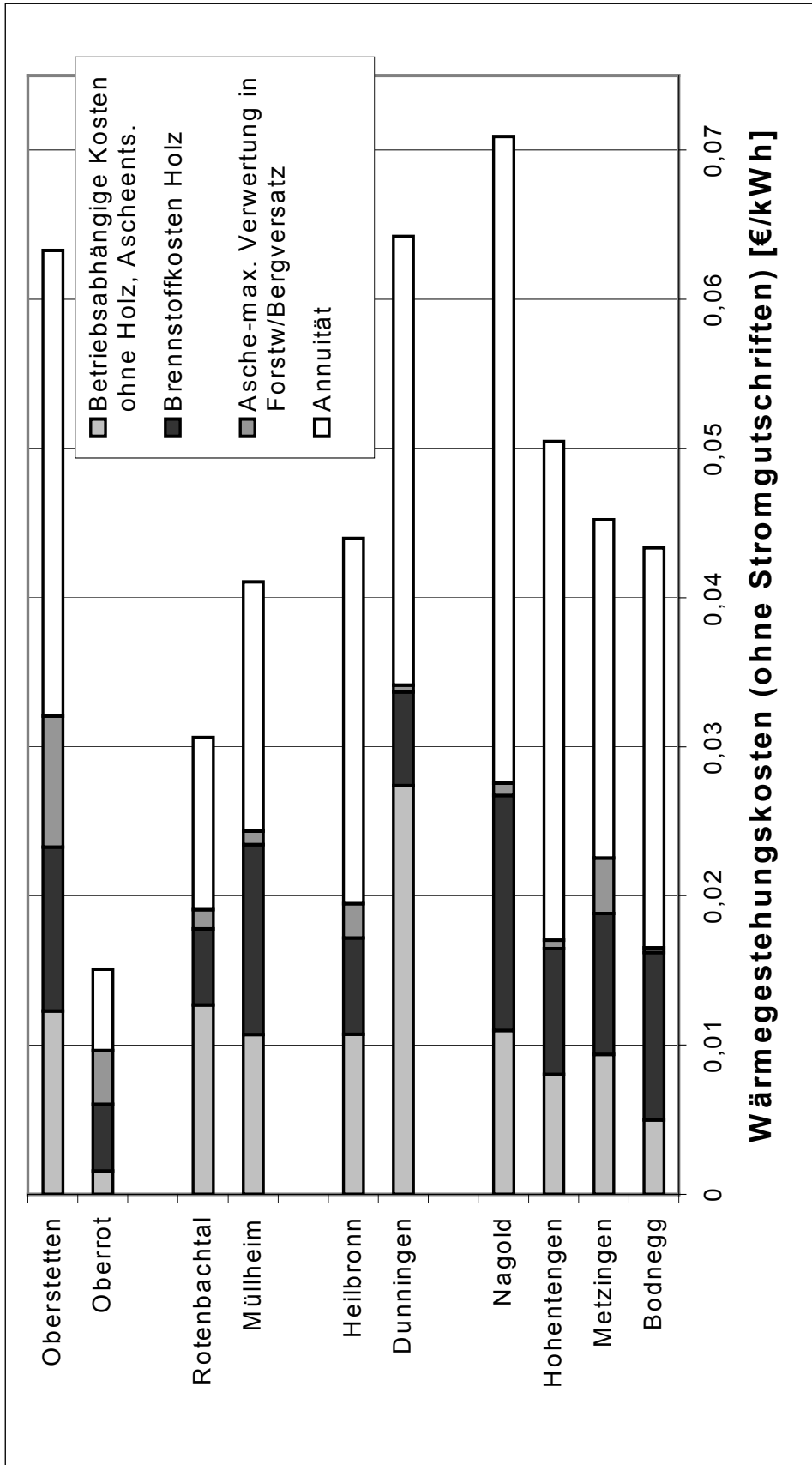


Abbildung II-50: Wärmegestehungskosten der Prozessketten bei maximaler Verwertung in Landwirtschaft und Bergversatz

## Anhang III - Daten und Ergebnisse zum Energiesystemmodell

**Tabelle III-1:** Daten zu Kraftwerksoptionen für die Verwertung von Holz

	Heizkraftwerk mit Rostfeuerung		Heizkraftwerk mit Wirbelschichtfeuerung		Kombikraftwerk
	13. BlmSchV	17. BlmSchV	13. BlmSchV	17. BlmSchV	
Brennstoff	Holz unbeh.	Holz beh.	Holz unbeh.	Holz beh.	Steinkohle, Holz beh. und unbeh.
Spez. Investition [€/kW <sub>el</sub> ]	3170	3477	3170	3272	1023
Spez. fixe Ausgaben [€/kW <sub>el</sub> a]	56	66	61	64	61
Betriebsmittelverbrauchsabhängige Ausgaben [Ct/kW <sub>h</sub> <sub>el</sub> ]	2,8	3,3	3,0	3,6	0,15
Elektrischer Nutzungsgrad [%]	30	30	30	30	30
NO <sub>x</sub> [t/PJ <sub>Input</sub> ]	70,2	163,79	93,6	117	56,16
SO <sub>2</sub> [t/PJ <sub>Input</sub> ]	4,68	18,72	2,34	4,68	56,16
Partikel [t/PJ <sub>Input</sub> ]	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68
Alle Anlagen können auch in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben werden					

**Tabelle III-2:** Preise und Potenziale für Holz

Holzart	Preis [€/GJ]	Preis [Ct/kWh]	Potenzial [PJ/a]
Altholz behandelt, geshreddert	-0,51	-0,18	10,4
Altholz unbehandelt, geshreddert	1,02	0,37	3
Waldrestholz ohne Rinde	4,76	1,71	12,9
Sägereste	1,29	0,47	12,2
Industrierestholz unbehandelt	2,41	0,87	0,7
Landschaftspflegeholz	2,20	0,79	8,3
Rinde	1,06	0,38	6,2

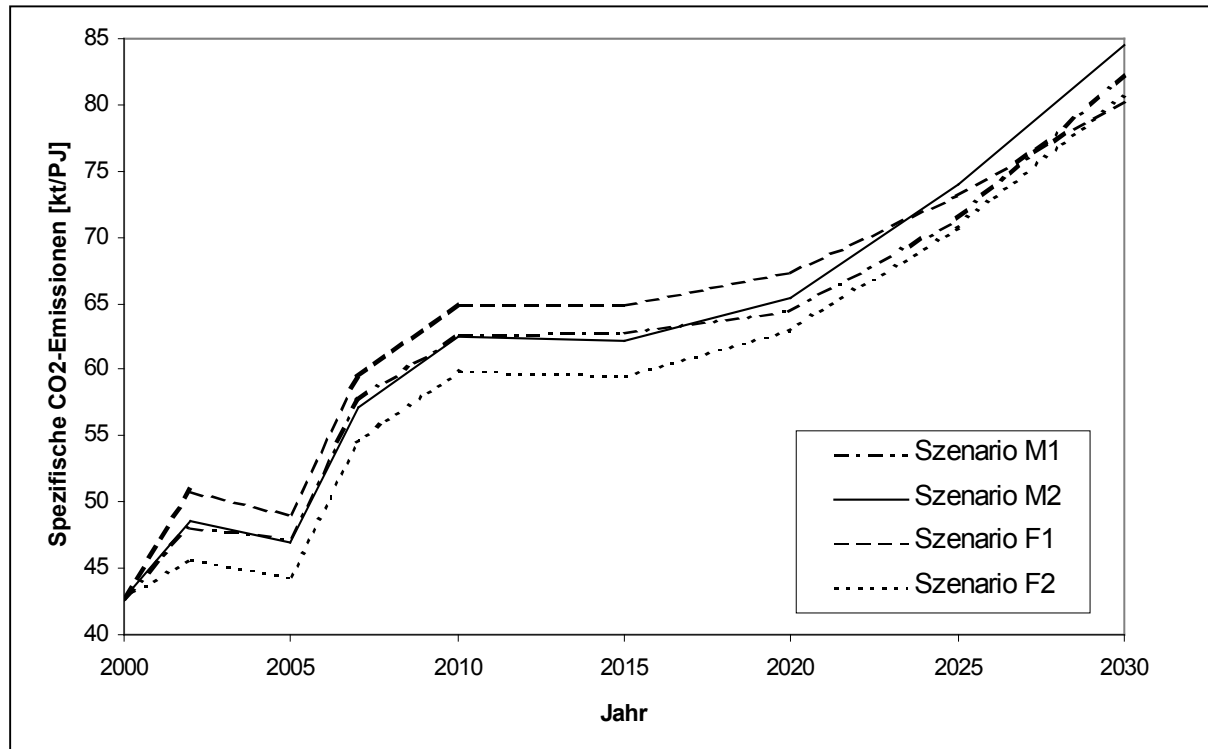


**Tabelle III-3:** Szenariocharakterisierung

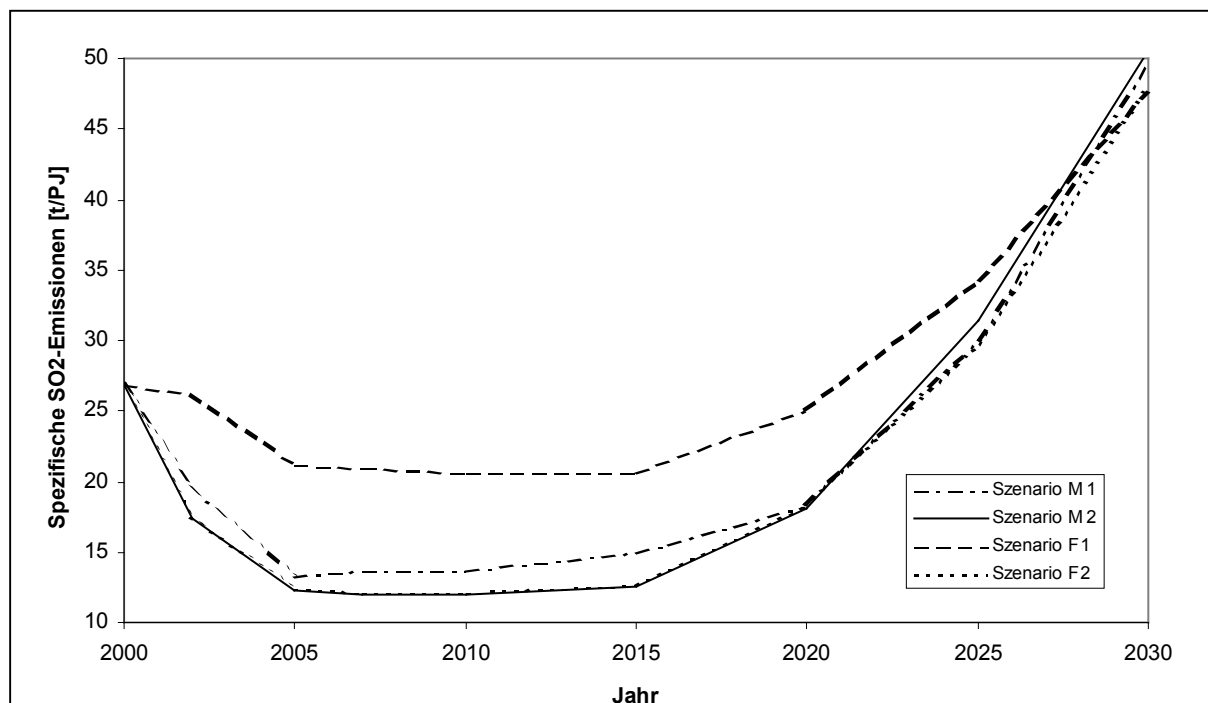
Szenariocharakterisierung		Bezeichnung
Marktszenario: Holznutzung ist freigestellt	Holznutzung in Zufeuerungsanlagen möglich	M1
	Holznutzung nur in reinen Holzfeuerungsanlagen	M2
Förderszenario: Das gesamte vorhandene Holzpotenzial muss zur Stromerzeugung genutzt werden.	Holznutzung in Zufeuerungsanlagen möglich	F1
	Holznutzung nur in reinen Holzfeuerungsanlagen	F2

**Tabelle III-4:** Holznutzung und sich daraus ergebende Stromgestehungskosten im Szenario M1

		2002	2005	2007	2010	2015	2020	2025	2030
Mit KWK	Holzmenge [PJ/a]	10,4	10,72	15,99	19,6	31,8	31,8	36,25	36,26
	Holzpreis [Ct/kWh]	-0,18	-0,17	0,01	0,08	0,23	0,23	0,30	0,30
	Stromgestehungskosten der Holzfeuerungen [Ct/kWh] <sup>a</sup>	1,5	1,5	1,7	1,8	2,2	2,2	2,4	2,4
Ohne KWK	Holzmenge [PJ/a]	-	-	0,72	10,4	10,4	16,27	24,15	25,86
	Holzpreis [Ct/kWh]	-	-	-0,18	-0,18	-0,18	0,017	0,15	0,17
	Stromgestehungskosten der Holzfeuerungen [Ct/kWh]	-	-	2,7	2,7	2,7	2,9	3,0	3,0
Stromgestehungskosten fossiler Anlagen [Ct/kWh] <sup>b</sup>		2,6	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,1	3,1
<p><sup>a</sup>: Unter Berücksichtigung einer Wärmevergütung von 7,7 €/MWh. Dies entspricht der durchschnittlichen Vergütung auf Kraftwerksebene.</p> <p><sup>b</sup>: Entspricht den Stromgestehungskosten im Szenario M2</p>									



**Abbildung III-1:** Entwicklung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen



**Abbildung III-2:** Entwicklung der spezifischen SO<sub>2</sub>-Emissionen

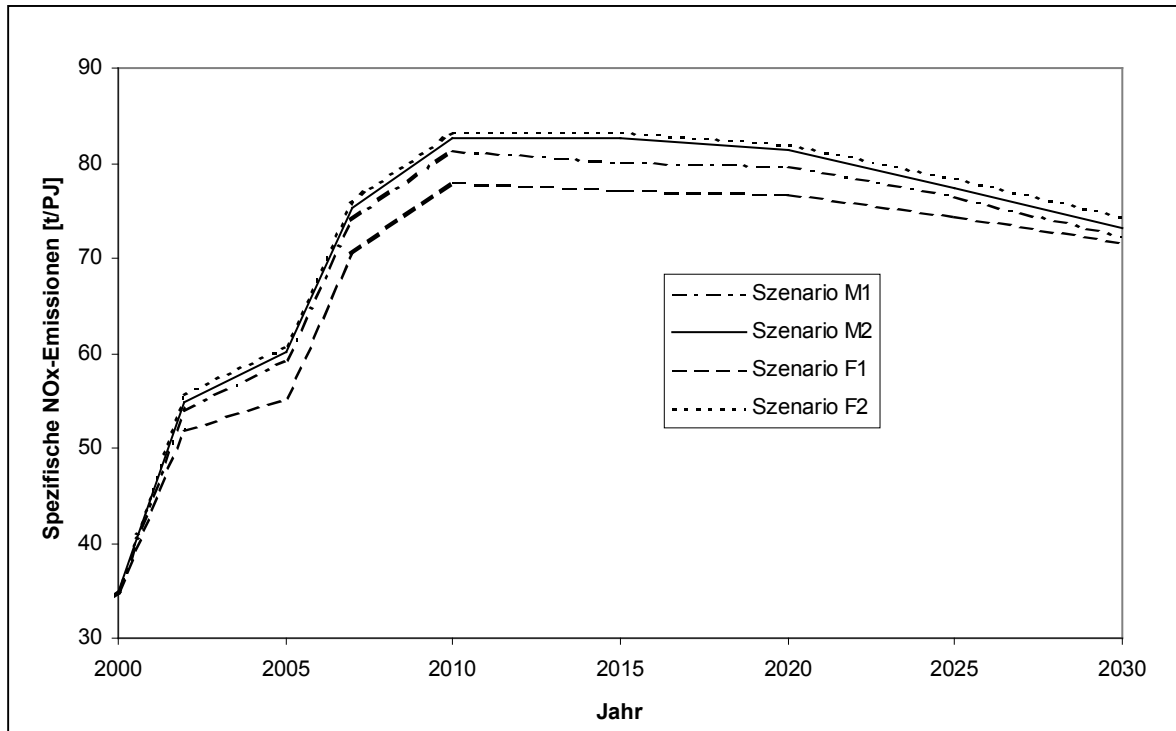


Abbildung III-3: Entwicklung der spezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen

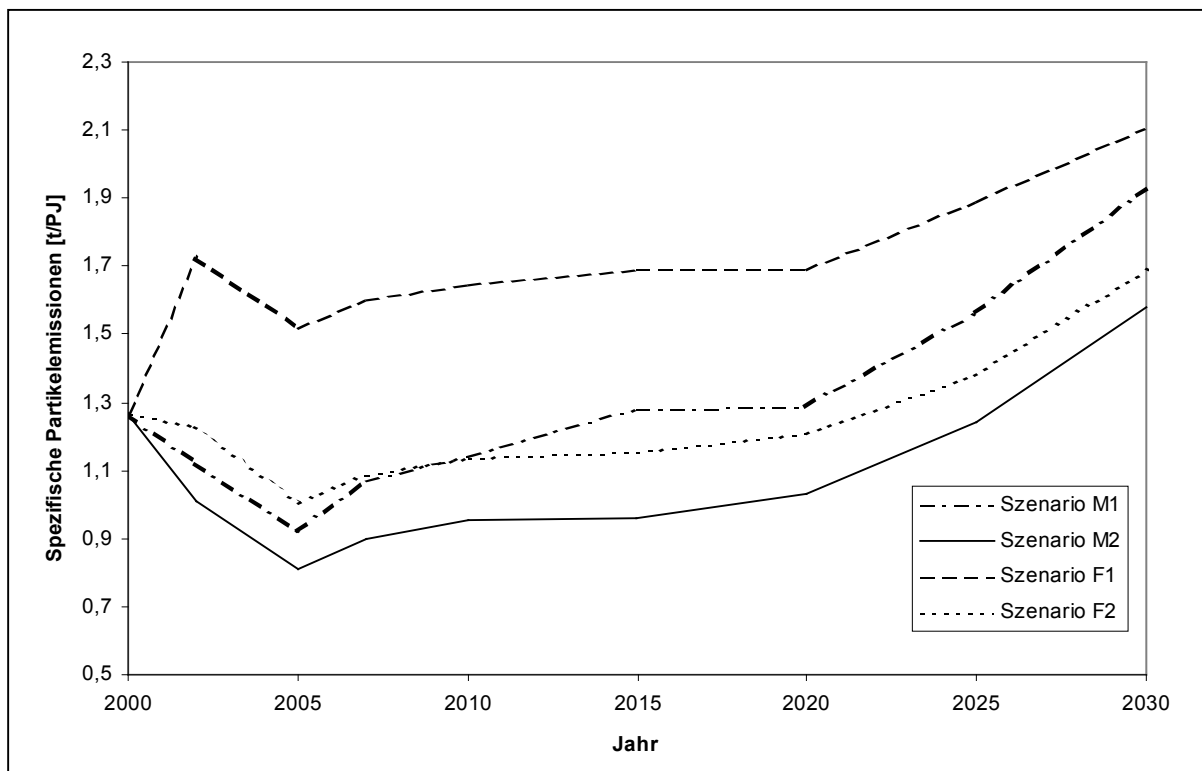


Abbildung III-4: Entwicklung der spezifischen Partikelemissionen

## Anhang IV – Rahmendaten zur Stadt Stutensee

**Tabelle IV-1:** Rahmendaten zur Stadt Stutensee

<b>Bevölkerung und Erwerbsstruktur</b>		
Einwohnerzahl ( Stand: 1999)	21.375	[SRD 00]
Erwartete Entwicklung der Einwohnerzahl bis 2010:	+ 13...30,5 %	[FNP 2010]
Versicherungspflichtig beschäftigte Arbeitnehmer in Industriebetrieben (1995):	3.807	[SRD 00]
davon im produzierenden Gewerbe	54,3%	
im Dienstleistungssektor	45,7 %	
Beschäftigte in Handwerksbetrieben (1995):	1.276	[SRD 00]
davon im Metallgewerbe	40,5 %	
im Bau- und Ausbaugewerbe	22,9 %	
im Holzgewerbe	7,0 %	
<b>Flächennutzung</b>		
Gemarkungsfläche	4.567 ha	[SRD 00]
davon Siedlungs- und Verkehrsfläche	14,6 %	
Landwirtschaftsfläche	40,9 %	
Waldfläche auf der Gemarkung	42,9 %	
Wasserfläche	0,9 %	
übrige Nutzungsarten	0,5 %	
Waldfläche pro Einwohner	0,09 ha	
<b>Gebäudebestand</b>		
Anzahl Wohngebäude (Stand: 1999)	4.980	[RENTZ ET AL 00]
Wohnfläche insgesamt (Stand: 1999)	890.475 m <sup>2</sup>	[RENTZ ET AL 00]
davon erbaut bis 1900	7 %	
1901-1918	4 %	
1919-1948	7 %	
1949-1957	7 %	
1958-1968	17 %	
1969-1978	27 %	
1979-1987	15 %	
1988-1999	15 %	

