

# Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

**Dipl.-Ing. Kirsten Biemann**

geboren in Friedrichshafen

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Technischen Universität Darmstadt  
(D17) zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte  
Dissertation

**Referenten:**

Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek, Technische Universität Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner, Ruhr- Universität Bochum

Tag der Einreichung: 15.10.2014

Tag der mündlichen Prüfung: 28.11.2014

Darmstadt, 2015



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungs- und Formelverzeichnis .....	12
Zusammenfassung .....	15
Abstract .....	16
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>17</b>
1.1 Motivation und Hintergrund.....	17
1.2 Problemstellung .....	20
1.3 Vorgehensweise .....	20
1.4 Aufbau der Arbeit.....	21
<b>2 Wärme- und Stromerzeugung aus Holzreststoffen .....</b>	<b>23</b>
2.1 Eigenschaften von Holzreststoffen zur energetischen Nutzung.....	23
2.1.1 Allgemeine Eigenschaften .....	23
2.1.2 Waldrestholz.....	24
2.1.3 Landschaftspflegeholz .....	24
2.1.4 Industrierestholz und A1 Holzpellets .....	25
2.1.5 Luftschadstoffe bei der Holzverbrennung.....	25
2.1.6 Entsorgung der Holzaschen .....	28
2.2 Hackschnitzel- und Pelletkessel .....	28
2.2.1 Hackschnitzelkessel .....	28
2.2.2 Pelletzentralheizungen .....	29
2.3 Holz- Heizkraftwerke.....	29
2.3.1 Dampfturbinen- Heizkraftwerke.....	30
2.3.2 Organic Rankine Cycle Anlagen .....	31
2.3.3 Holzvergaser- Blockheizkraftwerk .....	33
<b>3 Netzgebundenen Hauswärmeversorgung .....</b>	<b>35</b>
3.1 Zentrale und semi- zentrale Wärmenetze und ihre wichtigsten Komponenten .....	35

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

3.2	Auslegung eines Wärmenetzes .....	36
<b>4</b>	<b>Methodische Grundlagen der Arbeit .....</b>	<b>39</b>
4.1	Ausgewählte Aspekte der Ökobilanzierung .....	39
4.1.1	<i>Prozesskettenmodellierung nach BioEnergieDat</i> .....	39
4.1.2	<i>Allokationsverfahren</i> .....	40
4.1.3	<i>Wirkungsabschätzungsmethoden</i> .....	41
4.1.4	<i>Datenqualität</i> .....	44
4.2	Anmerkungen zur Bestimmung der Wärmegestehungskosten .....	48
4.2.1	<i>Kapitalgebundene Kosten</i> .....	49
4.2.2	<i>Bedarfsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten</i> .....	50
<b>5</b>	<b>Modellierung der Wärmenetzinfrastruktur .....</b>	<b>51</b>
5.1	Vorstellung der Fallbeispiele .....	51
5.1.1	<i>Siedlungstypen</i> .....	51
5.1.2	<i>Häuser und Abstände</i> .....	51
5.1.3	<i>Hauswärmebedarf für Heizung und Trinkwasser</i> .....	52
5.1.4	<i>Modellierte semi- zentrale Netzvarianten</i> .....	53
5.2	Wärmenetzauslegung .....	54
5.2.1	<i>Rohrnetzdimensionierung in RDesign</i> .....	55
5.2.2	<i>Auslegung der Wärmeerzeuger in WDesign</i> .....	58
5.2.3	<i>Umrechnung der Stücklisten in Materialmengen</i> .....	59
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Wärmegestehungskosten .....</b>	<b>63</b>
6.1	Wärmegestehungskosten der Heiz(kraft)werke .....	63
6.1.1	<i>Berechnung kapitalgebundenen Kosten</i> .....	63
6.1.2	<i>Berechnung der bedarfsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten</i> .....	64
6.2	Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Netze .....	68
6.2.1	<i>Berechnung der Investitionskosten und der kapitalgebundenen Kosten</i> .....	68
6.2.2	<i>Berechnung der bedarfsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten</i> .....	68
<b>7</b>	<b>Modellierung der Ökobilanzen .....</b>	<b>70</b>
7.1	Das modellierte System .....	70

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

7.2	Stand der Literatur .....	71
7.2.1	Ökobilanzen zu Energie aus Holz .....	72
7.2.2	Ökobilanzen der netzgebundenen Wärmeversorgung .....	72
7.3	Allgemeines Vorgehen bei der Modellierung von qualitativ hochwertigen Prozessketten .....	74
7.3.1	Verbesserungspotenzial der Datenqualitätsbewertungsmethoden .....	75
7.3.2	Erstellung eines Sachbilanzdatensatzes aus Primärdaten .....	76
7.3.3	Systematische Herangehensweise zur Qualitätssicherung bei der Erstellung von Sachbilanzen aus Literaturdaten .....	77
7.3.4	Anwendungsbeispiel: Biomasse- Organic Rankine Cycle Anlage .....	80
7.3.5	Fazit zur systematischen Herangehensweise .....	89
7.4	Modellierung der Holzbereitstellung .....	90
7.4.1	Bereitstellung von Waldrest- und Landschaftspflegeholz hackschnitzel mit mobilem Dieselhacker .....	91
7.4.2	Industrierestholz hackschnitzelbereitstellung mit stationärem Stromhacker .....	93
7.4.3	Pelletbereitstellung .....	95
7.4.4	Stromerzeugung .....	97
7.5	Modellierung der Holzheiz(kraft)werke und Holzheizungen .....	98
7.5.1	Hackschnitzelkessel mit 800 kW .....	98
7.5.2	Hackschnitzelkessel 50 kW .....	100
7.5.3	Pelletzentralheizung .....	102
7.5.4	Organic Rankine Cycle Anlage .....	103
7.5.5	Dampfturbinen- Heizkraftwerk .....	107
7.5.6	Holzvergaser- Blockheizkraftwerk .....	109
7.6	Modellierung der Wärmenetze .....	113
7.6.1	Modellierung der semi- zentralen Wärmenetze .....	113
7.6.2	Modellierung des zentralen Wärmenetzes .....	115
<b>8</b>	<b>Umweltwirkungen und ausgewählte Kosten der holzbasierten Wärmeversorgung .....</b>	<b>119</b>
8.1	Umweltwirkungen der Holzbrennstoffbereitstellung .....	120
8.2	Umweltwirkungen der Hausheizungen .....	123
8.3	Umweltwirkungen der Heiz(kraft)werke .....	127

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

8.3.1	<i>Umweltwirkungen der Holzheiz(kraft)werke und Gaskessel</i> .....	128
8.3.2	<i>Sensitivitätsanalyse am Beispiel der ORC- Anlage mit Waldrestholz</i> .....	134
8.3.3	<i>Einfluss der verschiedenen Holzreststoffe auf die Umweltwirkungen</i> .....	136
8.4	Umweltwirkungen und Kosten der semi- zentralen Wärmeversorgungskonzepte .....	141
8.4.1	<i>Relevanz unterschiedlicher Abnehmergrößen</i> .....	142
8.4.2	<i>Relevanz der Hausabstände und der Entfernung zur Heizzentrale am Beispiel der Einfamilienhäusersiedlung</i> .....	147
8.4.3	<i>Relevanz unterschiedlicher Rohrsysteme auf die Umweltwirkungen am Beispiel der Einfamilienhäusersiedlung</i> .....	149
8.4.4	<i>Einfluss der verwendeten Heiz(kraft)werke am Beispiel der Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser</i> .....	152
8.5	Umweltwirkungen der Wärmeversorgung eines Wohnhauses: Vergleich dezentraler und semi-zentraler Wärmeversorgungskonzepte .....	156
8.6	Umweltwirkungen der Wärmeversorgung einer typischen deutschen Wohnsiedlung: Vergleich dezentraler, semi- zentraler und zentraler Wärmeversorgungskonzepte .....	159
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>163</b>
9.1	Zusammenfassung .....	163
9.2	Diskussion der Ergebnisse .....	163
9.3	Ausblick .....	166
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>168</b>
	<b>Anhang 1: Wirkungsabschätzungsmethoden</b> .....	<b>178</b>
	<b>Anhang 2: Sachbilanzen des Heizkraftwerkanlagenbaus</b> .....	<b>179</b>
	<b>Anhang 3: Wärmenetzmodellierung</b> .....	<b>183</b>
	<b>Anhang 4: Kosten der Wärmenetzinfrastruktur</b> .....	<b>189</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung der Fernwärmepotenziale der Haushalte bis zum Jahr 2050.....	18
Abbildung 1-2: Wärmeerzeugung aus Biomasse und Biogas nach Energieträgern .....	19
Abbildung 2-1: Temperatur- Entropie Diagramm einer Dampfturbine .....	30
Abbildung 2-2: Vereinfachtes Schaltbild eines Dampfturbinenprozesses .....	30
Abbildung 2-3: Vereinfachtes Schaltbild des ORC- Prozesses .....	32
Abbildung 2-4: Temperatur- Entropie Diagramm des ORC- Prozesses .....	32
Abbildung 3-1: Strahlförmige und vermaschte Wärmenetzstruktur .....	35
Abbildung 3-2: Beispielhafte Jahresdauerlinie .....	38
Abbildung 4-1: Wirkungskategorien in der Mitte der Wirkungskette und am Wirkungsendpunkt.....	42
Abbildung 5-1: Strahlförmiges Wärmenetz (schematische Darstellung) für freistehende Häuser.....	55
Abbildung 5-2: Strahlförmiges Wärmenetz (Ausschnitt) für Doppelhäuser .....	56
Abbildung 5-3: Beispielhafte Jahresdauerlinie für ein Wärmenetz mit Hackschnitzelkessel 800 kW .....	58
Abbildung 5-4: Aufbau eines Kunststoffmantelrohres.....	59
Abbildung 5-5: Rohrgraben .....	60
Abbildung 5-6: Abzweiger .....	61
Abbildung 5-7: TwinPipes.....	61
Abbildung 5-8: Rohrgraben TwinPipes .....	62
Abbildung 7-1: Prozessketten der Wärmebereitstellung aus Holz .....	71
Abbildung 7-2: Steigerung der Emissionen durch Berücksichtigung der Wärmeverteilung .....	73
Abbildung 7-3: Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen der harmonisierten Prozesse .....	87
Abbildung 7-4: Kohlendioxid-, Staub- und NMVOC- Emissionen der harmonisierten Prozesse.....	88
Abbildung 7-5: Prozesskette der Waldrestholzbereitstellung.....	92
Abbildung 7-6: Prozesskette der Landschaftspflegeholzbereitstellung .....	93
Abbildung 7-7: Prozesskette der Industrierestholzbereitstellung.....	94
Abbildung 7-8: Prozesskette der Pelletbereitstellung.....	95
Abbildung 7-9: Nettostromerzeugung in Deutschland 2011 nach Primärenergieträgern.....	97
Abbildung 7-10: Schematische Darstellung: Hackschnitzelkessel 800 kW.....	98

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Abbildung 7-11: Prozesskette Hackschnitzelkessel 800 kW mit Waldrestholz .....	99
Abbildung 7-12: Prozesskette Hackschnitzelkessel 50 kW .....	101
Abbildung 7-13: Schematische Darstellung: Prozesskette der Pelletzentralheizung 10 kW.....	102
Abbildung 7-14: Prozesskette Pellet 10 kW .....	103
Abbildung 7-15: Schematische Darstellung der Prozesskette zur ORC- Anlage.....	104
Abbildung 7-16: Prozesskette der ORC- Anlage mit Waldrestholz.....	105
Abbildung 7-17: Schematische Darstellung: Prozesskette der Heizkraftwerke .....	107
Abbildung 7-18: Schematische Darstellung: Prozesskette Holzvergaser- Blockheizkraftwerk .....	110
Abbildung 7-19: Prozesskette Holzvergaser- Blockheizkraftwerk.....	111
Abbildung 7-20: Schematische Darstellung der Prozesskette mit (semi-) zentralem Wärmenetz .....	113
Abbildung 7-21: Prozesskette semi- zentrales Wärmenetz (allgemein) .....	114
Abbildung 7-22: Prozesskette zentrales Wärmenetz .....	116
Abbildung 8-1: Prozessketten der Wärmebereitstellung aus Holz .....	119
Abbildung 8-2: Prozesskettenabschnitt der Holzbereitstellung.....	120
Abbildung 8-3: Kumulierter nicht- regenerativer Energieaufwand der Holzbereitstellung pro MJ <sub>Holz</sub> .....	121
Abbildung 8-4: Sommersmog, Versauerung und Treibhausgase der Holzbereitstellung .....	122
Abbildung 8-5: Eutrophierung, Feinstaub, Ozonabbau und terr. Eutrophierung der Holzbereitstellung.....	122
Abbildung 8-6: Prozesskettenabschnitt der Heizung .....	123
Abbildung 8-7: Treibhausgase der Hausheizungen .....	124
Abbildung 8-8: Feinstaub der Hausheizungen.....	125
Abbildung 8-9: Ozonabbau und Eutrophierung der Hausheizungen .....	126
Abbildung 8-10: Versauerung, terrestrische Eutrophierung und Sommersmog der Hausheizungen .....	127
Abbildung 8-11: Prozesskettenabschnitt der Wärmebereitstellung im Heiz(kraft)werk.....	128
Abbildung 8-12: Kumulierter Energieaufwand der Heiz(kraft)werke .....	129
Abbildung 8-13: Treibhausgaspotenzial der Heiz(kraft)werke.....	130
Abbildung 8-14: Feinstaubemissionen der Heiz(kraft)werke.....	131
Abbildung 8-15: Ozonabbau und Eutrophierung der Heiz(kraft)werke .....	132
Abbildung 8-16: Sommersmog, Versauerung und terrestrische Eutrophierung der Heiz(kraft)werke .....	133
Abbildung 8-17: Sensitivität durch Allokationsmethoden .....	135



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Abbildung 8-18: Sensitivität: Deckung des Eigenstrombedarfes aus dem Netz .....	136
Abbildung 8-19: Fossile Kohlendioxidemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen .	138
Abbildung 8-20: Stickoxidemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen.....	139
Abbildung 8-21: Staubemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen .....	140
Abbildung 8-22: Kohlenmonoxidemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen.....	141
Abbildung 8-23: Prozesskettenabschnitt der semi- zentralen Wärmenetze .....	142
Abbildung 8-24: Kumulierter Energieaufwand der semi- zentralen Wärmenetze.....	143
Abbildung 8-25: Treibhausgasemissionen der semi- zentralen Wärmenetze .....	144
Abbildung 8-26: Feinstaubemissionen der semi- zentralen Wärmenetze .....	145
Abbildung 8-27: Eutrophierung und Ozonabbau der semi- zentralen Wärmenetze .....	145
Abbildung 8-28: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung und Versauerung der semi- zentralen Netze.....	146
Abbildung 8-29: Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Netze .....	147
Abbildung 8-30: Treibhausgase, Feinstaub, Eutrophierung und Ozonabbau: Variation der Abstände .....	148
Abbildung 8-31: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung und Versauerung: Variation der Abstände .....	149
Abbildung 8-32: Kumulierter Energieaufwand bei Variation des Rohrsystems .....	150
Abbildung 8-33: Treibhausgase, Feinstaub, Eutrophierung und Ozonabbau bei Variation des Rohrsystems...	151
Abbildung 8-34: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung, Versauerung bei Variation des Rohrsystems....	151
Abbildung 8-35: Wärmegestehungskosten bei Variation der Rohre .....	152
Abbildung 8-36: Treibhausgase bei Variation des Holzheiz(kraft)werkes.....	153
Abbildung 8-37: Feinstaub bei Variation des Holzheiz(kraft)werks .....	154
Abbildung 8-38: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung, Versauerung bei Variation des Holzheiz(kraft)werks.....	154
Abbildung 8-39: Eutrophierung und Ozonabbau bei Variation des Holzheiz(kraft)werks .....	155
Abbildung 8-40: Wärmegestehungskosten bei Variation des Holzheiz(kraft)werks.....	156
Abbildung 8-41: Prozessketten der dezentralen und semi- zentralen Wärmeerzeugung aus Holz.....	157
Abbildung 8-42: Dezentrale und semi- zentrale Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern.....	158
Abbildung 8-43: Dezentrale und semi- zentrale Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern.....	159
Abbildung 8-44: Dezentrale, semi- zentrale und zentrale Wärmeversorgung im Vergleich.....	160
Abbildung 8-45: Treibhausgase, Eutrophierung, Ozonabbau und Feinstaub beim zentralen und semi- zentralen Netz mit gemischten Abnehmern .....	161

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

---

Abbildung 8-46: Sommersmog, Versauerung und terrestrische Eutrophierung beim zentralen und semi-  
zentralen Netz mit gemischten Abnehmern .....162

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Eigenschaften von A1 Pellets.....	25
Tabelle 2-2: Partikelgrößen im Reingasstaub.....	27
Tabelle 2-3: Grenzwerte 1. BImSchV für FWL < 1MW.....	27
Tabelle 2-4: Grenzwerte TA Luft 2002 für FWL > 1MW .....	27
Tabelle 2-5: Grenzwerte TA Luft 2002 Nr. 5.1.4.1 für Holzvergaser- Blockheizkraftwerke .....	27
Tabelle 4-1: Luftemissionen aus der Holzverbrennung und Wirkungskategorien.....	44
Tabelle 4-2: Datenqualität.....	45
Tabelle 4-3: Pedigree Matrix .....	47
Tabelle 5-1: Ausgewählte Abnehmer .....	53
Tabelle 5-2: Untersuchte semi- zentrale Netzvarianten .....	54
Tabelle 5-3: Netzstruktur in RDesign für freistehende Häuser .....	57
Tabelle 6-1: Preisniveau in Deutschland und Italien .....	63
Tabelle 6-2: Investitionskosten unterschiedlicher ORC- Anlagen .....	63
Tabelle 6-3: Investitionskosten für Hackschnitzelkessel .....	64
Tabelle 6-4: Technische Eigenschaften der Heiz(kraft)werke .....	65
Tabelle 6-5: Grundvergütung und NaWaRo Bonus nach EEG 2009 .....	66
Tabelle 6-6: Vergütung nach EEG 2009 .....	66
Tabelle 6-7: Ermittlung der Wärmegestehungskosten für die Heiz(kraft)werke.....	67
Tabelle 6-8: Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Netze .....	69
Tabelle 7-1: Untersuchte Wärmebereitstellungskonzepte: Konversionstechnologien und Brennstoffe .....	70
Tabelle 7-2: Literaturanalyse.....	82
Tabelle 7-3: Literaturdaten der Emissionen einer ORC- Anlage pro kWh Strom oder Wärme.....	82
Tabelle 7-4: Geographie, Zeit und Technologie (Zahlen in Klammern: korrigierte Jahreszahlen) .....	83
Tabelle 7-5: Methodische Angemessenheit.....	84
Tabelle 7-6: Elementarflüsse.....	84
Tabelle 7-7: Verlässlichkeit und Vollständigkeit.....	85
Tabelle 7-8: Bewertung des fertigen Datensatzes.....	89

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Tabelle 7-9: Technische Daten des mobilen Hackers .....	91
Tabelle 7-10: Emissionen aus der Dieselerbrennung .....	91
Tabelle 7-11: Waldrestholzbereitstellung .....	92
Tabelle 7-12: Kenndaten der Landschaftspflegeholzbereitstellung.....	93
Tabelle 7-13: Landschaftspflegeholzbereitstellung .....	93
Tabelle 7-14: Daten des stationären Hackers.....	94
Tabelle 7-15: Bereitstellung mit stationärem Hacker .....	94
Tabelle 7-16: Nassvermahlung .....	95
Tabelle 7-17: Daten des Bandrockners .....	96
Tabelle 7-18: Bandrockner .....	96
Tabelle 7-19: Daten der Pelletierung.....	96
Tabelle 7-20: Pelletierung.....	96
Tabelle 7-21: Prozess „Strommix Deutschland 2011“ .....	97
Tabelle 7-22: Verbrennungseigenschaften des Holzes .....	98
Tabelle 7-23: Technische Kenndaten des Hackschnitzelkessels 800 kW .....	99
Tabelle 7-24: Inputs und Outputs des Hackschnitzelkessels 800 kW pro MJ.....	100
Tabelle 7-25: Emissionsdaten der Hackschnitzelkessel 800 kW pro MJ .....	100
Tabelle 7-26: Technische Kenndaten des Hackschnitzelkessels 50 kW .....	101
Tabelle 7-27: Inputs und Outputs des Hackschnitzelkessels 50 kW pro MJ.....	101
Tabelle 7-28: Emissionsdaten des Hackschnitzelkessel 50 kW pro MJ .....	102
Tabelle 7-29: Technische Kenndaten Pellet 10 kW .....	102
Tabelle 7-30: Inputs und Outputs der Pelletzentralheizung 10 kW pro MJ .....	103
Tabelle 7-31: Emissionsdaten der Pelletzentralheizung 10 kW pro MJ .....	103
Tabelle 7-32: Kenndaten der ORC- Anlage .....	104
Tabelle 7-33: ORC- Anlage: Inputs und Outputs der ORC- Anlage pro MJ <sub>th</sub> .....	106
Tabelle 7-34: Emissionsdaten der ORC- Anlagen pro MJ <sub>th</sub> .....	106
Tabelle 7-35: Technische Daten der Heizkraftwerke.....	108
Tabelle 7-36: Inputs und Outputs des Heizkraftwerkes mit Waldrestholz pro MJ <sub>th</sub> .....	108
Tabelle 7-37: Exergetische Gewichtungsfaktoren .....	108

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Tabelle 7-38: Inputs und Outputs des Heizkraftwerkes mit Industrierestholz pro MJ <sub>th</sub> .....	109
Tabelle 7-39: Emissionsdaten der Heizkraftwerke pro MJ <sub>th</sub> .....	109
Tabelle 7-40: Technische Daten des Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes .....	110
Tabelle 7-41: Inputs und Outputs des Vergasers pro MJ <sub>Holzgas</sub> .....	112
Tabelle 7-42: Emissionsdaten des Vergasers pro MJ <sub>Holzgas</sub> .....	112
Tabelle 7-43: Inputs und Outputs des Blockheizkraftwerkes .....	112
Tabelle 7-44: Emissionsdaten des Blockheizkraftwerkes pro MJ <sub>th</sub> (nicht allokiert) .....	113
Tabelle 7-45: Inputs und Outputs des Prozesses „Nahwärmenetz“ pro MJ .....	115
Tabelle 7-46: Inputs und Outputs des Gaskessels 1 MW pro MJ .....	115
Tabelle 7-47: Netzparameter Scharnhäuser Park .....	116
Tabelle 7-48: Inputs und Outputs des Gaskessels 10 MW pro MJ <sub>th</sub> .....	117
Tabelle 7-49: Daten des zentralen Wärmenetzes .....	118
Tabelle 7-50: Inputs und Outputs des Prozesses „Fernwärmenetz“ pro MJ <sub>th</sub> .....	118
Tabelle 8-1: Kenndaten der semi- zentralen Wärmeversorgung der Einfamilienhäusersiedlung .....	142
Tabelle 8-2: Wärmeverluste und Holzenergieanteil bei Variation des Rohrsystems.....	150
Tabelle 8-3: Kenndaten der semi- zentralen Wärmeversorgung der Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser .....	153
Tabelle 9-1: Vor-/ Nachteile der holzbasierten Wärmeversorgungskonzepte gegenüber Gas .....	166

# Abkürzungs- und Formelverzeichnis

## Abkürzungsverzeichnis

C	Vollständigkeit (qualitativer Datenqualitätsindikator)
CFC-11-Eq.	Trichlorfluormethan (CFC-11) Äquivalente
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
EFH	Einfamilienhaus
FWL	Feuerungswärmeleistung
GeR	Geografische Repräsentativität (qualitativer Datenqualitätsindikator)
H <sub>2</sub> O	Wasser
HCl	Chlorwasserstoff
HDPE	Polyethylen hoher Dichte
HKW	Heizkraftwerk
HS Kessel	Hackschnitzelkessel
HÜS	Hausübergabestation
IRH	Industrierestholz
KfW 55	KfW 55 Effizienzhaus
KMR	Kunststoffmantelrohr
KWK	Kraft- Wärme- Kopplung
LPH	Landschaftspflegeholz
M	Methodische Angemessenheit und Konsistenz (qualitativer Datenqualitätsindikator)
MFH	Mehrfamilienhaus
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NMVOG	Nicht- Methan- Kohlenwasserstoffe
NO <sub>2</sub>	Lachgas
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
ORC	Organic Rankine Cycle
P	Präzision (qualitativer Datenqualitätsindikator)
P- Eq.	Phosphoräquivalente
PM2.5- Eq.	Äquivalent an Partikeln der Größe <2,5 µm
PUR	Polyurethan
R	Referenz
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
TCDD	2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin
TeR	Technologische Repräsentativität (qualitativer Datenqualitätsindikator)
TiR	Zeitliche Repräsentativität (qualitativer Datenqualitätsindikator)
Verg.- BHKW (auch BHKW)	Holzvergaser- Blockheizkraftwerk
WRH	Waldrestholz

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

**Formelverzeichnis**

<b>Abkürzung</b>	<b>Verwendung</b>	<b>Einheit</b>
a	<b>Abstand</b> auch: Abstand zur Heizzentrale ( $a_{\text{zentrale}}$ ), Abstand der Straßen ( $a_{\text{Straße}}$ ), Hausabstand ( $a_{\text{Haus}}$ )	[m]
A	<b>Wohnfläche</b>	[m <sup>2</sup> ]
A <sub>0</sub>	<b>Investitionsbetrag</b>	Euro
A <sub>1...n</sub>	<b>Ersatzbeschaffungen in den Perioden 1 bis n</b>	Euro
A <sub>Abriss</sub>	<b>Kosten für den Abriss</b>	Euro
a <sub>F</sub>	<b>Annuitätsfaktor</b>	-
A <sub>N, K</sub>	<b>Annuität der kapitalgebundenen Kosten</b>	-
AG	<b>Aschegehalt</b>	-
b <sub>Haus</sub>	<b>Hausbreite</b>	[m]
d <sub>a</sub>	<b>Außendurchmesser</b>	[m]
E	<b>Exergie</b>	[MWh]
GF	<b>Gleichzeitigkeitsfaktor</b>	-
h <sub>Vollast</sub>	<b>Vollaststunden pro Jahr</b> auch: Vollaststunden Strom ( $h_{\text{Vollast, th}}$ ), Vollaststunden Wärme ( $h_{\text{Vollast, el}}$ ), Vollaststunden Vergaser ( $h_{\text{Vollast, Vergaser}}$ )	[h/ a]
h <sub>Betrieb</sub>	<b>Betriebsstunden pro Jahr</b> auch: Betriebsstunden pro Jahr des Strom- ( $h_{\text{Betrieb, Stromhacker}}$ ) oder Dieselhackers ( $h_{\text{Betrieb, Dieselhacker}}$ ) bzw. des Trockners ( $h_{\text{Betrieb, Trockner}}$ )	[h/ a]
H <sub>u</sub>	<b>Heizwert (unterer Heizwert)</b> auch: Heizwert Waldrest- ( $H_{u, WRH}$ ), Industrierest- ( $H_{u, IRH}$ ), Landschaftspflegeholz ( $H_{u, LPH}$ ) oder Pellet ( $H_{u, Pellet}$ ), Heizwert Diesel ( $H_{u, Diesel}$ ), Heizwert Holz absolut trocken ( $H_{u, atro}$ ), Heizwert Holzgas ( $H_{u, Holzgas}$ ) in [MJ/ Nm <sup>3</sup> ]	[MJ/ kg] bzw. [MJ/ Nm <sup>3</sup> ]
K <sub>Brennstoff</sub>	<b>Brennstoffkosten pro Jahr</b>	Euro/ a
L	<b>Länge</b> auch: Länge der Hauseinführung ( $L_{\text{HEF}}$ ), Länge des Hauses ( $L_{\text{Haus}}$ ), Länge der Reduktion ( $L_{\text{Reduktion}}$ ), Länge der Abzweiger ( $L_{\text{Abzweiger}}$ )	[m]
LD	<b>Lebensdauer</b> auch: Lebensdauer der Hausübergabestationen ( $LD_{\text{HÜS}}$ ), Lebensdauer des Netzes ( $LD_{\text{Netz}}$ ), Lebensdauer der Asphaltdecke ( $LD_{\text{Asphalt}}$ ), Lebensdauer des Trockners ( $LD_{\text{Trockner}}$ ), Lebensdauer Dieselhacker ( $LD_{\text{Dieselhacker}}$ ), Lebensdauer Stromhacker ( $LD_{\text{Stromhacker}}$ ), Lebensdauer HS Kessel 800 kW ( $LD_{\text{HS Kessel 800 kW}}$ ), Lebensdauer HS Kessel 50 kW ( $LD_{\text{HS Kessel 50 kW}}$ ), Lebensdauer Pelletkessel ( $LD_{\text{Pelletkessel}}$ ), Lebensdauer Gaskessel ( $LD_{\text{Gas}}$ ), Lebensdauer Maschinen- und Elektrotechnik ( $LD_{\text{Maschinen- / Elektrotechnik}}$ ), Lebensdauer Bautechnik ( $LD_{\text{Bautechnik}}$ ), Lebensdauer ORC- Modul ( $LD_{\text{ORC- Modul}}$ ), Lebensdauer Vergaser ( $LD_{\text{Vergaser}}$ ), Lebensdauer BHKW ( $LD_{\text{BHKW}}$ )	[a]
m	<b>Masse</b> auch: Masse Trockner ( $m_{\text{Trockner}}$ ), Wassermasse ( $m_{\text{H}_2\text{O}}$ ), Masse trockener Biomasse ( $m_{\text{BM}}$ ), Masse Asphalt ( $m_{\text{Asphalt}}$ ), Masse Polyethylen hoher Dichte ( $m_{\text{HDPE}}$ ), Masse Polyurethan ( $m_{\text{PUR}}$ ), Masse Sand ( $m_{\text{Sand}}$ ), Masse Stahl ( $m_{\text{Stahl}}$ ), Masse Wasser ( $m_{\text{H}_2\text{O}}$ )	[kg]
m <sub>Asche, pro Jahr</sub>	<b>Masse Asche pro Jahr</b>	[kg/ a]
m <sub>spez.</sub>	<b>Spezifische Masse</b> auch: Spezifische Stahl- ( $m_{\text{Stahl, spez}}$ ), Polyethylen- ( $m_{\text{HDPE, spez}}$ ), Polyurethan- ( $m_{\text{PUR, spez}}$ ), Sand- ( $m_{\text{Sand, spez}}$ ) und Wassermasse ( $m_{\text{H}_2\text{O, spez}}$ ) pro Meter Rohr [kg/m] bzw. pro Stück Abzweiger oder Reduktion [kg/Stück]	[kg/ m] bzw. [kg/ Stück]
m <sub>spez, Vergaser/ BHKW</sub>	<b>Spezifische Masse Vergaser/ BHKW</b> auch: Spezifische Beton- ( $m_{\text{Beton, spez, Vergaser bzw. BHKW}}$ ) und Stahlmasse ( $m_{\text{Stahl, spez,}}$ Vergaser bzw. BHKW)	[kg/ MW]
n	<b>Zahl</b> auch: Zahl der Hausübergabestationen ( $n_{\text{HÜS}}$ ), Personenzahl im Haushalt ( $n_{\text{Personen}}$ )	-

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

P	<b>Leistung</b> auch: elektrische Leistung ( $P_{el}$ ), thermische Leistung ( $P_{th}$ ), Vergaserleistung ( $P_{Vergaser}$ ), Heizgrenzleistung ( $P_{HG}$ ), Leistung der Hausübergabestation ( $P_{HÜS}$ ), gesamte von den Hausübergabestationen abgenommene Leistung ( $P_{ab\ HÜS}$ )	[kW] bzw. [MW]
$P_{Brennstoff}$	<b>Brennstoffkosten</b>	[Euro/ MWh]
q	<b>Zinsfaktor</b>	-
Q	<b>Wärme</b> auch: abgenommene Nahwärme ab Hausübergabestation ( $Q_{ab\ HÜS}$ ), Nahwärme ab Heizhaus ( $Q_{ab\ HH}$ )	[MWh]
$Q_{Heizwärme}$	<b>Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr</b>	[kWh/ m <sup>2</sup> *a]
$Q_{pro\ Jahr}$	<b>Erzeugte Wärmemenge pro Jahr</b>	[MWh/ a]
$Q_{th,\ spez,\ Trockner}$	<b>Spezifischer Wärmebedarf Trockner</b>	[MJ <sub>th</sub> / kg]
$Q_{Verlust}$	<b>Wärmeverluste</b>	-
$Q_{WW}$	<b>Warmwasserbedarf pro Person und Jahr</b>	[kWh/ Person*a]
$R_w$	<b>Restwert</b>	Euro
s	<b>Wandstärke</b>	[m]
$t_{betrachtet}$	<b>Betrachtungszeitraum</b>	[a]
T	<b>Temperatur</b> auch: Umgebungstemperatur $T_u$	[K]
V	<b>Volumen</b> auch: Volumen Aushub ( $V_{Aushub}$ )	[m <sup>3</sup> ]
$V_{Aushub,\ spez}$	<b>Spezifisches Aushubvolumen</b> (pro m Rohr oder Stück Reduktion/ Abweiger)	[m <sup>3</sup> / m] bzw. [m <sup>3</sup> / Stück]
$\dot{V}_{Holz}$	<b>Durchsatz Holz</b> auch: Durchsatz Dieselhacker ( $\dot{V}_{Holz,Dieselhacker}$ ) in [m <sup>3</sup> / h], Durchsatz Stromhacker ( $\dot{V}_{Holz,Stromhacker}$ ) und Durchsatz Pelletierung ( $\dot{V}_{Holz,Pelletierung}$ ) in [kg/ h]	[m <sup>3</sup> / h] bzw. [kg/ h]
$\dot{V}$	<b>Spezifischer Verbrauch</b> Auch: Spezifischer Dieserverbrauch ( $\dot{V}_{Diesel}$ ), spezifischer Hydraulikölverbrauch ( $\dot{V}_{Öl}$ ), spezifischer Schmierölverbrauch ( $\dot{V}_{Schmieröl}$ )	[l/ h] bzw. [kg/ h]
$\dot{V}_{H_2O,verdampft}$	<b>Verdampfungsleistung</b>	[kg <sub>H2O</sub> / h]
$V_{Wasser}$	<b>Wasserverlust</b>	-
w	<b>Wassergehalt</b>	-
W	<b>Spezifische Energie</b> Auch: Energie für die Ernte ( $W_{Ernte}$ ), Zerkleinern ( $W_{Zerkleinern}$ ) und Ein- und Ausladen ( $W_{Ein- und Ausladen}$ )	[kWh/ t]
$W_{el}$	<b>Stromeigenbedarf</b>	[MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>th</sub> ] bzw. [MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>el</sub> ]
$W_{el,\ pro\ Jahr}$	<b>Strombedarf pro Jahr</b>	[MJ <sub>el</sub> / a]
$W_{el,\ spez}$	<b>Spezifischer Strombedarf</b> auch: spezifischer Strombedarf Trockner ( $W_{el,\ spez,\ Trockner}$ ) bzw. Vermahlung ( $W_{el,\ spez,\ Vermahlung}$ ) in [MJ <sub>el</sub> / kg], Spezifischer Strombedarf Vergaser ( $W_{el,\ spez,\ Vergaser}$ ) in [MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>Gas</sub> ]	[MJ <sub>el</sub> / kg] bzw. [MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>Gas</sub> ]
$\rho$	<b>Dichte</b> auch: Dichte Stahl ( $\rho_{Stahl}$ ), Polyethylen ( $\rho_{HDPE}$ ), Polyurethan ( $\rho_{PUR}$ ), Sand ( $\rho_{Sand}$ ), Beton ( $\rho_{Beton}$ ) in [kg/ m <sup>3</sup> ] bzw. Dichte Diesel ( $\rho_{Diesel}$ ), Hydrauliköl ( $\rho_{Öl}$ ) in [kg/ l]	[kg/ m <sup>3</sup> ] bzw. [kg/ l]
$\rho_{Schütt,\ WRH}$	<b>Schüttdichte der Hackschnitzel oder Pellets</b>	[kg/ m <sup>3</sup> ]
$\eta$	<b>Nutzungsgrad</b> auch: elektrischer Nutzungsgrad ( $\eta_{el}$ ), thermischer Nutzungsgrad ( $\eta_{th}$ ), Gesamtnutzungsgrad ( $\eta_{ges}$ ), Nutzungsgrad Gas ( $\eta_{Gas}$ )	-



## Zusammenfassung

Fast 40 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland wurde 2008 gebraucht um Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude bereitzustellen. Um die Umweltlasten zu senken und fossile Ressourcen zu schonen, muss eine Umstrukturierung der Wärmeversorgung erfolgen. Daher sorgen gesetzliche Rahmenbedingungen dafür, dass in Zukunft Wohngebäude besser gedämmt werden, sowie vermehrt durch erneuerbare Energien und über Wärmenetze versorgt werden. Dabei ist der nachwachsende und speicherbare Rohstoff Holz ein attraktiver Energieträger, der jedoch aufgrund begrenzter Potenziale möglichst effizient eingesetzt werden muss. Ein Anschluss der Wohnhäuser über ein Wärmenetz ist attraktiv, da größere Heiz(kraft)werke effizienter betrieben werden können als Einzelheizungen. Die bessere Wärmedämmung der Häuser steht jedoch oft im Gegensatz zum Anschluss an ein Wärmenetz, welches am effizientesten arbeiten kann, wenn viel Wärme auf kleinem Raum abgenommen wird. Daher muss bei Wärmenetzneubauten sorgfältig geprüft werden, ob sie ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind.

In dieser Arbeit werden die Umweltwirkungen der holzbasierten semi- zentralen Hauswärmeversorgung für unterschiedliche Siedlungstypen untersucht. Dabei bedeutet semi- zentral, dass über das Wärmenetz nicht mehr als 500 Abnehmer versorgt werden und die Wärmeerzeuger mit bis zu 5 MW<sub>th</sub> sich in Kundennähe befinden. Neben einem Holzheiz(kraft)werk als Grundlast kommt in holzbasierten Wärmenetzen ein Spitzenlastgaskessel zum Einsatz. Als Methode um die potentiellen Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung zu erfassen kommt eine Ökobilanz nach ISO 14040/44 zum Einsatz. Dabei wird, anders als bei den bisher vorhandenen Ökobilanzen, auch der Bau und Betrieb der Wärmenetze miteinbezogen.

Obwohl die Umweltwirkungen der holzbasierten semi- zentralen Wärmeversorgung stark durch die Wärmebereitstellung dominiert werden zeigt sich, dass eine Betrachtung der Umweltlasten beim Wärmeerzeuger nicht ausreichend ist.

Eine Variation der Rahmenbedingungen hat ergeben, dass es zwei Haupteinflussfaktoren auf die Umweltwirkungen der holzbasierten semi- zentralen Wärmeversorgung gibt. Neben der Wärmebereitstellung im Heiz(kraft)werk hat auch der Siedlungstyp einen großen Einfluss, denn je nach Siedlungstyp variieren die Wärmeabnehmer und die Netzstruktur, und damit auch die Wärmeverluste und der Anteil der Wärme der aus Holzreststoffen produziert wird, sehr stark. Der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ist durch ihre bessere Brennstoffnutzung sowohl ökologisch als auch ökonomisch vorteilhaft. Aufgrund der großen Variation der Wärmeverluste zwischen Einfamilienhäusern mit 23 Prozent und großen Mehrfamilienhäusern mit 4 Prozent schneiden die größeren Abnehmer immer besser ab. Da bei der Holznutzung weniger Treibhausgasemissionen, ein geringerer Ozonabbau und weniger fossile Ressourcen gegenüber der Gasnutzung anfallen, ist ein höherer Holzenergieanteil vorteilhaft. Allerdings treten dann auch erhöhte Feinstaubemissionen auf.

Eine Überprüfung der Wirtschaftlichkeit hat zudem gezeigt, dass eine Umstellung auf eine holzbasierte semi- zentrale Hauswärmeversorgung für Mehrfamilienhäusersiedlungen ökonomisch realisierbar ist. Holzbasierte semi- zentrale Netze in Einfamilienhäusersiedlungen lohnen sich ökonomisch jedoch oft nicht.

Ein Vergleich der holzbasierten semi- zentralen Wärmeversorgung mit der heute vorherrschenden dezentralen Nutzung von Erdgas zeigt ein großes Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasen, Ozonabbau und fossilen Ressourcen bei Nutzung der holzbasierten Variante. Allerdings steigen die Feinstaubemissionen stark, Sommersmog, Versauerung, terrestrische Eutrophierung und teilweise auch die aquatische Eutrophierung leicht an. Lediglich durch die Nutzung eines Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes können die Feinstaubemissionen verringert werden. Ähnliches gilt auch für ein holzbasiertes zentrales Wärmenetz.

Auch bei der dezentralen Wärmeversorgung aus Holz sinken Treibhausgase, Ozonabbau und fossile Ressourcennutzung, jedoch steigen die Feinstaubemissionen extrem stark an. Sie liegen über 1.000 Prozent über denen der dezentralen Gasnutzung.

## Abstract

In 2008 almost 40 percent of the German final energy demand was used for room heating and hot water supply. To decrease environmental burdens and to save fossil resources a restructuring of the heating sector is needed. Therefore legislation enforces higher insulation standards of buildings and a more frequent use of renewable energies as well as heating networks. Wood as a renewable and storable energy source is an attractive fuel. However, it must be used as efficiently as possible because of limited wood supplies. Connecting buildings via a heating network is a good option since bigger heating plants can operate at higher efficiencies than small heaters. However, the higher insulation standards of the buildings often oppose the construction of a heating network, because heating networks work best with high energy demands and low network lengths. Therefore the environmental and economic feasibility of new heating networks needs to be checked beforehand.

This thesis explores the environmental burdens of different semi- centralized heating networks using wood residues as fuel. A semi- centralized heating network is a network with no more than 500 customers and a heating plant with less than 5 MW<sub>th</sub>. While wood residues are used in the base load plant, peak load is covered by a gas heating plant.

As a method to analyze the potential environmental burdens of the heat supply a life cycle assessment according to ISO 14040/44 is used. Opposed to former life cycle assessment studies, construction and operation of the network is included in the assessment.

Even though the environmental impacts of the semi- centralized heating from wood residues are dominated by the heat supply, an observation of the impacts solely at the heating plant is not sufficient.

By varying the boundary conditions of the heating network two main contributors to the environmental impacts are found. In addition to the heat production at the plant the type of the buildings in the settlement has a huge impact. Heat demanders and network structure vary for the different settlement types. This impacts the heat losses and the amount of energy generated from wood in the network.

Combined heat and power plants promise higher fuel utilization. They decrease costs and environmental impacts.

The heat losses in the network vary greatly between 23 percent for small single-family houses and 4 percent for big multi-family buildings. Therefore networks with bigger heat demanders have lower environmental burdens.

From an economic point of view the conversion from a gas heater to the connection of a multi- family building to a semi- centralized heating network using wood residues as fuel is worthwhile. However for a single-family building this is often not the case.

A comparison between the semi- centralized heat supply from wood residues and the commonly used heat supply from gas heaters shows a large potential to decrease greenhouse gas emissions, ozone depletion and fossil resource usage when using the first variant. However, it increases particulate matter formation, photochemical oxidant formation, eutrophication, and acidification. Only the usage of a wood gasification and a combined heat and power plant decreases particulate matter formation slightly. Similar results were obtained for a centralized heating network using wood residues as fuel.

Using wood heaters in the buildings further decreases greenhouse gas emissions, ozone depletion and fossil resources, but results in an increased particulate matter formation. This particulate matter formation is over 1.000 percent bigger than for gas heaters.

## **1 Einleitung**

### **1.1 Motivation und Hintergrund**

Eine der größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts wird der Umgang mit den endlichen fossilen Ressourcen und die Minimierung der von Menschen verursachten Umweltverschmutzung, sowie dem Klimawandel sein. Deswegen hat sich die Bundesrepublik Deutschland ehrgeizige Energieeinspar- und Klimaziele gesetzt. So soll der Primärenergieverbrauch bis 2020 gegenüber 2008 um 20 Prozent und bis 2050 um 50 Prozent sinken. Zudem soll bis 2020 der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch auf 18 Prozent bzw. auf 60 Prozent bis 2050 steigen. Diese Maßnahmen unterstützen die Erreichung der Klimaziele, nach denen gegenüber dem Referenzjahr 1990 eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 40 Prozent bis 2020 und um 80 Prozent bis 2050 gefordert wird [Bundesregierung 2012].

Bei der Erreichung dieser Ziele wird die Wärmebereitstellung eine Schlüsselrolle spielen, denn im Jahr 2008 wurden in Deutschland etwa 60 Prozent des Endenergieverbrauchs dafür genutzt Raum- und Prozesswärme sowie Warmwasser bereitzustellen. Dies entsprach etwa 40 Prozent der energiebedingten Kohlendioxidemissionen in Deutschland. Über 58 Prozent des Endenergieverbrauchs für Wärme entfielen dabei auf die Raumwärme und die Warmwasserbereitung. Dabei lag der Anteil an fossilen Energieträgern für diese Wärmebereitstellung bei 72 Prozent [Leitstudie 2011]. Alleine im Gebäudebereich soll es deswegen nach [Bundesregierung 2012] gegenüber dem Jahr 2008 zu einer Einsparung im Primärenergieverbrauch von 80 Prozent kommen.

Zur Umstrukturierung und Optimierung des Wärmesektors werden nach [Bundesregierung 2012] drei Elemente zum Einsatz kommen: Effizienzsteigerungen (bessere Wärmedämmung der Gebäude und verbesserte Anlagentechnik), verstärkte Nutzung der Kraft- Wärme- Kopplung und der Ausbau der erneuerbaren Energien.

Um Effizienzsteigerungen durch bessere Wärmedämmung der Wohngebäude zu erreichen, werden in der Energieeinsparverordnung [EnEV 2009] alle Hauseigentümer verpflichtet, bei Neubauten und bei der Sanierung älterer Häuser gewisse energetische Mindeststandards einzuhalten.

Die verstärkte Nutzung der Kraft- Wärme- Kopplung und der erneuerbaren Energien wird durch das Erneuerbare Wärme Gesetz (EEWärmeG) gefördert. Es sorgt dafür, dass ein bestimmter Teil der benötigten Hauswärme durch erneuerbare Energien (Geothermie, Umweltwärme, Sonnenenergie und Biomasse) gedeckt werden muss. Bei der dezentralen Nutzung von fester Biomasse müssen 50 Prozent der Wärme über erneuerbare Energien bereitgestellt werden. Statt des Einsatzes von erneuerbaren Energien kann die Nutzungspflicht auch durch Ersatzmaßnahmen erfüllt werden, wie die Nutzung von Abwärme, die Nutzung hocheffizienter Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen, die Steigerung der Energieeffizienz eines Gebäudes von mehr als 15 Prozent gegenüber den Vorschriften aus der EnEV oder durch den Anschluss an ein Wärmenetz. Dabei muss die Energie in diesem Wärmenetz entweder zu einem wesentlichen Anteil aus erneuerbaren Quellen stammen oder zu mindestens 50 Prozent in Kraft- Wärme- Kopplung oder aus Abwärme erzeugt werden [EEWärmeG].

Diese gesetzlichen Randbedingungen tragen also dazu bei, dass in Zukunft Wohngebäude vermehrt dezentral zu mindestens 50 Prozent über erneuerbare Energien, oder netzbasiert über Wärmenetze mit erneuerbaren Energien oder Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen versorgt werden. Dabei wird bei der netzgebundenen Wärmeversorgung je nach Größe des Wärmenetzes zwischen der zentralen und der semi- zentralen Wärmeversorgung unterschieden. Da bei der netzgebundenen Wärmeversorgung von reinen Wohnsiedlungen hauptsächlich kleinere semi- zentrale und keine größeren zentralen Wärmenetze zum Einsatz kommen, liegt der Fokus in dieser Arbeit auf semi- zentralen Netzen. Die Wärmeerzeuger in semi- zentralen Wärmenetzen haben eine Leistung von unter 5 MW<sub>th</sub>, sie versorgen nicht mehr als 500 Abnehmer und befinden sich in Kundenähe. Damit haben semi- zentrale Netze nur kurze Trassenlängen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Weiterhin sind zwei Entwicklungen zu beobachten: Bedingt durch die EnEV nimmt die Wärmedämmung zu und damit der Gesamtwärmebedarf ab. Parallel ist in den Ballungszentren in Deutschland ein Trend zur Reurbanisierung, also eine Abwanderung aus dem ländlichen in den städtischen Raum, und damit verbunden ein weiteres Wachstum der Städte festzustellen [Schubert 2012] [Adam, Milbert 2013].

Für die Wärmebereitstellung ergeben sich durch die Zuwanderung und die verbesserte Wärmedämmung der Gebäude folgende Herausforderungen: Einerseits wird auf Grund der verbesserten Wärmedämmung der Gebäude immer weniger Wärme nachgefragt, andererseits werden die teilweise stark verdichteten entstehenden Neubaugebiete in urbanen Ballungsräumen verstärkt auf eine netzgebundene und erneuerbare Wärmeversorgung setzen.

In Zukunft werden Wärmeeinsparmaßnahmen und erneuerbare Energien, sowie netzgebundene und dezentrale Wärmeversorgungskonzepte verstärkt miteinander konkurrieren. Die Nutzung einer netzgebundenen Wärmeversorgung, also der Anschluss der Wohnhäuser einer Siedlung über ein Wärmenetz, ist dabei eine attraktive Option, da im allgemeinen die größeren Heiz(kraft)werke effizienter betrieben werden können und weniger Luftschadstoffe ausstoßen, als die kleinen Einzelheizungen. Allerdings erschwert der sinkende Wärmebedarf die Planung von Wärmenetzen, die auf 30 bis 50 Jahre hin angelegt sind, und erhöht das Risiko von überdimensionierten Anlagen und Rohrnetzen, sowie steigenden Wärmeverlusten aufgrund sinkender Wärmeabnahme. Deswegen werden Wärmenetzneubauten sich nur in Gebieten mit hoher Abnehmerdichte lohnen. Neben den vorhandenen Abnehmern hängt diese dabei nach [Blesl et al. 2009] stark von der Siedlungsstruktur ab.

Nach [AGFW 2011] wurden im Jahr 2011 in Deutschland 13 Prozent der Wohnungen durch Fernwärme versorgt, wobei allerdings nur sehr wenige Ein- oder Zweifamilienhäuser an ein Netz angeschlossen waren. In den letzten Jahren gab es einen, wenn auch moderaten, Zuwachs in der Fernwärmeversorgung. Dabei wird in [AGFW 2012] von einem weiteren Zubau bei der Fernwärme ausgegangen. Die dazugehörigen möglichen Fernwärmepotenziale im Bereich der Haushalte zeigt Abbildung 1-1.

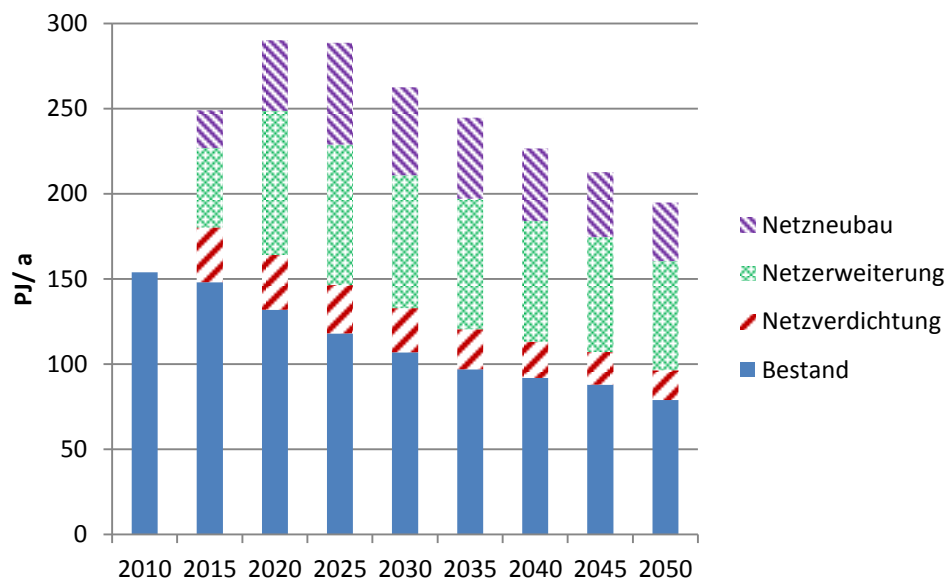


Abbildung 1-1: Entwicklung der Fernwärmepotenziale der Haushalte bis zum Jahr 2050 [AGFW 2012]

Trotz gleich bleibender Netzlängen wird auf Grund der besseren Dämmung der Fernwärmebedarf in den Bestandsnetzen sinken. Das gesamte Fernwärmepotenzial im Bereich der Haushalte steigt nach dieser Projektion bis 2020 an, bevor es, ebenfalls bedingt durch die verbesserte Wärmedämmung, wieder sinkt. Eine Erweiterung der Fernwärmepotenziale ist zu sehen im Bereich der Netzverdichtung. Durch diese Aufnahme bisher nicht angeschlossener Häuser in ein bestehendes Netz kann die Effizienz des Netzes gesteigert werden.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Weiterhin sind große Potenziale bei der Netzerweiterung, also der Verlängerung bestehender Netze zu sehen. Dabei können durch den sinkenden Wärmebedarf der Bestandsgebäude mit derselben Wärmeerzeugungsanlage weitere Häuser angeschlossen und versorgt werden. Für diese Arbeit interessant ist jedoch hauptsächlich das Fernwärmepotenzial für neue Wärmenetze durch den Anschluss neuer oder bestehender Wohnsiedlungen an ein neuzubauendes Wärmenetz. Während Netzverdichtung und –erweiterung meistens sinnvoll sind, gehen kritische Stimmen in der Literatur davon aus, dass viele Wärmenetzneubauten durch die verbesserte Wärmedämmung unwirtschaftlich und ökologisch nicht sinnvoll werden und daher sorgfältig geprüft werden müssen [Wolff, Jagnow 2011].

Derzeit stammen in Deutschland etwa 83 Prozent der Fernwärme aus Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen, 1 Prozent aus industrieller Abwärme und 16 Prozent aus der reinen Wärmeerzeugung. Als Brennstoffe werden in Deutschland zur Fernwärmebereitstellung hauptsächlich Gas (47 Prozent) und Steinkohle (29 Prozent) sowie Braunkohle (9 Prozent), Müll (10 Prozent), Biomasse (2 Prozent) und Öl (2 Prozent) eingesetzt [AGFW 2010].

Bereits heute ist der Anteil am Energieaufkommen aus erneuerbaren Energien im Wärmebereich mit 49 Prozent höher als im Strombereich mit 38 Prozent. Dabei werden in Deutschland derzeit etwa 92 Prozent der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien durch Biomasse abgedeckt [Bundesregierung 2012]. Speziell Holz ist als nachwachsender Energieträger mit sehr guten Brennstoffeigenschaften ein sehr wichtiger Brennstoff, der gegenüber anderen regenerativen Energieträgern wie Sonnenlicht oder Geothermie gut speicherbar ist.

Die [Leitstudie 2011] verdeutlicht die Wichtigkeit der Nutzung von Holz als zukünftigen Brennstoff für die Wärmeversorgung zur Erfüllung der politischen Ziele. In den in der Leitstudie vorgestellten zielorientierten Szenarien hat speziell die netzgebundene Kraft- Wärme- Kopplung eine wichtige Rolle als kostengünstige und hocheffiziente Brückentechnologie, welche bis zum Jahr 2030 verstärkt benötigt wird. Obwohl der Ausbau der Wärmeerzeugung aus fester Biomasse durch die verfügbaren Mengen begrenzt wird, kann eine Zunahme der Wärmeerzeugung in Heiz(kraft)werken, welche feste Biomasse einsetzen (gezeigt in Abbildung 1-2), nennenswert zur Erreichung der Ziele beitragen.

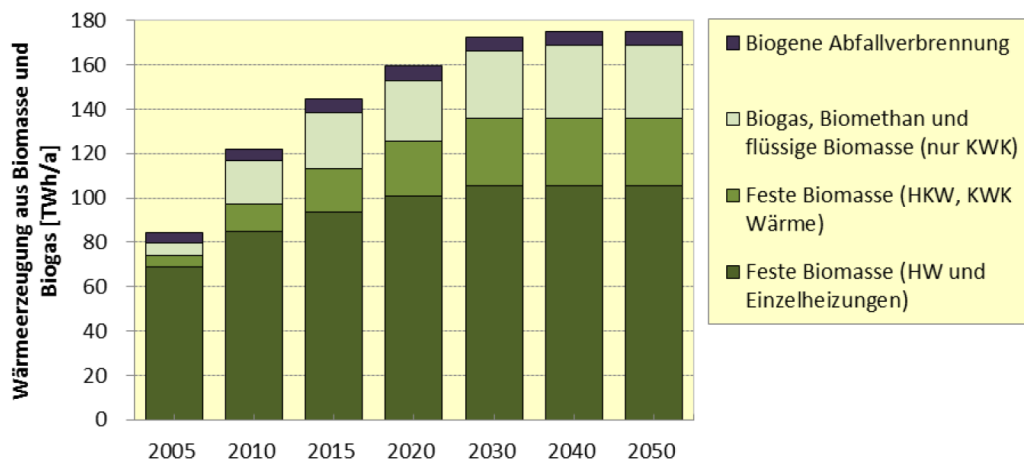


Abbildung 1-2: Wärmeerzeugung aus Biomasse und Biogas nach Energieträgern [Leitstudie 2011]

Um das begrenzte Potenzial an nachwachsendem Holz optimal zu nutzen, muss es jedoch möglichst effizient und umweltfreundlich eingesetzt werden.

Obwohl es bereits eine Reihe von Untersuchungen zu den Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung aus Holz gibt (z.B. [Briem et al. 2004], [König 2009], [Wolff 2004] und andere), wird bisher nur die Wärmeerzeugung im Heiz(kraft)werk betrachtet. Der Wärmetransport zum Kunden wird nicht berücksichtigt.

Dabei haben [Fröling et al. 2004], [Fröling et al. 2005], [Persson et al. 2006], [Perzon et al. 2007] und [Oliver-Sola et al. 2009], die sich mit den Umweltwirkungen der netzgebundenen Wärmebereitstellung auseinandersetzen, gezeigt, dass die Umweltwirkungen zwar sehr stark von der Wärmeerzeugung dominiert werden, aber auch der Einfluss durch den Bau und Betrieb des Wärmenetzes nicht zu vernachlässigen ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Berücksichtigung von Netzen zur umwelteffizienten Wärmeversorgung von hoher Relevanz ist. Allerdings reichen die heute verfügbaren Informationen nicht aus, um entscheidungsrelevante Informationen bereitzustellen.

### 1.2 Problemstellung

Zentrale Problemstellung dieser Arbeit ist die Frage, unter welchen Rahmenbedingungen eine holzbasierte semi- zentrale Hauswärmeversorgung aus ökologischen Gesichtspunkten empfehlenswert ist. Diese Frage wird für das weitere Vorgehen durch drei Unterfragen operationalisiert:

- Welche Umweltwirkungen treten bei der holzbasierten semi- zentralen Wärmeversorgung auf, wenn die Infrastruktur für die semi- zentralen Netze mitbetrachtet wird? Ist die holzbasierte semi- zentrale Hauswärmeversorgung überhaupt wirtschaftlich realisierbar?
- Was sind die Haupteinflussfaktoren auf die Umweltwirkungen der holzbasierten semi- zentralen Hauswärmeversorgung? Was passiert, wenn die Rahmenbedingungen variiert werden, indem z.B. unterschiedliche realistische Siedlungstypen sowie verschiedene Konversionsanlagen oder Holzbrennstoffe untersucht werden?
- Wie schneidet die holzbasierte semi- zentrale Hauswärmeversorgung gegenüber der dezentralen (holzbasierten oder fossilen) oder holzbasierten zentralen Hauswärmeversorgung ab?

### 1.3 Vorgehensweise

In dieser Arbeit werden die Umweltwirkungen der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen für unterschiedliche realistische Siedlungstypen untersucht und miteinander verglichen. Als Methode um die Umweltaspekte und die potentiellen Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung zu erfassen kommt eine Ökobilanz nach ISO 14040/44 zum Einsatz.

Nach [ISO 14040] kann eine Ökobilanz aufzeigen, wie die Umwelteigenschaften von Produkten in den verschiedenen Lebenswegphasen verbessert werden können. Sie dient der Information und Entscheidungsunterstützung in Politik, Industrie und bei Nichtregierungsorganisationen, indem sie unterschiedliche Produkte hinsichtlich der relevanten Umweltwirkungen vergleicht [ISO 14040].

Zunächst werden in dieser Arbeit unterschiedliche Wärmeversorgungskonzepte ausgewählt. Dabei können die Wohngebäude entweder dezentral über Hausheizungen, semi- zentral über kleinere holzbasierte Wärmenetze oder zentral über größere Wärmenetze versorgt werden. In diesen Wärmeversorgungskonzepten können unterschiedlichen Konversionsanlagen und Brennstoffe zum Einsatz kommen. Zunächst werden die derzeit gängigen Konversionsanlagen den verschiedenen Wärmeversorgungskonzepten zugeordnet, und im Anschluss die Umweltwirkungen dieser Anlagentypen untersucht und verglichen. Dabei werden für die dezentrale Versorgung sowohl Hackschnitzel- und Pelletheizungen als auch Gasheizungen betrachtet. Für die semi- zentralen Netze wird zum einen ein Holzvergaser- Blockheizkraftwerk als Kraft- Wärme- Kopplungsanlage und zum anderen ein Hackschnitzelkessel zur reinen Wärmebereitstellung eingesetzt. Der zentrale Vergleichsfall eines größeren Wärmenetzes wird durch ein Heizkraftwerk versorgt. Dabei werden als Brennstoff entweder Waldrest-, Industrierest- oder Landschaftspflegeholz hackschnitzel sowie Holzpellets eingesetzt.

Zunächst werden die Prozessketten der Konversionsanlagen modelliert und deren Umweltwirkungen ausgewertet. Im Anschluss wird die Systemgrenze erweitert, um die Umweltwirkungen des Wärmetransportes über das Netz zum Kunden in die Untersuchung miteinzubeziehen. Dazu werden zunächst

verschiedene Typen von Wohnsiedlungen identifiziert und betrachtet. Neben reinen Einfamilien- und Mehrfamilienhäusersiedlungen wird auch eine typische deutsche gemischte Wohnsiedlung untersucht. Im Anschluss werden für unterschiedliche Kombinationen aus Siedlungs- und Abnehmerart sowie Konversionsanlage und Brennstoffart die Wärmenetze ausgelegt und modelliert. Zudem werden die verwendeten Wärmenetzrohre und die Abstände zwischen Wärmeerzeuger und Kunden sowie zwischen den Wohnhäusern variiert. Danach werden die Ökobilanzen erstellt. Außerdem werden die Wärmebereitstellungskosten der Wärmeversorgungskonzepte bestimmt und dem Fernwärmepreis gegenüber gestellt, um die Wirtschaftlichkeit zu prüfen.

Damit können zunächst Vergleiche der semi- zentralen Netzvarianten untereinander durchgeführt werden. So kann der Einfluss der Abnehmerart und -größe, der verwendeten Konversionsanlagen, der Hausabstände und der verwendeten Wärmenetzkomponenten untersucht werden.

Im Anschluss werden die semi- zentralen Netzvarianten mit der dezentralen und zentralen Wärmeversorgung verglichen. Als fossiler Vergleichsfall dient jeweils eine dezentrale Gasheizung, da sie zurzeit nach [BDEW 2012] das am meisten genutzte Heizungskonzept sowohl bei Neubauten als auch bei älteren Häusern ist.

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Die für die Arbeit benötigten theoretischen und methodischen Grundlagen werden in den Kapitel 2 bis 4 eingeführt.

Zunächst wird in Kapitel 2 auf die Wärme- und Stromerzeugung aus Holzreststoffen eingegangen. Kapitel 2.1 stellt die verwendeten Holzreststoffe und ihre Bereitstellung vor und geht auf die bei der Verbrennung von Holz entstehenden Emissionen näher ein. Anschließend werden in Kapitel 2.2 zwei dezentrale Holzheizungen und ein Hackschnitzelkessel vorgestellt. Kapitel 2.3 beschreibt die Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen für die netzbasierte Wärmeversorgung aus Holz.

In Kapitel 3 wird ein Überblick über verschiedene Aspekte der netzbasierten Hauswärmeversorgung in Deutschland gegeben. Die verschiedenen Komponenten eines Wärmenetzes werden in Kapitel 3.1 eingeführt, während Kapitel 3.2 auf die technische Auslegung solcher Netze eingeht.

Kapitel 4 beschreibt die methodischen Grundlagen der Arbeit. In Kapitel 4.1 wird die Ökobilanz nach ISO 14040/44 erklärt. Es werden die Allokationsverfahren, die verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden und die Datenqualität einer Ökobilanz beschrieben. In Kapitel 4.2 wird das Vorgehen bei der Bestimmung der Wärmebereitstellungskosten nach [VDI 2067] gezeigt.

Kapitel 5 geht auf die Modellierung der Wärmenetzinfrastruktur für die semi- zentralen Wärmenetzkonzepte ein. Zunächst werden in Kapitel 5.1 die untersuchten Fallbeispiele vorgestellt. Danach wird die Vorgehensweise zur Netzauslegung in Kapitel 5.2 gezeigt.

Im Kapitel 6 ist die Bestimmung der Wärmebereitstellungskosten gezeigt. Zunächst werden in Kapitel 6.1 die Wärmebereitstellungskosten der Heizkraftwerke berechnet, dann zeigt Kapitel 6.2 die Wärmebereitstellungskosten für die unterschiedlichen semi- zentralen Netzvarianten.

In Kapitel 7 wird die eigentliche Prozesskettenmodellierung gezeigt. Eine Beschreibung des modellierten Gesamtsystems wird in Kapitel 7.1 gegeben. Danach wird in Kapitel 7.2 zunächst ein Überblick über die Literaturdaten der Ökobilanzierung zur Wärmeerzeugung aus Holzreststoffen und zu den Wärmenetzen gezeigt. Da für die Erstellung der Prozessketten unterschiedliche Literaturquellen genutzt werden, geht Kapitel 7.3 auf die Datenqualität von Sachbilanzdaten näher ein. Hier wird ein Schema gezeigt, das bei der Auswahl und der Zusammenstellung geeigneter Literaturquellen unterstützt. Diese zur Datenerhebung genutzte Methode wird am Beispiel einer Organic Rankine Cycle Anlage genauer erklärt. In Kapitel 7.4 wird dann auf die Modellierung der Holzbereitstellung eingegangen. Kapitel 7.5 zeigt die Modellierung der

## **Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

---

Holzheiz(kraft)werke und Holzheizungen. In Kapitel 7.6 wird die Modellierung der semi- zentralen Netze sowie des zentralen Netzes beschrieben.

Kapitel 8 zeigt die Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung für Wohnhäuser. Dabei wird in Kapitel 8.1 zunächst auf die Bereitstellung der unterschiedlichen Holzreststoffe eingegangen. Anschließend werden in Kapitel 8.2 die Umweltwirkungen der Holzheizungen untereinander und mit denen einer konventionellen Gasheizung verglichen. Danach werden in Kapitel 8.3 die holzbasierten Heiz(kraft)werke untersucht, gegenübergestellt und mit den Gasheizwerken verglichen. Schließlich werden die Umweltwirkungen und die Wärmegestehungskosten der unterschiedlichen semi- zentralen Wärmeversorgungskonzepte in Kapitel 8.4 untereinander verglichen. In Kapitel 8.5 wird gezeigt, wann eine holzbasierte semi- zentrale oder eine dezentrale Wärmeversorgung für ein Einfamilien- und ein Mehrfamilienhaus besser geeignet ist, als eine dezentrale Gasheizung. Für eine durchschnittliche gemischte deutsche Wohnsiedlung wird zudem in Kapitel 8.6 bestimmt wie eine holzbasierte zentrale Wärmeversorgung gegenüber einer dezentralen oder semi- zentralen Wärmeversorgung abschneidet.

Abschließend werden in Kapitel 9 die Schlussfolgerungen aus der Arbeit diskutiert und ein Ausblick gegeben.



## 2 Wärme- und Stromerzeugung aus Holzreststoffen

In diesem Kapitel wird die Wärmeerzeugung aus Holzreststoffen eingeführt. Dazu werden zunächst in Kapitel 2.1 die unterschiedlichen Reststoffsportimente (Waldrestholz, Industrierestholz und Landschaftspflegeholz) und ihre verbrennungsrelevanten Eigenschaften erklärt. Die reine Wärmebereitstellung aus Holzreststoffen durch Hackschnitzelkessel oder Pelletheizungen zeigt Kapitel 2.2. In Kapitel 2.3 werden die Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen, die in einem Wärmenetz zum Einsatz kommen können, eingeführt. Verschiedene Holzheizkraftwerke (Dampfturbinen- Heizkraftwerk, Organic Rankine Cycle Anlage und Holzvergaser- Blockheizkraftwerk) werden beschrieben.

### 2.1 Eigenschaften von Holzreststoffen zur energetischen Nutzung

#### 2.1.1 Allgemeine Eigenschaften

Bei der energetischen Nutzung von Holzbrennstoffen gibt es einige Merkmale welche die Brennstoffqualität stark beeinflussen, und wichtig für die Schadstoffbildung, die benötigte Brennstoffmenge und die Nutzbarkeit der Asche sind [Kaltschmitt et al. 2009]. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Nach [Kaltschmitt et al. 2009] wird als **Heizwert** die Wärmemenge bezeichnet, die bei einer vollständigen Brennstoffoxidation freigesetzt wird. Dabei wird die Kondensationswärme des Wasserdampfes im Abgas nicht mitgerechnet. Der Heizwert von biogenen Brennstoffen hängt dabei von ihrem Wassergehalt und ihrer Elementarzusammensetzung ab.

Der **Wassergehalt** ( $w$ ) beschreibt den Anteil an Wasser in der feuchten Biomasse. Dabei setzt die feuchte Biomasse sich aus der Wassermasse ( $m_{H_2O}$ ) und der Masse trockener Biomasse ( $m_{BM}$ ) zusammen [Kaltschmitt et al. 2009].

$$w = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{BM}} \quad \text{Formel 2-1}$$

Bei erntefrischem Holz liegt der Wassergehalt abhängig von Jahreszeit und Holzart bei etwa 45 bis 60 Prozent. Komplette luftgetrocknete Holz hat nur noch Wassergehalte von 10 bis 20 Prozent [Kaltschmitt et al. 2009].

Da sich der Heizwert von Biomasse sehr stark mit dem Wassergehalt verändert, werden meistens die unteren Heizwerte für absolut trockene (wasserfreie) Biomasse ( $H_{u,atro}$ ) angegeben. Für die Verbrennung ist der reale untere Heizwert im nassen Zustand ( $H_u$ ) nötig. Er kann aus dem Wassergehalt und dem Heizwert der absolut trockenen Biomasse berechnet werden [Kaltschmitt et al. 2009].

$$H_u = \frac{H_{u,atro} * (100 - w) - 2,443 * w}{100} \quad \text{Formel 2-2}$$

Die Konstante 2,443 stammt aus der Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg bei 25°C.

Neben Heizwert und Wassergehalt bestimmt auch der **Aschegehalt** sehr stark die Verbrennungseigenschaften des eingesetzten Holzes. Der Aschegehalt bezeichnet den Anteil an anorganischen Rückständen, die nach einer vollständigen Verbrennung des Holzes zurückbleiben. Dieser Anteil stammt entweder direkt aus dem Brennstoff oder aus Brennstoffverunreinigungen (z.B. der Baumrinde anhaftenden Steinen und Erde). Die meisten Holzbrennstoffe haben Aschegehalte von maximal ein Prozent der Trockenmasse. Höhere Aschegehalte treten bei hohem Rindenanteil oder starker Brennstoffverunreinigung auf. Je höher der Aschegehalt ist, desto höher sind auch die Aufwendungen für die Ascheentsorgung und die Staubemissionen. Außerdem kann ein hoher Aschegehalt auch zum Versintern der Feuerungsanlagen führen [Kaltschmitt et al. 2009].

Für die energetische Nutzung wird das Holz üblicherweise mechanisch aufbereitet um die Abmessungen und Größenverteilung des Brennstoffes an die Anforderungen des Konversionsverfahrens anzupassen. Dabei werden im Bereich automatisch beschickter Feuerungen zwei Holzreststoffsortimente eingesetzt: **Holzhackschnittel** und **Holzpellets**. Diese können aus unterschiedlichen Restholzsortimenten hergestellt werden [Kaltschmitt et al. 2009].

Eine weitere wichtige Kenngröße ist die **Schüttdichte**. Sie zeigt wie viel Brennstoffmasse pro Volumeneinheit enthalten ist. Im Gegensatz zur Dichte des Holzes werden hier die Hohlräume zwischen den Brennstoffteilchen mitbetrachtet. Typische Schüttdichten von Holzhackschnittel liegen zwischen 200 und 300 kg/m<sup>3</sup> [Kaltschmitt et al. 2009]. Die Schüttdichte wird immer dann benötigt, wenn das Volumen einer bestimmten Brennstoffmenge bestimmt werden muss, um zum Beispiel die Größe eines Brennstofflagers zu bestimmen.

### 2.1.2 Waldrestholz

Bei der Ernte von hochwertigem Stammholz zur stofflichen Nutzung fällt eine Menge an minderwertigen Holzsortimenten und Rückständen an, die als Waldrestholz bezeichnet werden [Wolff 2004]. Hierunter fallen auch Bäume, die wegen zu geringer Durchmesser oder Schädlingsbefall bei Durchforstungsmaßnahmen gefällt werden müssen, aber für eine stoffliche Nutzung nicht geeignet sind. Außerdem gehören dazu minderwertige Baumteile wie Rinde, Äste, Krone und Wurzelstock [Wolff 2004].

Bei der Bereitstellung von Waldrestholz werden üblicherweise die Verfahrensschritte Ernte und Rücken (beinhaltet Fällen, Entasten, Abzopfen, Vorliefern und Rücken), Hacken und Transport unterschieden [Wolff 2004]. Je nach dem Grad der Mechanisierung können sich diese Verfahrensabschnitte teilweise erheblich unterscheiden und auch zusammen fallen. Dabei kommen zur Waldholzernte rein motormanuelle, teilmechanisierte und vollmechanisierte Verfahren, sowie Mischformen der Verfahren zum Einsatz [Kaltschmitt et al. 2009], [Wolff 2004]. Üblicherweise werden die gefällten Vollbäume, das Durchforstungsholz oder der Schlagabraum zunächst einige Monate im Wald gelagert. Hierdurch sinkt der Wassergehalt auf etwa 20 bis 40 Prozent; die Blätter bzw. Nadeln der Bäume fallen ab und dienen als Nährstoffe für den Wald [Kaltschmitt et al. 2009].

Schließlich wird das Waldrestholz entweder mit einem stationären oder einem mobilen Hacker zerkleinert auf eine Spangröße von etwa 20 bis 80 mm [Kaltschmitt et al. 2009]. Da das Hacken meist noch im Wald erfolgt, kommt oft ein dieselbetriebener mobiler Hacker zum Einsatz. Im Anschluss wird das Hackgut per LKW zum Ort des Einsatzes transportiert, wobei nach [Wolff 2004] eine übliche Transportdistanz für die lokale Brennstoffversorgung zwischen 10 und 40 Kilometern liegt.

### 2.1.3 Landschaftspflegeholz

Nach [Kaltschmitt et al. 2009] bezeichnet Landschaftspflegeholz den holzartigen Anteil der Biomasse, der bei Landschaftspflegemaßnahmen wie bei der Landwirtschaft oder im Gartenbau anfällt. Nach [Wolff 2004] fällt dieses Holz bei Straßen- und Gewässerrandpflege, in öffentlichen Grünanlagen, auf Friedhöfen, beim Rückschnitt von Hecken, Streuobstbäumen oder Feldgehölzen, und im Intensivobst- sowie Weinbau an. Daher hat Landschaftspflegeholz sehr unterschiedliche Wassergehalte, die meist über denen der anderen Restholzsortimente liegen. Aufgrund teilweise großer Rindenanteile und Verunreinigungen hat Landschaftspflegeholz relativ hohe Aschegehalte [Wolff 2004].

Im Allgemeinen ähnelt die Bereitstellung von Landschaftspflegeholzhackschnitteln derjenigen für Waldrestholz [Wolff 2004]. Allerdings wird beim Rückschnitt von Bäumen und Hecken meistens nach [Wolff 2004] und [Kaltschmitt et al. 2009] mit rein motormanuellen Verfahren gearbeitet und anschließend das Holz mit einem mobilen Hacker zerkleinert. Danach wird es mit dem LKW abtransportiert.

### 2.1.4 Industrierestholz und A1 Holzpellets

Unter Industrierestholz werden die Produktionsrückstände aus der Holzbearbeitung und Holzverarbeitung verstanden. Es beinhaltet meist unbehandelte Holzfraktionen wie Holzschnitzel oder Abschnitte, Schwarten, Spreißel, Späne, Stäube und teilweise auch Rinde [Kaltschmitt et al. 2009]. Die meisten dieser Sortimente werden nicht nur zur energetischen, sondern auch zur stofflichen Nutzung eingesetzt, z.B. kommen Abschnitte, Schwarten und Spreißel in der Zellstoff-, Spanplatten- oder Papierindustrie zum Einsatz. Späne, Schleifstäube und sonstige Sägenebenprodukte sind auch der wesentliche Rohstoff für die Herstellung hochwertiger Holzpellets [Kaltschmitt et al. 2009].

Das Industrierestholz wird direkt im Sägewerk mit einem stationären, meist elektrisch betriebenen Großhacker zerkleinert [Miekley 2012].

Nach [DIN 2011] gibt es verschiedene Güteklassen für Holzpellets, wobei in Pelletheizungen nur Pellets der höchsten Güteklasse A1 zum Einsatz kommen. Ausgangsmaterial zur Holzpelletherstellung ist Stammholz und Industrierestholz (chemisch unbehandelte Holzrückstände) [DIN 2011]. In Tabelle 2-1 sind die in der Norm geforderten Brennstoffeigenschaften aufgelistet.

Eigenschaftsart	Eigenschaft (A1 Pellets)
Durchmesser und Länge	Durchmesser = $6 \pm 1$ mm bzw. $8 \pm 1$ mm und Länge = 3,15 bis 40 mm
Wassergehalt	$\leq 10\%$
Aschegehalt (bezogen auf die Trockenmasse)	$\leq 0,7$ Masse-%
Anteil an Feingut	$\leq 1$ Masse-%
Additive	$\leq 2$ Masse-% (Art und Menge sind anzugeben)
Schüttdichte	$\geq 600$ kg/m <sup>3</sup>
Heizwert	16,5 bis 19,0 MJ/kg

**Tabelle 2-1: Eigenschaften von A1 Pellets [DIN 2011]**

Nach [Miekley 2012] waren die Ausgangsstoffe zur Pelletherstellung in Deutschland 2011 unbehandelte Holzreste und bestanden zu 76 Prozent aus Sägemehl und Hobelspänen mit einem Wassergehalt von etwa 8 Prozent, der Rest waren Kappstücke, Schwarten, Spreißel und Hackschnitzel ohne Rinde. Obwohl auch Stammholz als Ausgangsstoff für die Pelletierung geeignet wäre, ist davon auszugehen, dass dieses auf Grund der größeren Wertschöpfung nur stofflich genutzt wird.

Diese Restholzsortimente fallen jeweils im Sägewerk bei der Produktion von Holzprodukten an und werden danach direkt vor Ort weiterverarbeitet. Hierbei werden die größeren Holzsortimente zuerst vor Ort mittels eines strombetriebenen stationären Großhackers zu Hackschnitzeln verarbeitet. Dieser Prozessschritt ist analog wie der zu Bereitstellung von Industrierestholzhackschnitzeln. Im Anschluss erfolgen eine Nassvermahlung und eine Trocknung auf 10 Prozent Wassergehalt in einem Bandtrockner. Schließlich wird das vorzerkleinerte und getrocknete Industrierestholz zusammen mit dem Sägemehl und den Hobelspänen noch einmal trocken vermahlen. Danach wird Pelletierungshilfsmittel (maximal zwei Prozent Maisstärke) zugegeben und die Holzmasse in der Pelletpresse zu Pellets verarbeitet. Abschließend werden die fertigen Pellets mit einem Silo-LKW zum Endkunden transportiert [Miekley 2012].

### 2.1.5 Luftschadstoffe bei der Holzverbrennung

Wie auch bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe werden bei der energetischen Holznutzung verschiedene Luftschadstoffe freigesetzt.

Diese können nach [Kaltschmitt 2009] in drei Kategorien unterteilt werden: Stoffe aus vollständiger Oxidation der Hauptbestandteile des Holzes (Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff), Stoffe aus unvollständiger Oxidation des Holzes und Stoffe aus Spurenelementen und Verunreinigungen.

Bei der vollständigen Oxidation der Hauptbrennstoffbestandteile entstehen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser. Bei der unvollständigen Oxidation können sich Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und unverbrannte Kohlenstoffpartikel (als Teil der Staubemission) bilden. Aus den Spurenelementen und Verunreinigungen werden Staub- und Aschepartikel, Schwermetalle (z.B. Kupfer, Blei, Zink, Cadmium), Stickstoffmonoxid und -dioxid (zusammen Stickoxide NO<sub>x</sub>), Cyanwasserstoff, Ammoniak (NH<sub>3</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Chlorwasserstoff (HCl) und Kaliumchlorid sowie Dioxine und Furane freigesetzt.

Hierbei sind die Kohlenmonoxidemissionen üblicherweise eine Größenordnung höher als die der Kohlenwasserstoffe. Quelle für die Stickoxidemissionen ist hauptsächlich der im Brennstoff gebundene Stickstoff [Kaltschmitt et al. 2009].

Bei naturbelassenem Holz sind die Gehalte an Schwefel, Chlor und Kalium sehr gering, so dass die zugehörigen Emissionen kaum Bedeutung haben. Die polychlorierten Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzo-Furane werden in ihrer toxikologischen Wirkung am besonders giftigen Tetrachlor-Dibenzo-p-Dioxin (TCDD) gemessen und in TCDD Äquivalenten angegeben. Bei der Verbrennung von naturbelassenen Holzwerkstoffen werden allerdings in der Regel nur sehr geringe Mengen an Dioxin gebildet [Kaltschmitt et al. 2009].

### 2.1.5.1 Abgasnachbehandlungsmethoden

Neben Primärmaßnahmen (Optimierung der Feuerungstechnik und der Betriebsbedingungen) können zur Emissionsminderung auch verschiedene Abgasreinigungsmethoden eingesetzt werden. Gerade bei größeren Holzfeuerungen werden die auftretenden Staubemissionen meistens durch eine Staubabscheidung gemindert, wobei hier nach [Kaltschmitt et al. 2009] entweder eine Flieh- oder Schwerkraftabscheidung (Zyklon), eine Abscheidung durch elektrische Feldkräfte (Elektrofilter) oder eine Nass- Entstaubung (Wäscher) eingesetzt werden.

In einem **Zyklon** wird das partikelreiche Abgas rotiert und die Staubpartikel wandern durch die Fliehkraft an die Außenwand des Zyklons, sinken ab und werden abgeschieden. Um die Abscheideleistung zu erhöhen können mehrere Zyklone zu einem sogenannten Multizyklon zusammengeschaltet werden. Da Zyklone relativ kostengünstig sind, sind sie derzeit die am meisten genutzte Abscheidetechnik. So kann der geforderte Staubgrenzwert bei Holzfeuerungen meist schon bei alleiniger Nutzung eines Zyklons eingehalten werden, wobei allerdings nur gröbere Partikel größer als 2µm abgetrennt werden können. Der Staubabscheidegrad liegt dabei bei 85 bis 95 Prozent [Kaltschmitt et al. 2009].

Bei einem **Elektrofilter** hingegen werden die Staubteilchen zunächst negativ aufgeladen, bevor sie dann zu einer positiv geladenen Niederschlagselektrode wandern und abgeschieden werden. Typische Reingasstaubwerte sind nach einem Elektrofilter 10 bis 20 mg/Nm<sup>3</sup> bei einem Abscheidegrad von 95 bis 99,99 Prozent [Kaltschmitt et al. 2009]. Nach [Wolff 2004] können Elektrofilter eingesetzt werden um Partikel zwischen 0,01 und 10 µm aus dem Abgas zu filtern.

Eine Abgaskondensation im **Rauchgaskondensator** verbessert durch die Kondensation des im Abgas befindlichen Wassers den Gesamtwirkungsgrad der Anlage und reinigt das Abgas zusätzlich von Partikeln. Je nach vorgeschalteter Staubabscheidung und Verbrennungsbedingungen führt er zu einer Staubreduktion zwischen 30 und 90 Prozent [Kaltschmitt et al. 2009].

In Tabelle 2-2 sind die Partikelgrößen im Reingasstaub von Holzfeuerungen gezeigt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Partikelgröße	≤ 1µm	≤ 2,5µm	≤ 10µm
Mit Multizyklon	52%	70%	97%
Mit Elektroabscheider	62%	68%	88%
Mit Multizyklon und Elektroabscheider	41%	55%	80%
Mit Multizyklon und Rauchgaskondensator	95%	96%	100%

**Tabelle 2-2: Partikelgrößen im Reingasstaub [Wolff 2004]**

Weiterhin können auch andere Abgasfraktionen, wie die Stickoxidemissionen, durch Sekundärmaßnahmen gemindert werden.

### 2.1.5.2 Abgasgrenzwerte nach Bundesimmissionsschutzgesetz

Das „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“ kurz Bundes- Immissionsschutzgesetz [BImSchG 2013] regelt nicht nur welche Anlagen einer Genehmigungspflicht unterliegen, sondern bestimmt auch unter welche Verordnungen die unterschiedlichen Anlagen fallen. Konversionsanlagen, welche ausschließlich unbehandeltes Holz nutzen und eine Feuerungswärmeleistung (FWL) von unter 1 MW aufweisen, fallen unter die erste Bundes- Immissionsschutzverordnung [1. BImSchV 2010]. Hier werden lediglich Grenzwerte für die Staub- und Kohlenmonoxidemissionen vorgegeben.

Tabelle 2-3 zeigt die Grenzwerte nach [1. BImSchV 2010].

Brennstoff	Nutzwärmeleistung	Staubgrenzwert (mg/Nm <sup>3</sup> bei 13 Vol.% O <sub>2</sub> )	Kohlenmonoxidgrenzwert (mg/Nm <sup>3</sup> bei 13 Vol.% O <sub>2</sub> )
Hackschnitzel	4-500 kW	100	1.000
	> 500 kW		500
Pellets	4-500 kW	60	800
	> 500 kW		500

**Tabelle 2-3: Grenzwerte 1. BImSchV für FWL < 1MW**

Größere Anlagen zur Energieerzeugung aus naturbelassenem Holz fallen ab einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW unter die Technische Anleitung Luft [TA Luft 2002] und müssen für die Staub-, Kohlenmonoxid-, Stickoxid- und Gesamtkohlenstoffemissionen strengere Grenzwerte einhalten. Tabelle 2-4 zeigt die Grenzwerte nach [TA Luft 2002].

Feuerungswärmeleistung	Staub (mg/Nm <sup>3</sup> bei 11 Vol.% O <sub>2</sub> )	Kohlenmonoxid (mg/Nm <sup>3</sup> bei 11 Vol.% O <sub>2</sub> )	Stickoxide (mg/Nm <sup>3</sup> bei 11 Vol.% O <sub>2</sub> )	Gesamtkohlenstoff (mg/Nm <sup>3</sup> bei 11 Vol.% O <sub>2</sub> )
< 2,5 MW	100	150	250	10
≥ 2,5 und < 5 MW	50			
≥ 5 MW	20			

**Tabelle 2-4: Grenzwerte TA Luft 2002 für FWL > 1MW**

Für das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk gelten nach [Nowack 2012] die Grenzwerte für Gasmotoren aus der [TA Luft 2002 Nr. 5.4.1.4] als Anhaltswerte. Dabei kann Holzgas entweder als Biogas oder als „gasförmiger Brennstoff, ausgenommen Biogas, Klärgas oder Grubengas“ eingestuft werden. Meistens wird eine Einstufung als Biogas vorgenommen. Damit gelten bei 5 Vol% O<sub>2</sub> folgende in Tabelle 2-5 gezeigten Grenzwerte:

	Einstufung als Biogas	Einstufung als sonstiges Gas
Kohlenmonoxid	650 mg/ Nm <sup>3</sup>	300 mg/ Nm <sup>3</sup>
Stickoxide	500 mg/ Nm <sup>3</sup> 1 g (Zündstrahlmotor)	250 mg/ Nm <sup>3</sup> (Lambda-1-Motor) 500 mg/ Nm <sup>3</sup> (Magermotor)

**Tabelle 2-5: Grenzwerte TA Luft 2002 Nr. 5.1.4.1 für Holzvergaser- Blockheizkraftwerke**

### **2.1.6 Entsorgung der Holzaschen**

Bei der Holzverbrennung fallen üblicherweise drei unterschiedliche Aschefraktionen an: Die Grob- oder Rostasche, die Flug- oder Zyklonasche und die Feinstflugasche. Nur die Grobasche bleibt als fester Reststoff im Brennraum zurück, die Flugasche wird vom Rauchgas mitgetragen, lagert sich an den Wärmeüberträgern ab und kann durch Zyklonfilter herausgefiltert werden. Die Feinstflugasche wird als Staubemission an die Umwelt abgegeben und kann durch einen Elektrofilter teilweise herausgefiltert werden [Kaltschmitt et al. 2009], [Wolff 2004]. Nach [Wolff 2004] beträgt der Anteil der Grobasche bei einer Hackschnitzelfeuerung zwischen 70 und 90 Prozent, der Anteil der Flugasche liegt bei 10 bis 30 Prozent und der Anteil der Feinstflugasche liegt bei 3 bis 6 Prozent der Gesamtaschemenge.

Für eine Ascheverwertung und Entsorgung ist es ausschlaggebend, welche Nährstoff- und Schwermetallgehalte die jeweiligen Holzaschen und Aschefraktionen aufweisen [Wolff 2004]. Gerade in der Grobaschefraktion sind bedeutende Mengen an Nährstoffen wie Kalzium, Magnesium, Natrium und insbesondere Kalium und Phosphor enthalten. Somit können diese Aschen als Düngemittel im Wald oder auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden. Hierbei enthält die Grobasche etwa 80 bis 95 Prozent der durch den Brennstoff zugeführten Nährstoffe. Der Anteil an den wichtigen Düngemitteln Kaliumoxid und Phosphorpentoxid beträgt in der Grobasche etwa 6,4 bzw. 2,6 Prozent. Zusätzlich steigen die Schwermetallemissionen je feiner die Aschefraktion ist, da diese mit der Verbrennungsluft ausgetragen werden, dort zur Staubpartikelbildung führen und erst später abgeschieden werden. Während also Grobasche auf Grund der geringen Schwermetallgehalte als Düngemittel zum Einsatz kommen kann, müssen die beiden anderen Aschefraktionen auf einer Deponie bzw. einer Sondermülldeponie entsorgt werden [Kaltschmitt et al. 2009], [Wolff 2004].

## **2.2 Hackschnitzel- und Pelletkessel**

Grundsätzlich können nach [Kaltschmitt et al. 2009] Holzfeuerungen sowohl von hand- (z.B. Scheitholzöfen) als auch automatisch beschickt werden, wobei bei den automatisch beschickte Feuerungen nur hierfür geeignete Brennstoffe wie Holzhackschnitzel oder Holzpellets zum Einsatz kommen. Mit einer automatischen Brennstoffzugabe ist eine Reihe von Vorteilen verbunden, weswegen im Folgenden ausschließlich diese Anlagen betrachtet werden. So kann ein gleichbleibender Betrieb mit konstanter Leistung gewährleistet werden und die Luftmengen können angepasst werden, was zu einer geringeren Schadstoffbelastung der Abgase führt. Automatisch beschickte Anlagen können in einem Bereich zwischen 30 und 100 Prozent ihrer Leistung geregelt werden und sich so veränderlichen Wärmenachfragen anpassen [Kaltschmitt et al. 2009].

### **2.2.1 Hackschnitzelkessel**

Automatisch beschickte Feuerungen können entweder als Festbett-, Wirbelschicht- oder Flugstromfeuerungen ausgeführt werden. Dabei wird bei einer Festbettfeuerung der Brennstoff von Luft durchströmt, ohne dass er bewegt wird. Im Fall einer stationären Wirbelschicht werden die Brennstoffpartikel angehoben und in der Schwebelage gehalten bzw. bei einer zirkulierenden Wirbelschicht werden die Partikel teilweise ausgetragen und müssen wieder zurückgeführt werden. Wenn alle Partikel mit dem Gasstrom transportiert werden stellt dies einen Flugstrom dar. Hier erfolgt die Verbrennung der fein gemahlene Brennstoffpartikel im Flug [Kaltschmitt et al. 2009].

Flugstromfeuerungen werden nur für sehr trockene und feinkörnige Brennstoffe eingesetzt. Während Wirbelschichten nur bei größeren Leistungen gebräuchlich sind, sind Festbettfeuerungen, die in einem großen Leistungsbereich eingesetzt werden können, am weitesten verbreitet. Festbettfeuerungen werden als Unterschubfeuerungen, Feuerungen mit seitlichem Einschub mit und ohne Rost oder als Abwurfffeuerungen ausgeführt. Bei einer Unterschubfeuerung wird der Brennstoff von unten in die Feuermulde eingeschoben und verbrannt. Allerdings setzen diese Feuerungen einen geringen Aschegehalt von maximal ein Prozent voraus und sind daher für viele Brennstoffe nicht geeignet. Abwurfffeuerungen kommen nur für Pellets in

Frage, wobei der Brennstoff über einen Fallschacht in den Feuerungsraum eingeführt wird [Kaltschmitt et al. 2009].

Am weitesten verbreitet sind die Feuerungen mit seitlichem Einschub, da hiermit alle Arten von Brennstoffen verbrannt werden können, auch solche mit höheren Asche- oder Wassergehalten. Diese Feuerungen werden in einem Größenbereich von 50 kW bis 60 MW eingesetzt. Während im Bereich von Leistungen bis 100 kW hauptsächlich Rostfeuerungen mit starrem Rost genutzt werden, kommen bei größeren Feuerungen bewegte Roste (Vorschub- oder Walzenroste) zum Einsatz [Kaltschmitt et al. 2009]. Über ein kontinuierliches Beschickungssystem wird der Brennstoff auf den Rost gefördert und dort verbrannt. Während sich bei einer starren Rostfeuerungen der Brennstoff nur dadurch weiter bewegt, dass der Rost schräg ist, wird bei bewegten Rosten der Rost, und damit auch der Brennstoff, aktiv bewegt [Wolff 2004].

Alle Hackschnitzelkessel mit unter 1 MW Feuerungswärmeleistung fallen unter die 1. BImSchV und müssen je nach Leistungsklasse die Grenzwerte nach Tabelle 2-3 einhalten.

### 2.2.2 Pelletzentralheizungen

Nach [FNR 2013] werden Pelletzentralheizungen üblicherweise im Heizungsraum eines Gebäudes installiert. Pelletzentralheizungen werden in einer Größe von 4 kW bis 300 kW auf dem Markt angeboten. Sie können Gebäude durch die Verbrennung von Holzpellets beheizen und mit Warmwasser versorgen.

Pelletzentralheizungen sind im Gegensatz zu Scheitholzkesseleln sehr gut (automatisch) regelbar (bis auf 20 Prozent der Nennleistung) und die Verbrennungsparameter können hier besser optimiert werden, was zu geringeren Emissionen führt. Daher benötigen Pelletzentralheizungen nicht unbedingt einen Pufferspeicher, allerdings kann der Einsatz eines solchen sinnvoll sein, wenn dadurch das häufige Ein- und Ausschalten der Heizung verhindert wird oder wenn der Wärmebedarf des Hauses so niedrig ist, dass selbst kleine Pelletzentralheizungen sonst überdimensioniert wären [FNR 2013].

Pelletzentralheizungen weisen von den Holzheizungen die höchsten Wirkungsgrade mit über 90 Prozent auf. Sie unterliegen der 1. BImSchV und müssen damit Emissionsgrenzwerte nach Tabelle 2-3 von 0,06 g/Nm<sup>3</sup> Staub und 0,8 g/Nm<sup>3</sup> Kohlenmonoxid einhalten [FNR 2013].

Zusätzlich zur eigentlichen Pelletzentralheizung wird ein Pellet- Vorratslager und ein Transportsystem von diesem zum Kessel benötigt. Hierzu kann entweder vor Ort ein Lagerraum eingerichtet werden oder ein vorgefertigter Lagerbehälter zum Einsatz kommen (Gewebesacksilo, Tank oder Erdsilo). Über Förderschnecken oder Saugeinrichtungen (pneumatisch) werden die Pellets zur Heizung transportiert. Während bei pneumatischen Systemen ein kleiner Vorratsbehälter an der Heizung als Zwischenspeicher dient, muss bei der Nutzung einer Schnecke der Lagerraum direkt an die Pelletzentralheizung anschließen. Über einen schrägen Boden rutschen die Pellets zur Schnecke und werden dann stetig weiterbefördert. Bei pneumatischen Saugeinrichtungen kann sich das Pelletlager auch weiter entfernt von der Heizung befinden und es wird mehrmals pro Tag das Zwischenlager befüllt [FNR 2013].

Auf Grund der geringen Aschegehalte von Holzpellets ist der Ascheanfall einer Pelletzentralheizung sehr gering und so muss der Aschebehälter nur in Abständen von mehreren Wochen entleert werden. Die hierbei anfallende Asche kann im Hausmüll entsorgt werden [FNR 2013].

### 2.3 Holz- Heizkraftwerke

Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen erfolgt die Biomasseverbrennung bei geringeren Temperaturen. Um eine Hochtemperatur- Chlorkorrosion zu vermeiden haben biomassegefeuerte Dampferzeuger nur Frischdampftemperaturen von bis zu 450°C. Außerdem sind Biomasse- Heizkraftwerke aus Gründen der Brennstofflogistik kleiner als fossile Kraftwerke, so sind wirkungsgradsteigernde Maßnahmen aus wirtschaftlichen Gründen nicht immer umsetzbar. Daher kommt es bei der Bereitstellung von Energie aus

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Biomasse zu geringeren Wirkungsgraden (maximal 25 bis 35 Prozent) als bei fossilen Kraftwerken (bis zu 47 Prozent). Um den Ausnutzungsgrad des Brennstoffes zu erhöhen erfolgt daher die Stromerzeugung aus Biomasse meist parallel zur Wärmeerzeugung als Kraft- Wärme-Kopplung (KWK) [Kaltschmitt et al. 2009].

### 2.3.1 Dampfturbinen- Heizkraftwerke

Übliche Holzheizkraftwerke mit Dampfturbine haben nach [DBFZ 2012] eine Größe zwischen 1 und 20 MW<sub>el</sub>. Dadurch haben sie eine Feuerungswärmeleistung von über 1 MW und müssen die Abgasgrenzwerte nach TA Luft aus Tabelle 2-4 einhalten.

Die meisten Holzheizkraftwerke arbeiten mit einem Dampfkraftprozess bei dem als Arbeitsmittel Wasserdampf eingesetzt wird. Ein idealisiertes Temperatur- Entropie- Diagramm dieses Prozesses ist in Abbildung 2-1 zu sehen und das vereinfachte Schaltbild in Abbildung 2-2.

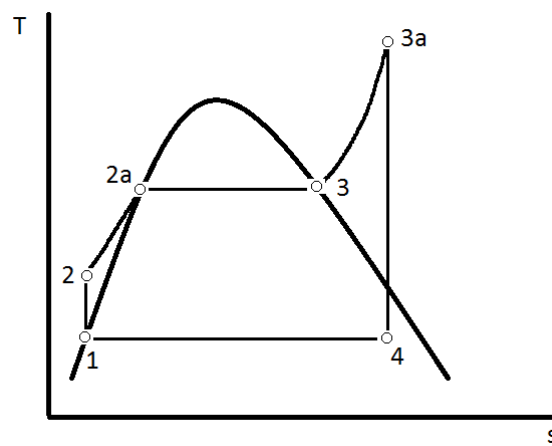


Abbildung 2-1: Temperatur- Entropie Diagramm einer Dampfturbine [Kaltschmitt et al. 2009]

Zunächst erfolgt eine isentrope Kompression des flüssigen Wassers mit Hilfe der Speisewasserpumpe (1 → 2). Im Anschluss wird das Wasser isobar erhitzt (2 → 2a) und dann bei konstanter Temperatur und Druck verdampft (2a → 3). Schließlich erfolgt eine isobare Überhitzung des Dampfes zur Wirkungsgradsteigerung um eine Entspannung ins Nassdampfgebiet weitgehend zu vermeiden (3 → 3a) und anschließend eine isentrope Expansion in der Turbine. Der Nassdampf wird im Kondensator kondensiert (4 → 1). Die in der Turbine entstehende mechanische Arbeit treibt einen Generator zur Stromerzeugung an [Kaltschmitt et al. 2009].

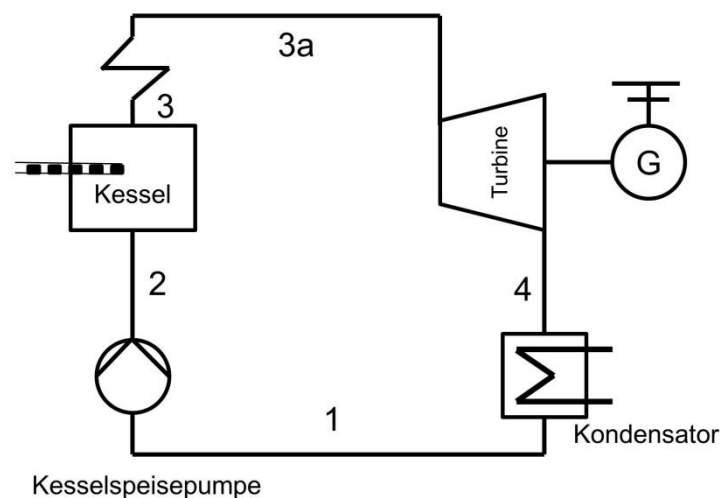


Abbildung 2-2: Vereinfachtes Schaltbild eines Dampfturbinenprozesses [Kaltschmitt et al. 2009]



Dampfturbinen- Heizkraftwerke können auf verschiedene Arten betrieben werden: zur reinen Stromerzeugung im Kondensationsbetrieb und zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung im Gegendruck- oder Entnahmekondensationsbetrieb.

Der Kondensationsbetrieb weist die höchsten elektrischen Wirkungsgrade auf, da die Entspannung des Dampfes in der Turbine auf einen möglichst geringen Druck erfolgt (20 bis 100 mbar also unter Umgebungsdruck). Allerdings liegt die Abwärme mit 30 bis 40°C auf einem für eine weitere Nutzung zu niedrigen Temperaturniveau und muss weggekühlt werden [Kaltschmitt et al. 2009].

Bei einer Gegendruckturbine wird Strom und Wärme in einem festen Verhältnis erzeugt. Je nach Anforderungen der Wärmeabnehmer wird der Dampf nur auf ein bestimmtes Mindestdruck- bzw. Temperaturniveau (z.B. 90°C und 0,8 bar) entspannt. Damit steht nach dem Verlassen der Turbine der gesamte Dampf für die Wärmeerzeugung zur Verfügung. Diese Turbinen erfordern eine gleichmäßige Wärmenachfrage, die ganzjährig bestehen muss, da sie wärmegeführt gefahren werden, und werden daher hauptsächlich bei der Prozesswärmeerzeugung eingesetzt. Sie erreichen hohe Gesamtwirkungsgrade mit bis zu 90 Prozent [Kaltschmitt et al. 2009].

Um auch bei schwankender Wärmenachfrage (Versorgung von Haushalten und Kleinverbrauchern mit Raumwärme) noch effizient Strom erzeugen zu können, werden Entnahme- Kondensationsturbinen eingesetzt. Hiermit kann entweder der vollständige Dampf in der Turbine entspannt werden (Kondensationsbetrieb) oder ein Teil des Dampfes wird vorher für eine andere Nutzung auf dem gewünschten Temperatur- und Druckniveau abgezweigt. Somit kann ein variables Verhältnis zwischen Strom und Wärme eingestellt werden. Die Stromausbeute ist höher als beim Gegendruckbetrieb [Kaltschmitt et al. 2009].

### 2.3.2 Organic Rankine Cycle Anlagen

Eine Organic Rankine Cycle Anlage (ORC- Anlage) funktioniert ähnlich wie eine konventionelle Dampfturbine, außer dass hier anstelle von Wasser ein organisches Arbeitsmittel eingesetzt wird. Dieses Arbeitsmittel weist im Vergleich zu Wasser geringere Siede- und Kondensationstemperaturen auf, so dass eine ORC- Anlage auch aus Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (70°C bis 300°C) Strom erzeugen kann. Neben der Abwärmeverstromung oder dem Einsatz in der Geothermie werden ORC- Anlagen als Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen zur Biomasseverstromung eingesetzt [Kaltschmitt et al. 2009], [van Loo, Koppejan 2009].

Die in einer ORC- Anlage maximal nutzbaren Temperaturen sind beschränkt, da das Arbeitsmittel sich bei zu hohen Temperaturen zersetzen würde. Um eine eventuell auftretende partielle Überhitzung des Arbeitsmittels zu verhindern wird daher meistens mit zwei Kreisläufen gearbeitet. Abbildung 2-3 zeigt ein Schaltbild des ORC- Prozesses. Zunächst wird die im Biomassekessel erzeugte Feuerungswärme an einen Thermoölkreislauf abgegeben, so dass ein praktisch druckloser Betrieb möglich ist. Danach wird über einen Wärmetauscher im Verdampfer das organische Arbeitsmittel erhitzt, verdampft und überhitzt. Der entstandene Dampf treibt bei seiner Entspannung eine langsam laufende Axialturbine an. Die hierbei gewonnene mechanische Energie wird in einem direkt an die Turbine gekoppelten Generator in elektrische Energie umgewandelt. Das Arbeitsmedium wird in einem Kondensator weiter heruntergekühlt und kondensiert, wobei die hier gewonnene Wärme (Temperatur nur um die 90°C) als Nah- oder Fernwärme ausgekoppelt werden kann. Um den elektrischen Wirkungsgrad des Prozesses zu steigern, werden mehrere Rekuperatoren zur internen Wärmerückgewinnung verbaut, welche das Arbeitsmittelkondensat vorwärmen (im Bild nicht zu sehen). Zusätzlich werden die Verbrennungsabgase mit Hilfe eines Economisers (Rauchgaskondensator) dazu genutzt das Fernwärmewasser weiter zu erhitzen. Als Notkühlung wird ein Luftkühler installiert, so dass auch eine Stromproduktion ohne Wärmeabnehmer möglich ist [Kaltschmitt 2009 et al.], [Kaltschmitt 2002].

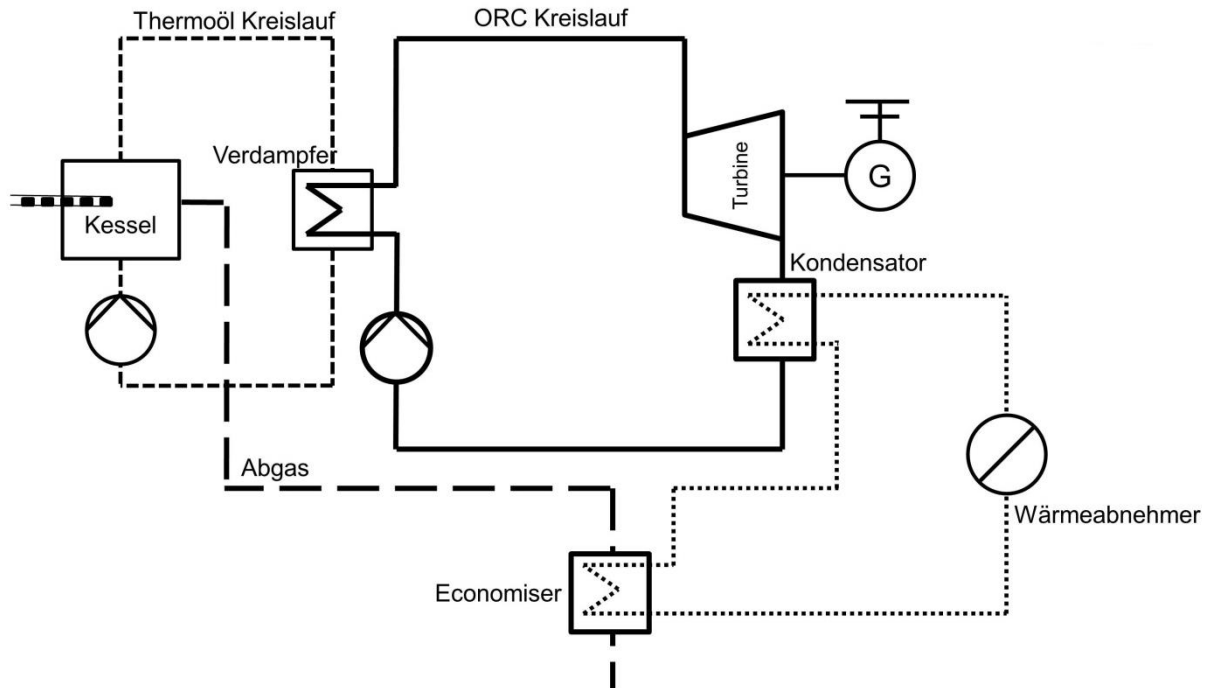


Abbildung 2-3: Vereinfachtes Schaltbild des ORC- Prozesses [Kaltschmitt et al. 2009]

Im idealisierten Temperatur- Entropie Diagramm sieht der ORC- Prozess wie in Abbildung 2-6 gezeigt aus.

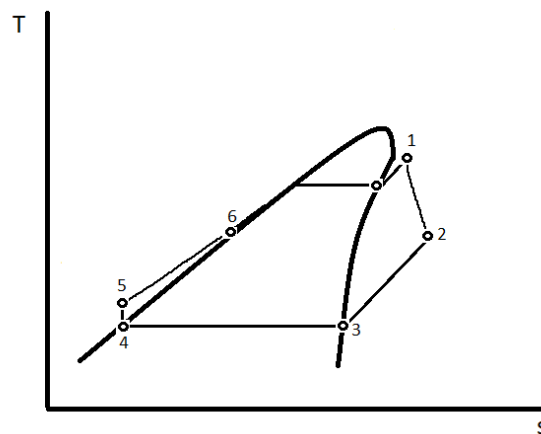


Abbildung 2-4: Temperatur- Entropie Diagramm des ORC- Prozesses [van Loo, Koppejan 2009]

Der Ablauf des Prozesses ist nach [van Loo, Koppejan 2009] wie folgt:

- 4 → 5: Druckerhöhung des flüssigen Arbeitsmediums in der Speisepumpe
- 5 → 6: Vorwärmung des organischen Arbeitsmittels
- 6 → 1: Erhitzung, Verdampfung und Überhitzung des Arbeitsmediums
- 1 → 2: Entspannung in der Turbine
- 3 → 4: Abkühlung im Rekuperator
- 4 → 5: Kondensation im Kondensator

Wie im Temperatur- Entropie Diagramm zu sehen ist, erfolgt die Entspannung des übersättigten Dampfes nicht wie bei Wasser zu Nassdampf, sondern zu trockenem Dampf (negative Steigung der Linie im Diagramm) [van Loo, Koppejan 2009]. Daher kann in der Turbine auch kein Tropfenschlag auftreten.

Üblicherweise kommt im Biomasse- ORC- Anlagen Silikonöl als Arbeitsmittel zum Einsatz. Dieses Arbeitsmedium ist nicht toxisch und hat kein Ozonabbaupotenzial, es altert nicht und ist nicht korrosiv, allerdings ist es leicht entflammbar. Sowohl Thermoöl- als auch Silikonölkreislauf sind geschlossen und das Thermoöl muss erst nach 10 Betriebsjahren ausgetauscht werden [Oberberger 2003].

ORC- Anlagen benötigen keinen Dampfkessel und haben daher geringere Investitions- und Reparaturkosten als herkömmliche Biomasseanlagen. Sie weisen ein sehr gutes Teillastverhalten auf und können im Bereich zwischen 20 und 100 Prozent der Volllast gefahren werden [van Loo, Koppejan 2009], [Oberberger 2003]. Nach [Kaltschmitt 2002] beträgt der elektrische Wirkungsgrad bei 40 Prozent Teillast immer noch 85 Prozent des Wirkungsgrades bei Volllast. Weitere Vorteile von ORC- Anlagen sind der geringe Personalbedarf, da die Anlage teilweise unbemannt gefahren werden kann und der geringe Wartungsbedarf. Durch die langsam laufende Axialturbine treten nur geringe Umlaufgeschwindigkeiten und Drehzahlen auf, was die mechanische Beanspruchung verringert, die Turbinenlebensdauer erhöht und einen direkten Anschluss des Generators ohne ein Zwischengetriebe ermöglicht [Kaltschmitt 2002]. Nach [Oberberger 2003] sind ORC- Anlagen für schnelle Lastwechsel geeignet.

Laut [DBFZ 2012] waren Ende 2011 in Deutschland etwa 85 Biomasse- ORC- Anlagen im Betrieb, die eine elektrische Leistung zwischen 200 kW<sub>el</sub> und 2x 1,55 MW<sub>el</sub> aufwiesen. Damit haben auch alle ORC- Anlagen eine Feuerungswärmeleistung von über 1 MW und fallen unter die TA Luft.

Trotz elektrischer Wirkungsgrade der ORC Anlagen von im Idealfall bis zu 20 Prozent, haben konventionelle Dampfturbinen Vorteile bei der Stromproduktion. Allerdings sind Dampfturbinen erst bei größeren Anlagen wirtschaftlich betreibbar. Ein Grund für die besseren Eigenschaften einer herkömmlichen Dampfturbine ist der sehr hohe Stromeigenbedarf einer ORC- Anlage, der bei bis zu 25 Prozent liegen kann. Daher sollten ORC- Anlagen immer wärmegeführt betrieben werden, um höhere Gesamtnutzungsgrade zu erreichen. Dabei muss sichergestellt werden, dass ausreichende Wärmeabnehmer zur Verfügung stehen, um größere Volllaststundenzahlen zu erreichen (5.000 h/a oder mehr) [DBFZ 2012].

### 2.3.3 Holzvergaser- Blockheizkraftwerk

Anstelle einer direkten Verbrennung des Holzes kann nach [Kaltschmitt et al. 2009] auch eine zweistufige Umwandlung erfolgen, bei welcher der Holzbrennstoff zunächst vergast und dann erst das Gas energetisch genutzt wird. Theoretisch können hiermit deutlich höhere Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung als bei der direkten Holzverbrennung erhalten werden, allerdings gibt es bisher nur wenige erfolgreiche Biomassevergasungsanlagen in Deutschland [Kaltschmitt et al. 2009]. Die Vergasung der Biomasse erfolgt in zwei Schritten: In der Aufheizphase wird die Biomasse zunächst getrocknet, danach erfolgt eine Entgasung der flüchtigen Bestandteile. In der Reaktionsphase reagieren die entgasten Bestandteile und der Koks mit dem Vergasungsmittel (Luft, Sauerstoff oder Wasserdampf) [Güssing]. Das dadurch entstehende Produktgas besteht hauptsächlich aus brennbaren Gasen (Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Methan und Kohlenwasserstoffverbindungen), nicht brennbaren Gasen (Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Stickstoff) und Verunreinigungen (Partikel, Teere, Alkalien, Ammoniak, Schwefel- und Halogenverbindungen). Je geringer der Anteil an nicht brennbaren Gasen und Verunreinigungen ist, desto höher sind die Qualität des Produktgases und der Heizwert [Kaltschmitt et al. 2009].

Grundsätzlich lassen sich Biomassevergaser anhand des Reaktortyps (Festbettvergaser, Wirbelschichtvergaser und Flugstromvergaser), der Art der Wärmebereitstellung (externe bzw. interne Wärmezufuhr), des eingesetzten Vergasungsmittels (Luft, Sauerstoff, Wasserdampf) und der Drücke (atmosphärisch oder erhöhter Druck) im Reaktor unterscheiden [Kaltschmitt et al. 2009].

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Wirbelschichtvergaser weisen üblicherweise eine sehr gute Temperaturkonstanz und eine leichte Regelbarkeit auf und auf Grund der guten Wärmeübertragung vom Bett an den Brennstoff und der besseren Strömungsführung hat der biogene Festbrennstoff nur Verweildauern von wenigen Sekunden bis Minuten. Auch bei kleineren Reaktorabmessungen kann so ein hoher Stoffumsatz sichergestellt werden. Allerdings führt die höhere Komplexität dieser Anlagenform auch zu höheren Kosten [Kaltschmitt et al. 2009].

Wirbelschichtvergaser arbeiten mit einer externen Wärmezufuhr, um die Wärme vom Bettmaterial auf die Brennstoffe zu übertragen. Nach [Kaltschmitt et al. 2009] gibt es derzeit drei Arten von Wirbelschichtvergasern:

- stationäre Wirbelschichtvergaser, bei denen die Geschwindigkeiten nur so hoch sind, dass Bettmaterial und Brennstoff im Schwebезustand gehalten werden,
- zirkulierende Wirbelschichtvergaser, bei denen beide Materialien fluidisiert werden und daher größere Menge Materialien mit dem Gas ausgetragen und wieder zurückgeführt werden müssen
- Zweibettwirbelschichten, bei denen eine Kombination aus zwei Wirbelschichten zum Einsatz kommt.

Speziell bei der zirkulierenden Wirbelschicht handelt es sich nach [Kaltschmitt et al. 2009] um ein bereits mehrfach kommerziell erprobtes Anlagekonzept. Daher wird diese im Folgenden näher vorgestellt.

Bei einer zirkulierenden Wirbelschicht wird der feinkörnige Brennstoff (1 bis 50 mm) in den unteren Teil des Reaktors eingeführt. Über das Bettmaterial wird dem Brennstoff Wärme zugeführt, dieser erhitzt sich, wird getrocknet und vergast. Dabei können als Vergasungsmittel Luft, Sauerstoff, Dampf oder Mischungen dieser Vergasungsmittel genutzt werden. Da die Gasgeschwindigkeiten oberhalb der Schwebegeschwindigkeit der Partikel liegen, verteilt sich die Wirbelschicht über den gesamten Reaktor. Dabei wird allerdings ein Teil des Bettmaterials aus dem Reaktor ausgetragen. Er muss daher mit Hilfe von Zyklonen aus dem Gasstrom abgetrennt und zurückgeführt werden.

Nach [DBFZ 2012] werden auf dem Markt Holzvergaser- Blockheizkraftwerke in einer Größe von 150 kW<sub>el</sub> bis zu 5 MW<sub>el</sub> angeboten. Allerdings gibt es in Deutschland bisher nur wenige erfolgreiche Holzvergaser- Anlagen [DBFZ 2012].

Die Emissionsgrenzwerte für Holzvergaser- Blockheizkraftwerke sind wie in Kapitel 2.1.5.2 beschrieben in der [TA Luft 2002] zu finden.

### 3 Netzgebundenen Hauswärmeversorgung

In diesem Kapitel wird zunächst in Kapitel 3.1 auf den Unterschied zwischen semi- zentralen und zentralen Netzen eingegangen. Danach werden die wichtigsten für ein Wärmenetz benötigten Komponenten und Bauteile erklärt. Kapitel 3.2 zeigt wie die Auslegung eines Wärmenetzes erfolgen kann.

#### 3.1 Zentrale und semi- zentrale Wärmenetze und ihre wichtigsten Komponenten

Bei der semi- zentralen oder zentralen Wärmeversorgung von Wohngebäuden wird die Wärme in Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen oder Heizkesseln produziert und über ein Zwei- Leiternetz mit getrennter Vor- und Rücklaufleitung zum Abnehmer transportiert.

Dabei kann je nach Größe des Wärmenetzes zwischen zentralen und semi- zentralen Versorgungskonzepten unterschieden werden. Die größeren zentralen Wärmenetze versorgen oftmals nicht nur Wohngebäude, sondern auch Industrieabnehmer, und weisen große vermaschte Netzstrukturen auf. Diese vermaschten Netzstrukturen erhöhen nach [Krimmling 2011] die Versorgungssicherheit und verringern den Pumpenergiebedarf, führen jedoch auch zu höheren Investitionskosten. Die kleineren semi- zentralen Wärmenetze dienen hauptsächlich zur Versorgung von Wohnhäusern, sie zeichnen sich durch ihren einfacheren Aufbau, die Nähe zwischen Wärmeerzeuger und Abnehmer sowie ihre kleinere Ausdehnung aus. Da es keine allgemeingültige Abgrenzung zwischen zentralen und semi- zentralen Netzen gibt, wird hier für die semi- zentralen Netze mit der Definition aus [Krimmling 2011] gearbeitet. Demnach hat ein semi- zentrales Wärmenetz eine Wärmeerzeugerleistung bis zu  $5 \text{ MW}_{\text{th}}$  und die Wärmeträgertemperatur des Wassers ist nicht höher als  $110^\circ\text{C}$ . Zudem befinden sich die Anlagen in Kundennähe, so dass nur kurze Trassenlängen notwendig sind. In der vorliegenden Arbeit wird zudem davon ausgegangen, dass diese Netze immer unvermaschte Strahlnetze sind und durch das Netz nicht mehr als 500 Abnehmer versorgt werden.

In Abbildung 3-1 werden beispielhaft zwei unterschiedliche Wärmenetzstrukturen gezeigt.

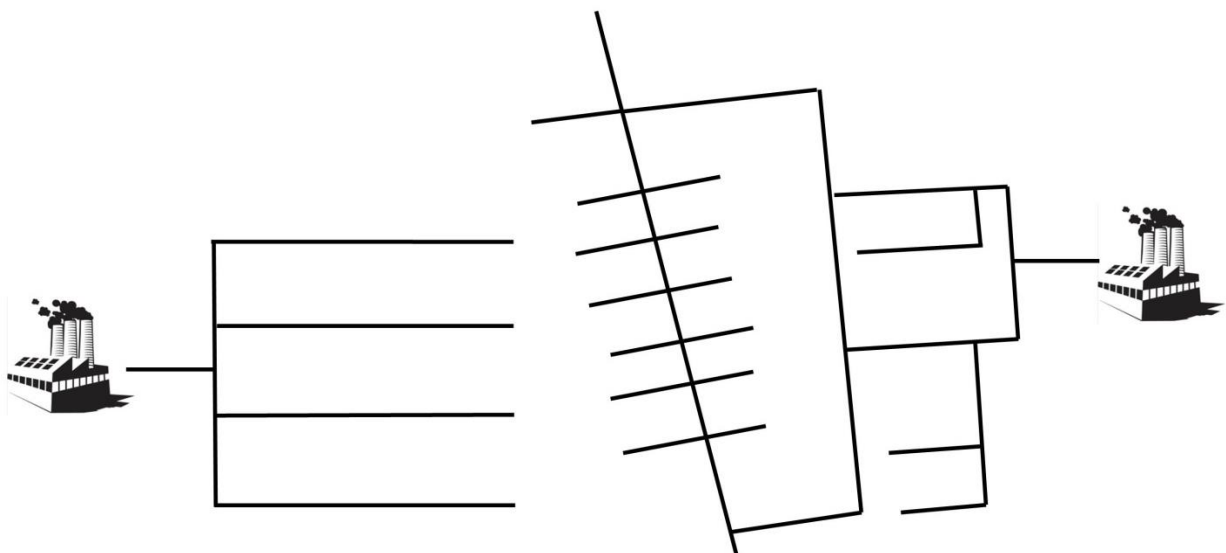


Abbildung 3-1: Strahlförmige und vermaschte Wärmenetzstruktur

Links in der Abbildung ist ein strahlförmiges Wärmenetz gezeigt, wie es auch in dieser Dissertation betrachtet wird. Rechts ist eine vermaschte Netzstruktur zu sehen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Einige statistische (gemittelte) Daten eines Fernwärmenetzes aus dem Jahr 2010 waren nach [AGFW 2010]:

- Mittlere Trassenlänge pro Hausübergabestation: 59 Meter
- Mittlere Ausnutzungsdauer: 1.741 h/a
- Mittlere Leistung der Hausübergabestationen: 153 kW
- Gemittelte Wärmeverluste: 12%
- Mittlere Netzlänge: 17 km
- Mittlere Trassenleistung: 2,6 MW/ km

Die Wärmeerzeugung erfolgt in einer Heizzentrale. Das Wärmenetz besteht neben Rohren auch aus Abzweigeleitungen (Abzweiger), Übergängen von einem größeren auf einen kleineren Rohrdurchmesser (Reduktionen) und Verbindungsmuffen. Dabei werden in der Praxis, obwohl auch Freileitungen oder Kanalverlegungen möglich sind, hauptsächlich erdverlegte Systeme (Mantelrohrsystemen) eingesetzt. Am meisten verbreitet sind dabei Kunststoffmantelrohre (KMR). Bei diesen ist das Medienrohr aus Stahl und wird von einer Isolierschicht aus Polyurethan (PUR) bedeckt. Diese wird durch ein Kunststoffmantelrohr als Polyethylen hoher Dichte (HDPE) gegen äußere Einflüsse (wie das Eindringen von Wasser) geschützt [Krimmling 2011].

Wärmerohre können entweder starr oder flexibel sein. Vorteil der flexiblen Rohre sind die geringeren Netzbaukosten, da sie direkt von der Rolle verlegt werden können, sowie das einfachere Umgehen von Hindernissen, allerdings sind flexible Rohrsysteme nur für kleinere Rohrdurchmesser einsetzbar. Im Gegensatz zu den starren Rohre haben die flexiblen Rohre üblicherweise Medienrohre aus Kunststoff, die jedoch nur geringere Temperaturen als die Stahlrohre zulassen. Für kleinere Rohrdurchmesser gibt es zudem Systeme bei denen Vor- und Rücklaufrohr in derselben Isolierung eingebettet sind- so genannte Doppelrohrsysteme, womit sich die benötigten Grabenbreiten reduzieren und weniger Erdarbeiten zur Verlegung anfallen [Krimmling 2011].

Für den Transport der Wärme zum Kunden werden zudem eine oder mehrere Netzpumpen benötigt, um die passende Drücke und Volumenströme aufrechtzuerhalten.

Für die Übergabe der Wärme aus dem Wärmenetz an ein Gebäude wird zunächst eine Hauseinführung gebaut. Hierzu wird eine Bohrung im Mauerwerk des Gebäudes benötigt, durch diese wird das Hauseinführungrohr in den Heizungsraum des Gebäudes eingeführt und das Loch wird über eine Hauseinführungsdichtung gegenüber äußeren Einflüssen geschützt.

Die Wärmeabnehmer werden parallel an das Netz angeschlossen und eine Hausübergabestation (HÜS) im Gebäude, die eine klassische dezentrale Heizung ersetzen kann, übergibt die Wärme an das Gebäude. Diese kann entweder direkt an das Wärmenetz angeschlossen sein (keine Systemtrennung) oder die Wärme über einen Wärmetauscher an das Heizwasser des Gebäudes abgeben. Über einen weiteren Wärmetauscher oder durch Aufladen eines Warmwasserspeichers wird das Warmwasser für die Gebäude bereitgestellt [Krimmling 2011].

### 3.2 Auslegung eines Wärmenetzes

Bei der Planung eines Wärmenetzes kommt es nun darauf an, welcher maximale und minimale Wärmebedarf vorliegt und wie der zeitliche Verlauf der Wärmeleistung und der Jahreswärmebedarf sind. Nach [Krimmling 2011] kann durch die Nutzung von historischen Klimadaten einer Region und durch Betrachtung von Referenzlastprofilen die Jahresdauerlinie für ein Versorgungsgebiet grob ermittelt werden. Allerdings ist es nach [RDesign] gerade bei kleineren Wärmenetzen wichtig, das individuelle Abnahmeverhalten eines jeden Wärmekunden zu kennen und zu berücksichtigen, um ein optimales Netz zu definieren. Daher muss der Wärmebedarf eines jeden Abnehmers im Netz bestimmt werden.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Da in der Praxis selten historische Abnahmedaten vorhanden sind, kann die Bestimmung des Wärmebedarfs über den Heizwärmebedarf ( $Q_{\text{Heizwärme}}$ ) pro Quadratmeter Wohnfläche ( $A$ ), den Warmwasserbedarf ( $Q_{\text{WW}}$ ) pro Person, die Volllaststunden pro Jahr ( $h_{\text{Volllast}}$ ) und die Personenzahl im Haushalt ( $n_{\text{Personen}}$ ) erfolgen.

Aus diesen Daten können die Leistungen der Hausübergabestationen ( $P_{\text{HÜS}}$ ) wie folgt berechnet werden:

$$P_{\text{HÜS}} = \frac{Q_{\text{Heizwärme}} \cdot A + Q_{\text{WW}} \cdot n_{\text{Personen}}}{h_{\text{Volllast}}} \quad \text{Formel 3-1}$$

Ab einer bestimmten Außentemperatur wird die Heizgrenze erreicht, oberhalb dieser kommt es zu einer fast konstanten Wärmeabnahme, da die Wärme nur noch zur Bereitstellung des ganzjährig benötigten Warmwasserbedarfes eingesetzt wird. Dieser minimale Wärmebedarf tritt normalerweise im Sommer auf, wenn keine Raumwärme, sondern nur Warmwasser benötigt wird. Daher kann nach [RDesign] die Heizgrenzleistung dadurch bestimmt werden, dass der maximale Wärmebedarf bei reiner Warmwassernutzung bestimmt wird. Diese Heizgrenzleistung wird in Prozenten der Nennleistung angegeben. Dabei variiert die Heizgrenzleistung je nach Abnehmer zwischen unter 10 Prozent für schlechter gedämmte ältere Häuser und steigt auf bis zu 50 Prozent für Passivhäuser (Heizwärmebedarf von unter 20 kWh/m<sup>2</sup>\*a) [RDesign].

Die Heizgrenzleistung ( $P_{\text{HG}}$ ) wird berechnet nach:

$$P_{\text{HG}} = \frac{Q_{\text{WW}} \cdot n_{\text{Personen}}}{h_{\text{Volllast}}} \quad \text{Formel 3-2}$$

Werden Heizgrenzleistung und Leistung der Hausübergabestation durcheinander geteilt, wird die Heizgrenzleistung in Prozent erhalten. Der minimale Wärmebedarf (Heizgrenzleistung) wird benötigt um die Grundlast des Netzes zu bestimmen [Krimmling 2011].

Normalerweise ist davon auszugehen, dass die maximale Wärmeleistung der Summe der maximalen Leistungen aller Abnehmer entspricht. Da in einem Wärmenetz nie alle Abnehmer gleichzeitig die maximale Leistung anfragen, kommt es zu einer Verringerung der benötigten Netzleistung um den Gleichzeitigkeitsfaktor. Dieser liegt üblicherweise bei 0,8 bis 0,6 (je nach Anzahl der gleichartigen Abnehmer) [Krimmling 2011]. Nach empirischen Untersuchungen an unterschiedlichen bestehenden Wärmenetzen kann dieser Gleichzeitigkeitsfaktor (GF) aus der Zahl gleichartiger Hausübergabestationen im Netz ( $n_{\text{HÜS}}$ ) nach [RDesign] wie folgt näherungsweise berechnet werden:

$$GF = 0,4798 + \frac{0,5197}{1 + \left(\frac{n_{\text{HÜS}}}{49,7159}\right)^{1,8955}} \quad \text{Formel 3-3}$$

Über die Leistungen der Hausübergabestationen, die Anzahl der Hausübergabestationen, den Wärmeverlust und den Gleichzeitigkeitsfaktor können die Nahwärme ab Hausübergabestation und die benötigte Nahwärme ab Heizhaus berechnet werden.

Die gesamte von den Hausübergabestation abgenommene Leistung ( $P_{\text{ab HÜS}}$ ) berechnet sich als Summe der Leistungen aller Hausübergabestationen ( $P_{1, \text{HÜS}}$  bis  $P_{n, \text{HÜS}}$ ) im Netz multipliziert mit dem Gleichzeitigkeitsfaktor:

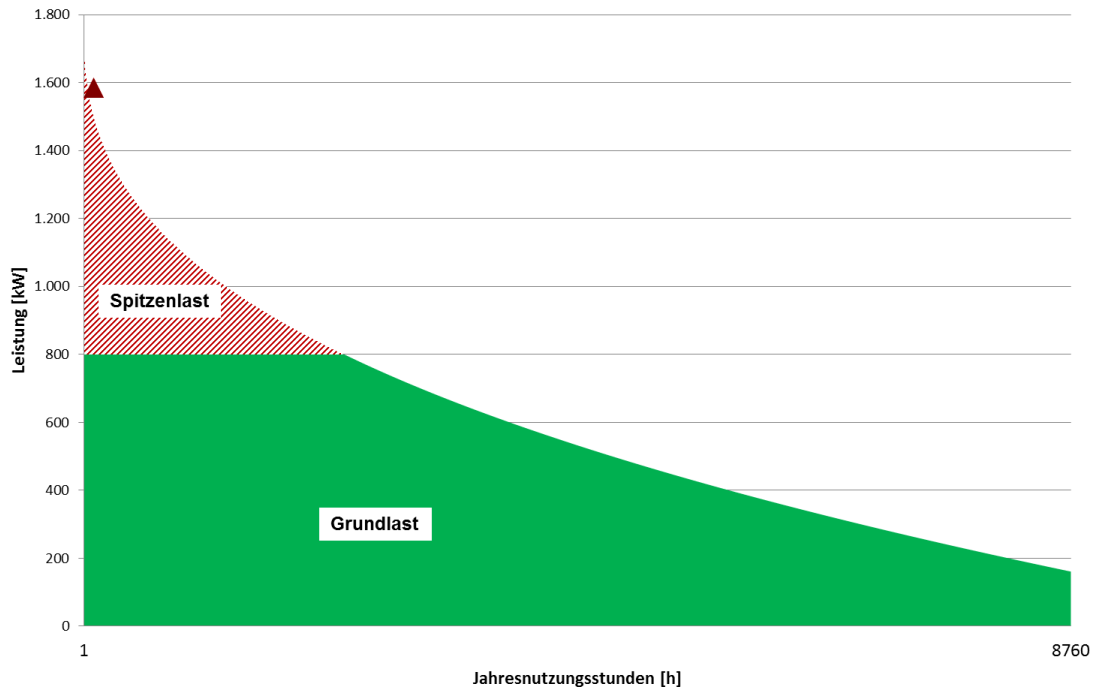
$$P_{\text{ab HÜS}} = GF * (P_{1, \text{HÜS}} + P_{2, \text{HÜS}} + \dots + P_{n, \text{HÜS}}) \quad \text{Formel 3-4}$$

Damit kann aus der Nahwärme ab Hausübergabestation und dem Wärmeverlust ( $Q_{\text{Verlust}}$ ) die Nahwärme ab Heizhaus ( $Q_{\text{ab HH}}$ ) berechnet werden:

$$Q_{\text{ab HH}} = Q_{\text{ab HÜS}} * (1 + Q_{\text{Verlust}}) \quad \text{Formel 3-5}$$

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Zur Auslegung des Wärmenetzes wird eine geordnete Jahresdauerlinie erstellt (zu sehen in Abbildung 3-2) in welche jeweils die zu jeder Stunde benötigte Wärmeleistung im Jahresverlauf ermittelt und dann nach Größe sortiert wird. Die Jahresvolllaststunden werden nach [RDesign] bestimmt indem die Nahwärme ab Heizhaus durch die Nennleistung geteilt wird.



**Abbildung 3-2: Beispielhafte Jahresdauerlinie**

Auf Basis der oben ermittelten Daten kann das Netz ausgelegt werden. Die Bestimmung der Rohrdurchmesser erfolgt in einem iterativen Prozess, bei dem das Netz mehrmals durchgerechnet und die Durchmesser angepasst werden. Je nach Durchmesser des Rohres und Massenstrom im Rohr treten unterschiedliche Druckverluste auf. Diese Druckverluste sollten in einem Bereich zwischen 100 und 200 Pascal pro Meter liegen. Dabei darf die Geschwindigkeit im Rohrabschnitt eine gewisse Höhe nicht überschreiten. Normalerweise liegen die Geschwindigkeiten bei gebäudenahen Leitungen und Anschlussleitungen unter 1 m/s, bei gebäudefernen Leitungen oder großen Transportleitungen können diese jedoch auch 2 bis 4 m/s betragen [Krimmling 2011]. Die Durchmesser der Rohre wird üblicherweise über die Nennweite nach [DIN EN ISO 6708] angegeben. Sie besteht aus dem Kürzel DN und einer ganzen Zahl, welche annähernd den inneren Rohrdurchmesser in Millimetern beschreibt.

Die Netzpumpe bemisst sich durch die im Netz auftretenden Druckverluste und die benötigten Massenströme [Krimmling 2011].

Wichtig für die Effizienz eines Wärmenetzes sind die Wärmeverluste. Sie werden durch das benötigte Temperaturniveau, die jährliche Betriebsdauer und die Dämmstärke der eingesetzten Rohre sowie ihrer Wärmeleitfähigkeit bestimmt [Krimmling 2011].

Oft kommen für die Wärmenetzauslegung kommerziell erhältliche Programm zum Einsatz, da eine Auslegung von Hand zu mühsam ist.



## **4 Methodische Grundlagen der Arbeit**

In diesem Kapitel werden zunächst in Kapitel 4.1 die theoretischen Grundlagen der Ökobilanzierung eingeführt. Dabei wird neben allgemeinen Angaben zur Methodik auch bereits auf verschiedene Aspekte der in dieser Arbeit erfolgten Modellierung eingegangen, z.B. auf die verwendeten Methoden zur Wirkungsabschätzung oder Allokation. In Kapitel 4.2 wird die Bestimmung der Wärmegestehungskosten nach [VDI 2067] beschrieben.

### **4.1 Ausgewählte Aspekte der Ökobilanzierung**

Eine Ökobilanz dient dazu die potenziellen Umweltwirkungen eines Produkts über den Verlauf seines gesamten Lebenswegs von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Nutzung bis zur Entsorgung systematisch zu untersuchen [ISO 14040].

Eine Ökobilanzstudie wird nach [ISO 14040] in vier Schritten (iterativ) durchgeführt:

- 1) Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- 2) Sachbilanz
- 3) Wirkungsabschätzung
- 4) Auswertung

Über das Ziel einer Ökobilanzstudie werden Gründe für die Durchführung der Studie, die beabsichtigte Anwendung und die Zielgruppe festgelegt. Im Untersuchungsrahmen werden die untersuchten Produktsysteme, ihre funktionellen Einheiten (quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit) und die Systemgrenzen (Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind) festgelegt. Außerdem werden die Allokationsverfahren, die Anforderungen an die Datenqualität und die verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden bestimmt [ISO 14040].

In der Sachbilanz werden die relevanten Input- und Outputflüsse (Ressourcen, Produkte, Koppelprodukte, Abfälle und Emissionen in Boden, Luft und Wasser) eines Prozesses quantifiziert und auf die funktionelle Einheit bezogen. Oft hat ein Produktsystem oder ein Prozess mehr als ein Produktoutput. Sollen nun lediglich die Umweltlasten eines der Produkte bestimmt werden, wird eine Aufteilung der Outputflüsse auf die Ko-Produkte anhand einer Allokationsmethoden notwendig (näher beschrieben in Kapitel 4.1.2).

In der ISO 14044 wird Wirkungsabschätzung definiert als „Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient“ [ISO 14044]. Laut [ISO 14040] dienen Wirkungsabschätzungsmethoden dazu festzulegen, wie die in der Sachbilanz erhaltenen Elementarflüsse an die Umwelt zu Wirkungskategorien und -indikatoren verknüpft werden, um so potenzielle Umweltwirkungen der Produkte abzubilden. Je nach Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz können hierfür verschiedene Wirkungsabschätzungsmethoden und -kategorien zum Einsatz kommen. Die in dieser Arbeit verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden sind näher beschrieben in Kapitel 4.1.3.

Schließlich werden in der Auswertung die Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung ausgewertet und die unterschiedlichen untersuchten Systeme können gegenübergestellt werden.

#### **4.1.1 Prozesskettenmodellierung nach BioEnergieDat**

Die meisten der in dieser Arbeit verwendeten Datensätze zur Biomassebereitstellung und Biomassekonversion wurden als Teil des vom BMU geförderten Projektes BioEnergieDat von 2010 bis 2012 erstellt. Dieses Projekt wurde von einem Konsortium aus sieben Partnern ausgeführt und hatte zum Ziel, eine

validierte Datenbank für Datensätze zu Energie aus Biomasse zu entwickeln. Aufgrund eines modularen Aufbaus der Prozessketten können die Ergebnisse nicht nur für die deutsche Biomassestrategie eingesetzt werden, sondern sind auch auf andere Ökobilanznutzungen übertragbar. Im Projekt wurden 37 Prozessketten erstellt, die auf einer Auswertung bestehender Literatur und Projekte aufbauen [Schebek 2010], [BioEnergieDat 2013].

Für das Projekt wurden umfassende methodische Rahmenbedingungen entwickelt um die Datensatzerstellung zu unterstützen. Um die Nutzbarkeit der BioEnergieDat Datensätze zu vergrößern wurden die Anforderungen verschiedener Nutzerperspektiven z.B. aus den ISO Normen 14040/44, dem ILCD Handbuch, den ecoinvent quality network Anforderungen oder eines Carbon Footprint (nach PAS 2050 und dem Greenhouse Gas Protocol) untersucht und integriert. Hierbei konnten die meisten Anforderungen in einen sogenannten gemeinsamen „Methodenkern“ überführt werden, den alle Datensätze erfüllen mussten. Manche der Nutzerperspektiven benötigten jedoch eine Erweiterung, Reduktion oder Abwandlung des Methodenkerns [BioEnergieDat 2013].

Die methodischen Anforderungen des BioEnergieDat Methodenkerns sind im Folgenden näher beschrieben.

Alle BioEnergieDat Datensätze sind ISO 14040/44 konform und folgen dem Unit- process- Prinzip, d.h. die einzelnen Prozesse im Lebenszyklusmodell werden als kleinste mögliche und sinnvolle Einheit modelliert. Die Prozesse werden nicht aggregiert und auf der Ebene der Unit- Prozesse wird keine Allokation durchgeführt (Multi- Output- Prozesse). Damit bleiben sie für viele unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten offen. Außerdem gilt in BioEnergieDat das Prinzip der möglichst vollständigen Modellierung, d.h. alle Input- und Outputflüsse eines Prozesses sollen erfasst werden. Die vollständigen Prozessketten basieren auf einer „Wiege bis zu Bahre“ Betrachtung. Die Liste der Elementarflüsse ist so umfangreich wie möglich und enthält auch biogene Emissionen. Zentral für BioEnergieDat ist die Transparenz der Datensätze und die ausreichende Dokumentation, welche Angaben zum geografischen und zeitlichen Bezug des Prozesses, die modellierte Technik und das Produkt, die Besonderheiten in der Modellierung, die verwendeten Datenquellen, die Anwendbarkeit des Datensatzes und die durchgeführte Qualitätssicherung enthält. Anhand der Dokumentation muss ein Nutzer die Nutzbarkeit und Qualität eines Datensatzes eindeutig beurteilen können. Für alle BioEnergieDat- Datensätze wurde ein internes Review durch einen Modellierer, welcher nicht an der Datensatzerstellung beteiligt war, durchgeführt. Zudem wurden alle Datensätze in sogenannten Technologiepanels von Experten geprüft und, falls nötig, angepasst. Die geografische Systemgrenze aller Vordergrundprozesse ist Deutschland und das Referenzjahr ist das Jahr 2010 [BioEnergieDat 2013]. Nicht in BioEnergieDat enthalten ist die Präzision (erklärt in Tabelle 4-2), da ausschließlich mit sekundären Datenquellen gearbeitet wird.

Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze der Holzkonversionstechnologien basieren auf den in BioEnergieDat erstellten Datensätzen, wobei sie teilweise angepasst wurden, um für die spezielle Anwendung besser nutzbar zu sein. Diese jeweils im Einzelfall näher beschriebenen Anpassungen waren z.B. der Einsatz einer exergetischen Allokation, der Wechsel von einer Brutto- auf eine Nettobetrachtung oder die Aufnahme weiterer Luftemissionen. Damit erfüllen alle in dieser Dissertation verwendeten Datensätze die Anforderungen des BioEnergieDat Methodenkerns.

### 4.1.2 Allokationsverfahren

Falls möglich sollte eine Allokation durch eine Teilung der betroffenen Prozessmodule in zwei oder mehrere Teilprozesse oder durch eine Systemerweiterung vermieden werden. Bei einer Systemerweiterung wird nach [Baumann, Tillman 2004] ein alternativer Prozess benötigt, welcher dasselbe Produkt liefert wie das Ko-Produkt. Die Umweltlasten dieses Prozesses werden dem System gutgeschrieben, da sie durch die Bereitstellung des Ko- Produktes vermieden werden können. Ansonsten können die Inputs und Outputs des Systems zwischen den Produkten so aufgeteilt werden, dass die physikalischen Beziehungen zwischen ihnen widerspiegelt werden. Wenn auch dieser Ansatz nicht funktioniert, können laut [ISO 14044] andere

Beziehungen zwischen den Produkten ausgewählt werden, z.B. indem die Allokation anhand der ökonomischen Werte der Produkte erfolgt [ISO 14044].

Mögliche physikalische Beziehungen zwischen den Ko-Produkten können die Masse, Stoffmenge oder der Energieinhalt sein. Gerade bei Kraft- Wärme- Kopplungsprozessen bei denen neben Strom auch Wärme erzeugt wird, macht es oft Sinn eine exergetische Allokation durchzuführen. Im Gegensatz zur Energie spiegelt die Exergie direkt die Arbeitsfähigkeit der Wärme wider, also den Teil der Wärme, der oberhalb der Raumtemperatur liegt. Nach [Briem et al. 2004] kann aus der Energiemenge (Q) die Exergie (E) in Abhängigkeit der Temperatur der Wärme (T) in Kelvin und der Umgebungstemperatur ( $T_u$ ) ebenfalls in Kelvin wie folgt berechnet werden:

$$E = Q * \frac{T - T_u}{T} \quad \text{Formel 4-1}$$

Üblicherweise wird dabei von einer Umgebungstemperatur von 10°C (283 K) ausgegangen [Briem et al. 2004].

### 4.1.3 Wirkungsabschätzungsmethoden

In diesem Kapitel werden zunächst die mit der Wärmebereitstellung aus Holz verknüpften relevanten Wirkungskategorien identifiziert und kurz beschrieben. Danach wird darauf eingegangen, welche Wirkungsabschätzungsmethoden für diese jeweils verwendet werden.

Als positive Effekte bei der energetischen Holznutzung werden gegenüber der Nutzung von fossilen Brennstoffen üblicherweise sowohl die geringeren fossilen Kohlendioxidemissionen (und damit auch das geringere Treibhausgaspotenzial) angesehen, als auch die Schonung fossiler Ressourcen. Allerdings werden auch bei der Verbrennung von Holz eine Vielzahl von Luftschadstoffen freigesetzt, die vergleichbar, oder sogar teilweise höher (z.B. Staubemissionen), als bei der Nutzung fossiler Brennstoffe ausfallen können. Aber auch weitere Kategorien wie die Versauerung und Eutrophierung sind wichtig zur Beurteilung der Umweltwirkungen der energetischen Biomassenutzung. Auf Grund ihrer geringeren Bedeutung bei der Nutzung von Holzreststoffen werden in dieser Arbeit die Wirkungskategorien Ionisierende Strahlung und Landnutzungsänderungen nicht mitbetrachtet. Anstelle des Ressourcenverbrauchs (Wasser sowie Mineralien und Metalle) wird mit einem kumulierten Energieaufwand gearbeitet. Dies hat den Vorteil, dass direkt die energetische Effizienz der Prozesse zu sehen ist, da hier nicht eingetragt wird, wie selten welche Rohstoffe sind. Außerdem müssen, auf Grund mangelnder Daten zu den Schwermetall- und teilweise auch Dioxinemissionen, die Wirkungskategorien Humantoxizität und Ökotoxizität außen vorgelassen werden.

In den ISO- Normen finden sich keine Angaben über die zu verwendenden Wirkungsabschätzungsmethoden. Um aus einer Vielzahl an verfügbaren Wirkungsabschätzungsmethoden die am besten geeigneten und ausgereiftesten Methoden auszuwählen, wird auf die Analyse von [JRC 2011] zu diesem Thema aufgebaut. In dieser Publikation werden zunächst die betrachteten Wirkungskategorien gezeigt und dann für jede Kategorie unterschiedliche bereits verfügbare Methoden verglichen. Dabei werden die Methoden anhand von Kriterien wie der Vollständigkeit, Umweltrelevanz, wissenschaftliche Robustheit und Sicherheit, Dokumentation, Transparenz und Reproduzierbarkeit sowie Anwendbarkeit bewertet.

Grundsätzlich kann bei der Auswahl von Wirkungskategorien zwischen zwei Arten von Indikatoren unterschieden werden. Die einen Indikatoren sind in der Mitte der Wirkungskette angesiedelt. Sie beschreiben einen bekannten Umweltmechanismus für eine Reihe von Substanzen, ein Beispiel hierfür wäre das Treibhausgaspotenzial. Die anderen Indikatoren beschreiben die Wirkungsendpunkte der drei Schutzbereiche „menschliche Gesundheit“, „natürliche Umwelt“ und „natürliche Ressourcen“ [JRC 2010].

Beide Arten von Wirkungsindikatoren werden in Abbildung 4-1 gezeigt.

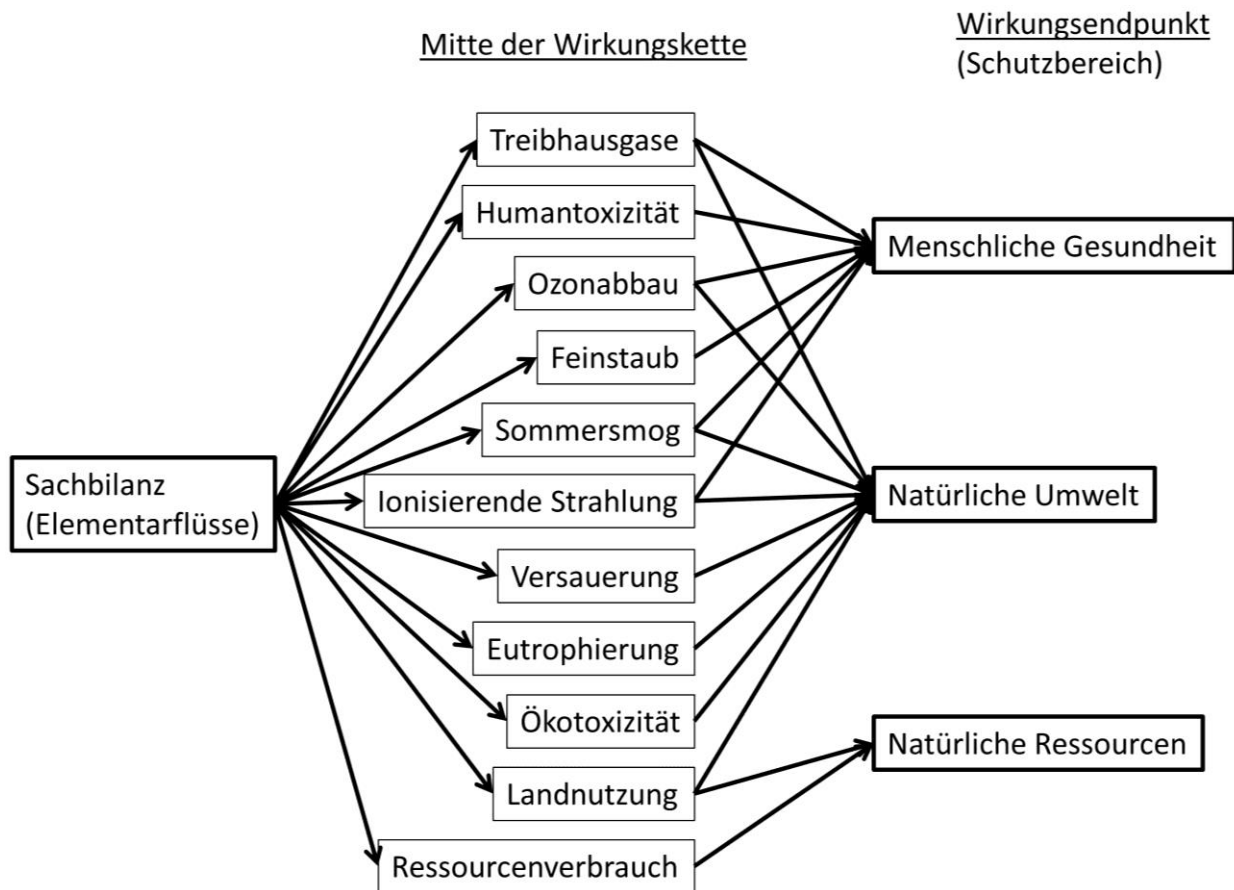


Abbildung 4-1: Wirkungskategorien in der Mitte der Wirkungskette und am Wirkungsendpunkt [JRC 2010]

Bei den Wirkungsendpunkten ist die Unsicherheit deutlich höher, als in der Mitte der Wirkungskette, da viele Schadensmechanismen noch nicht vollständig erforscht sind [JRC 2010]. In der vorliegenden Arbeit wird daher ausschließlich mit den im Folgenden näher beschriebenen Indikatoren aus der Mitte der Wirkungskette gearbeitet.

Die in dieser Arbeit verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden werden nach den Empfehlungen in [JRC 2011] ausgewählt. Allerdings sind nicht alle in [JRC 2011] empfohlenen Methoden für die verwendete Ökobilanzsoftware openLCA verfügbar oder mit der ecoinvent v2.2 Datenbank kompatibel, daher muss teilweise auf alternative Methoden ausgewichen werden.

#### 4.1.3.1 Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand dient dazu den Energieverbrauch während des Lebenszyklus eines Produktes zu untersuchen. Er enthält sowohl den direkten Energieverbrauch als auch den grauen Energieverbrauch, d.h. der indirekte Energieverbrauch durch die stoffliche Nutzung geht ebenfalls ein. Dabei werden jedoch nur Stoffe eingerechnet, die auch einen Nutzen als Energieträger haben [Hischier et al. 2010]. Der kumulierte Energieaufwand kann in den nicht- erneuerbaren Anteil und den erneuerbaren Anteil unterteilt werden. In ecoinvent v2.2 wird mit acht verschiedenen Wirkungskategorien gerechnet. Drei davon gelten als nicht-erneuerbar: Der fossile kumulierte Energieaufwand (enthält Steinkohle, Braunkohle, Rohöl, Erdgas, Grubengas und Torf und wird über den Brennwert der Stoffe bestimmt), der nukleare kumulierte Energieaufwand und der kumulierte Energieaufwand mit nicht- erneuerbarer Biomasse aus einem Primärwald [Hischier et al. 2010]. Alle drei nicht- erneuerbaren Anteile werden in dieser Arbeit zusammengefasst. Fünf weitere Kategorien aus dem Bereich des erneuerbaren kumulierte Energieaufwand werden ebenfalls in ecoinvent v2.2 genutzt: Biomasse, Wind, Sonne, Geothermie und Wasser [Hischier et al. 2010]. Auf Grund der großen

Unsicherheiten bei der Bestimmung des kumulierten Energieaufwandes aus Wind, Sonne, Wasser und Geothermie wird hier nur mit dem Anteil aus Biomasse gearbeitet. Hierzu wird nach [Hischier et al. 2010], wie beim fossilen kumulierte Energieaufwand auch, der Brennwert der Biomasse benötigt. Die zugehörigen Wirkungsfaktoren sind in Anhang 1 gezeigt. Der kumulierte Energieaufwand wird in MJ- Äquivalenten angegeben.

### **4.1.3.2 Treibhausgase**

Alle Treibhausgase haben eine gemeinsame Eigenschaft: ihre Fähigkeit Infrarotstrahlung zu absorbieren und damit die Atmosphäre aufzuheizen. Neben Kohlendioxid haben auch andere Gas wie z.B. Methan, Lachgas oder Kohlenmonoxid eine stärkere oder schwächere Wirkung als Treibhausgas. Der Beitrag eines Stoffes zum Treibhausgaseffekt ist daher als Treibhausgaspotenzial definiert. Er wird bestimmt, indem die Steigerung der Aufnahme der Infrarotstrahlung durch ein Kilogramm der Substanz durch die Steigerung durch ein Kilogramm Kohlendioxid geteilt wird. Die Treibhausgase werden daher in Kilogramm Kohlendioxidäquivalenten (kg CO<sub>2</sub>-Eq.) angegeben. Da unterschiedliche Treibhausgase unterschiedlich lange in der Atmosphäre verweilen, haben sie je nach betrachtetem Zeithorizont eine andere Treibhausgaswirkung [Baumann und Tillman 2004]. In dieser Arbeit wird für die Berechnung des Treibhauseffektes nach der Empfehlung von [JRC 2011] das Treibhausgaspotenzial des Intergovernmental Panel for Climate Change [IPCC 2007] mit einem Zeithorizont von 100 Jahren verwendet.

### **4.1.3.3 Feinstaub**

Die Wirkungskategorie Feinstaub beschreibt die Auswirkungen auf die Atemwege durch primäre und sekundäre Partikelemissionen. In [JRC 2011] wird für den Feinstaub empfohlen mit den Angaben aus der RiskPoll Software Version 1.051 von [Rabl, Spadaro 2004] zu arbeiten. Auf Grund der relativ geringen Anzahl an Emissionen kann diese Wirkungskategorie in openLCA übernommen werden, in dem die vom [JRC 2011] gelieferten Wirkungsfaktoren auf die ecoinvent v2.2 Flüsse umgearbeitet werden. Sie wird in Äquivalenten zu einem Kilogramm Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 2,5 µm (PM 2.5µm- Eq.) angegeben. Auch hier sind die zugehörigen Wirkungsfaktoren in Anhang 1 aufgelistet.

### **4.1.3.4 Ozonabbau**

Verschiedene Substanzen führen dazu, dass die stratosphärische Ozonschicht, welche die Erde von der schädlichen Ultraviolettstrahlung der Sonnen schützt, dünner wird. Meistens wird ein Gleichgewichtsmodell verwendet. Als Referenz dient das Ozonabbaupotenzial von CFC-11 [Baumann und Tillman 2004]. Laut [JRC 2011] wird empfohlen das Ozonabbaupotenzial nach [WMO 1999] zu verwenden. Da die „ozone depletion, infinite“ nach ReCiPe midpoint (H) auf diesen Faktoren basiert, wird sie hier verwendet. Der Ozonabbau wird als Kilogramm CFC-11- Äquivalent angegeben.

### **4.1.3.5 Sommersmog**

Der Sommersmog wird durch die Bildung von Photooxidantien bestimmt. Photooxidantien sind sekundäre Luftschadstoffe, die sich unter dem Einfluss von Sonnenlicht in den unteren Schichten der Atmosphäre aus Stickoxiden und anderen Kohlenwasserstoffen bilden. Bodennahe Ozon ist einer der wichtigsten Photooxidantien mit Auswirkungen auf das Atemsystem von Menschen und Tieren. Das Potenzial der unterschiedlichen Stoffe zur Erzeugung von Sommersmog kann in Kilogramm NMVOC- Äquivalenten (flüchtige organische Verbindungen) angegeben werden [Baumann und Tillman 2004]. Auch hier wird nach der Empfehlung aus [JRC 2011] die „photochemical oxidant formation“ aus ReCiPe midpoint (H) genutzt.

### **4.1.3.6 Eutrophierung**

Bei der Eutrophierung kommt es zu einem übermäßigen Nährstoffeintrag in den Boden oder ins Wasser welcher zu einer verstärkten Bioproduktivität führt [Baumann und Tillman 2004].

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Eutrophierung wird durch den Eintrag von Phosphor und Phosphaten in Frischwasser bestimmt, daher wird sie meist in Kilogramm Phosphor- Äquivalenten angegeben [Baumann und Tillman 2004]. Verwendet wird in dieser Arbeit die „freshwater eutrophication“ aus ReCiPe midpoint (H), wie von [JRC 2011] empfohlen.

Die terrestrische Eutrophierung hingegen wird meistens durch Stickstoffemissionen ausgelöst [Baumann und Tillman 2004]. Verwendet wird hier die „terrestrial eutrophication“ des Environmental Design of Industrial Products (EDIP 2003) als in [JRC 2011] genannte alternative Methode. Nach [Hischier et al. 2010] wird die terrestrische Eutrophierung als Fläche eines terrestrischen Ökosystems bestimmt bei der durch eine vollständige Deponierung die maximal zulässige terrestrische Eutrophierung überschritten wird. Sie wird in Quadratmetern gemessen.

### 4.1.3.7 Versauerung

Über Regen, Schnee oder Nebel können Luftschadstoffe in den Boden eingetragen werden, wo sie zur Versauerung führen können. Alle Substanzen mit Versauerungspotenzial haben gemeinsam, dass sie Wasserstoffionen mit versauernder Wirkung bilden können. Das Versauerungspotenzial (AP) wird daher meistens auf die Menge an Wasserstoffionen, die ein Kilogramm Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) erzeugen kann, bezogen. Wichtige Schadstoffe mit versauernder Wirkung sind neben Schwefeldioxid die Stickoxide, Chlorwasserstoff und Ammoniak [Baumann und Tillman 2004]. Für die terrestrische Versauerung wird die in [JRC 2011] als alternative Methode identifizierte „terrestrial acidification“ aus ReCiPe midpoint (H) verwendet. Sie zeigt die Versauerung in Kilogramm Schwefeldioxid- Äquivalenten.

In Tabelle 4-1 wird gezeigt welche Emissionen aus der Holzverbrennung für die jeweiligen Wirkungskategorien benötigt werden. Eutrophierung und Ozonabbau werden nur durch die Emissionen aus den Vorketten bestimmt.

	Treibhausgase (100 Jahre)	Feinstaub	Terrestrische Eutrophierung	Terrestrische Versauerung	Sommersmog
<b>Kohlendioxid</b>	x				
<b>Kohlenmonoxid</b>	x	x			x
<b>Lachgas</b>	x				
<b>Methan</b>	x				x
<b>NMVOC</b>					x
<b>Schwefeldioxid</b>		x		x	x
<b>Staub</b>		x			
<b>Stickoxide</b>		x	x	x	x
<b>Ammoniak</b>		x	x	x	

**Tabelle 4-1: Luftemissionen aus der Holzverbrennung und Wirkungskategorien**

Mit Ausnahme der ORC- Anlagen mit Industrierest- und Landschaftspflegeholz hackschnitzel sowie des Dampfturbinen- Heizkraftwerkes mit Waldrestholz hackschnitzel enthalten alle Prozessketten die geforderten Emissionen. Einzig die Ammoniakemissionen fehlen bei allen Prozessen. Eine Überprüfung anhand ausgewählter Holznutzungstechnologien aus ecoinvent v2.2 hat allerdings ergeben, dass die Unterschiede bei der Einrechnung von Ammoniak zu der Holzverbrennung ohne Ammoniak sehr gering ausfallen, da überhaupt nur sehr geringe Ammoniakemissionen auftreten. Daher wird das Fehlen dieser als nicht kritisch angesehen.

### 4.1.4 Datenqualität

Schon bei der Datenerhebung bestimmt sich die spätere Datenqualität eines Datensatzes. Dabei gibt es zwei Arten von potenziellen Fehlerquellen: mangelnde Präzision (bildet die natürliche Schwankung der Werte ab) und Unsicherheiten, die aus mangelndem Wissen um den exakten (d.h. fehlerfreien) Wert stammen und durch bessere Datenaufnahme reduziert werden können. Die verschiedenen Quellen von Unsicherheit in der Ökobilanz sind nach [Björklund 2002]:

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

- Datenungenauigkeit
- Datenlücken
- nicht repräsentative Daten (oft genutzt zum Füllen von Datenlücken)
- Unsicherheiten im Modell (um ein System modellieren zu können muss es immer vereinfacht werden)
- räumliche und zeitliche Unsicherheit
- Fehler und Unsicherheiten aufgrund von Modellierungsentscheidungen (Allokation, Systemgrenzen,...)

Um die Unsicherheit in einer Ökobilanz bestimmen zu können, muss die Datenqualität, und damit der Grad des Vertrauens in die Daten auf Prozess- und auf Produktsystemebene, bestimmt werden. Die Datenqualität einer Ökobilanz ist nach [ISO 14044 Kapitel 3.19] definiert als „Eigenschaften von Daten in Bezug auf ihre Eignung, festgelegte Anforderungen zu erfüllen“. Damit ist die Datenqualität nicht absolut messbar, sondern immer abhängig von der beabsichtigten Anwendung und den Nutzeranforderungen. Die Datenqualität eines Prozesses oder einer Prozesskette wird durch die Metainformationen des Datensatzes über die Datenerhebung, Präzision, Verlässlichkeit, Vollständigkeit, Alter, Geographie und Technologie ausgedrückt [Björklund 2002].

In den ISO Normen [ISO 14040] und [ISO 14044] werden verschiedene Datenqualitätsanforderungen definiert (gezeigt in Tabelle 4-2) und beschrieben.

Anforderung	ISO Beschreibung
<b>Repräsentativität</b>	qualitative Einschätzung für den Grad, in dem die Datenmenge die wahre, interessierende Grundgesamtheit widerspiegelt (d. h. geographischer und zeitlicher Bezug sowie technologischer Erfassungsbereich)
<b>zeitbezogener Erfassungsbereich</b>	Alter der Daten und das kleinste Zeitintervall, über das die Daten gesammelt werden sollten
<b>geographischer Erfassungsbereich</b>	geographischer Bereich, aus dem Daten für Prozessmodule gesammelt werden sollten
<b>Technologischer Erfassungsbereich</b>	spezifische Technologie oder Technologiemix
<b>Präzision</b>	Maß für die Schwankungsbreite der Werte für alle angegebenen Daten (z. B. Varianz)
<b>Vollständigkeit</b>	prozentualer Anteil eines Flusses, der gemessen oder abgeschätzt wird
<b>Konsistenz</b>	qualitative Einschätzung dafür, ob die Methode der Studie auf die verschiedenen Komponenten der Analyse einheitlich angewendet wird
<b>Vergleichspräzision</b>	qualitative Einschätzung für den Umfang, in dem ein unabhängiger Ersteller mit den Informationen über die Methode und die Datenwerte die in der Studie angegebenen Ergebnisse reproduzieren kann
<b>Datenquellen</b>	-
<b>Unsicherheit der Information</b>	z. B. Daten, Modelle und Annahmen

**Tabelle 4-2: Datenqualität [ISO 14044]**

In [UNEP/ SETAC 2011] wird der Indikator „Datenquellen“ näher definiert als „Datenquellen zur Dokumentation der Datenherkunft“.

Dabei beziehen sich diese Datenqualitätsanforderungen nach [Smith Cooper 2012] auf verschiedene Ebenen des Lebenszyklus: die Konsistenz auf die Sachbilanz, die Vollständigkeit auf die Prozessmodule und die anderen Kriterien auf die Flüsse eines Prozessmodules. Dennoch müssen alle Kriterien konsistent für die ganze Prozesskette angewendet werden.

Nach [May, Brennan 2003] gibt es drei grundsätzliche Methoden um die Datenqualität zu analysieren:

- quantitative Methoden, welche lediglich die Präzision ausweisen
- qualitative Methoden, bei denen verschiedene Datenqualitätsindikatoren bewertet werden
- Mischmethoden, bei denen aus der qualitativen Bewertung eine quantitative Präzision abgeleitet wird

### **4.1.4.1 Quantitative Datenqualitätsbewertungsmethoden**

Quantitative Bewertungsmethoden berechnen die Präzision eines Outputs, indem sie eine Fehlerfortpflanzungsanalyse nutzen. Soweit wie möglich wird hierfür für alle Inputflüsse eines Prozesses die Präzision bestimmt. Kann kein Wert festgelegt werden, können Faustregeln genutzt werden, um wahrscheinliche Unsicherheitsverteilungen zu generieren. Hauptnachteil dieser Datenqualitätsanalysemethoden ist, dass hier nur ein Aspekt der Datenqualität, nämlich die Präzision, betrachtet wird. Die Nutzbarkeit der Daten für eine spezielle Anwendung wird dabei nicht bewertet [May, Brennan 2003].

### **4.1.4.2 Qualitative Datenqualitätsbewertungsmethoden**

Oftmals ist die Präzision nicht bekannt oder es soll die Nutzbarkeit der Daten für eine spezielle Anwendung bewertet werden. Daher werden nach [May, Brennan 2003] qualitative Bewertungen der Datenqualität durchgeführt, indem jede Eigenschaft eines Produktsystems, Prozessmoduls oder Flusses, welche die Datenqualität betrifft, mit einer Note bewertet wird, wobei niedrigere Noten üblicherweise bessere Datenqualitäten ausdrücken.

Neben den qualitativen Datenqualitätsindikatoren aus den ISO Normen haben viele Organisationen und Ökobilanzdatenbanken ihre eigenen Qualitätsstandards definiert. Zwei gängige Methoden um die Datenqualität zu bewerten sind die in ecoinvent verwendete Pedigree Matrix und das data quality rating aus dem ILCD Handbuch.

#### **Pedigree Matrix**

Die von [Weidema, Wesnæs 1996] eingeführte Pedigree Matrix definiert fünf qualitative Datenqualitätsindikatoren: zeitliche Korrelation, geografische Korrelation, weitere technologische Korrelation, Verlässlichkeit und Vollständigkeit. Jeder dieser Indikatoren wird mit einer Note zwischen 1 (beste Qualität) und 5 (schlechteste Qualität) bewertet. Entgegen der [ISO 14044] wird hier die Vollständigkeit genutzt um auszudrücken, wie repräsentativ die verwendeten Daten im Hinblick auf die Messmethoden, Stichprobenumfang und den Erhebungszeitraum sind. Ist ein Wert unbekannt, wird automatisch die schlechteste Note (5) vergeben.



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Note	1	2	3	4	5
<b>Verlässlichkeit</b>	Verifizierte Daten basierend auf Messungen	Verifizierte Daten die teilweise auf Annahmen basieren ODER nicht-verifizierte Daten basierend auf Messungen	Nicht- verifizierte Daten die teilweise auf qualifizierten Annahmen basieren	Qualifizierte Annahmen	Nicht qualifizierte Annahmen
<b>Vollständigkeit</b>	Repräsentative Daten einer ausreichenden Zahl an Anlagen, über einen ausreichenden Zeitraum um natürliche Schwankungen auszugleichen	Repräsentative Daten einer geringeren Anlagenzahl, über einen ausreichenden Zeitraum	Repräsentative Daten einer ausreichenden Menge an Anlagen, über einen kürzeren Zeitraum	Repräsentative Daten einer geringeren Anlagenzahl, über einen kürzeren Zeitraum ODER Unvollständige Daten einer ausreichenden Anlagenzahl, über ausreichenden Zeitraum	Repräsentativität unbekannt oder unvollständige Daten einer kleinen Anzahl von Anlagen über einen kürzeren Zeitraum
<b>Zeitliche Korrelation</b>	Weniger als 3 Jahre Zeitunterschied zur Zeitperiode des Datensatzes	Weniger als 6 Jahre Zeitunterschied zur Zeitperiode des Datensatzes	Weniger als 10 Jahre Zeitunterschied zur Zeitperiode des Datensatzes	Weniger als 15 Jahre Zeitunterschied zur Zeitperiode des Datensatzes	Alter der Daten unbekannt oder mehr als 15 Jahre Zeitunterschied
<b>Geografische Korrelation</b>	Daten der betrachteten Region	Durchschnittliche Daten einer größeren Region, welche die betrachtete Region enthält	Daten einer Region mit ähnlichen Produktionsbedingungen	Daten einer Region mit leicht ähnlichen Produktionsbedingungen	Daten aus unbekannter Region oder sehr unterschiedlicher Region
<b>Weitere Technologische Korrelation</b>	Daten der Firma, Prozesse und Materialien welche untersucht werden	Daten der Prozesse und Materialien welche untersucht werden (z.B. selbe Technologie) einer anderen Firma	Daten der Prozesse und Materialien welche untersucht werden, aber von anderer Technologie	Daten ähnlicher Prozesse und Materialien	Daten ähnlicher Prozesse auf Labormaßstab oder von anderer Technologie

**Tabelle 4-3: Pedigree Matrix [Weidema, Wesnæs 1996] (übersetzt ins Deutsche)**

Nach [Weidema 1998] sind die Datenqualitätsindikatoren und ihre Bewertungskriterien fest vorgegeben, allerdings kann die Interpretation der Ergebnisse von der Art des Prozesses, dem Industriesektor und dem Ziel der Studie abhängen. Während Verlässlichkeit und Vollständigkeit unabhängig von den Zielen einer Studie sind, können die weitere technologische, zeitliche und geografische Korrelation variieren [Weidema, Wesnæs 1996].

Allerdings kann argumentiert werden, dass die Verbindung von Vollständigkeit und Repräsentativität nur aus Sicht eines Datenbankanbieters Sinn macht. Die Vollständigkeit ist üblicherweise ebenfalls abhängig von der intendierten Nutzung der Daten, da ein spezifischer Nutzer eventuell nicht nach repräsentativen Daten sondern Daten für einen ganz speziellen Zweck sucht.

### Data quality rating

Sowohl im ILCD Handbuch [ILCD 2010] als auch in der Product Environmental Footprint Guideline [PEF 2012] werden sechs Datenqualitätsindikatoren definiert: technologische Repräsentativität (TeR), geografische Repräsentativität (GeR), zeitliche Repräsentativität (TiR), Vollständigkeit (C) (nach ISO 14044), Präzision (P) und methodische Angemessenheit und Konsistenz (M).

Die Vollständigkeit bestimmt den quantitativen Anteil an (Elementar-)Flüssen, der in der Sachbilanz enthalten ist. Die Präzision misst die Varianz der Daten. Beide Indikatoren werden auf der Ebene der Produktsysteme und für jede einzelne Wirkungsabschätzungskategorie bewertet. Die methodische Angemessenheit und Konsistenz bewertet inwiefern die verwendeten Sachbilanzmethoden und methodischen Grundlagen (z.B. Allokation) im Einklang mit den Forderungen des ILCD Handbuches oder der PEF Guideline stehen. Alle Methoden müssen dabei gleichermaßen auf den gesamten Lebenszyklus angewendet werden [ILCD 2010], [PEF 2012].

Die technologische, geographische und zeitliche Repräsentativität (TeR, GR und TiR) sind nach [ILCD 2010] und [PEF 2012] abhängig vom Kontext. Sie bestimmen wie gut der Datensatz die wahren Gegebenheiten in Bezug auf die betrachtete Technologie, den Zeithorizont und die Geographie widerspiegelt. Nach [PEF 2012] können diese in Product Environmental Footprint Category Rules näher bestimmt werden.

Jeder Indikator wird mit einer Note zwischen 1 und 5 bewertet, wobei 1 die beste Note ist.

Die Datenqualität wird dann nach [PEF 2012] wie folgt berechnet:

$$DQR = \frac{TeR+GeR+TiR+P+C+M}{6} \quad \text{Formel 4-2}$$

Ist ein Indikator nicht anwendbar wird die Note 0 vergeben und die Zahl im Nenner wird um 1 reduziert. Während beim ILCD Handbuch der schlechteste Wert fünffach gezählt wurde, gehen bei der neueren PEF Guideline alle Indikatoren gleich stark in die Bewertung ein [PEF 2012] [ILCD 2010].

#### **4.1.4.3 Kombination von qualitativen Datenqualitätsanalysemethoden mit quantitativen Unsicherheitsverteilungen**

Neben der Präzision und der rein qualitativen Bewertung der Datenqualität gibt es Methoden, die anhand der qualitativen Datenqualitätsnoten eine zusätzliche quantitative Unsicherheitsverteilung hinzufügen [May, Brennan 2003].

Breite Anwendung hat dieses Vorgehen in der ecoinvent Datenbank gefunden. In dieser werden die qualitative und die quantitative Datenqualität miteinander kombiniert. Basierend auf der Bewertung nach der Pedigree Matrix wird eine zusätzliche Unsicherheitsverteilung berechnet. Die hierzu verwendeten quantitativen Unsicherheitsverteilungen wurden anhand von Expertenschätzungen definiert [Weidema et al. 2013].

Trotz des mathematischen Hintergrundes in der zusätzlichen Unsicherheitsverteilung sind die Ergebnisse immer subjektiv, da sie sich auf Expertenschätzungen verlassen. Die Angabe dieser zusätzlichen Unsicherheitsverteilung kann jedoch zu einer Scheingenaugigkeit der Ergebnisse führen und im schlimmsten Fall sogar das Verständnis der Datenunsicherheit schmälern [May, Brennan 2003].

Deswegen wird in dieser Arbeit alleine mit einer qualitativen Datenqualitätsbewertung gearbeitet. Dabei wird die Datenqualität bereits bei der Datensatzerstellung einbezogen, das hierzu verwendete Vorgehen ist in Kapitel 7.3 gezeigt.

## **4.2 Anmerkungen zur Bestimmung der Wärmegestehungskosten**

Zur Bestimmung der Wärmegestehungskosten der verschiedenen holzbasierten Wärmeversorgungskonzepte werden zunächst die Kosten der Wärme ab Konversionsanlage bestimmt. Über das Programm RDesign können dann die zusätzlichen Kosten für einen Transport der Wärme zum Endkunden berechnet werden, indem die in RDesign vorhandenen Kostendaten aktualisiert oder teilweise auf das Jahr 2010 fortgeschrieben werden.

Für die Ermittlung der Wärmegegestehungskosten der Konversionsanlagen wird eine Wirtschaftlichkeitsrechnung nach VDI 2067 durchgeführt. Die Richtlinie VDI 2067: Blatt 1 „Grundlagen und Kostenbetrachtungen“ beschäftigt sich mit der Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Zur Ermittlung dieser wird mit der Annuitätenmethode gearbeitet. Zunächst muss daher ein sinnvoller Betrachtungszeitraum ausgewählt werden. Bei klassischen Gebäudeheizungen kann ein Betrachtungszeitraum zwischen 15 und 20 Jahren gewählt werden. Dabei sind nach [VDI 2067] zur Ermittlung der Kosten vier Gruppen zu unterscheiden:

- Kapitalgebundene Kosten: werden aus den Investitionen, der rechnerischen Nutzungsdauer und den Instandhaltungskosten (Ersatzbeschaffungen) berechnet
- Bedarfsgebundene oder verbrauchsgebundene Kosten: enthalten die Brennstoff-, Betriebsmittel und Energiekosten
- Betriebsgebundene Kosten: Kosten für Instandhaltung (Wartung, ...) sowie Bedienung der Anlage (Personalkosten)
- Sonstige Kosten: hierunter fallen Versicherung, Steuern,...

#### 4.2.1 Kapitalgebundene Kosten

Unter der Annuität der kapitalgebundenen Kosten ( $A_{N,K}$ ) versteht man nach [VDI 2067] „regelmäßig wiederkehrende gleich hohe Zahlungen, üblicherweise die Jahresrate der Tilgung und Verzinsung einer Schuld“. Sie wird wie folgt berechnet:

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n - R_w) * a_F \quad \text{Formel 4-3}$$

Dabei ist  $A_0$  der Investitionsbetrag,  $A_1$  bis  $A_n$  sind die Ersatzbeschaffungen in den Perioden 1 bis n,  $R_w$  ist der Restwert und  $a_F$  ist der Annuitätsfaktor. Der Restwert wird durch eine lineare Abschreibung des Investitionsbetrages bis zum Ende des Betrachtungszeitraums ( $t_{\text{betrachtet}}$ ) und Abzinsung auf den Beginn des Zeitraumes ermittelt [VDI 2067].

Um den am Ende der Lebensdauer benötigten Abriss der Anlagen miteinzurechnen kann davon ausgegangen werden, dass für den Abriss pauschalisiert 10 Prozent der Investitionskosten aufgewendet werden müssen. Diese Kosten werden auf den Beginn des Zeitraums diskontiert.

Damit berechnen sich die Kosten für den Abriss ( $A_{\text{Abriss}}$ ) aus dem Zinsfaktor ( $q$ ) zu:

$$A_{\text{Abriss}} = A_0 * \frac{0,1}{q^{t_{\text{betrachtet}}}} \quad \text{Formel 4-4}$$

Für die vorliegende Arbeit wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass die Nutzungsdauer gleich dem Betrachtungszeitraum ist. Damit wird der Restwert 0. Zudem wird angenommen, dass während der Nutzungsdauer keine Ersatzbeschaffungen notwendig werden, also keine Anlagenteile vollständig ausgetauscht werden müssen. Damit lässt sich die Annuität der kapitalgebundenen Kosten (inklusive Abriss) wie folgt berechnen:

$$A_{N,K} = \left(1 + \frac{0,1}{q^{t_{\text{betrachtet}}}}\right) A_0 * a_F \quad \text{Formel 4-5}$$

Der Annuitätsfaktor berechnet sich nach [VDI 2067] wie folgt:

$$a_F = \frac{q-1}{1-q^{-t_{\text{betrachtet}}}} \quad \text{Formel 4-6}$$

Hier wird von einem Zinsfaktor von 1,045 nach [Bundesbank] ausgegangen und einem Betrachtungszeitraum von 15 Jahren (für die Konversionsanlagen), was nach der Tabelle des AfA eine übliche Abschreibungsdauern für Energieanlagen ist, bzw. von 35 Jahren (für das Wärmenetz).

#### 4.2.2 Bedarfsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten

Die **bedarfsgebundenen Kosten** können aus den benötigten Brennstoffmengen, der Menge an zu entsorgender Asche und dem Strombedarf pro Jahr sowie den Kosten hierfür ermittelt werden.

Zunächst wird die erzeugte Wärmemenge pro Jahr ( $Q_{\text{pro Jahr}}$ ) bestimmt. Diese errechnet sich aus der thermischen Leistung der Anlage ( $P_{\text{th}}$ ) und den Vollaststunden pro Jahr ( $h_{\text{Vollast,th}}$ ):

$$Q_{\text{pro Jahr}} = P_{\text{th}} * h_{\text{Vollast,th}} \quad \text{Formel 4-7}$$

Der Strombedarf pro Jahr ( $W_{\text{el, pro Jahr}}$ ) bestimmt sich aus der erzeugten Wärmemenge und dem spezifischen Stromeigenbedarf ( $W_{\text{el}}$ ) pro MJ erzeugte Wärme:

$$W_{\text{el, pro Jahr}} = Q_{\text{pro Jahr}} * W_{\text{el}} \quad \text{Formel 4-8}$$

Bei den Heizkraftwerken wird dieser Strombedarf selber gedeckt und von der verkauften Strommenge abgezogen. Die Heizwerke beziehen den Strombedarf aus dem Netz. Sie müssen dafür im Jahr 2010 nach [BDEW 2013] 10,84 Cent/kWh zahlen.

Die Aschemasse, die pro Jahr zu entsorgen ist ( $m_{\text{Asche, pro Jahr}}$ ) berechnet sich aus der erzeugten Wärmemenge, dem thermischen Nutzungsgrad ( $\eta_{\text{th}}$ ), dem Aschegehalt (AG), dem Wassergehalt ( $w$ ) des Holzes und dem Heizwert ( $H_u$ ) des Holzes:

$$m_{\text{Asche, pro Jahr}} = \frac{Q_{\text{pro Jahr}} * \text{AG} * (1-w)}{\eta_{\text{th}} * H_u} \quad \text{Formel 4-9}$$

Die gesamte Asche wird über eine Deponie entsorgt. Dafür fallen nach Angaben des [Bodenseekreis] derzeit Gebühren in der Höhe von 80 Euro die Tonne an. Tatsächlich werden die Ascheentsorgungskosten bundesweit allerdings nennenswert variieren.

Den größten Anteil an den bedarfsgebundenen Kosten hat die Brennstoffversorgung. Die Brennstoffkosten pro Jahr ( $K_{\text{Brennstoff}}$ ) berechnen sich aus der erzeugten Wärmemenge pro Jahr, dem thermischen Nutzungsgrad und den Brennstoffkosten pro MWh ( $p_{\text{Brennstoff}}$ ).

$$K_{\text{Brennstoff}} = \frac{Q_{\text{pro Jahr}}}{\eta_{\text{th}}} * p_{\text{Brennstoff}} \quad \text{Formel 4-10}$$

Nach [C.A.R.M.E.N.] liegen die Kosten für Waldhackschnitzel mit 35 Prozent Wassergehalt bei 27,48 Euro pro MWh und bei 49,84 Euro pro MWh für A1 Pellets (bezogen auf das Jahr 2010). Nach [Eurostat] beträgt der Preis für Erdgas im Jahr 2010 durchschnittlich 38,15 Euro pro MWh für die Industrie (ohne MwSt. und erstattungsfähige Steuern und Abgaben).

Auf Grund der geringen finanziellen Bedeutung können die Kosten für die sonstigen Betriebsmittel wie Wasser oder Schmieröl vernachlässigt werden.

Für die **betriebsgebundenen Kosten** werden zunächst die Wartungskosten pro Jahr nach [Oberberger, Thek 2008] pauschalisiert mit 1,5 Prozent der Investitionskosten angesetzt. Über Abschätzungen zu den für den Anlagenbetrieb benötigten Arbeitsstunden können die Personalkosten pro Jahr bestimmt werden.

In dieser Arbeit werden auch die **sonstigen Kosten** pauschalisiert als Prozent der Investitionskosten und nach [Oberberger, Thek 2008] mit 0,5 Prozent (reine Wärmezeugung) bzw. 1 Prozent (Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen) angesetzt.

## **5 Modellierung der Wärmenetzinfrastruktur**

In diesem Kapitel wird die Modellierung der Infrastruktur für die semi- zentralen Wärmenetzkonzepte beschrieben. Dazu werden zunächst in Kapitel 5.1 die untersuchten Fallbeispiele vorgestellt. Anschließend wird die Vorgehensweise zur Netzauslegung in Kapitel 5.2 gezeigt.

### **5.1 Vorstellung der Fallbeispiele**

In dieser Arbeit werden unterschiedliche typische deutsche Wohnsiedlungen untersucht. Neben einer durchschnittlichen deutschen Wohnsiedlung werden reine Einfamilien- und Mehrfamilienhausbebauungen verglichen. Alle Siedlungen bestehen dabei aus Neubauten, welche die Anforderungen nach der [EnEV 2009] erfüllen. Zudem wird ein Niedrigenergieeinfamilienhaus (KfW 55 Effizienzhaus) untersucht. Dieser Standard kann entweder von einem Neubau oder einem ambitioniert sanierten älteren Gebäude erreicht werden.

#### **5.1.1 Siedlungstypen**

Nach [Pfaffenberger et al. 2001] gibt es einige häufige deutsche Siedlungstypen, welche sich für die Versorgung durch ein Wärmenetz eignen. Daher werden die in [Pfaffenberger et al. 2001] definierten Siedlungstypen: „Einfamilienhäuser- und Doppelhäusersiedlung“, „Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser“ und die „Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern“ betrachtet.

Der Siedlungstyp der Einfamilienhäuser- und Doppelhäusersiedlung besteht aus freistehenden Einfamilienhäusern mit 1,5 bis 2,5 Geschossen und ist mit einem dichten, regelmäßigen Straßennetz erschlossen. Die Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser besteht fast ausschließlich aus freistehenden Mehrfamilienhäusern mit 2 bis 3 Geschossen und ist durch ein enges geometrisches Straßennetz erschlossen. Bei der Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern sind die Wohnblocks grobmaschig erschlossen. Die großen Mehrfamilienhäuser haben 3 bis 5 Geschosse und sind in Zeilen bis maximal 115 Meter Gesamtlänge als 2-, 3- oder 4- Spänner angeordnet. Die Siedlung mit Zeilenbebauung besteht zur Hälfte aus kleinen Mehrfamilienhäusern und der Rest aus großen Mehrfamilienhäusern [Pfaffenberger et al. 2001].

Neben diesen Siedlungstypen wird eine typische deutsche gemischte Wohnsiedlung ausgewählt, die eine Mischform der drei genannten Siedlungstypen darstellt.

Der durchschnittliche Gebäudebestand in Deutschland bestand laut Daten des statistischen Bundesamtes [Destatis 2010] im Jahr 2006 zu 28,8 Prozent aus Einfamilienhäusern, zu 18,2 Prozent aus Zweifamilienhäusern, zu 22,3 Prozent aus kleineren Mehrfamilienhäusern (3 bis 6 Wohneinheiten), zu 20,7 Prozent aus größeren Mehrfamilienhäusern (6 bis 12 Wohneinheiten) und zu 10,0 Prozent aus sehr großen Mehrfamilienhäusern mit mehr als 13 Wohneinheiten. Semi- zentrale Wärmenetze werden in kleineren Wohnsiedlungen gebaut, so dass angenommen werden kann, dass keine Industrieunternehmen und keine sehr großen Mehrfamilienhäuser in dem Gebiet stehen. Daher wird für die durchschnittliche Siedlung eine reine Wohnbebauung, welche zu 52,2 Prozent aus einer Einfamilienhäuser- und Doppelhäusersiedlung (mit 32 Prozent Einfamilienhäusern und 20,2 Prozent Zweifamilienhäusern) besteht, angenommen. Weiterhin besteht diese gemischte Wohnbebauung zu 24,8 Prozent aus einer Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser und zu 23 Prozent aus einer Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern.

#### **5.1.2 Häuser und Abstände**

Nach [IWU 2011] haben die meisten Einfamilien- und Reihenhäuser eine Wohneinheit und bestehen aus zwei Vollgeschossen (ohne Dachboden und Keller). Mehrfamilienhäuser haben hingegen meistens zwischen drei (kleines Mehrfamilienhaus) und vier (großes Mehrfamilienhaus) Vollgeschosse. Der minimale Abstand zwischen zwei Häusern (Abstandsfläche eines Hauses) bestimmt sich nach der [Musterbauordnung] aus der Höhe des Hauses. Er muss wenigstens 0,4-mal die Höhe betragen, mindestens jedoch 3 Meter. Dabei wird die

Wandhöhe von der Geländeoberfläche bis zum Schnittpunkt der Wand mit der Dachhaut (oder bis zum oberen Abschluss der Wand) gemessen. Dächer mit einer Neigung unter 70° werden zu einem Drittel der Wandhöhe zugerechnet, alle anderen voll. In dieser Arbeit wird für die Einfamilienhäuser von einer Dachneigung von 45° ausgegangen, die Mehrfamilienhäuser werden mit Flachdach betrachtet. Über die Angabe der Vollgeschosse, der Hausbreite und unter der Annahme, dass die Geschosshöhe etwa drei Meter beträgt, kann der Mindestabstand zwischen den Häusern bestimmt werden. Die Länge der Hauseinführungsleitung bestimmt sich aus dem Abstand zwischen Straße und Haus und der halben Straßenbreite. Die Breite der Straßen wird hier mit 8 Metern angesetzt.

Über die Geschossfläche kann die Breite des Hauses abgeschätzt werden, wenn von einem annähernd quadratischen Grundriss ausgegangen wird. Dabei beträgt die Nutzfläche eines Hauses nach [IWU 2011] etwa das 1,2- fache der beheizten Wohnfläche. Wird diese Nutzfläche durch die Anzahl der Vollgeschosse geteilt, erhält man die Geschossfläche oder Grundfläche des Hauses.

### 5.1.3 Hauswärmebedarf für Heizung und Trinkwasser

Um den Heizwärmebedarf eines Hauses bestimmen zu können, müssen, wie in Kapitel 3.2 gezeigt, der Wärmebedarf pro Quadratmeter beheizte Wohnfläche und die Größe der beheizten Wohnfläche bekannt sein. Nach [Destatis 2012] hatte ein Bewohner in Deutschland im Jahr 2010 durchschnittlich 43 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Die Angaben für die unterschiedlichen Haustypen werden daher so gewählt, dass auf jeden Bewohner etwa diese 43 m<sup>2</sup> kommen. Nach [VDI 2067: Blatt 12] kann ab einer Raumanzahl von 7 oder mehr von einer Belegungszahl mit durchschnittlich 3,8 Bewohnern ausgegangen werden. Da hier größere Einfamilienhäuser oder größere Wohnungen in Mehrfamilienhäusern mit mehr als 7 Räumen betrachtet werden, wird jeweils angenommen, dass jede Wohneinheit vier Bewohner hat.

Für die Daten zum Heizwärmebedarf, den Volllaststunden und dem Warmwasserbedarf wird auf Daten aus der Software RDesign sowie auf Daten aus [VDI 2067: Blatt 12] und [IWU 2011] zurückgegriffen.

Nach [VDI 2067:Blatt 12] variiert der Warmwasserbedarf je nach Nutzerverhalten und vorhandenen Warmwasserabnehmern zwischen 380 und 720 kWh pro Person und Jahr. Für die Modellierung in RDesign wird daher ein durchschnittlicher Warmwasserbedarf von 540 kWh pro Person und Jahr ausgewählt.

Für die Werte des Wärmebedarfs pro Quadratmeter Wohnfläche werden die Daten aus [IWU 2011] und für die Jahresvolllaststunden die Daten aus RDesign verwendet. Während der Heizwärmewärmebedarf nur vom Energiestandard des Hauses abhängt, variieren die Volllaststunden je nach den klimatischen Gegebenheiten. Da der Scharnhauser Park in Stuttgart als zentraler Vergleichsfall dient, werden aus Gründen der Vergleichbarkeit alle semi- zentralen Wärmenetze ebenfalls für Stuttgart modelliert. Die damit erhaltenen Ergebnisse sind jedoch auf andere Orte mit ähnlichen klimatischen Gegebenheiten übertragbar. In einem kälteren Klima hingegen wären durch die höhere Auslastung der Wärmeerzeuger leichte Verbesserungen gegenüber den hier erhaltenen Ergebnissen zu erwarten.

Alle untersuchten Neubauten erfüllen die energetischen Anforderungen nach [EnEV 2009]. Die Niedrigenergiehäuser (KfW 55 Effizienzhäuser) weisen hingegen nur 55 Prozent des für Neubauten nach [EnEV 2009] maximal möglichen Wärmebedarfs auf und werden finanziell gefördert.

Die in dieser Arbeit betrachteten Haustypen und ihre für die Bestimmung des Wärmebedarfs relevanten Eigenschaften werden in Tabelle 5-1 gezeigt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

	<b>Einfamilienhaus</b>	<b>KfW 55 Effizienzhaus</b>	<b>Kleines Mehrfamilienhaus</b>	<b>Großes Mehrfamilienhaus</b>
Beheizte Wohnfläche	175 m <sup>2</sup>	175 m <sup>2</sup>	1035 m <sup>2</sup>	2070 m <sup>2</sup>
Grundfläche	105 m <sup>2</sup>	105 m <sup>2</sup>	414 m <sup>2</sup>	621 m <sup>2</sup>
Maße des Hauses	10 x 10,50 m	10 x 10,50 m	20 x 20,70 m	25 x 24,84 m
Minimaler Hausabstand	6,15 m	6,15 m	7,2 m	9,6 m
Vollgeschosse	2	2	3	4
Personen	4	4	24	48
Volllaststunden	1.770 h/a	1.500 h/a	1.914 h/a	1.914 h/a
Heizwärmebedarf in [kWh/m <sup>2</sup> *a]	88,8 bzw. 86,8 (Doppelhaushälfte)	48,8	79,9	79,9
Leistung der Hausübergabestation	10 kW bzw. 9,8 kW (Doppelhaushälfte)	7,2 kW	50 kW	100 kW
Heizgrenzleistung	12,2% bzw. 12,5% (Doppelhaushälfte)	20,2%	13,6%	13,6%

**Tabelle 5-1: Ausgewählte Abnehmer**

### 5.1.4 Modellierte semi- zentrale Netzvarianten

Der Fokus der Wärmeerzeugung für die semi- zentralen Netze liegt bei der Nutzung eines Hackschnitzelkessels mit 800 kW und Waldrestholzhackschnitzeln, da diese Brennstoff- Technologiekombination bisher in der Praxis am meisten zum Einsatz kommt. Zum Vergleich werden zwei Wärmenetze mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk untersucht. Für alle Wärmenetze werden einfach gedämmte Kunststoffmantelrohre verwendet, sofern nicht ausdrücklich etwas anderes angegeben ist.

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben wurde, muss beachtet werden, dass nach [Krimmling 2011] maximal 50 Prozent der Gesamtleistung eines Wärmenetzes durch die Grundlast bereitgestellt werden können. Als Wärmeerzeuger stehen der Hackschnitzelkessel mit 800 kW (beschrieben in Kapitel 7.5.1), das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk mit 1,6 MW (beschrieben in Kapitel 7.5.6) und ein Spitzenlastgaskessel mit 1 MW zur Verfügung. Damit sind zwei Netzgesamtleistungen möglich, einmal 1,8 MW (bestehend aus dem Hackschnitzelkessel mit 800 kW und dem Gaskessel mit 1 MW) und einmal 3,6 MW (bestehend aus dem Holzvergaser- Blockheizkraftwerk mit 1,6 MW und zwei Gaskesseln zu je 1 MW).

Durch Variation des Siedlungstyps bzw. der Abnehmer sowie der genutzten Konversionsanlagen werden sieben realistische Fallbeispiele definiert, die im Folgenden weiter untersucht werden. Diese Fallbeispiele (auch semi- zentrale Netzvarianten genannt) zeigt Tabelle 5-2.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

		KfW 55	EFH	MFH	MFH mit BHKW	2- Spänner	gemischt	gemischt mit BHKW
<b>Siedlungstyp</b>		Einfamilien- häusersiedlung		Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser		Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilien- häusern	Durchschnittliche deutsche Siedlung	
<b>Konversions- anlagen</b>	BHKW 1,6 MW <sub>th</sub>	0	0	0	1	0	0	1
	HS Kessel 800 kW	1	1	1	0	1	1	0
	Gaskessel 1 MW	1	1	1	2	1	1	2
<b>Abnehmer</b>	Einfamilien- häuser	468	312	0	0	0	18	48
	Doppelhaus- hälften	0	0	0	0	0	2x6	2x15
	Mehrfamilien- häuser	0	0	44	120	2x6	14	37
	Große Mehrfamilien- häuser	0	0	0	0	2x6	2x7	2x17

**Tabelle 5-2: Untersuchte semi- zentrale Netzvarianten**

Neben diesen Netzvarianten wurden weitere Konfigurationen geprüft, die sich jedoch als nicht interessant herausgestellt haben. So ist z.B. bei der Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern der Unterschied zwischen 2- Spännern oder 4- Spännern sehr gering.

Für alle Netze beträgt der Abstand zur Heizzentrale 100 Meter, der zwischen den Häusern jeweils 10 Meter. Am Beispiel des Netzes „EFH“ wird die Sensitivität der Ergebnisse auf den Abstand der Häuser und die Distanz zur Heizzentrale untersucht. Dazu werden ein Netzvarianten mit erhöhtem Abstand zur Heizzentrale (500 Meter) und eine Netzvariante mit minimalem Hausabstand (6,15 Meter nach [Musterbauordnung]) betrachtet.

Ebenfalls am Beispiel des Netzes „EFH“ wird die Auswirkung der Verwendung von unterschiedlichen Rohrsystemen untersucht. Dazu wird das Netz mit einfach gedämmten Kunststoffmantelrohren (KMR Serie 1) einem Netz mit besser gedämmten Rohren (KMR Serie 3) bzw. Doppelrohren (TwinPipes) gegenübergestellt.

### 5.2 Wärmenetzauslegung

Die in dieser Arbeit genutzte Vorgehensweise für die Wärmenetzauslegung wird im Folgenden näher beschrieben. Sie besteht aus der:

- Rohrnetzdimensionierung in RDesign
- Auslegung der Wärmeerzeuger in WDesign
- Umrechnung der Stücklisten in Materialmengen
- Erstellung der Ökobilanz in openLCA (gezeigt in Kapitel 7.6.1)

Alle Daten zur Rohrnetzdimensionierung der verschiedenen Netze sowie die Hintergrunddaten zur Umrechnung in die Materialmengen sind in Anhang 3 aufgeführt.



### 5.2.1 Rohrnetzdimensionierung in RDesign

Die Infrastruktur für die Wärmenetze kann über die kommerziell erhältliche Software RDesign der Firma BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH ausgelegt werden. Mit dem excelbasierten Rohrauslegungsprogramm können strahlförmige Wärmenetze mit einer Wärmequelle berechnet werden. Das Programm enthält zudem Klimadaten für ausgewählte deutsche Orte, typische Wärmeabnehmerdaten, technische Daten zu verschiedenen Rohrsystemen und Angaben zu den Kosten der einzelnen Netzkomponenten. Diese Daten werden aktualisiert und teilweise auf das Bezugsjahr 2010 fortgeschrieben.

#### 5.2.1.1 Aufbau des Wärmenetzes

Zunächst muss in RDesign die Netzstruktur festgelegt werden. Die in dieser Arbeit untersuchten Wärmenetze sind symmetrisch aufgebaut und bestehen aus vier Strahlen. Wird von einer Bebauung mit freistehenden Einzelhäusern („Einfamilienhäuser- und Doppelhäusersiedlung“ bzw. „Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser“) ausgegangen, ist das Wärmenetz wie in Abbildung 5-1 gezeigt aufgebaut. Für die Eingabe der Netzstruktur in RDesign muss beachtet werden, dass jeder Knotenpunkt im Netz genau einen Vorgänger und maximal zwei Nachfolger haben darf. Dabei kann ein Knoten entweder eine Abzweigung (Beispiel ist der Knoten 11 in Abbildung 5-1) sein oder einen Abnehmer versorgen (Beispiel ist der Knoten 11112 in Abbildung 5-1). Zusätzlich müssen jeweils die Trassenlängen zwischen den Knoten angegeben werden.

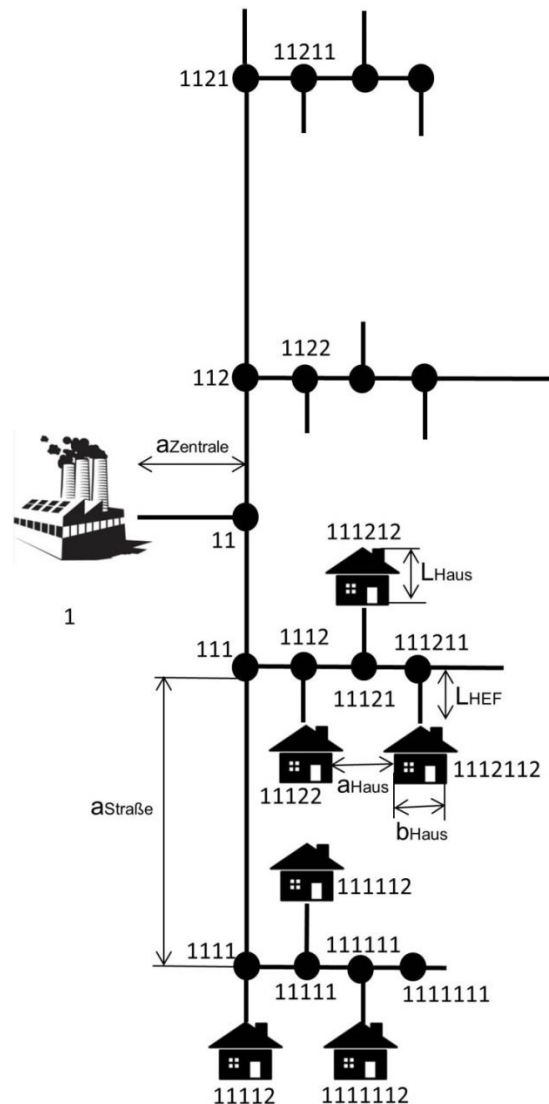


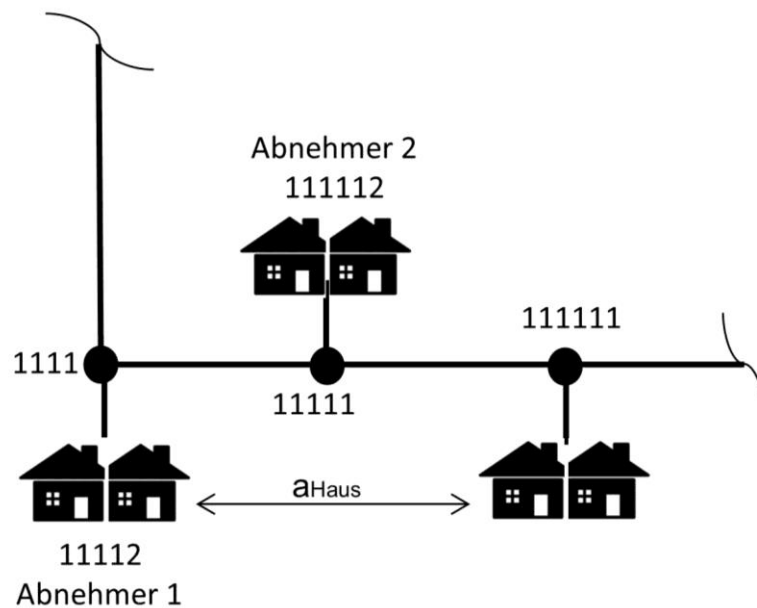
Abbildung 5-1: Strahlförmiges Wärmenetz (schematische Darstellung) für freistehende Häuser

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Wichtig ist die Lage der Heizzentrale und der Abstand zur Heizzentrale ( $a_{\text{zentrale}}$ ) sowie der Abstand der Straßen ( $a_{\text{Straße}}$ ). Außerdem muss die Länge der Hauseinführung ( $L_{\text{HEF}}$ ) aus dem Abstand des unter der Straße verlegten Fernwärmerohres zum Haus bestimmt werden. Eine typische Länge für die Hauseinführung ist nach [Esch et al. 2011] 10 Meter. Im Fall von freistehenden Einzelhäusern beträgt die Trassenlänge zwischen den Abnehmern die halbe Hausbreite ( $b_{\text{Haus}}/2$ ) plus den halben Hausabstand ( $a_{\text{Haus}}/2$ ). Der Mindestabstand der Parallelstraßen lässt sich hier aus der Länge der Hauseinführung, dem Hausabstand und der Länge des Hauses ( $L_{\text{Haus}}$ ) wie folgt berechnen:

$$a_{\text{Straße}} = 2 * L_{\text{HEF}} + 2 * L_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}} \quad \text{Formel 5-1}$$

Einen Ausschnitt aus der schematischen Darstellung des Wärmenetzes für die Zeilenbebauung mit Doppelhäusern (2- Spänner) zeigt Abbildung 5-2.



**Abbildung 5-2: Strahlförmiges Wärmenetz (Ausschnitt) für Doppelhäuser**

Jeweils zwei Gebäude werden durch eine Hauseinführungsleitung gemeinsam versorgt. Dadurch vergrößert sich die Trassenlänge zwischen den Abnehmern auf die Hausbreite plus den halben Hausabstand, gleichzeitig verringert sich die Zahl der Abnehmer jedoch auf die Hälfte.

Die Angabe der Netzstruktur erfolgt in RDesign wie in Tabelle 5-3 dargestellt. Hier sind sowohl die Werte für freistehenden Häuser, als auch für Doppelhäuser eingetragen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Knotennummer	Abnehmerbezeichnung	Trassenlänge (in m) Freistehende Häuser	Trassenlänge (in m) 2- Spänner
1			
11		$a_{\text{Zentrale}}$	$a_{\text{Zentrale}}$
111		$a_{\text{Straße}}/2$	$a_{\text{Straße}}/2$
1111		$a_{\text{Straße}}$	$a_{\text{Straße}}$
11111		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
11112	Abnehmer 1	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
111111		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
111112	Abnehmer 2	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
...	...	...	...
1112		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
11121		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
11122	Abnehmer 3	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
111211		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
111212	Abnehmer 4	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
...	...	...	...
112		$a_{\text{Straße}}/2$	$a_{\text{Straße}}/2$
1121		$a_{\text{Straße}}$	$a_{\text{Straße}}$
11211		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
11212	Abnehmer 5	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
112111		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
112112	Abnehmer 6	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
...	...	...	...
1122		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
11221		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
11222	Abnehmer 7	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
112211		$a_{\text{Haus}}/2 + b_{\text{Haus}}/2$	$b_{\text{Haus}} + a_{\text{Haus}}/2$
112212	Abnehmer 8	$L_{\text{HEF}}$	$L_{\text{HEF}}$
...	...	...	...
...	Abnehmer n	...	...

**Tabelle 5-3: Netzstruktur in RDesign für freistehende Häuser**

Dabei wird von einem Abstand zwischen der ersten Kreuzung und der Heizzentrale von 100 Metern ausgegangen und von einem Hausabstand für alle Haustypen von 10 Metern.

Für die Auswertung der Umweltwirkungen in Kapitel 8 werden Siedlungsart, Hausabstände (und damit die Abstände der Straßen) sowie die Abstände zur Heizzentrale variiert.

### 5.2.1.2 Sonstiges

Für die Auslegung des Wärmenetzes in RDesign müssen, wie in Kapitel 3.2 erklärt wurde, neben der Netzstruktur eine Reihe an weiteren Daten bekannt sein:

- Der geografische Ort des Netzes (ausschlaggebend für Klimadaten und Vollaststunden)
- Die Zahl und Art der Wärmeabnehmer (Leistung der Hausübergabestationen, Vollaststundenzahl und Heizgrenzleistung)
- Die Eigenschaften der Rohrleitungen

Aus diesen Daten kann die benötigte Wärme ab Hausübergabestation und der Wärmeverlust berechnet werden.

Obwohl in RDesign bereits Bauteildaten für die Rohrleitungen vorhanden sind, werden diese angepasst um das in der Arbeit untersuchte Rohrsystem von logstor besser abzubilden. Die dänische Firma logstor ist einer der weltweit führenden Hersteller auf dem Gebiet vorgedämmter Rohre für Wärmenetze.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Bei der Berechnung des Rohrnetzes werden von RDesign die abgenommenen Wärmemengen (Nahwärme ab HÜS), die Wärmeverluste, der Strombedarf pro Jahr für die Netzpumpen und Stücklisten der verwendeten Rohrleitungen, Abzweiger, Reduktionen und Pumpen erhalten. Außerdem berechnet RDesign aus den angegebenen Kostendaten die Kosten des Netzes (näher beschrieben in Kapitel 6.2).

### 5.2.2 Auslegung der Wärmeerzeuger in WDesign

Für die Auslegung der Wärmeerzeugungsanlagen in WDesign werden die Netzdaten aus RDesign benötigt. Aus den Klimadaten, der maximalen und minimalen Netzleistung, der Anschlussleistung der Abnehmer und der abgenommenen Nahwärme ab Hausübergabestation kann eine Jahresdauerlinie (siehe Kapitel 3.2) erstellt werden. Zudem müssen Angaben zum Energiesystem, also den verwendeten Spitzen- und Grundlastwärmeerzeugern sowie ihrer Regelbarkeit, gemacht werden. Damit wird die Jahresdauerlinie in Grund- und Spitzenlast aufgeteilt.

Als Grundlast dient der Hackschnitzelkessel mit 800 kW Leistung und einer Regelbarkeit bis auf 30 Prozent seiner Nennlast sowie das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk mit 1,6 MW und einer Regelbarkeit bis auf 20 Prozent seiner Nennleistung. Ein oder zwei Spitzenlastgaskessel mit 1 MW und einer Regelbarkeit bis auf 20 Prozent der Nennleistung kommen zum Einsatz.

Mit diesen Daten erstellt das Programm eine Jahresdauerlinie und bestimmt welche Energieanteile auf die Grund- und Spitzenlast entfallen. Die Angabe wieviel Prozent der erzeugten Wärme aus dem Holzheiz(kraft)werk stammen, wird in openLCA für die Erstellung der Ökobilanz benötigt.

Ein Beispiel für eine in WDesign erstellte Jahresdauerlinie zeigt Abbildung 5-3.

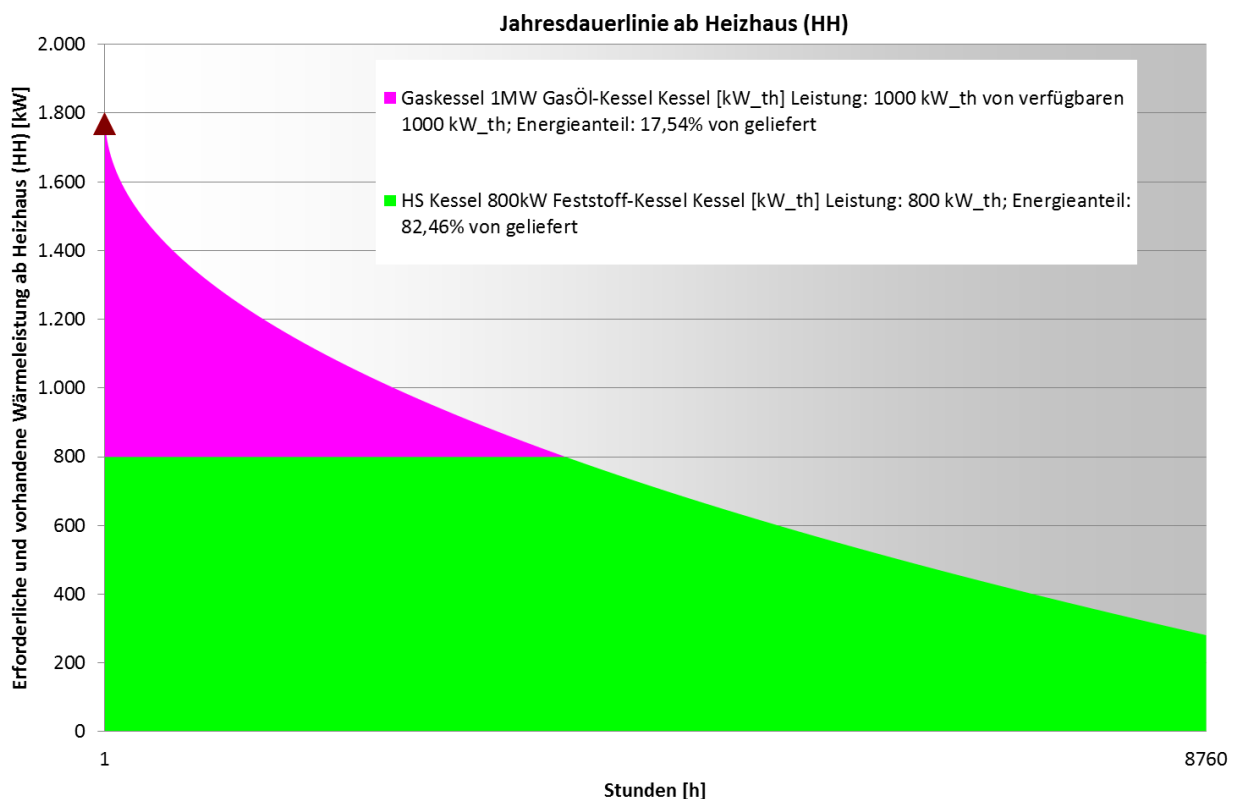


Abbildung 5-3: Beispielhafte Jahresdauerlinie für ein Wärmenetz mit Hackschnitzelkessel 800 kW

Bei allen hier betrachteten Netzen wird zu über 80 Prozent Holz zur Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt.

### 5.2.3 Umrechnung der Stücklisten in Materialmengen

Für die Ökobilanzierung in openLCA müssen die Stücklisten aus RDesign zunächst anhand von Herstellerangaben in Materialmengen umgerechnet werden.

Bei den in dieser Arbeit verwendeten Kunststoffmantelrohren (beschrieben in Kapitel 3.1) ist das Medienrohr aus Stahl und wird von einer Isolierschicht aus Polyurethan (PUR) bedeckt. Diese wird durch ein Kunststoffmantelrohr aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE) gegen äußere Einflüsse (wie das Eindringen von Wasser) geschützt [Krimmling 2011]. Auf [www.logstor.com](http://www.logstor.com) können die Datenblätter für die betrachteten Kunststoffmantelrohre der Firma logstor heruntergeladen werden [logstor 2013a]. Aus den Angaben zu den verwendeten Materialien, den Rohrdurchmessern, der Verlegetiefe und der notwendigen Überdeckung werden die Materialmenge an Stahl, Polyethylen, Polyurethan, Sand, Asphalt, Wasser und Aushub pro Meter Rohr bzw. pro Stück Abzweiger, Reduktion oder Muffe abgeleitet.

#### 5.2.3.1 Kunststoffmantelrohr Serie 1 oder 3

Den Aufbau eines Kunststoffmantelrohres nach [logstor 2013a] zeigt Abbildung 5-4.

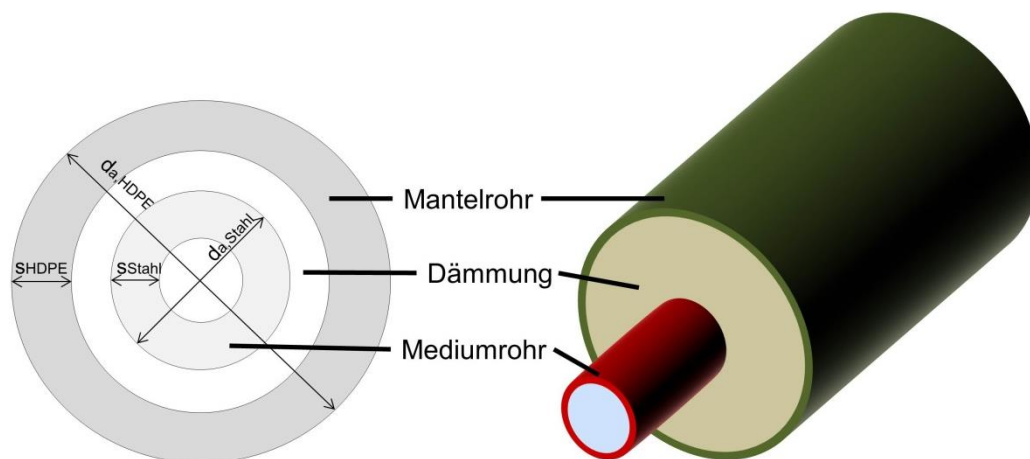


Abbildung 5-4: Aufbau eines Kunststoffmantelrohres [logstor 2013a]

Ebenfalls im Katalog zu finden sind Angaben zu den Außendurchmessern des Medium- und Mantelrohres sowie den jeweiligen Materialstärken. Damit wird das Volumen an Polyurethan, Polyethylen hoher Dichte und Stahl pro Meter Rohr sowie der Wasserinhalt bestimmt und mittels der Dichte des Materials in die Menge pro Meter Rohr umgerechnet.

Zunächst müssen daher Annahmen zu den Dichten der verwendeten Materialien gemacht werden. Dabei wird von einer Dichte des Wassers von  $1.000 \text{ kg/m}^3$  ausgegangen. Die Dichte des verwendeten Stahls ( $\rho_{\text{Stahl}}$ ) beträgt  $7.850 \text{ kg/m}^3$ , die des Polyethylens ( $\rho_{\text{HDPE}}$ )  $950 \text{ kg/m}^3$ , die des Polyurethans ( $\rho_{\text{PUR}}$ )  $70 \text{ kg/m}^3$  und die des Sandes ( $\rho_{\text{Sand}}$ )  $1.530 \text{ kg/m}^3$ .

Für die spezifische Stahlmasse ( $m_{\text{Stahl, spez}}$ ) in kg pro Meter Rohr kann in Abhängigkeit des Außendurchmesser ( $d_{a, \text{Stahl}}$ ) und der Wandstärke ( $s_{\text{Stahl}}$ ) des Medienrohres folgende Formel genutzt werden:

$$m_{\text{Stahl, spez}} = \frac{\pi}{4} * \left( d_{a, \text{Stahl}}^2 - (d_{a, \text{Stahl}} - 2s_{\text{Stahl}})^2 \right) * \rho_{\text{Stahl}} \quad \text{Formel 5-2}$$

Wird statt der Dichte des Stahles die von Polyethylen eingesetzt und der Durchmesser des Medienrohres durch den des Mantelrohres ersetzt, kann analog die spezifische Masse an Polyethylen berechnet werden. Ebenso kann die spezifische Masse an Polyethylen für die Muffen bestimmt werden.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Für die spezifische Masse an Polyurethanisolierung ( $m_{PUR, spez}$ ) pro Meter Rohr gilt:

$$m_{PUR, spez} = \frac{\pi}{4} * \left( (d_{a, HDPE} - 2s_{HDPE})^2 - d_{a, Stahl}^2 \right) * \rho_{PUR} \quad \text{Formel 5-3}$$

Die spezifische Wassermasse ( $m_{H2O, spez}$ ) pro Meter Rohr berechnet sich nach:

$$m_{H2O, spez} = \frac{\pi}{4} * (d_{a, Stahl} - 2s_{Stahl})^2 * \rho_{H2O} \quad \text{Formel 5-4}$$

Abbildung 5-5 zeigt die Verlegung der Rohre im Rohrgraben nach [logstor 2013a] und die Randbedingungen, die hierbei eingehalten werden müssen. In den Unterlagen von [logstor 2013a] sind für die verschiedenen Nenndurchmesser der Rohre die unterschiedlichen Werte A, D und K zu finden.

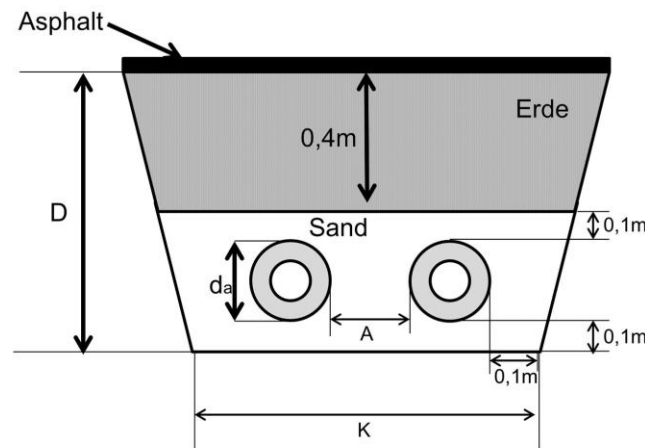


Abbildung 5-5: Rohrgraben [logstor 2013a]

Damit berechnet sich das spezifische Aushubvolumen ( $V_{Aushub, spez}$ ) in  $m^3$  pro Meter Rohr näherungsweise als:

$$V_{Aushub, spez} = K * D \quad \text{Formel 5-5}$$

Die benötigte spezifische Sandmasse ( $m_{Sand, spez}$ ) pro Meter Rohr wird bestimmt durch:

$$m_{Sand, spez} = \left( \frac{K}{2} * (2 * 0,1 + d_{a, HDPE}) - \frac{\pi}{4} * d_{a, HDPE}^2 \right) * \rho_{Sand} \quad \text{Formel 5-6}$$

Um von einem größeren Rohrdurchmesser auf einen kleineren zu kommen, werden so genannte Reduktionen eingesetzt. Der Materialbedarf für die Reduktionen muss daher ebenfalls abgeschätzt werden. Hierfür wird davon ausgegangen, dass eine Reduktion jeweils zur Hälfte aus dem Rohr mit dem größeren Durchmesser und zur anderen Hälfte aus dem Rohr mit dem kleineren Durchmesser besteht. Dabei wird vernachlässigt, dass die Reduktion einen Übergang zwischen den beiden Rohrstücken haben muss, der entstehende Fehler dürfte allerdings extrem gering sein.

Damit berechnet sich die spezifische Masse pro Reduktion ( $m_{Reduktion, spez}$ ) an Sand, Stahl, Polyethylen hoher Dichte, Polyurethan und Wasser aus der Länge ( $L_{Reduktion}$ ) der Reduktion wie folgt:

$$m_{Reduktion, spez} = L_{Reduktion} * \left( \frac{m_{Rohr 1, spez}}{2} + \frac{m_{Rohr 2, spez}}{2} \right) \quad \text{Formel 5-7}$$

Das spezifische Aushubvolumen ( $V_{Reduktion, Aushub, spez}$ ) pro Reduktion wird genauso berechnet.

Für die Materialmengen der Abzweiger wird für die Modellierung davon ausgegangen, dass nur gerade vorgedämmte Abzweiger mit einem Winkel von  $45^\circ$  (gezeigt in Abbildung 5-6) eingesetzt werden.

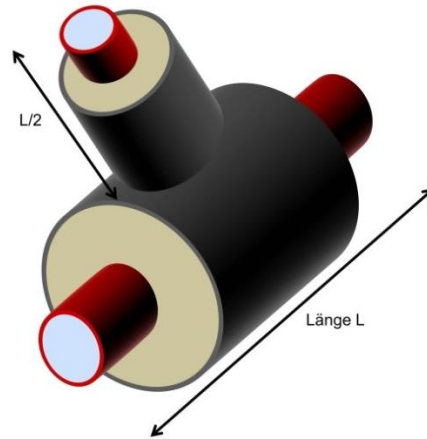


Abbildung 5-6: Abzweiger [logstor 2013a]

Die spezifischen Massen pro Abzweiger ( $m_{\text{Abzweiger, spez}}$ ) berechnen sich aus der Länge ( $L_{\text{Abzweiger}}$ ) wie folgt:

$$m_{\text{Abzweiger, spez}} = L_{\text{Abzweiger}} * m_{\text{Rohr 1, spez}} + \frac{L_{\text{Abzweiger}}}{2} * m_{\text{Rohr 2, spez}} \quad \text{Formel 5-8}$$

Dabei können die Angaben zu den Längen der Abzweiger wiederum aus [logstor 2013a] entnommen werden.

Für den Bau der Wärmenetze werden die Rohre üblicherweise unter der Straße verlegt, daher muss auch die Asphaltdecke über dem Rohrgraben mitbetrachtet werden. Als Vereinfachung wird angenommen, dass für die Asphaltmenge immer vom größten Rohrgrabendurchmesser (K) des dicksten Rohrdurchmesser DN150 auszugehen ist. Dabei hat die Asphaltdeckschicht eine Dicke von 3,5 Zentimetern und der Asphalt weist eine Dichte von  $1.000 \text{ kg/m}^3$  auf. Während die Lebensdauer des Wärmenetzes mit 35 Jahren angesetzt ist, wird angenommen, dass der Asphalt bereits nach 15 Jahren erneuert werden muss.

### 5.2.3.2 TwinPipes

Als weiteres Rohrsystem werden TwinPipes betrachtet, hier sind Vorlauf- und Rücklaufrohr in einer gemeinsamen Isolierung untergebracht (gezeigt in Abbildung 5-7). Grundsätzlich haben diese Rohre den Vorteil, dass sie einfacher zu verlegen und preisgünstiger als normale Kunststoffmantelrohre sind. Doppelrohre können allerdings nur für kleinere Rohrdurchmesser eingesetzt werden und sind für größere Fernwärmenetze oft nicht geeignet.

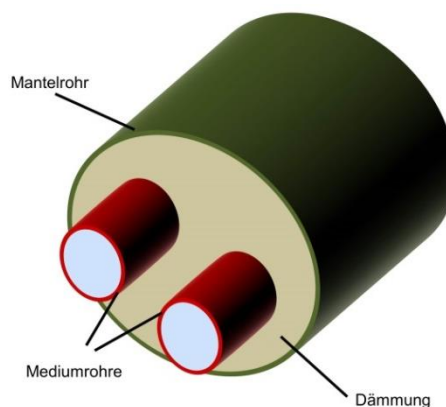


Abbildung 5-7: TwinPipes [logstor 2013a]

Die verwendeten Materialien sind dabei dieselben wie bei den normalen Kunststoffmantelrohren.

Ähnlich wie oben beschrieben kann die spezifische Stahlmasse pro Meter Rohr wie folgt berechnet werden:

$$m_{Stahl,spez} = \frac{\pi}{4} * (d_{a,Stahl}^2 - (d_{a,Stahl} - 2s_{Stahl})^2) * \rho_{Stahl} * 2 \quad \text{Formel 5-9}$$

Der Faktor zwei ergibt sich aus der Tatsache, dass ein Meter Rohr nun zwei Meter Medienrohr (Vor- und Rücklauf) enthält.

Die spezifische Masse an Polyethylen hoher Dichte pro Meter Rohr berechnet sich ebenfalls analog wie beim normalen Kunststoffmantelrohr:

$$m_{HDPE,spez} = \frac{\pi}{4} * (d_{a,HDPE}^2 - (d_{a,HDPE} - 2s_{HDPE})^2) * \rho_{HDPE} \quad \text{Formel 5-10}$$

Die spezifische Masse an Polyurethan pro Meter Rohr wird berechnet nach:

$$m_{PUR,spez} = \frac{\pi}{4} * ((d_{a,HDPE} - 2s_{HDPE})^2 - 2d_{a,Stahl}^2) * \rho_{PUR} \quad \text{Formel 5-11}$$

Die spezifische Wassermasse pro Meter Rohr berechnet sich nach:

$$m_{H2O,spez} = \frac{\pi}{4} * (d_{a,Stahl} - 2s_{Stahl})^2 * \rho_{H2O} * 2 \quad \text{Formel 5-12}$$

Die Verlegung im Rohrgraben erfolgt nach [logstor 2013a] wie Abbildung 5-8 in gezeigt.

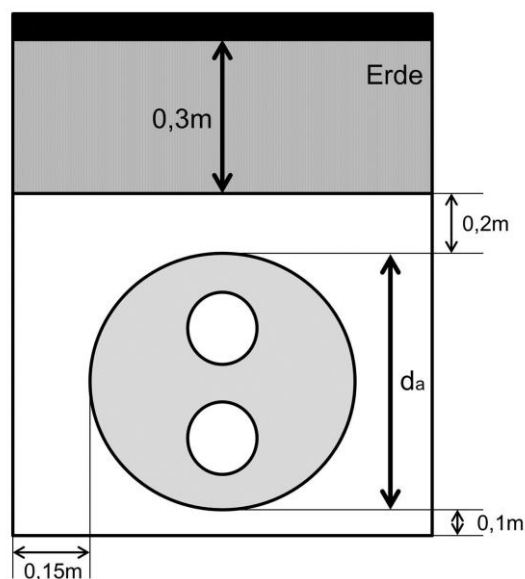


Abbildung 5-8: Rohrgraben TwinPipes [logstor 2013a]

Damit kann das spezifische Aushubvolumen pro Meter Rohr berechnet werden über:

$$V_{Aushub,spez} = (d_{a,HDPE} + 0,3) * (d_{a,HDPE} + 0,6) \quad \text{Formel 5-13}$$

Die spezifische Sandmasse beträgt pro Meter Rohr:

$$m_{Sand,spez} = ((d_{a,HDPE} + 0,3)^2 - \frac{\pi}{4} * d_{a,HDPE}^2) * \rho_{Sand} \quad \text{Formel 5-14}$$

Die Materialmengen für die Reduktionen der TwinPipes und die Abweiger werden genauso berechnet wie für die normalen Kunststoffmantelrohre (siehe Kapitel 5.2.3.1) und daher hier nicht gesondert beschrieben.



## 6 Bestimmung der Wärmegestehungskosten

In diesem Kapitel wird die Berechnung der Wärmegestehungskosten gezeigt. Zunächst wird in Kapitel 6.1 auf die Wärmegestehungskosten der Heiz(kraft)werke eingegangen. Danach wird in Kapitel 6.2 gezeigt wie die Wärmegestehungskosten der unterschiedlichen semi- zentralen Netzvarianten berechnet werden. Alle Berechnungen in diesem Kapitel folgen dem in Kapitel 4.2 vorgestellten Vorgehen aus [VDI 2067].

### 6.1 Wärmegestehungskosten der Heiz(kraft)werke

#### 6.1.1 Berechnung kapitalgebundenen Kosten

Zunächst werden für die unterschiedlichen Anlagentypen die Investitionskosten ( $A_0$ ) aus Literaturangaben abgeleitet. Teilweise werden hierfür Angaben aus anderen Ländern oder früheren Jahren verwendet. Diese müssen dann anhand der allgemeinen Preisentwicklung auf das Jahr 2010 bezogen und anhand der Preisunterschiede in den Ländern auf deutsche Preise umgerechnet werden. Hierfür werden die in Tabelle 6-1 gezeigten Angaben zum Preisniveau in Deutschland, Italien und Österreich verwendet.

Jahr (2010=100%)	Deutschland (Gewerbliche Betriebsgebäude)	Italien (alle Güter)
2005	86,1%	-
2007	95,0%	94,3%
2009	-	98,4%
2013	107,8%	-

Tabelle 6-1: Preisniveau in Deutschland und Italien [Destatis], [OECD]

Nach [Eurostat] war das Preisniveau im Baugewerbe in Europa im Jahr 2007 wie folgt: EU (100%), Deutschland (116%), Österreich (124%) und Italien (83%).

Am Beispiel der Investitionskosten für die ORC- Anlage wird das Vorgehen zur Umrechnung der Preise auf das Preisniveau in Deutschland im Jahr 2010 näher beschrieben.

Nach [Oberberger, Thek 2008] betragen die Investitionskosten für eine ORC- Anlage mit 1,57 MW<sub>el</sub> in Österreich im Jahr 2007 8,3 Mio. €. Dieser Preis wird zunächst auf das Preisniveau in Deutschland im Jahr 2007 umgerechnet. Danach wird der Preis auf das Preisniveau in Deutschland im Jahr 2010 gebracht. Damit betragen die Investitionskosten für die ORC- Anlage 8,2 Mio. €. Die vollständige Umrechnung ist in Formel 6-15 gezeigt.

$$A_{0,ORC\ 1,57\ MW_{el},DE\ 2010} = A_{0,ORC\ 1,57\ MW_{el},AT\ 2007} * \frac{116\%}{124\%} * \frac{1}{95\%} \quad \text{Formel 6-1}$$

Die weiteren Literaturwerte für die Investitionskosten der ORC- Anlage werden in Tabelle 6-2 gezeigt.

Elektrische Leistung	Investitionskosten	Jahr	Land	Quelle	Investitionskosten pro MW <sub>el</sub> (Deutschland, 2010)
0,5 MW <sub>el</sub>	2,9 Mio. €	2007	Deutschland	[Wilhelm 2007]	6,1 Mio. €
0,8 MW <sub>el</sub>	3,0 Mio. €	2010	Deutschland	GEMIS 4.81	3,0 Mio. €
1 MW <sub>el</sub>	5,2 Mio. €	2005	Deutschland	[König 2009]	6,0 Mio. €
1,007 MW <sub>el</sub>	5,9 Mio. €	2009	Italien	[Duvia et al. 2009]	8,3 Mio. €
0,65 MW <sub>el</sub>	5,2 Mio. €	2007	Österreich	[Oberberger, Thek 2008]	7,9 Mio. €
1,57 MW <sub>el</sub>	8,3 Mio. €	2007	Österreich	[Oberberger, Thek 2008]	5,2 Mio. €

Tabelle 6-2: Investitionskosten unterschiedlicher ORC- Anlagen

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Literaturwerte werden (in der letzten Spalte dargestellt) auf das Jahr 2010 und Deutschland aktualisiert. Dabei zeigt sich, dass die Kosten pro MW<sub>el</sub> aus [König 2009], [Oberberger, Thek 2008] und [Wilhelm 2007] vergleichbar sind. Die Angaben in [Duvia et al. 2009] der Firma Turboden erscheinen sehr hoch, die Angaben aus GEMIS 4.81 hingegen zu niedrig. Zudem können diese nicht verifiziert werden, da die Originalquelle unklar ist. Vermutet wird jedoch, dass ältere Angaben mittels Lernfaktoren auf heutige Preise umgerechnet werden, da die neueste in GEMIS 4.81 zitierte Quelle von 2003 stammt.

Als realistischer Wert werden daher die aus [König 2009] abgeleiteten Investitionskosten von 6,0 Mio. € für die ORC- Anlage mit einem Megawatt elektrischer Leistung verwendet.

Nach [Schulzke 2011] kostet der Bau eines Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes mit einem Gasinput von 5 MW im Jahr 2010 8 Mio. Euro bzw. 5.500 Euro pro kW installierte elektrische Leistung. Das hier betrachtete Holzvergaser- Blockheizkraftwerk hat einen Gasinput von etwa 4 MW und ist damit nur geringfügig kleiner. Werden die 5.500 Euro aus [Schulzke 2011] angesetzt, hat das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk Investitionskosten in Höhe von 5,5 Mio. Euro.

Für die Bestimmung der Investitionskosten des Hackschnitzelkessels mit 800 kW werden ebenfalls zunächst verschiedene Literaturangaben verglichen (gezeigt in Tabelle 6-3). Wiederum anhand der Preisentwicklungen im Baugewerbe in Deutschland werden die Preise auf das Jahr 2010 bezogen und die Preise pro kW werden verglichen.

Thermische Leistung	Investitionskosten	Jahr	Quelle	Investitionskosten pro kW <sub>th</sub> (Deutschland, 2010)
500 kW <sub>th</sub>	120.000 €	2009 bis 2012	[Netzwerk 2010]	240 €
800 kW <sub>th</sub>	150.000 €	2013	[Aberle 2013]	174 €
1.000 kW <sub>th</sub>	533.660 €	2005	GEMIS 4.81	620 €
2.600 kW <sub>th</sub>	1.600.000 €	2007	[Wilhelm 2007]	648 €

**Tabelle 6-3: Investitionskosten für Hackschnitzelkessel**

Zu beachten ist hierbei, dass die Quellen teilweise nicht direkt vergleichbar sind. Die Angaben von [Aberle 2013] beinhalten zwar den Hackschnitzelkessel mit Brennstofflager und -austragung, Montage und Inbetriebnahme, allerdings fehlt hier der Bau der Gebäude. Ähnliches gilt vermutlich für die Angabe aus [Netzwerk 2010]. Daher wird für den Hackschnitzelkessel 800 kW der Preis pro kW<sub>th</sub> aus GEMIS 4.81 übernommen. Damit betragen die Investitionskosten 495.850 €.

Die Literaturangaben zu den Investitionskosten für den Gaskessel mit 1 MW enthalten teilweise keine Montage. Nach diesen kostet die Anschaffung des Gaskessels etwa 30.000 Euro. Zusätzlich müssen allerdings auch die Gebäude und Nebenanlagen gebaut werden und alles montiert werden. Daher wird hier von Gesamtinvestitionskosten in Höhe von 172.345 Euro aus GEMIS 4.81 im Jahr 2000 ausgegangen. Dies entspricht etwa Investitionskosten von 208.900 Euro im Jahr 2010.

Aus diesen Investitionskosten werden wie in Kapitel 4.2.1 gezeigt die kapitalgebundenen Kosten errechnet.

### 6.1.2 Berechnung der bedarfsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten

Die **bedarfsgebundenen Kosten** können wie in Kapitel 4.2.2 gezeigt aus der Brennstoffmenge, der Menge zu entsorgender Asche und dem Strombedarf pro Jahr berechnet werden.

Dafür werden die in Tabelle 6-4 gezeigten technischen Daten der betrachteten Anlagen benötigt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

	ORC- Anlage	Verg.- BHKW	HS Kessel 800 kW	Gas 1 MW
Elektrische Leistung	1 MW	1 MW	-	-
Thermische Leistung	6,26 MW	1,6 MW	800 kW	1 MW
Volllaststunden	4.890	6.750	6.000	-
Elektrische Nutzungsgrad	10,6%	35%	-	-
Thermischer Nutzungsgrad	70%	-	85%	87,5%
Eigenstrombedarf (kWh <sub>el</sub> / MWh <sub>th</sub> )	26,8	52,1	20	20
Heizwert (MJ/kg)	11,355			-
Wassergehalt	35%			-
Aschegehalt d. TM	1,6%			-

**Tabelle 6-4: Technische Eigenschaften der Heiz(kraft)werke**

Für die **betriebsgebundenen Kosten** wird der Arbeitsaufwand zur Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebs abgeschätzt und mit den durchschnittlichen Arbeitskosten in der Energieversorgung im Jahr 2010 von 44,20 Euro pro Stunde nach [Destatis] multipliziert.

Laut [FNR 2005] liegt der Personalbedarf eines Heizwerkes mit weniger als 1 MW Leistung bei 0,2 bis 0,4 Personenjahren. Er ist zudem abhängig von der Brennstoffqualität. Nach [IAB] arbeitete ein Arbeitnehmer im Jahr 2010 durchschnittlich etwa 1.500 Stunden. Da hier von einer guten Brennstoffqualität ausgegangen werden kann und das Heizwerk kleiner als 1 MW ist, wird von 0,4 Personenjahren und damit von 600 Arbeitsstunden pro Jahr für den technischen Betrieb des Hackschnitzelkessel mit 800 kW ausgegangen. Diese Annahmen scheinen nach einem Vergleich mit den Angaben nach [TWS 2014] plausibel. Demnach fallen für einen Hackschnitzelkessel mit 500 kW und einer sehr hohen Brennstoffqualität sogar nur 130 Arbeitsstunden pro Jahr an.

Laut [Oberberger, Thek 2008] liegen die Jahresarbeitsstunden einer ORC- Anlage mit 650 kW<sub>el</sub> bei 3.400 h/a und bei einer ORC- Anlage mit 1,57 MW<sub>el</sub> bei 4.500 h/a. Der Mittelwert der beiden Angaben von 3.950 h/a wird für die betrachtete 1 MW<sub>el</sub> Anlage ausgewählt.

Nach [Schulzke 2011] muss das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk während dem Betrieb dauerhaft beaufsichtigt werden. Da es das ganze Jahr in Betrieb ist, werden die Arbeitsstunden mit 8.760 Stunden pro Jahr grob abgeschätzt.

Nach [TWS 2014] ist der Betrieb eines Spitzenlastgaskessels nicht arbeitsaufwändig. Pro Jahr fallen daher nur 30 Arbeitsstunden an. Dies entspricht Personalkosten von 1.326 Euro im Jahr 2010.

Die **sonstigen Kosten** werden als 0,5 Prozent (reine Wärmebereitstellung) bzw. ein Prozent (Kraft- Wärme- Kopplungsanlage) Prozent der Investitionskosten angesetzt [Oberberger, Thek 2008].

Zusätzlich zur erzeugten Wärme können die beiden betrachteten Kraft-Wärme- Kopplungsanlagen auch Strom verkaufen. Unter der Annahme, dass beide Anlagen Anfang 2010 in Betrieb gegangen sind, fällt ihre Stromerzeugung unter das EEG 2009 und wird nach diesem vergütet [EEG 2009]. Teilweise sind im EEG 2009 unterschiedliche Vergütungssätze je nach Leistung der Anlage festgelegt. In diesem Fall gilt als Leistung nicht die elektrische Wirkleistung, sondern der Quotient aus der Summe des jährlich eingespeisten Stroms und der Summe der vollen Zeitstunden des Kalenderjahres. Die EEG- Vergütung wird unverändert für einen Zeitraum von 20 Jahren gewährt. Bei Anlagen, die nach 2009 in Betrieb gehen, werden die Vergütungssätze jedoch zum 1. Januar eines jeden Folgejahres um einen festen Prozentsatz abgesenkt. Bei Biomasseanlagen beträgt die Degression ein Prozent. Die Grundvergütung der Anlagen mit Inbetriebnahme im Jahr 2009 in Abhängigkeit ihrer elektrischen Leistung sowie die Höhe des NaWaRo- (Nachwachsende Rohstoffe) Bonus wird in Tabelle 6-5 gezeigt.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

	<b>Bis 150 kW</b>	<b>Bis 500kW</b>	<b>Bis 5 MW</b>
<b>Grundvergütung</b>	11,67 Cent pro kWh	9,18 Cent pro kWh	8,25 Cent pro kWh
<b>NaWaRo- Bonus</b>	6 Cent pro kWh	6 Cent pro kWh	2,5 Cent pro kWh (4 Cent pro kWh bei Landschaftspflegeholz)

**Tabelle 6-5: Grundvergütung und NaWaRo Bonus nach EEG 2009**

Zusätzlich gibt es noch einen Bonus von 2 Cent pro kWh für innovative Anlagentechnik, der sowohl für die ORC- Anlage als auch für das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk gewährt wird. Der KWK- Bonus von 3 Cent pro kWh wird bis zu einer Leistung von 20 MW gewährt, aber nur für den Teil des eingespeisten Stroms, der im KWK- Betrieb erzeugt wird.

	<b>ORC- Anlage 1 MW<sub>el</sub></b>	<b>Vergaser- BHKW 1 MW<sub>el</sub></b>
<b>Leistung nach EEG 2009</b>	0,56 MW <sub>el</sub>	0,75 MW <sub>el</sub>
<b>Volllaststunden Strom</b>	4.890 h/a	6.750 h/a
<b>Volllaststunden Wärme</b>	4.890 h/a	6.750 h/a
<b>Leistungsanteil bis 150 kW</b>	26,9%	20,0%
<b>Leistungsanteil bis 500 kW</b>	62,7%	46,7%
<b>Leistungsanteil bis 5 MW</b>	10,4%	33,3%
<b>Grundvergütung</b>	9,75 Cent pro kWh	9,37 Cent pro kWh
<b>NaWaRo- Bonus</b>	5,63 Cent pro kWh	4,83 Cent pro kWh
<b>Innovative Anlagentechnik</b>	2 Cent pro kWh	2 Cent pro kWh
<b>KWK Bonus</b>	3 Cent pro kWh	3 Cent pro kWh

**Tabelle 6-6: Vergütung nach EEG 2009**

Die gesamte EEG- Vergütung für die ORC- Anlage mit Inbetriebnahme im Jahr 2010 beträgt damit 20,18 Cent pro kWh. Die Vergütung für das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk beträgt dementsprechend 19,01 Cent pro kWh.

Eine Zusammenfassung der Berechnung der Wärmegestehungskosten für die Heiz(kraft)werke ist in Tabelle 6-7 gezeigt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

	<b>ORC- Anlage</b>	<b>Vergaser- BHKW</b>	<b>HS Kessel 800 kW</b>	<b>Gas 1 MW</b>
Kapitalkosten pro Jahr	562.400 €	512.130 €	46.170 €	19.500 €
Abrisskosten pro Jahr	29.000 €	26.460 €	2.390 €	1.000 €
<b>ges. Kapitalkosten pro Jahr</b>	<b>519.400 €</b>	<b>538.590 €</b>	<b>48.560 €</b>	<b>20.500 €</b>
Brennstoffpreis pro kWh	0,028 €	0,028 €	0,028 €	0,038 €
Brennstoffkosten pro Jahr	1.272.300 €	517.720 €	155.740 €	43.600 €
Ascheentsorgung pro Jahr	12.200 €	1.840 €	1.490 €	-
Strompreis pro kWh	0,12 €	0,12 €	0,12 €	0,12 €
Stromkosten pro Jahr	0 €	0 €	11.590 €	2.400 €
<b>bedarfsgebundene Kosten pro Jahr</b>	<b>1.284.500 €</b>	<b>519.560 €</b>	<b>168.820 €</b>	<b>46.000 €</b>
Jahresarbeitsstunden	3.950 h	8.760 h	300 h	30 h
Personalkosten pro Jahr	174.600 €	387.300 €	26.530 €	1.300 €
Wartungskosten pro Jahr	90.600 €	82.500 €	7.440 €	3.200 €
<b>betriebsgebundene Kosten pro Jahr</b>	<b>265.200 €</b>	<b>469.800 €</b>	<b>33.970 €</b>	<b>4.500 €</b>
Anteil sonstige Kosten	1%	1%	0,5%	0,5%
<b>sonstige Kosten pro Jahr</b>	<b>60.400 €</b>	<b>55.000 €</b>	<b>2.480 €</b>	<b>1.000 €</b>
EEG- Vergütung pro kWh <sub>el</sub>	0,2018 €	0,1901 €	-	-
<b>Erlöse Stromverkauf pro Jahr</b>	<b>821.100 €</b>	<b>1.144.820 €</b>	<b>0 €</b>	<b>0 €</b>
<b>Gesamte Kosten pro Jahr</b>	<b>1.380.400 €</b>	<b>438.120 €</b>	<b>253.830 €</b>	<b>72.000 €</b>
<b>spez. Gesamtkosten pro kWh<sub>th</sub></b>	<b>0,045 €</b>	<b>0,042 €</b>	<b>0,053 €</b>	<b>0,072 €</b>

**Tabelle 6-7: Ermittlung der Wärmegestehungskosten für die Heiz(kraft)werke**

Es zeigt sich, dass die verschiedenen Anlagentypen sehr unterschiedliche Wärmegestehungskosten aufweisen, wobei die Investitionskosten und die Brennstoffkosten den größten Einfluss haben.

Am günstigsten schneiden die ORC- Anlage und das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk ab. Die Wärmegestehungskosten betragen 4,5 bzw. 4,2 Cent pro kWh<sub>th</sub>. Mit 5,3 bzw. 7,2 Cent pro kWh<sub>th</sub> weisen der Hackschnitzelkessel und der Gasspitzenlastkessel teilweise höhere Wärmegestehungskosten auf. Allerdings liegen die geringeren Kosten bei den Heizkraftwerken hauptsächlich daran, dass der erzeugte Strom nach dem EEG 2009 vergütet wird.

Nach dem [EEG 2014] würden ORC- Anlage und Holzvergaser- Blockheizkraftwerk nur noch etwa 12 Cent pro kWh Vergütung für den Strom bekommen. Damit stiegen die Wärmegestehungskosten des Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes auf 8 Cent pro kWh<sub>th</sub>. Bei der ORC- Anlage würde sich die Senkung der EEG- Vergütung weniger stark auswirken, die Kosten pro kWh Wärme lägen dann bei 6 Cent (ohne Berücksichtigung des Netzes). Beide Anlagen hätten dann allerdings Wärmegestehungskosten, welche höher als bei der reinen Wärmeerzeugung im Hackschnitzelkessel lägen.

Abschließend werden die errechneten Wärmegestehungskosten mit Literaturangaben verglichen. Laut [Thrän 2011] betragen die Wärmegestehungskosten einer ORC- Anlage mit 1 MW<sub>el</sub> etwa 57 Euro pro MWh<sub>th</sub> und liegen damit geringfügig höher als die in dieser Arbeit berechneten Kosten. [Oberberger, Thek 2008] kommt auf Kosten von 46 Euro pro MWh<sub>th</sub> für eine ORC- Anlage mit 650 kW<sub>el</sub> und auf Kosten von 40 Euro pro MWh<sub>th</sub> für eine Anlage mit 1,56 MW<sub>el</sub>. Die hier errechneten Kosten der 1 MW<sub>el</sub> ORC- Anlage von 45 Euro pro MWh<sub>th</sub> scheinen daher plausibel zu sein. Unter der Annahme, dass der Hackschnitzelkessel 80 Prozent der gesamten Wärmemenge liefert und der Spitzenlastgaskessel 20 Prozent abdeckt, liegt der errechnete gemischte Wärmegestehungspreis bei 57 Euro pro MWh<sub>th</sub> und ist damit den in [Thrän 2011] angegebenen Kosten von 76 Euro pro MWh<sub>th</sub> für einen Hackschnitzelkessel mit 750 kW und einen Gaskessel mit 1,5 MW vergleichbar.

## **6.2 Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Netze**

Die Berechnungen der Kosten für das Wärmenetz werden mit Hilfe des Programmes RDesign durchgeführt. Werden in diesem Programm Kosten für die unterschiedlichen Netzkomponenten hinterlegt, berechnet RDesign die Investitionskosten der Netzleitungen inklusive Montage, die Grabungskosten inklusive Oberflächenwiederherstellung und die Investitionskosten der Netzpumpen. Aus diesen Angaben sowie dem Zinssatz und der Nutzungsdauer können dann die kapitalgebundenen Kosten abgeleitet werden. Zudem werden die von RDesign berechneten technischen Angaben zum Netz wie der Strombedarf pro Jahr und die benötigte Wärmemenge genutzt um die bedarfsgebundenen Kosten zu bestimmen.

### **6.2.1 Berechnung der Investitionskosten und der kapitalgebundenen Kosten**

Obwohl in RDesign bereits Kostendaten für die Wärmenetzkomponenten hinterlegt sind, müssen diese aktualisiert werden, da die Daten aus Österreich stammen und aus dem Jahr 2001 sind. Hierzu werden verschiedene Herstellerprospekte und Angebote unterschiedlicher Hersteller aus Deutschland, Dänemark und Österreich ausgewertet. Diese Angaben werden auf das Jahr 2010 und das Land Deutschland umgerechnet. Grundsätzlich werden vier unterschiedliche Quellen verwendet: die Angaben aus RDesign (Bezugsjahr 2001 und Land Österreich); ein Herstellerprospekt von logstor (Jahr 2013 und Land Dänemark); ein Herstellerprospekt von Steinbacher (Jahr 2012 und Land Österreich) und ein Angebot von isoplus (Jahr 2013 und Land Deutschland).

Ein Wärmenetz enthält eine Vielzahl an Komponenten wie Rohrleitungen, Abweiger, Reduktionen, Muffen und Pumpen für die Preisdaten gefunden werden müssen.

Die Hausübergabestationen und Hauseinführungen werden für die Kosten nicht mitbilanziert, da sie meist im Eigentum des Wärmekunden sind und von diesem bezahlt werden.

Die Angaben zur Herleitung der verwendeten Kostendaten sind im Anhang 4 zu finden.

Die Nutzungsdauer des Wärmenetzes beträgt nach [RDesign] 35 Jahre. Als Zinssatz wird 4,5 Prozent nach [Bundesbank] angesetzt. Damit können aus den Investitionskosten für den Netzbau die kapitalgebundenen Kosten nach [VDI 2067] berechnet werden. Die Instandhaltungskosten werden nach [RDesign] pauschalisiert als ein Prozent der Investitionskosten angesetzt.

### **6.2.2 Berechnung der bedarfsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen Kosten**

Für die bedarfsgebundenen Kosten wird der von RDesign berechnete Strombedarf pro Jahr und die Wärmemenge ab Heizhaus (enthält sowohl die verkaufte Nahwärme als auch die Wärmeverluste) benötigt. Aus diesen Angaben können mit Hilfe der Wärmegestehungskosten (Berechnung gezeigt in Kapitel 6.1) und der Stromkosten für Großverbraucher von 12,07 Cent/ kWh im Jahr 2010 nach [BDEW 2013] die bedarfsgebundenen Kosten abgeleitet werden.

Die sonstigen Kosten werden ebenfalls pauschal mit 0,5 Prozent der Investitionskosten berechnet [RDesign].

Die betriebsgebundenen Kosten des Wärmenetzes werden nicht gesondert ausgewiesen. Instandhaltungsarbeiten am Netz sind bereits in den kapitalgebundenen Kosten enthalten und das zum Betrieb der Heiz(kraft)werke benötigte Personal ist in den Wärmegestehungskosten ab Heizhaus eingerechnet. Die errechneten Investitionskosten und die Wärmegestehungskosten der unterschiedlichen Netzvarianten sind in Tabelle 6-8 zusammengefasst.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

	<b>EFH</b>	<b>EFH Serie 3</b>	<b>EFH TwinPipes</b>	<b>KfW55</b>	<b>MFH</b>	<b>MFH mit BHKW</b>	<b>2- Spänner</b>
Investitionskosten Netzleitung inkl. Montage	637.830€	868.490€	360.230€	920.200€	156.2120€	671.330€	73.110€
Grabungskosten inkl. Oberflächen- wiederherstellung	399.960€	469.280€	504.550€	584.360€	93.750€	447.580€	44.070€
Investitionskosten Netz-Pumpen	8.800€	8.800€	8.800€	8.800€	8.800€	17.230€	11.480€
<b>Gesamte Investitionskosten</b>	1.046.590€	1.346.570€	873.580€	1.513.360€	258.770€	1.136.140€	128.660€
Kapitalkosten pro Jahr	60.160€	77.340€	50.250€	86.890€	15.040€	65.070€	7.660€
Instandhaltungs- kosten pro Jahr	20.930€	26.930€	17.470€	30.270€	5.180€	22.720€	2.570€
<b>ges. Kapitalkosten pro Jahr</b>	81.090€	104.270€	67.720€	117.160€	20.220€	87.790€	10.230€
Wärmekosten pro Jahr	381.230€	360.880€	353.440€	321.680€	252.500€	1.019.060€	201.430€
Stromkosten pro Jahr	2.030€	1.550€	1.560€	2.040€	790€	6.290€	650€
<b>bedarfsgebundene Kosten pro Jahr</b>	383.260€	362.440€	355.010€	323.720€	253.290€	1.025.350€	202.080€
<b>sonstige Kosten pro Jahr</b>	5.230€	6.730€	4.370€	7.570€	1.290€	5.680€	640€
<b>Gesamte Kosten pro Jahr</b>	469.590€	473.440€	427.100€	448.450€	274.800€	1.118.820€	212.950€
<b>spez. Gesamtkosten pro kWh<sub>th</sub></b>	<b>0,085 €</b>	<b>0,086 €</b>	<b>0,077 €</b>	<b>0,090 €</b>	<b>0,065 €</b>	<b>0,054 €</b>	<b>0,062 €</b>

**Tabelle 6-8: Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Netze**

## 7 Modellierung der Ökobilanzen

In diesem Kapitel wird die Modellierung der Ökobilanzen der unterschiedlichen Prozessketten beschrieben. Kapitel 7.1 zeigt das modellierte System. In Kapitel 7.2 wird der aktuelle Stand der Literatur zur Ökobilanzierung der Energiebereitstellung aus Holz und zur netzgebundenen Wärmeversorgung kurz vorgestellt. Im Anschluss wird in Kapitel 7.3 ein Vorgehen beschrieben und beispielhaft durchgeführt, das die Erstellung von qualitativ hochwertigen Sachbilanzen aus Literaturdaten ermöglicht. Schließlich wird in den Kapiteln 7.4 bis 7.6 die Erstellung der Sachbilanzen für die Ökobilanzierung der Wärmebereitstellung aus Holzreststoffen gezeigt.

### 7.1 Das modellierte System

Die Wärme für ein Wohngebäude kann auf drei Arten bereitgestellt werden:

- dezentral, also über eine Hausheizung im Gebäude
- semi- zentral über ein unvermaschtes Wärmenetz mit kurzen Trassenlängen und einer kleinen Wärmeerzeugerleistung (siehe auch Kapitel 3.1)
- zentral über ein vermaschtes Wärmenetz

In diesen Wärmeversorgungskonzepten können unterschiedliche Konversionsanlagen und Brennstoffe zum Einsatz kommen. In Tabelle 7-1 wird ein Überblick über die betrachteten Konversionstechnologie-Brennstoffkombinationen gezeigt und unter welche Art der Wärmebereitstellung (zentral, semi- zentral oder dezentral) diese fallen.

	Heizkraftwerke			Heizwerk	Heizung		
	Dampfturbine 5 MW <sub>el</sub>	ORC- Anlage 6 MW <sub>th</sub> Gaskessel 10 MW	Verg.- BHKW 1,6 MW <sub>th</sub> 2 Gaskessel 1 MW	HS- Kessel 800 kW Gaskessel 1 MW	HS- Kessel 50 kW	Pellet 10 kW	Gasheizung 10 - 50 kW
Wald- restholz	x	x	x	x	x		
Industrie- restholz	x	x				x	
Landschafts- pflegeholz		x		x			
Erdgas		x	x	x			x
	<b>Zentrale Wärmeversorgung</b>		<b>Semi- zentrale Wärmeversorgung</b>		<b>Dezentrale Wärmeversorgung</b>		

**Tabelle 7-1: Untersuchte Wärmebereitstellungskonzepte: Konversionstechnologien und Brennstoffe**

Der schematische Aufbau der Prozessketten für die Wärmebereitstellung aus Holzreststoffen ist in Abbildung 7-1 gezeigt. In dieser Abbildung werden die unterschiedlichen Wärmebereitstellungspfade und ihre Prozesskettenabschnitte visualisiert.



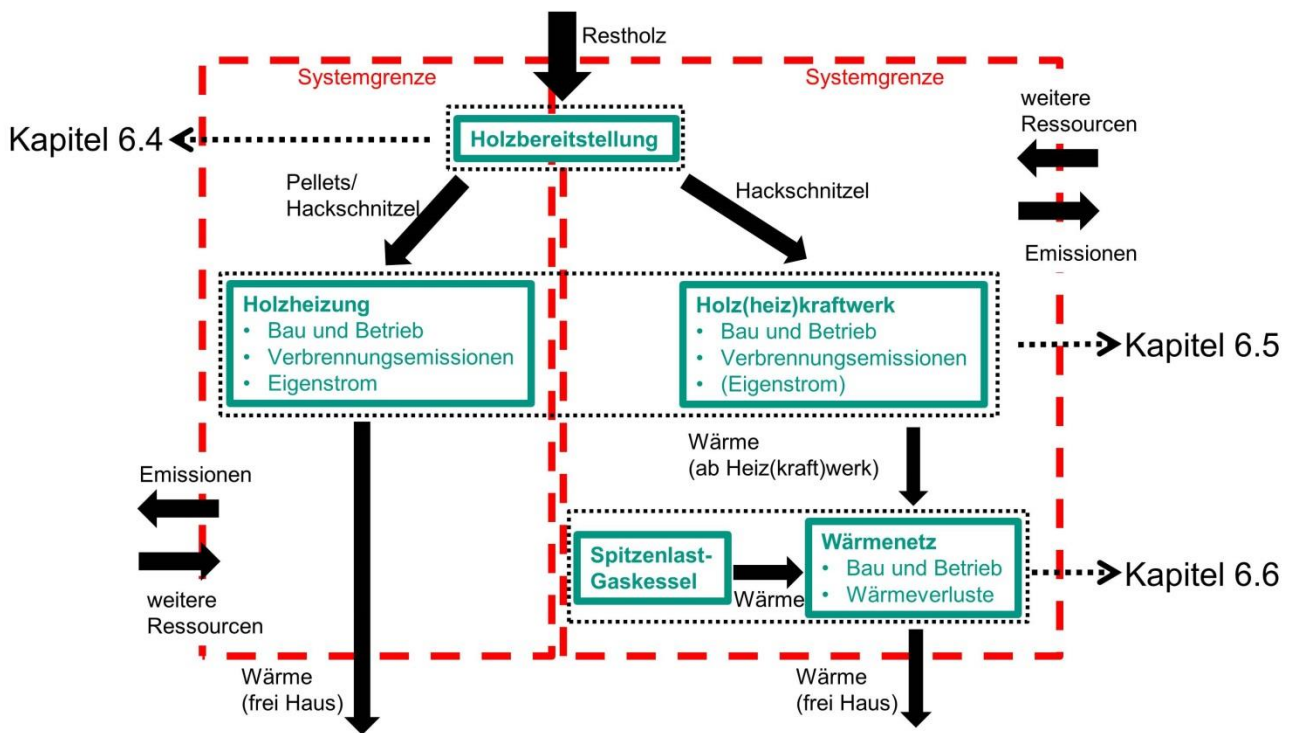


Abbildung 7-1: Prozessketten der Wärmebereitstellung aus Holz

Rechts in der Abbildung ist die netzbasierte Wärmebereitstellung aus Holz zu sehen, bei der zur Spitzenlastwärmeerzeugung Erdgas eingesetzt wird. Diese netzbasierte Wärmebereitstellung kann wiederum in drei Prozesskettenabschnitte unterteilt werden: Die Bereitstellung der Holzbrennstoffe, die Wärmeerzeugung im Holzheiz(kraft)werk und den Wärmetransport über das Netz zum Kunden. Im Unterschied dazu besteht die links in der Abbildung gezeigte dezentrale Wärmeversorgung nur aus der Holzbereitstellung und dem Betrieb der Konversionsanlage, da das bereitgestellte Holz direkt zum Kunden transportiert und dort verbrannt wird, um lokal Wärme bereitzustellen. Jeder Prozesskettenabschnitt enthält die zugehörigen Transporte.

Ebenfalls in der Abbildung gezeigt ist, in welchen Kapiteln die Modellierung der Sachbilanzen der unterschiedlichen Prozesskettenabschnitte gezeigt wird. Zunächst wird in Kapitel 7.4 die Modellierung der Holzbereitstellung beschrieben, danach wird in Kapitel 7.5 auf die Konversionstechnologien (Holzheizungen, Holzheizkraftwerke und Heizwerke) eingegangen. Schließlich wird die Modellierung der Wärmenetzinfrastruktur in Kapitel 7.6 beschrieben.

Alle Ökobilanzen werden in der Software openLCA, einer open Source Ökobilanzsoftware der Firma GreenDelta modelliert. Als Datenbasis für die Hintergrundprozesse wird die kommerziell erhältliche Datenbank des ecoinvent Centers in der Version 2.2 genutzt.

## 7.2 Stand der Literatur

In der Literatur finden sich derzeit keine Ökobilanzen für die netzgebundenen Wärmeversorgung durch Holzreststoffe. Daher wird im Folgenden unterschieden zwischen der Ökobilanzierung der Wärmeversorgung aus Holzreststoffen (ohne Netz) (gezeigt in Kapitel 7.2) und der Ökobilanzierung der Wärmenetzinfrastruktur (gezeigt in Kapitel 7.3).

### **7.2.1 Ökobilanzen zu Energie aus Holz**

Das große Interesse an Ökobilanzdaten der Energieerzeugung aus Holzreststoffen hat dazu geführt, dass es im deutschsprachigen Raum in der Zwischenzeit eine Reihe von Ökobilanzdatensätzen und Studien gibt, die sich mit dem Thema auseinandersetzen. Neben der kommerziell erhältlichen ecoinvent Datenbank enthält auch das freiverfügbare GEMIS (**G**lobales **E**missions-**M**odell **i**ntegrierter **S**ysteme) einige Datensätze aus dem Bereich Energie aus Holzreststoffen. Außerdem gibt es eine Reihe von Ökobilanzstudien aus den letzten Jahren wie [Briem et al. 2004], [König 2009], [Wolff 2004] und andere.

Problematisch bei der Modellierung der Energieerzeugung aus Holzreststoffen ist daher weniger die Datenverfügbarkeit, sondern die Datenauswahl. Oftmals variieren die Ergebnisse der Studien und Datensätze trotz ähnlicher Technologien und Brennstoffe auf Grund von methodischen Unterschieden in der Modellierung erheblich. Während z.B. für eine ORC- Anlage mit einer Leistung von 0,8 MW<sub>el</sub> und der Nutzung von Waldrestholzhackschnitzeln in GEMIS 4.81 nur 0,5 g<sub>CO2</sub>/ kWh<sub>th</sub> angegeben werden, hat die ORC- Anlage mit 1 MW<sub>el</sub> und unbehandelten Hackschnitzeln nach [Briem et al. 2004] Emissionen von 101 g<sub>CO2</sub>/ kWh<sub>th</sub>.

Daher ist eine der Aufgaben bei der Datensatzerstellung für Energie aus Holz die Harmonisierung der Daten und damit die Erstellung valider und konsistenter Datensätze. Hierzu müssen verschiedene Literaturquellen ausgewertet, hinsichtlich ihrer Datenqualität untersucht und verglichen werden. Im Anschluss werden aus den am besten geeigneten Datensätzen oder Studien die Prozessketten aufgebaut. Dieses Vorgehen zur Literatursauswahl wird in Kapitel 7.3 näher beschrieben und am Beispiel der Literatursauswahl für die ORC- Anlage detailliert untersucht.

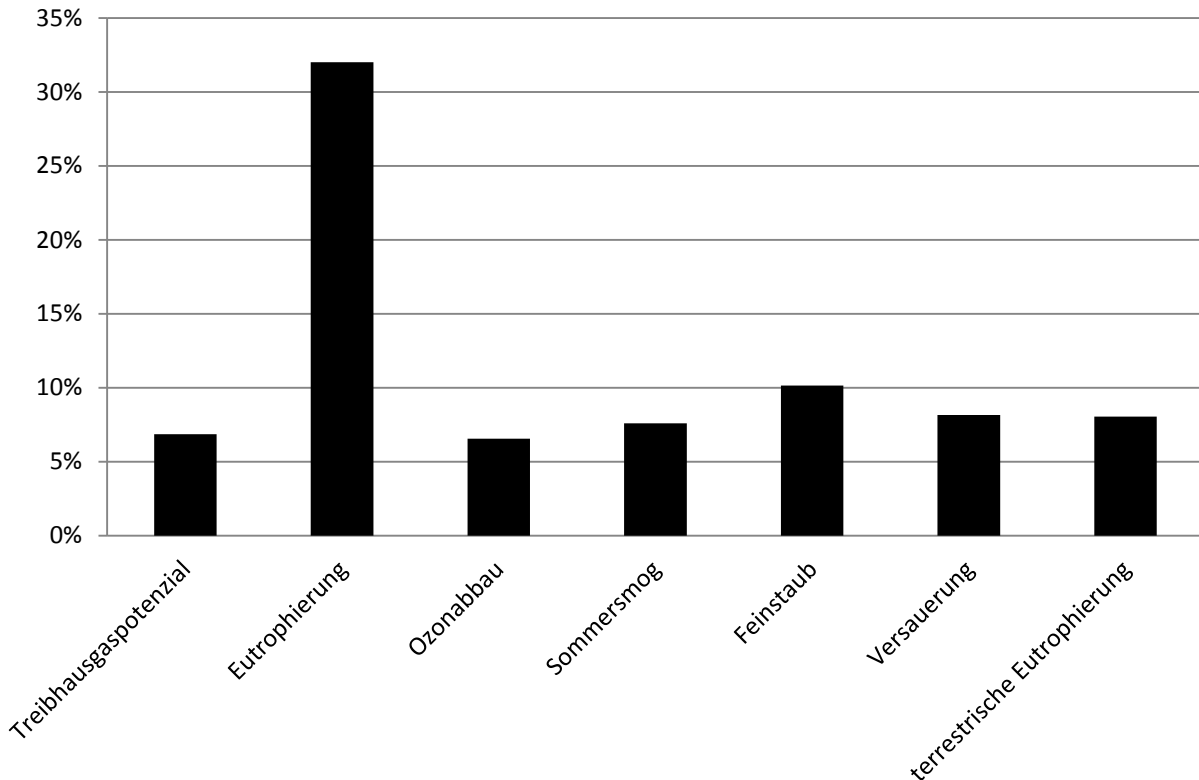
### **7.2.2 Ökobilanzen der netzgebundenen Wärmeversorgung**

Bisher gibt es nur wenige Ökobilanzen von Wärmenetzen [Fröling et al. 2004], [Fröling et al. 2005], [Persson et al. 2006], [Perzon et al. 2007] [Oliver-sola et al. 2009] sowie einen ecoinvent v2.2 Datensatz aus dem Jahr 2000 („heat, at local distribution cogen 160kWe Jakobsberg, allocation exergy“). Die wichtigsten Ergebnisse dieser Ökobilanzen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Der in ecoinvent modellierte Datensatz beschreibt das Wärmenetz der Siedlung Jakobsberg in Basel in der Schweiz. Diese Siedlung bestand im Jahr 2002 aus 220 Wohneinheiten: 54 Einfamilien- und 9 Mehrfamilienhäusern, einer Alterssiedlung und einem Kindergarten. Die Siedlung wurde mittels eines Erdgas BHKW mit 160 kW<sub>el</sub> (360 kW<sub>th</sub>) und 2 Spitzenlastölkessel (600 und 1200 kW<sub>th</sub>) über ein Wärmenetz mit Wärme versorgt. Das ganze System ging bereits im Jahre 1987 in Betrieb.

Um die Wärmeverteilung zu analysieren, wurde ein kleines Verteilnetz mit Kunststoffmantelrohren abgebildet. Diese Rohre sind mit Polyurethan Hartschaum isoliert und mit Polyethylen verkleidet. Die Daten zur Infrastruktur wurden der (über ecoinvent leider nicht mehr verfügbaren Quelle) „Ökoinventare von Energiesystemen“ aus dem Jahr 1996 entnommen und die Lebensdauer des Netzes wurde mit 30 Jahren festgelegt. Ein Heizwasserspeicher von 56 Litern pro kW installierte Leistung des Blockheizkraftwerkes sorgte für eine größere Auslastung. Außerdem wurden die für die Heizzentrale benötigten Rohrleitungen mitbetrachtet.

Um die Relevanz des Netzes zu überprüfen, wird die Wärmebereitstellung ab Anlage („heat, at system cogen 160kWe Jakobsberg, allocation exergy (CH)“) der Wärmebereitstellung beim Kunden, also der Prozesskette mit Wärmeverteilung gegenübergestellt. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Wirkungskategorien zeigt Abbildung 7-2.



**Abbildung 7-2: Steigerung der Emissionen durch Berücksichtigung der Wärmeverteilung**

In den meisten Wirkungskategorien betragen die Unterschiede zwischen dem System mit und ohne Wärmeverteilung zwischen 6 und 10 Prozent. Bei der Eutrophierung treten jedoch sogar 32 Prozent höhere Emissionen auf. Der Beitrag der Wärmeverteilung ist somit nicht vernachlässigbar. Die angenommenen Wärmeverluste in ecoinvent v2.2 betragen nur 6 Prozent und liegen damit deutlich unter den durchschnittlichen Wärmeverlusten von 12 Prozent nach [AGFW 2010]. Bei einem durchschnittlichen deutschen Wärmenetz sind daher noch höhere Unterschiede zu erwarten.

In den Jahren 2004 bis 2006 ist eine Reihe von drei Artikeln [Fröling et al. 2004], [Fröling et al. 2005], [Persson et al. 2006] im International Journal of Life Cycle Assessment mit dem Ziel die Arbeiten der Swedish Heat District Association zum Thema Ökobilanz der verschiedenen Phasen eines Wärmenetzes abzubilden erschienen. [Fröling et al. 2004] beschäftigt sich mit der Produktion der Wärmenetzrohre, [Fröling et al. 2005] mit dem Aufbau des gesamten Netzes. In [Persson et al. 2006] wird die Nutzungsphase evaluiert und die drei verschiedenen Phasen werden abschließend miteinander verglichen.

In [Fröling et al. 2004] wird die Ökobilanz von Stahlrohren, die mit Polyurethanschaum isoliert und von Polyethylen ummantelt sind, beschrieben. Dazu wurden Firmendaten von PowerPipe Systems AB in Schweden für die Jahre 1999-2000 ausgewertet, wobei nur Material- und Energieaufwand, nicht aber der Bauaufwand von Maschinen und Fabriken enthalten sind. Das Fazit der Studie ist, dass die größten Umweltwirkungen (zwischen 93 und 99 Prozent) bereits bei der Rohrherstellung auftreten. Außerdem ist es von Vorteil TwinPipes (Hin- und Rückflussrohr sind in einer gemeinsamen Ummantelung enthalten) einzusetzen, da hier nicht nur Material eingespart wird, sondern auch Vorteile bei der Verlegung (geringere Grabenbreite) auftreten. Im Bereich der Rohmaterialien tragen besonders Stahl, Polyethylen und Polyurethan zu den Umweltwirkungen bei (größer 90 Prozent).

In [Fröling et al. 2005] wird der Aufbau des Wärmenetzes bilanziert. Hierin sind sowohl die Transporte der Rohre an den Ort der Verlegung, die sonstigen benötigten Wärmenetzkomponenten (T- Stücke und Verbindungen) als auch der eigentlich Wärmenetzbau enthalten, nicht aber die für den Bau benötigten

Maschinen. Geringere Umweltbelastungen treten auf, wenn von einer Verlegung auf der grünen Wiese (statt in einem asphaltierten Bereich) ausgegangen werden kann. Im Bereich der Treibhausgasemissionen entfallen die meisten Umweltwirkungen auf das Ausheben der Verlegegräben (speziell auf die Dieselbereitstellung und die Verbrennungsemissionen).

In [Persson et al. 2006] wird der Betrieb des Netzes speziell im Hinblick auf die Wärmeverluste untersucht. Als Wärmequellen werden einmal ein Gaskessel und einmal der schwedische Fernwärmemix untersucht. Übliche Wärmeverluste in Netzen werden mit 10 Prozent angesetzt. Die Nutzungsphase dominiert die meisten Umweltwirkungen, wobei hier nur die Wärmeverluste (und nicht die gesamte Wärmebereitstellung) betrachtet werden. Für größere Rohrdurchmesser steigt jedoch die Relevanz der Rohrherstellung an den Umweltwirkungen.

[Perzon 2007] beschreibt ein Wärmenetz in Schweden im Jahr 2002 das mit einem alternativen Rohrsystem betrieben wird. Das EPSPEX System enthält 4 Rohre aus Polyethylen, die in einem Block aus Polystyren zur Isolation untergebracht sind. Vorteilhaft an diesem System sind die niedrigeren Wärmeverluste (um die 5 Prozent pro Jahr), da mit zwei Flüssigkeitskreisläufen gearbeitet wird, einem für die Heizwärme (der im Sommer abgeschaltet ist) und einem ausschließlich für das Warmwasser, der ganzjährig läuft. Auch hier werden Produktion, Konstruktion und Betrieb des Gesamtsystems betrachtet. Obwohl in diesem Fall 80 Prozent der Wärme aus Biomasse produziert wird, haben die Wärmeverluste weiterhin den größten Einfluss auf die Treibhausgasbilanz. Auch in den anderen Kategorien dominieren die Wärmeverluste, wobei bei der Versauerung, Eutrophierung und beim Ressourcenverbrauch auch die Herstellung der Rohre (Material) und der Aushub mittels Dieselfahrzeugen eine große Rolle spielen.

[Oliver-Sola et al. 2009] untersucht ein Wärmenetzstück von 100 Metern Länge an einer Straße mit 10 Wohnblocks zu jeweils 24 Wohneinheiten. Im Gegensatz zu den anderen Beiträgen werden hier weitere Teile des Wärmenetzes mitbetrachtet; nämlich die Rohrleitungen zu bzw. in den Gebäuden sowie andere Komponenten der Gebäudeheizung und Warmwasserverteilung. Allerdings werden nur die Infrastruktur und die Wärmeerzeugung, nicht aber die zum Betrieb benötigte Hilfsenergie und die Wärmeverluste betrachtet. Die meisten Umweltwirkungen werden durch die Grundlastanlage, den Aushub der Gräben, die Spitzenlastkessel und dem für die Rohre benötigten Stahl sowie vom Wärmetauscher in den Häusern verursacht.

Obwohl weder der ecoinvent v2.2 Datensatz noch die Artikel geografisch und zeitlich repräsentativ sind, zeigen sie, dass die Wärmeverteilung einen wichtigen Einfluss auf die Umweltlasten der netzgebundenen Wärmeversorgung hat. Jedes Wärmenetz ist je nach den spezifischen Gegebenheiten anders, daher ist eine pauschalisierte Betrachtung nicht möglich. Die Literaturdaten sind daher nicht als Datenquellen für die Ökobilanzierung der Wärmeverteilung im Netz geeignet.

Dabei dominiert die Nutzungsphase (Wärmeerzeugung mit Verlusten) laut [Persson et al. 2006], [Oliver-Sola et al. 2009] und ecoinvent v2.2 die Ökobilanz. Wichtig ist außerdem nach [Oliver-Sola et al. 2009], [Perzon 2007] die Verlegung der Rohre, d.h. den Aushub der Rohrgräben und den dafür benötigten und verbrannten Diesel mit zu betrachten. Für die Herstellung der Wärmerohre reicht es nach [Fröling et al. 2004] aus die Rohmaterialien zu untersuchen, da die eigentliche Rohrproduktion nur einen geringen Einfluss hat.

### **7.3 Allgemeines Vorgehen bei der Modellierung von qualitativ hochwertigen Prozessketten**

Die in dieser Arbeit erstellten Prozessketten/ Sachbilanzen basieren auf sekundären Datenquellen. Eines der Ziele der Arbeit war die Entwicklung von generischen Datenmodellen, die zum einen eine allgemeine Analyse der Umweltwirkungen der Wärmebereitstellung aus Holzreststoffen ermöglichen sollten. Zum anderen wurden die entwickelten Datenmodelle soweit moduliert aufgebaut, dass diese auch für spezifische Gegebenheiten angepasst werden können. Um die Qualität und damit auch die Verlässlichkeit dieser Datensätze zu erhöhen und die Transparenz der Datensatzerstellung zu gewährleisten, wurde eine

systematische Herangehensweise zur Datensatzerstellung aus Literaturdaten entwickelt. Diese Vorgehensweise soll in diesem Kapitel näher beschrieben werden. Ihre Umsetzung wird am Beispiel der Datensatzerstellung für die ORC- Anlage gezeigt.

Zunächst wird in Kapitel 7.3.1 rekapituliert, welches Verbesserungspotenzial derzeit bei den unterschiedlichen gängigen Datenqualitätsbewertungsmethoden gesehen wird. Anschließend zeigt Kapitel 7.3.2 die Hinweise zur Datensatzerstellung und Qualitätsbewertung in den "Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases" der [UNEP/ SETAC 2011] auf. Kapitel 7.3.3 beschreibt die im Rahmen der Arbeit verwendete systematische Herangehensweise allgemein, während Kapitel 7.3.4 das Anwendungsbeispiel zeigt. Ein Fazit zur systematischen Herangehensweise wird in Kapitel 7.3.5 gezogen.

### 7.3.1 Verbesserungspotenzial der Datenqualitätsbewertungsmethoden

In Kapitel 4.1.4 wurden bereits unterschiedliche Möglichkeiten die Datenqualität einer Ökobilanz zu bewerten beschrieben. Dabei wurde zwischen qualitativen und quantitativen Methoden unterschieden und auf die Möglichkeit verwiesen, dass aus einer qualitativen Datenqualitätsbewertung quantitative Unsicherheiten abgeleitet werden können.

Da die Betrachtung der Präzision nur die Varianz der Daten, nicht aber die Nutzbarkeit für eine spezielle Anwendung abdeckt [May, Brennan 2003], wird diese nicht weiter betrachtet, sondern mit einer rein qualitativen Datenqualitätsbewertung gearbeitet. Diese qualitative Bewertung wird zudem nicht in eine quantitative Präzision überführt, da die von Experten bestimmten Unsicherheitsverteilungen nach [May, Brennan 2003] zu einer Scheingenauigkeit führen können.

Obwohl die heute gängigen qualitativen Methoden einen guten Ausgangspunkt für die Bewertung der Datenqualität darstellen, gibt es noch einiges an Verbesserungspotenzial.

So haben nach [Smith Cooper 2012] sowohl die data quality ratings nach [ILCD 2010] und [PEF 2012] als auch die Pedigree- Matrix nach [Weidema, Wesnæs 1996] das Potenzial inkonsistent angewendet zu werden, was zu unterschiedlichen und nicht reproduzierbaren Bewertungen führen kann.

Die Bewertung der Datenqualität nach [ILCD 2010] ist oft subjektiv, da es unterschiedliche Auffassungen zu Bewertungen wie "erfüllt die Kriterien im hohen Maße" gibt [Smith Cooper 2012]. Dieser Nachteil wird teilweise durch den 2013 publizierten Product Environmental Footprint (PEF) Guide behoben, in welchem spezifiziert wird, dass technologische, zeitliche und geografische Repräsentativität kontextspezifisch sind und in produktgruppenspezifischen Regeln näher definiert werden sollen. Ein Beispiel ist die Definition der geografischen Repräsentativität in den Produktgruppenspezifischen Regeln für Papier. Hier werden Daten aus dem betrachteten Land als beste Option eingestuft, gefolgt von einem Mix aus Daten aus allen EU- Staaten und Daten eines einzelnen anderen EU- Staates oder eines sonstigen anderen Staates. Am schlechtesten schneiden Daten mit unbekannter Geografie oder globale Daten ab. Für die zeitliche Repräsentativität sind Bewertungen für die unterschiedlichen Altersklassen der Daten angegeben; bei der technologischen Repräsentativität wird zwischen der betrachteten Technologie, einem Technologiemix, einer ähnlichen Technologie oder unbekannt unterschieden [PFCR 2011]. Zudem wird in [PEF 2012] genauer spezifiziert, welche methodischen Anforderungen erfüllt sein müssen, um eine bestimmte Bewertung in der Kategorie "methodische Angemessenheit" vergeben zu können.

In [Weidema 1998] wurde die Pedigree- Matrix getestet, indem verschiedene Ökobilanzexperten dieselbe Prozesskette bewerten sollten. Hierbei kam es bei den Indikatoren Verlässlichkeit, Vollständigkeit und weitere technologische Korrelation zu abweichenden Bewertungen. Nach [Smith Cooper 2012] bestehen auch in der aktuellsten Fassung der Pedigree- Matrix weiterhin Bedenken bei den Indikatoren Vollständigkeit und weitere technologische Korrelation, da z.B. die Aussage "ausreichender Zeitraum um natürliche Schwankungen auszugleichen" und "kürzerer Zeitraum" (bei der Vollständigkeit) und die Aussagen "ähnlich" und "anders" (bei der weiteren technologischen Korrelation) unterschiedlich interpretierbar sind.

Die meisten der beschriebenen Datenqualitätsbewertungsmethoden sind eher statisch, d.h. ein universeller Satz an Kriterien wird angewendet, ohne auf die speziellen Nutzeranforderungen einzugehen. Diese einheitlichen Bewertungsmethoden helfen dabei Datensätze untereinander hinsichtlich bestimmter Kriterien vergleichbar zu machen. Die Nutzeranforderungen werden jedoch i.A. nur implizit betrachtet und nicht systematisch ausgewiesen. Eine gute Datenqualität bedeutet also nicht automatisch, dass der Datensatz auch die spezifischen Nutzeranforderungen erfüllt. Deswegen ist es empfehlenswert die spezifischen Nutzeranforderungen explizit auszuweisen und bereits bei der Datensatzerstellung zu berücksichtigen.

### 7.3.2 Erstellung eines Sachbilanzdatensatzes aus Primärdaten

Die Wichtigkeit der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens für die Datensatzerstellung betonen auch die „Global Principles for Life Cycle Assessment Databases“ [UNEP/SETAC 2011].

Nach [UNEP/SETAC 2011] besteht die Datensatzerstellung hier aus drei Schritten:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
2. Datensatzerstellung,
3. Validierung und Dokumentation.

In der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens müssen verschiedene Aspekte wie die Prozessart (standortspezifisch oder Technologiemic), Wirkungsabschätzungsmethoden, Technologie, Zeit, Geographie, Abschneidekriterien, beabsichtigte Anwendung des Datensatzes, Unsicherheiten und die Aufnahme in eine Datenbank miteinbezogen werden.

Nach der Richtlinie startet die Datensatzerstellung mit der Vorbereitung einer (vorläufigen) Elementarflussliste. Diese Liste kann dadurch gefüllt werden, dass die Einträge für die verschiedenen Wirkungskategorien aufgenommen werden und danach die für diese Technologie nicht relevanten Flüsse entfernt werden. Außerdem wird ein Vergleich mit anderen Datensätzen zur selben oder einer ähnlichen Technologie empfohlen. Datenlücken werden behandelt indem zwischen einem Wert von 0 und einem fehlenden Wert unterschieden wird (beide müssen begründet werden).

In einem dritten Schritt werden die gesammelten Daten bewertet. Parallel zur Datenaufnahme werden Indikatoren wie Vollständigkeit, Sensitivität, Unsicherheit und Konsistenz untersucht. Die Dokumentation gibt Tipps für die Anwendung des Datensatzes und enthält alle Informationen, die ein Anwender bei der Nutzung des Datensatzes wissen sollte. Datensätze können also nur genutzt werden, wenn das Ziel und der Untersuchungsrahmen des Datensatzes und der Studie übereinstimmen. Ein Datensatzersteller muss daher abgeben für welche Technologie, Geographie, Industriesektor und Zeit der Datensatz gilt. Abschneidekriterien müssen angegeben, sowie erklärt, und die unterstützten Wirkungskategorien müssen ausgewiesen werden. Daten zu Unsicherheit und Allokationsmethoden müssen ebenfalls enthalten sein [UNEP/ SETAC 2011].

Für die Bewertung der Datenqualität wird auf die Datenqualitätsanforderungen aus der ISO 14044 verwiesen. Der Datensatzersteller bewertet den eigenen Datensatz gegenüber diesen Datenqualitätskriterien und gibt für jeden Fluss des Datensatzes eine Quelle an. Dies kann bei Primärdaten eine eigene Messung sein, oder es können Sekundärdaten aus der Literatur zitiert werden. Mit Hilfe dieser Angaben und der Dokumentation kann der Nutzer selber entscheiden, ob der Datensatz für die gewünschte Anwendung geeignet ist [UNEP/ SETAC 2011].

Probleme können auftreten, wenn Datensätze aus unterschiedlichen Datenbanken kombiniert werden, da die Datensätze möglicherweise nur innerhalb einer Datenbank konsistent sind. Diesem Problem kann durch das Durchführen von Plausibilitätsrechnungen begegnet werden. Damit können Datenlücken und Unsicherheiten gezeigt werden [UNEP/SETAC 2011].

### **7.3.3 Systematische Herangehensweise zur Qualitätssicherung bei der Erstellung von Sachbilanzen aus Literaturdaten**

#### **7.3.3.1 Allgemeines**

Das Vorgehen aus [UNEP/ SETAC 2011] kann im Prinzip sowohl auf die Erstellung von Datensätzen aus primären als auch aus sekundären Daten angewendet werden. Allerdings ist die Vorgehensweise noch relativ allgemein gehalten. Sie stellt einen guten Startpunkt für die Entwicklung einer eigenen systematischen Herangehensweise für die Qualitätssicherung bei der Erstellung von Sachbilanzen dar.

Bei der Datensatzerstellung aus sekundären Datenquellen müssen zwei Schwierigkeiten überwunden werden: Zunächst muss entschieden werden, welche Literaturquellen nutzbar sind, indem die Datenqualität der Quellen den eigenen Anforderungen gegenübergestellt wird. Basiert der neue Datensatz auf mehr als einer Literaturquelle, muss zudem die Problematik der nicht konsistenten Daten begegnet werden, da die Literaturquellen meist für unterschiedliche Anwendungen konzipiert wurden.

In diesem Kapitel wird ein systematischer Arbeitsprozess vorgestellt, wie aus sekundären Daten ein konsistenter und für die beabsichtigte Anwendung geeigneter Datensatz erstellt werden kann. Für die Bewertung der Datenqualität wird dafür mit verschiedenen qualitativen Datenqualitätsindikatoren aus [ISO 14044], [ILCD 2010] und [Weidema, Wesnæs 1996] gearbeitet. Durch die Anwendung dieser systematischen Herangehensweise werden die Anforderungen hinsichtlich Transparenz und Reproduzierbarkeit von Ökobilanzergebnissen auch auf die Datensatzerstellung angewendet.

Die Herangehensweise besteht aus fünf Schritten, die zusammen mit dem fertigen Datensatz dokumentiert werden:

- Schritt 1: Festlegung der Zielsetzung*
- Schritt 2: Charakterisierung der Technologie*
- Schritt 3: Dokumentation und Charakterisierung der vorhandenen Literatur*
- Schritt 4: Definition der Datenqualitätskriterien und ihrer Referenzwerte (Schritt 4a)  
Bewertung der vorhandenen Literaturdaten (Schritt 4b)*
- Schritt 5: Zusammenstellung des Datensatzes*

Diese fünf Schritte können auf verschiedene Datensatztypen angewendet werden, also nicht nur für ganze Produktsysteme, sondern auch für (Teil-)Produktsysteme und Prozessmodule.

Je nach Komplexität des untersuchten Systems und der vorhandenen Literatur wird empfohlen das Schema iterativ anzuwenden. Während die Festlegung der Zielsetzung (Schritt 1), die Charakterisierung der Technologie (Schritt 2) und die Definition der Datenqualitätskriterien und ihrer Referenzwerte (Schritt 4a) nur einmal durchgeführt werden muss (bis auf eventuelle kleinere Anpassungen) wird es empfohlen, die Schritte 3 und 4b schrittweise zu wiederholen. Gerade bei komplexen Systemen oder einer großen Vielzahl an Literaturquellen sollte dann nach jeder Analyse bewertet werden, inwiefern der abgeleitete Datensatz die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt oder ob weitere Literatur hinzugezogen werden muss. Die ersten beiden Schritte beinhalten dabei die Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens aus [UNEP/ SETAC 2011], während die Datensatzerstellung und die Validierung und Dokumentation gemeinsam in den Schritten 3 bis 5 erfolgen.

#### **7.3.3.2 Schritt 1: Festlegung der Zielsetzung**

Zunächst sollte der Datensatzersteller festlegen für welche spezifischen Nutzungen (z.B. Erstellung eines Carbon Footprints) der zu erstellende Datensatz gedacht ist. Ist der Datensatz für eine spezielle Nutzung vorgesehen, werden zunächst das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Im Anschluss werden hieraus allgemeine Randbedingungen abgeleitet. Ist der Datensatz dazu gedacht in eine Datenbank

aufgenommen zu werden, muss er für verschiedene Anwendungen nutzbar bleiben und verschiedene Ziele und Untersuchungsrahmen unterstützen. Daher wird der Datensatzersteller zunächst festlegen, für welchen Nutzerkreis dieser Datensatz gedacht ist und hieraus ebenfalls allgemeine Randbedingungen ableiten. Anhand dieser Nutzeranforderungen und Randbedingungen wird dann die Qualität des Datensatzes bewertet, wobei sowohl die verwendeten Datenqualitätskriterien als auch ihre Referenzwerte für unterschiedliche Nutzer verschieden sein können.

Zunächst werden allgemeine Randbedingungen für die Geographie, die Zeit und die Technologie sowie die Methodik und die betrachteten Elementarflüsse festgelegt. Diese nutzerabhängigen Kriterien werden durch weitere nutzerunabhängige Kriterien wie Verlässlichkeit, Konsistenz, Reproduzierbarkeit und Vollständigkeit (nach der Definition von [Weidema, Wesnæs 1996]) ergänzt. Die betrachteten Kriterien können dabei nach [Rousseaux et al. 2001] auf verschiedenen Ebenen bewertet werden: Auf der Ebene der Flüsse, der Prozesse oder der Produktsysteme. Geographie, Zeit und Technologie sowie Abschneidekriterien, Verlässlichkeit, Konsistenz, Vollständigkeit und die betrachteten Elementarflüsse werden auf Prozessmodulebene bewertet, andere Kriterien wie die Systemgrenzen, die Behandlung von Multifunktionalität, Dokumentation und Reproduzierbarkeit beziehen sich auf ein ganzes Produktsystem.

### **7.3.3.3 Schritt 2: Charakterisierung der Technologie**

Basierend auf einer kurzen Literaturrecherche oder auf Expertenwissen des Datensatzerstellers wird zunächst kurz die betrachtete Technologie beschrieben. Hierdurch werden die kritischen Punkte der zu untersuchenden Technologie und die erwarteten Hauptumweltlasten des Produktsystems aufgedeckt. Daraus wird dann abgeleitet, welche Aspekte der Sachbilanz verpflichtend sind, um die relevanten Umweltwirkungen möglichst vollständig abzudecken. Bei Bedarf werden auch die betrachteten Wirkungsabschätzungskategorien miteinbezogen.

### **7.3.3.4 Schritt 3: Dokumentation und Charakterisierung der vorhandenen Literatur**

Um Daten für die Sachbilanz zu erhalten wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wird die Literatur in vier verschiedene Ebenen unterteilt:

1. Geprüfte Sachbilanz/ Ökobilanzstudien oder –datensätze
2. Nicht geprüfte Sachbilanz/ Ökobilanzstudien oder –datensätze
3. Ausführliche technische Beschreibungen
4. Publikationen zu einzelnen Aspekten der Technologie

Zunächst wird Literatur der ersten und zweiten Art untersucht. Sind diese Daten nicht ausreichend, wird die Literaturanalyse ergänzt durch weitere Quellen. Hierbei kann die Sekundärliteratur sich teilweise auf andere sekundäre oder primäre Datenquellen mit unterschiedlichen Merkmalen beziehen, wobei oftmals die verwendeten Daten deutlich älter als die eigentliche Studie sind. Gerade diese Information ist jedoch für den späteren Datennutzer von großer Wichtigkeit und oftmals in bestehenden Datenbanken nicht transparent. Daher werden diese Informationen in den Datensatz aufgenommen. So werden die Datenquellen der Literaturquellen angegeben, bzw. das Fehlen einer Information über die Originalquelle wird dokumentiert.

### **7.3.3.5 Schritt 4: Definition der Datenqualitätskriterien und ihrer Referenzwerte und Bewertung der vorhandenen Literaturdaten**

Auf Basis der allgemeinen Randbedingungen aus Schritt 1 wird die Datenqualität der verschiedenen Literaturquellen anhand von qualitativen Kriterien evaluiert.



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Diese Kriterien können unter anderem folgende sein:

- Geographie, Zeit und Technologie
- Methodische Angemessenheit
- Betrachtete Elementarflüsse
- Verlässlichkeit und Vollständigkeit
- Konsistenz und Reproduzierbarkeit

Der zeitliche und geographische Erfassungsbereich wird aus den Definitionen in [ISO 14044 Kapitel 4.2.3.6.2] übernommen. Der zeitliche Erfassungsbereich (hier auch kurz mit Zeit bezeichnet) beschreibt das Alter der Daten. Zudem wird geprüft ob die Literaturquellen primäre oder sekundäre Daten verwenden und wie alt diese jeweils sind. Der geographische Erfassungsbereich (kurz Geographie) bezieht sich nach [ISO 14044] auf den geographischen Bereich aus dem die Daten stammen. Für die technologische Repräsentanz (kurz Technologie) wird die Definition aus [ILCD 2010] übernommen: sie beschreibt wie gut die Daten den Prozess hinsichtlich der technologischen und technischen Eigenschaften abbilden.

Die methodische Angemessenheit beschreibt in Anlehnung an [ILCD 2010], welche methodischen Vorgaben an den fertigen Datensatz, und damit auch an die potenziellen Datenquellen, gestellt werden.

Zusätzlich zu den Datenindikatoren aus der [ISO 14044], [ILCD 2010] und [Weidema, Wesnæs 1996] wird hier der Indikator „betrachtete Elementarflüsse“ aufgenommen. Ähnlich wie auch [UNEP/ SETAC 2011] es fordert, sollte der Datensatzersteller vorab überlegen, welche Elementarflüsse zur vollständigen Beschreibung der Umweltwirkungen der Prozesskette benötigt werden, und die Datenquellen diesen gegenüber abgleichen. Dabei können die Elementarflüsse aus den verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden übernommen werden, oder durch technische Beschreibungen der untersuchten Technologie bestimmt werden.

Zudem werden zwei Kriterien aus der Pedigree- Matrix von [Weidema, Wesnæs 1996] fast unverändert genutzt: Verlässlichkeit und Vollständigkeit. Die Verlässlichkeit prüft inwiefern die Datensammelmethode und Prüfungen angemessen sind. Um eine hohe Verlässlichkeit zu erreichen, müssen alle Daten aus verifizierten Messungen stammen. Die Vollständigkeit beschreibt wie statistisch repräsentativ die Daten sind. Messungen für alle relevanten Anlagen müssen über einen ausreichenden Zeitraum durchgeführt werden, um natürliche Schwankungen auszugleichen [Weidema, Wesnæs 1996].

Abschließend werden zwei weitere Kriterien aus [ISO 14044] aufgenommen: Konsistenz und Reproduzierbarkeit. Die Dokumentation eines Datensatzes oder einer Studie sollte dem Nutzer eine Bewertung der Datenqualität und ein Reproduzieren der Ergebnisse erlauben, ohne dass dieser dafür den Datensatzersteller kontaktieren muss. Außerdem sollte die Methodik konsistent angewendet werden.

Diese Kriterien werden nun priorisiert, indem sie in sehr wichtige Kriterien (d.h. Kriterien, die am Ende erfüllt sein müssen), wichtige Kriterien und weniger wichtige Kriterien (d.h. Kriterien, die am Ende erfüllt sein können) unterteilt werden. Dabei wird immer auch eine Abwägung nötig sein, welcher maximale Aufwand für die Datensatzerstellung vertretbar ist, und welche Wichtigkeit der zu erstellende Datensatz hat.

Anschließend werden den unterschiedlichen Kriterien Referenzwerte zugewiesen. Abschließend wird jede der Literaturquellen mit den Referenzwerten für die verschiedenen Kriterien verglichen und bewertet, um die Schwachstellen der Quellen aufzudecken. Um diesen Prozess zu vereinfachen wird mit Tabellen gearbeitet.

Zusätzlich zu den hier beschriebenen Kriterien könnten je nach Nutzeranforderungen weitere Kriterien wie z.B. die Präzision aufgenommen werden.

### **7.3.3.6 Zusammenstellung des Datensatzes**

Basierend auf der Datenqualitätsbewertung der Literaturquellen wählt der Datensatzersteller diejenigen Quellen und Informationen aus, welche am besten zu den gestellten Anforderungen passen. Eine

Einschätzung, welche Datenquellen warum geeignet sind, wird gegeben. Soll ein Datensatz aus mehreren Quellen zusammengestellt werden, ist es wichtig darauf zu achten inwiefern eine Kombination der Daten aus methodischer Sicht möglich ist. Die Zusammenstellung des Datensatzes wird kurz beschrieben und die erreichten Datenqualitätsverbesserungen bzw. die verbleibenden Defizite werden ausgewiesen.

### **7.3.4 Anwendungsbeispiel: Biomasse- Organic Rankine Cycle Anlage**

Die in Kapitel 7.3.3 beschriebene Vorgehensweise wird im Folgenden auf die Datenerfassung und die Datensatzerstellung des in Kapitel 7.5.4 näher beschriebenen Datensatzes für die deutsche ORC- Anlage mit Waldrestholzhackschnitzeln angewendet. Dabei werden die einzelnen Schritte des Vorgehens genau dokumentiert und erklärt.

#### **7.3.4.1 Definition der allgemeinen Randbedingungen**

Der fertige Datensatz soll den Anforderungen des Methodenkerns aus BioEnergieDat genügen, welche in Kapitel 4.1.1 näher beschrieben sind. Kurz zusammengefasst bedeutet dies, dass der Datensatz ISO 14040/44 konform sein muss und nach dem Unit- process Prinzip aufgebaut ist. Prozesse dürfen nicht allokiert und nicht aggregiert (Multioutput- Prozesse) sein. Gesamte Prozessketten werden von der Rohstoffentnahme bis zur Entsorgung modelliert. Die Liste der Elementarflüsse sollte möglichst vollständig sein und muss auch biogene Emissionen ausweisen.

Der betrachtete Ort ist Deutschland und das Referenzjahr ist das Jahr 2010. Jeder Prozess muss Angaben zu Ort, Zeit, Technologie, Datenquellen und zur Modellierung enthalten.

Neben den Anforderungen des BioEnergieDat- Methodenkerns werden auch die Anforderungen einer anderen Nutzerperspektive geprüft. Dafür wird ein Carbon Footprint nach [GHG Protocol] betrachtet. Dabei bleiben Geographie, Zeit, Technologie, Verlässlichkeit und Vollständigkeit, Systemgrenzen und Abschneidekriterien gleich. Einzig bei der Behandlung der Elementarflüsse gibt es Unterschiede, da hier nur die Treibhausgasemissionen aus [IPCC 2007] betrachtet werden. Nur wenn sich die Perspektive des [GHG- Protocol] vom Methodenkern unterscheidet wird im Folgenden darauf eingegangen.

#### **7.3.4.2 Charakterisierung der Prozesskette**

Für die Datensatzerstellung werden Daten zu Bau, Betrieb und Entsorgung einer ORC- Anlage mit 1 MW<sub>el</sub>, die mit Waldrestholzhackschnitzeln befeuert wird, benötigt. Das Hintergrundsystem kann aus ecoinvent v2.2 übernommen werden und die Holzbereitstellung wird separat modelliert (gezeigt in Kapitel 7.4.1.1), daher werden diese Prozessmodule im Folgenden nicht mitbetrachtet.

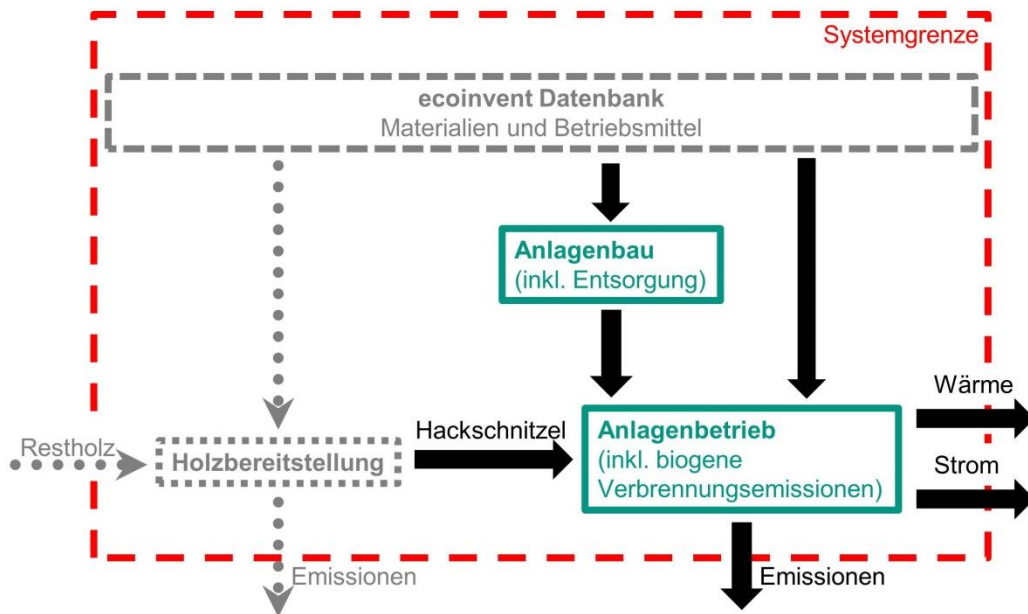


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Prozesskette

Eine Beschreibung der ORC- Technologie ist in Kapitel 2.3.2 zu finden. Wichtig für die Ökobilanzierung ist hierbei die Forderung aus [DBFZ 2012] ORC- Anlage immer wärmegeführt zu fahren um ihre relativ geringen elektrischen Wirkungsgrade zu kompensieren. Zudem werden alle Literaturquellen daraufhin geprüft, ob sie den nach [DBFZ 2012] hohen Stromeigenverbrauch von bis zu 25 Prozent ausweisen.

Neben den Angaben zum Anlagenbau und zur Entsorgung werden auch verlässliche Daten zu den (biogenen) Emissionen aus der Holzverbrennung benötigt. Wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben ist, können nach [Kaltschmitt et al. 2009] bei der Verbrennung von unbehandeltem Holz folgende Emissionen auftreten: Kohlenmonoxid (CO), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, NMVOC, Staub, Lachgas ( $N_2O$ ), Stickoxide ( $NO_x$ ), Ammoniak, Schwefeldioxid, Chlorwasserstoff, Kaliumchlorid, Dioxine und Furane (gemessen als TCDD-Äquivalente) und Schwermetalle. Dabei sind nur die Chlor und Kaliumemissionen so gering, dass sie vernachlässigt werden können [Kaltschmitt et al. 2009].

#### 7.3.4.3 Dokumentation und Charakterisierung der vorhandenen Literatur

Verfügbare Literaturquellen sind ein verifizierter Sachbilanzdatensatz aus GEMIS 4.81 und zwei nicht verifizierte Ökobilanzstudien. Aufgrund der guten Verfügbarkeit dieser Quellen wird zunächst keine technische Literatur untersucht.

Eine weitere potenzielle Quelle [König 2009] wird bereits in diesem Schritt aussortiert, da sie keine Sachbilanzdaten, sondern nur hoch aggregierte Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen und dem Energieverbrauch enthält.

Tabelle 7-2 fasst die Literaturquellen, die betrachtete Technologie, die Art des Brennstoffes, die Datenherkunft und das Alter der Quellen kurz zusammen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Ebene	Name	Jahr	Ziel	Datenquelle
1	GEMIS 4.81	2010	LCI einer ORC- Anlage mit 5 MW <sub>th</sub> (0,8 MW <sub>el</sub> ) und Waldrestholz hackschnitzeln	Deutsches Projekt „Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse“ von 2003 und Abschlussbericht des Projektes [Fritsche et al. 2004]
2	Jungbluth et al. 2002	2002	LCI einer ORC- Anlage mit 335 kW <sub>el</sub> und Waldrestholz hackschnitzeln	Messungen einer Schweizer Anlage
2	Briem et al. 2004	2004	LCI einer ORC- Anlage mit 1 MW <sub>el</sub> und unbehandelten Holzhackschnitzeln	Ausschreibungsdaten einer deutschen ORC Anlage von 2002/03 kombiniert mit Emissionsdaten zweier Österreicher ORC Anlagen

**Tabelle 7-2: Literaturanalyse**

Um die Relevanz eines harmonisierenden Vorgehens zu zeigen, werden zunächst die Originalergebnisse der Studien anhand folgender ausgewählter Sachbilanzergebnisse verglichen: Kohlendioxid (fossil), Kohlenmonoxid, Staub und Stickoxide (gezeigt in Tabelle 7-3).

	Quelle	Strom	Wärme
<b>Kohlendioxid (fossil) in [g/ kWh]</b>	GEMIS 4.81	0,2	0,5
	[Briem et al. 2004.]	69	101
	[Jungbluth et al. 2002]	49	271
<b>Kohlenmonoxid in [mg/ kWh]</b>	GEMIS 4.81	9	22
	[Briem et al. 2004.]	778	1.141
	[Jungbluth et al. 2002]	946	5.269
<b>Stickoxide in [mg/ kWh]</b>	GEMIS 4.81	12	29
	[Briem et al. 2004.]	1.421	2.082
	[Jungbluth et al. 2002]	2.652	13.981
<b>Staub in [mg/ kWh]</b>	GEMIS 4.81	0,4	1,0
	[Briem et al. 2004.]	204	300
	[Jungbluth et al. 2002]	2130	11.860

**Tabelle 7-3: Literaturdaten der Emissionen einer ORC- Anlage pro kWh Strom oder Wärme**

Obwohl die Anlagen, außer der ORC- Anlage aus [Jungbluth et al. 2002], ähnliche Leistungen aufweisen, dieselben Produkte bereitstellen und einen vergleichbaren Brennstoff nutzen (Holzhackschnitzel aus Waldrestholz oder unbehandeltem Holz) variieren die gesamten Emissionen pro kWh Strom oder Wärme extrem stark. Teilweise treten Abweichungen zwischen den Ergebnissen von bis zu einem Faktor von 10.000 auf. Dabei fallen die Werte aus GEMIS 4.81 jeweils um eine Größenordnung kleiner aus als die der anderen beiden Studien. Am höchsten liegen die Werte aus [Jungbluth et al. 2002].

Mögliche Gründe für diese sehr unterschiedlichen Ergebnisse sind technologische Unterschiede (Anlagenalter und -größe, Brennstoff, Abgasnachbehandlungsverfahren, ...) und methodische Unterschiede, wie das Verwenden unterschiedlicher Hintergrunddaten, unterschiedliche Allokationsmethoden, Abdeckung der Elementarflüsse sowie Brutto- oder Nettobetrachtung.

Zu diesem Zeitpunkt können die unveränderlichen technologischen Unterschiede nicht von den (teilweise) harmonisierbaren methodischen Abweichungen unterschieden werden. Eine Erklärung der Studienergebnisse ist nicht möglich.

Daher wird im Folgenden der systematische Ansatz zur Datenqualitätsbewertung weiter durchgeführt, um so die Literaturquellen besser zu verstehen und vergleichen zu können.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

### 7.3.4.4 Datenqualitätskriterien und Bewertung

Hier werden die verschiedenen Literaturquellen anhand der allgemeinen und speziellen Randbedingungen bewertet, verglichen und eventuelle Defizite identifiziert. Zunächst wird für jedes Datenqualitätskriterium der Soll- Zustand festgelegt und dann dieser mit dem Ist- Zustand abgeglichen. Kritische Punkte wurden dabei *kursiv* geschrieben, um mehr aufzufallen.

#### Geografie, Zeit und Technologie

Gesucht werden Daten für eine ORC- Anlage mit 1 MW<sub>el</sub> welche als Brennstoff Waldrestholz einsetzt. Der geografische Erfassungsbereich der Vordergrundprozesse ist Deutschland; das Referenzjahr ist 2010. Dabei stellt die technologische Repräsentativität ein sehr wichtiges Kriterium dar, welches vom fertigen Datensatz erfüllt werden muss. Geografie und Zeit sind wichtige Kriterien, die, falls möglich, zu erfüllen sind. Die Analyse der technologischen Repräsentanz, des geografischen und zeitlichen Erfassungsbereichs zeigt Tabelle 7-4.

Kriterium	Benötigte Information	Referenz (R)	[Jungbluth et al. 2002]	GEMIS 4.81	[Briem et al. 2004]
Technologische Repräsentanz	Technologie	ORC- Anlage	R	R	R
	Größe	1 MW <sub>el</sub>	335 kW <sub>el</sub>	0,8 MW <sub>el</sub>	R
	Brennstoff	Waldrestholz- hackschnitzel	R	R	Unbehandelte Holz hackschnitzel
	Nutzungsgrad	Angegeben	R	R	R
	Eigenstrombedarf	Angegeben	n. a.	n. a.	R (12%)
geographischer Erfassungsbereich	Geographie	Deutschland	Schweiz	R	R
zeitlicher Erfassungsbereich	Jahr	2010	2002	2010 (2002/03)	2004 (2002/03)

**Tabelle 7-4: Geographie, Zeit und Technologie (Zahlen in Klammern: korrigierte Jahreszahlen)**

Fast alle untersuchten Datenquellen beziehen sich auf (teilweise deutlich) ältere Studien/ Messungen, so dass jeweils die Zeit angepasst werden muss. Oftmals ist es auch schwierig die Originalliteratur einzusehen oder Angaben zu dieser fehlen.

#### Methodische Angemessenheit

Alle Prozesse müssen ISO 14040/44 konform sein, werden als Prozessmodule implementiert und nutzen keine aggregierten Daten. Die gesamte Prozesskette ist „von der Wiege bis zur Bahre“ und alle relevanten Hintergrundprozesse sollten mit abgebildet sein (inklusive Bau und Entsorgung der Infrastruktur). Alle Prozesse müssen zunächst als Multioutput- Prozesse angegeben werden, um dem Nutzer zu erlauben, selber eine Allokation oder Systemerweiterung vorzunehmen [BioEnergieDat 2013].

Eine der wichtigsten Aufgaben in BioEnergieDat war die Erstellung von harmonisierten Sachbilanzdaten, daher ist die Methodik ein sehr wichtiges (Muss) Kriterium.

Den Vergleich zwischen Referenz und Literatur zeigt Tabelle 7-5.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Kriterium	Referenz (R)	[Jungbluth et al. 2002]	GEMIS 4.81	[Briem et al. 2004]
<b>Funktionelle Einheit</b>	1 MJ <sub>th</sub>	1 MW <sub>el</sub>	1 TJ <sub>th</sub>	1 MW <sub>el</sub>
<b>Systemgrenzen</b>	Wiege bis zur Bahre	R	R	R
	Infrastruktur betrachtet	R	Anlagenbau: nur Stahlmenge Keine Arbeitsmittel	R
<b>Multifunktionalität</b>	Multioutput-Prozess	exergetische Allokation	energetische Allokation	exergetische Allokation

**Tabelle 7-5: Methodische Angemessenheit**

Alle Literaturquellen weisen zusätzlich auch die Sachbilanzdaten ohne Allokation aus.

### Betrachtete Elementarflüsse

Für die gesamte Prozesskette soll eine möglichst vollständige Sachbilanz erstellt werden. Diese sollte Emissionen in Wasser, Boden und Luft (inklusive biogene Emissionen) sowie die Ressourcennutzung enthalten.

Da die Hintergrundprozesse für den Anlagenbau und Betrieb sowie die Entsorgung aus ecoinvent v2.2 bzw. BioEnergieDat übernommen werden, ist der einzige Prozess mit Elementarflüssen der Anlagenbetrieb. Dabei müssen folgende (biogene) Verbrennungsemissionen ausgewiesen werden: CO, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, NMVOC, PAH, TCDD, NH<sub>3</sub>, Staub und Schwermetalle (s. auch Kapitel 4.1.2). Die Abdeckung aller für das Produktsystem relevanten Elementarflüsse ist ein wichtiges Kriterium.

Die Ergebnisse des Abgleichs der vorhandenen Elementarflüsse zeigt Tabelle 7-6.

Kriterium	Referenz (R)	[Jungbluth et al. 2002]	GEMIS 4.81	[Briem et al. 2004]
<b>Luftemissionen</b>	CO, CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O, NMVOC, PAH, TCDD, NH <sub>3</sub> , Staub und Schwermetalle	NO <sub>x</sub> , Staub, CO	SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Staub, CO, CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, NMVOC, PAH, TCDD, HCl	NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, CO und Staub
<b>Biogene Emissionen</b>	Angegeben	R	R	R

**Tabelle 7-6: Elementarflüsse**

Für einen Carbon Footprint nach [GHG- Protocol] sind nur Treibhausgase aus [IPCC 2007], d.h. fossiles Kohlenmonoxid und -dioxid, sowie fossiles und biogenes Methan und Lachgas nötig. Durch Anwenden einer entsprechenden Wirkungsabschätzungsmethode kann jedoch der finale Datensatz angepasst werden.

### Verlässlichkeit und Vollständigkeit

Da im BioEnergieDat Methodenkernel keine Vorgaben zu diesen beiden Kriterien gemacht werden, werden sie als weniger wichtige (Kann) Kriterien eingestuft.

Um die Bewertung der Vollständigkeit an die Nutzeranforderungen anzupassen und einer möglichen Subjektivität entgegen zu wirken, werden die Referenzwerte näher definiert. Ein ausreichender Zeitraum ist ein Jahr Anlagenbetrieb (etwa 4.000 Vollaststunden) um alle Schwankungen durch unterschiedliche Lastsituationen und Biomassequalitäten im Jahresverlauf abzubilden. Eine ausreichende Zahl an Anlagen wäre die Abdeckung aller für den deutschen Markt relevanten ORC- Anlagen im Größenbereich 1 MW<sub>el</sub> (deren genaue Zahl allerdings nicht bekannt ist).

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Untersuchungsergebnisse der beiden Kriterien zeigt Tabelle 7-7.

Kriterium	Referenz (R)	GEMIS 4.81	[Briem et al. 2004]	[Jungbluth et al. 2002]
<b>Verlässlichkeit</b>	<b>Verifizierte Daten basierend auf Messungen</b>	Nicht verifizierte Daten basierend auf Messungen	Nicht verifizierte Daten die teilweise auf qualifizierten Annahmen basieren	Nicht verifizierte Daten basierend auf Messungen
<b>Vollständigkeit</b>	<b>Repräsentative Daten aller ORC- Anlagen im Größenbereich von 1 MW<sub>el</sub> in Deutschland; Gemittelt über ein Jahr Betriebszeit</b>	Repräsentative Daten einer geringeren Anlagenzahl über einen kürzeren Zeitraum	Repräsentative Daten einer geringeren Anlagezahl über einen ausreichenden Zeitraum	Repräsentative Daten einer geringeren Anlagenzahl über einen kürzeren Zeitraum

**Tabelle 7-7: Verlässlichkeit und Vollständigkeit**

In [Jungbluth et al. 2002] sind keine kontinuierlichen Messungen verwendet worden. [Briem et al. 2004] nutzt Emissionsmesswerte zweier österreichischer Anlagen in Lienz (1 MW<sub>el</sub>) und Admont (0,4 MW<sub>el</sub>), welche unbehandeltes Holz verbrennen. Kontinuierliche Messungen über 4.800 Stunden werden gemittelt. Allerdings werden die SO<sub>x</sub>-, Kohlenwasserstoff- und HCl- Emissionen aus einer nicht näher genannten Literaturquelle ergänzt. GEMIS 4.81 gibt an, dass die Datenqualität „gut“ ist, d.h. es werden nicht validierte Primärdaten verwendet. Angaben zum Messzeitraum und zur Zahl der untersuchten Anlagen werden nicht gemacht, womit hier angenommen wird, dass die Daten zwar repräsentativ sind, aber Daten einer geringen Anlagenzahl über einen kürzeren Zeitraum verwendet werden.

### Konsistenz und Reproduzierbarkeit

Alle Datenquellen berücksichtigen die Grundsätze der Konsistenz und Reproduzierbarkeit, obwohl es oftmals sehr zeitaufwändig ist die benötigten Informationen zu finden.

Diese sehr wichtigen Kriterien müssen ebenfalls für den späteren Datensatz erfüllt sein.

#### 7.3.4.5 Zusammenstellung des Datensatzes

### Bewertung und Auswahl der Literaturquellen

Eine Zusammenfassung der Bewertungen aus dem vorherigen Kapitel kommt zu folgenden Ergebnissen:

- Eine der Datenquellen ist für den gewünschten Anwendungsfall nicht nutzbar: Die in [Jungbluth et al. 2002] betrachtete Anlage ist deutlicher kleiner als die gesuchte, was zu einer großen Abweichung bei der technologischen Repräsentanz führt.
- GEMIS 4.81 enthält eine sehr umfassende Liste an Emissionen für die Verbrennung von Waldrestholzhackschnitzeln, allerdings ist die Anlage etwas kleiner als die gesuchte und der Anlagenbau, die Arbeitsmedien und der Eigenstrombedarf sind nicht angegeben.
- [Briem et al. 2004] gibt sehr detaillierte Informationen zum Bau der Anlage und enthält auch Angaben zu den Arbeitsmitteln und dem Eigenstrombedarf. Allerdings stammen die Emissionsdaten zu NO<sub>x</sub>, CO und Staub aus Messungen für unbehandelte Holzhackschnitzel einer anderen ORC- Anlage und werden ergänzt durch (nicht weiter definierte und damit wenig verlässliche) Literaturdaten zu SO<sub>x</sub>, HCl und Kohlenwasserstoffen.

Keine der Literaturquellen erfüllt alleine die Anforderungen. Daher wird der finale Datensatz aus zwei Quellen zusammengestellt, um die Nachteile der einzelnen Datenquellen teilweise kompensieren zu können. Dabei wird die 1 MW<sub>el</sub> ORC- Anlage aus [Briem et al. 2004] übernommen (Anlagenbau und Betriebsmittel sowie

## **Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

---

Bruttonutzungsgrad) und mit dem Anlagenbetrieb aus GEMIS 4.81 kombiniert (Verbrennungsemissionen für Waldrestholz). Da beide Anlagen eine ähnliche Größe haben, kann angenommen werden, dass die Verbrennungsemissionen nur von der Brennstoffart und der Abgasnachbehandlung abhängen. Aus Konsistenzgründen werden alle Emissionen aus derselben Quelle übernommen. Ein Abgleich zwischen der technischen Beschreibung in Kapitel 7.3.4.2 und dem angegebenen Eigenstrombedarf aus [Briem et al. 2004] von 12 Prozent ergibt, dass dieser deutlich unter 25 Prozent liegt, und damit vermutlich zu niedrig angesetzt ist. Daher wird der Eigenstrombedarf aus einer Primärquelle übernommen und nach [Fink 2007] mit 16,8 Prozent angesetzt.

Die Modellierung der ORC- Anlage wird ausführlich in Kapitel 7.5.4 beschrieben.

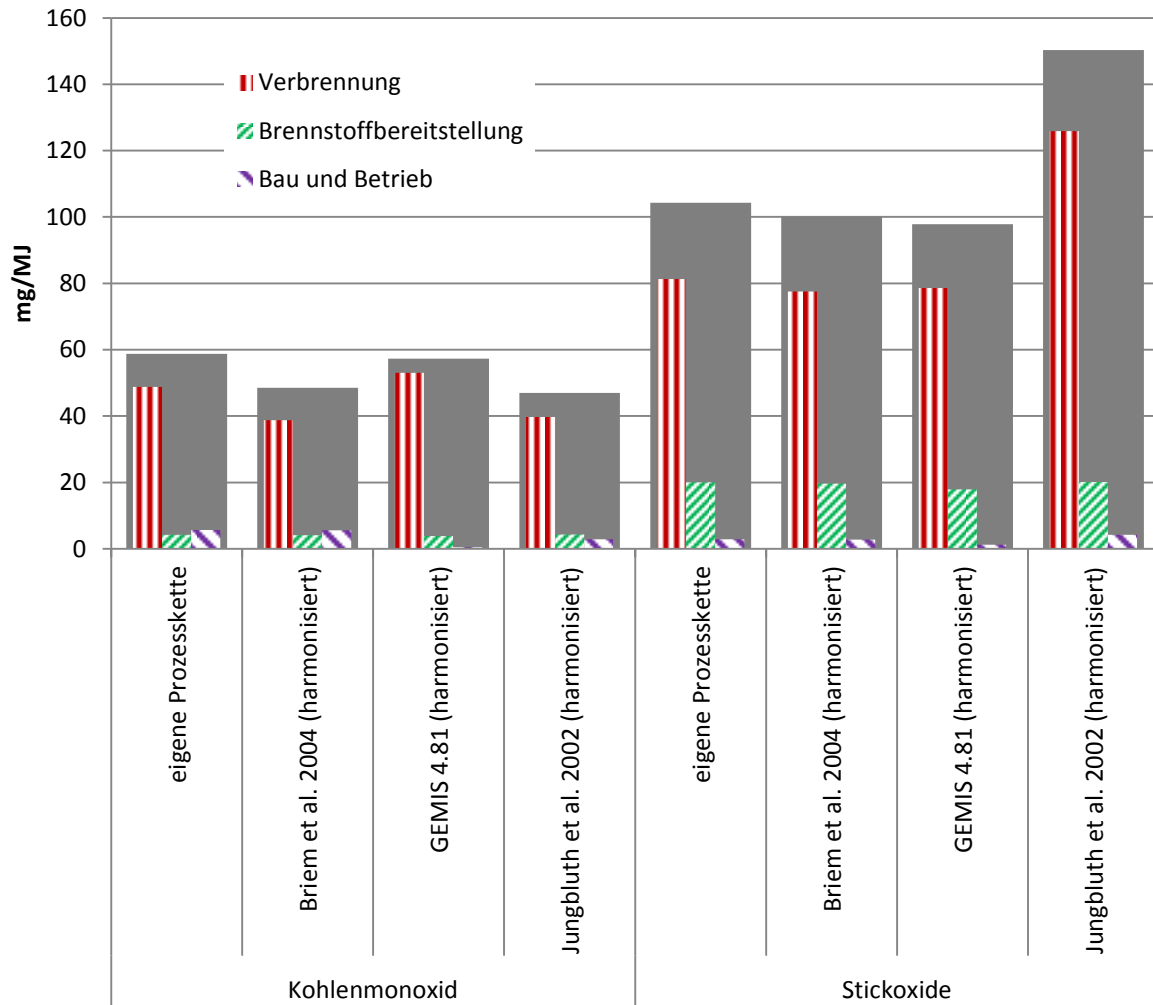
### **Bewertung des finalen Datensatzes und Vergleich mit den harmonisierten Sachbilanzergebnissen der verschiedenen Studien**

Hier werden die Angaben aus den unterschiedlichen Literaturquellen zunächst genutzt um diese als harmonisierte Datensätze nach zu modellieren. Harmonisiert heißt dabei, dass die methodischen Abweichungen zwischen den Datensätzen soweit möglich aufgehoben werden. Hierzu wird mit einheitlichen Vorketten, d.h. der Holzbereitstellung aus Kapitel 7.4.1.1 und der Ascheentsorgung aus Kapitel 7.5.1 und den sonstigen Hintergrundprozessen aus ecoinvent v2.2 gearbeitet. Alle Prozesse werden netto modelliert, d.h. es wird angenommen, dass der Eigenstrom selber gedeckt wird. Weiterhin wird eine exergetische Allokation durchgeführt.

In Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 werden die Emissionen aus der Holzbereitstellung, dem Bau und Betrieb der Anlage und die Emissionen aus der Holzverbrennung getrennt ausgewiesen und auf ein MJ Wärme bezogen. Zusätzlich wird der selber modellierte Datensatz den harmonisierten Originalquellen gegenübergestellt.



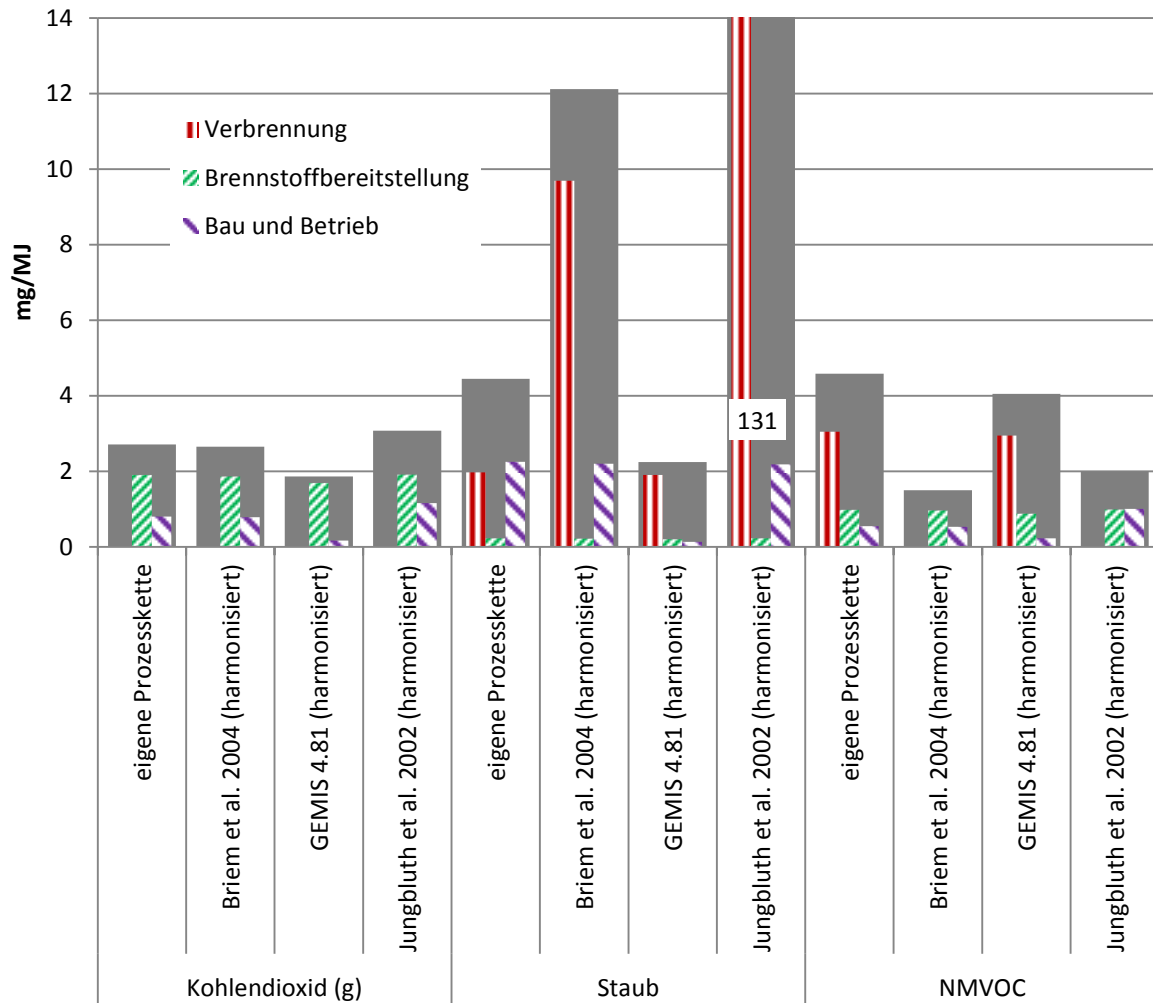
**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**



**Abbildung 7-3: Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen der harmonisierten Prozesse**

Sowohl bei den fossilen Kohlendioxidemissionen als auch beim Kohlenmonoxid und den Stickoxiden werden in allen Fällen ähnliche Ergebnisse erhalten. Speziell die Verbrennungsemissionen aus [Briem et al. 2004] und GEMIS 4.81 stimmen im Bereich der Stickoxidemissionen sehr gut überein, während sie bei [Jungbluth et al. 2002] gegenüber dem eigenen Datensatz um etwa 40 Prozent höher sind.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 7-4: Kohlendioxid-, Staub- und NMVOC- Emissionen der harmonisierten Prozesse**

Abweichungen sind bei den Staubemissionen zu sehen, die aber fast ausschließlich auf die unterschiedlichen Staubemissionen aus der Holzverbrennung zurückzuführen sind. Dabei hat GEMIS 4.81 wegen der Nutzung eines Elektrofilter die niedrigeren Emissionen als [Briem et al. 2004] mit Rauchgaskondensator und Multizyklon. Die extrem hohen Staubemissionen von 131 mg pro MJ<sub>th</sub> (im Diagramm nicht mehr gezeigt, da abgeschnitten) bei [Jungbluth et al. 2002] liegen wegen der Verbrennungsemissionen von 219 mg/Nm<sub>3</sub> bei 11% O<sub>2</sub> oberhalb des Grenzwertes nach [TA Luft 2002] und sind daher unrealistisch.

Interessant ist auch ein Vergleich der NMVOC- Emissionen: so haben die beiden Originalquellen [Briem et al. 2004] und [Jungbluth et al. 2002] auf Grund ihrer fehlenden Angaben zu den NMVOC- Emissionen aus der Holzverbrennung zu geringe Gesamtemissionen. Im Allgemeinen betragen die Verbrennungsemissionen beim selber modellierten Datensatz etwa 40 bis 85 Prozent der Gesamtemissionen und sind daher nicht vernachlässigbar.

Ebenfalls zu sehen ist, dass die Annahme eines pauschalen Stahlverbrauchs in GEMIS 4.81 als einzige Infrastrukturaufwendung zu einer sichtbaren Abweichung bei den Emissionen führt.

In Tabelle 7-8 wird abschließend der fertige Datensatz hinsichtlich seiner Datenqualität bewertet.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Kriterium	Referenz (R)	BioEnergieDat	Kommentar
Geografie	Deutschland	R	-
Zeit	2010	2002/03	8 Jahre Unterschied
Technologie	ORC- Anlage (1 MW <sub>el</sub> ) mit Waldrestholz hackschnitzeln	R	-
Funktionelle Einheit	1 MJ <sub>th</sub>	R	-
Systemgrenzen	Wiege zur Bahre	R	-
Multifunktionalität	Multioutput	R	-
Elementarflüsse	Emissionen in Wasser, Boden und Luft (inklusive biogene), Ressourcen	R	Schwermetall- und Ammoniakemissionen in Luft aus Holzverbrennung fehlen
Verlässlichkeit	Verifizierte Daten basierend auf Messungen	Nicht verifizierte Daten basierend auf Messungen	-
Vollständigkeit	Repräsentative Daten einer ausreichenden Anlagenzahl über eine angemessene Zeitspanne	Repräsentative Daten einer geringeren Anlagenzahl über einen kürzeren Zeitraum	-

**Tabelle 7-8: Bewertung des fertigen Datensatzes**

Der fertige Datensatz enthält eine ausführliche Emissionsliste (nur die Schwermetall- und Ammoniakemissionen aus der Holzverbrennung fehlen), auch die biogenen Emissionen sind enthalten. Die Systemgrenze des gesamten Produktsystems ist von der Wiege bis zur Bahre (inklusive Entsorgung am Lebensende) und es besteht aus nicht aggregierten Multioutput- Prozessmodulen. Dadurch können unterschiedliche Allokationsmethoden angewendet werden. Die technologische Repräsentativität und der geographische Erfassungsbereich sind angemessen.

Defizite liegen im schlechten zeitlichen Erfassungsbereich, da die ältesten enthaltenen Daten von 2002/03 stammen. Diese stammen teilweise aus einer Zeit als die ORC- Technologie noch sehr neu war und es wenige Anlagen gab. Alleine in den letzten 10 Jahren sind in Deutschland jedoch etwa 80 ORC- Anlagen neu gebaut worden [DBFZ 2012]. Es sollten also Lernkurveneffekte (d.h. niedrigere Emissionen) auftreten, die hier vernachlässigt sind. Die Nutzung nicht verifizierter Daten und der fehlende Beweis, dass Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurden, verringern ebenfalls die Datenqualität. Daher wäre es wünschenswert, wenn neuere Messdaten einer deutschen ORC- Anlage aufgenommen und für den Datensatz verwendet werden könnten.

### 7.3.4.6 Dokumentation

Wie bereits vorher angesprochen, enthält der Prozess der Datenauswahl bereits viele Entscheidungen, welche die spätere Datenqualität des fertigen Datensatzes maßgeblich beeinflussen und welche dem späteren Datennutzer transparent gemacht werden müssen. Daher wird empfohlen die Kapitel 7.3.4.1 bis 7.3.4.5 zusammen mit dem fertigen Datensatz zu dokumentieren.

### 7.3.5 Fazit zur systematischen Herangehensweise

Die systematische Herangehensweise für die Qualitätsprüfung während der Datensatzerstellung aus Literaturdaten integriert verschiedene Nutzeranforderungen und nutzt unterschiedliche bestehende Datenqualitätsindikatoren. Das Beispiel der ORC- Anlage zeigt die Anwendbarkeit des Schemas. Durch die

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Analyse verschiedener Datenquellen und durch die Kombination zweier Datenquellen miteinander kann die Gesamtqualität des neuen Datensatzes im Hinblick auf die Nutzeranforderungen wie folgt deutlich gegenüber den Originaldaten verbessert werden:

- Mehr Elementarflüsse/ Emissionen (inklusive biogenen Emissionen)
- Wiege zur Bahre (inklusive Infrastruktur)
- Modellierung von Multioutput- Prozessen
- Korrektur des zeitbezogenen Erfassungsbereichs
- Datenlücken und Einschränkungen der Nutzbarkeit des neuen Datensatzes sind transparent, da sie explizit ausgewiesen werden

Allerdings hängt die erreichte Datenqualität letztendlich immer davon ab, wie gut die Qualität der Originalquellen ist. Durch die Anwendung der schematischen Herangehensweise wird das Verständnis für die Technologie und Prozesskette erhöht, sowie die Qualität der verschiedenen Literaturquellen transparent bewertet. Indem verschiedene Datenquellen untersucht werden und durch das Anwenden einer schrittweisen Prozedur wird das Risiko verringert wichtige Aspekte zu übersehen. Durch die Dokumentation dieses Prozesses wird es dem zukünftigen Nutzer leicht gemacht zu entscheiden, ob der Datensatz für die gewünschte Anwendung geeignet ist oder nicht, und wo Verbesserungspotenzial zu finden ist.

Neben den Modellierungsanforderungen aus BioEnergieDat kann die schematische Herangehensweise auch andere Nutzeranforderungen unterstützen. So könnten neben den betrachteten Kriterien weitere Indikatoren wie z.B. die Präzision (in BioEnergieDat nicht vorgeschrieben) hinzugefügt werden. Die Vorgehensweise ist nicht nur für die Datensatzerstellung aus Literaturdaten geeignet, sondern auch um einen geeigneten Prozess für einen bestimmten Anwendungsfall auszuwählen (z.B. um zu bestimmen welcher Hintergrunddatensatz in einer Studie eingesetzt werden kann).

Im Vergleich zu anderen qualitativen Datenqualitätsmethoden hat die systematische Herangehensweise mehrere Vorteile: Im Gegensatz zu den (aggregierten) Noten für die Datenqualität in anderen Ansätzen erlaubt die systematische Herangehensweise eine transparentere Datenbewertung. Während alle bisher bestehenden Methoden die Repräsentativität bezüglich Technologie, Zeit, Geographie sowie Vollständigkeit und Verlässlichkeit bewerten, werden hier weitere Indikatoren im Bereich der methodischen Anforderungen hinzugefügt: Umgang mit Multifunktionalität und Systemgrenzen sowie die Elementarflüsse. Durch die (technologiespezifische) Beschreibung was für die Vollständigkeit ein angemessener Zeitraum ist, kann die nicht reproduzierbare Bewertung dieses Indikators umgangen werden.

### 7.4 Modellierung der Holzbereitstellung

Die im Folgenden beschriebenen Prozessketten zur Biomassebereitstellung basieren auf den für das Projekt BioEnergieDat modellierten Prozessketten. Die Prozesskette für Landschaftspflegeholz wurde selber im Projekt modelliert. Die Prozessketten zur Industrierestholz- und Pelletbereitstellung wurden gemeinsam im Rahmen einer Diplomarbeit [Miekley 2012] erhoben und die erstellten Prozessketten in BioEnergieDat eingepflegt.

Um eine größere Vergleichbarkeit der Bereitstellung von Landschaftspflege- und Waldrestholz zu erreichen wurde die Waldrestholzbereitstellung neu modelliert. Die Daten zum Energieverbrauch der einzelnen Prozessschritte wurden der BioEnergieDat- Datenbank entnommen.

Alle Brennstofftransporte werden in dieser Arbeit mit 20 Kilometern angesetzt, eine Sensitivitätsanalyse hat jedoch ergeben, dass eine Variation der Transportdistanz nur sehr geringe Auswirkungen auf die Umweltwirkungen hat.

### 7.4.1 Bereitstellung von Waldrest- und Landschaftspflegeholz hackschnitzel mit mobilem Dieselhacker

Bei zwei der drei betrachteten Restholzsortimente, bei Waldrestholz und Landschaftspflegeholz, kommt für die Bereitstellung der Hackschnitzel ein mobiler dieselbetriebener Hacker zum Einsatz. Nach einer Lagerung im Wald (bei Waldrestholz) bzw. direkt beim Zurückschneiden von Landschaftspflegegehölzen werden die entstehenden Restholzsortimente vor Ort gehackt und dann abtransportiert. Für den genutzten Hacker gelten dabei die in Tabelle 7-9 gezeigten technischen Daten.

Kenndaten	Wert	Quelle
Betriebsstunden des Hackers pro Jahr ( $h_{\text{Betrieb, Dieselhacker}}$ )	1.000 h/a	GEMIS 4.81
Lebensdauer des Hackers ( $LD_{\text{Dieselhacker}}$ )	10 Jahre	GEMIS 4.81
Durchsatz des Hackers ( $\dot{V}_{\text{Holz, Dieselhacker}}$ )	121 m <sup>3</sup> /h	Wolff 2004
Spezifischer Dieserverbrauch des Hackers ( $\dot{V}_{\text{Diesel}}$ )	33 l/h	Wolff 2004
Dichte des Diesekraftstoffes ( $\rho_{\text{Diesel}}$ )	0,832 kg/l	GEMIS 4.81
Heizwert des Diesekraftstoffes ( $H_{u, \text{Diesel}}$ )	43,09 MJ/ kg	GEMIS 4.81
Hackverluste	1%	König 2009

**Tabelle 7-9: Technische Daten des mobilen Hackers**

Der untersuchte Hacker hat nach [BioEnergieDat] eine Gesamtmasse von etwa 19,3 Tonnen und besteht zu 965 kg aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE), der Rest ist aus Stahl.

Um ein größeres Spektrum an Emissionen zu erhalten wird nicht mit der in BioEnergieDat modellierten Dieselerbrennung gearbeitet, sondern ein GEMIS 4.81 Datensatz („Diesel-DE-Landwirtschaft-2005 (Endenergie)“) genutzt.

Kenndaten	Wert
Kohlendioxid, fossil	246 g/kWh
Kohlenmonoxid	575 mg/kWh
Methan	5,8 mg/kWh
Lachgas	5,8 mg/kWh
NMVO	10,9 mg/kWh
Partikel	200 mg/kWh
Schwefeldioxid	84 mg/kWh
Stickoxide	2,9 g/kWh

**Tabelle 7-10: Emissionen aus der Dieselerbrennung [GEMIS 4.81] und [Wolff 2004]**

Die Staubemissionen des GEMIS Datensatzes werden angepasst, um den Grenzwerten nach Stage IIIa [Richtlinie 2004/26/EG] zu entsprechen. Die Schwefeldioxidemissionen stammen aus dem ursprünglichen BioEnergieDat- Datensatz und damit aus [Wolff 2004].

#### 7.4.1.1 Waldrestholz hackschnitzel

Eine vereinfachte Darstellung der Bereitstellung der Waldrestholz hackschnitzel zeigt Abbildung 7-5, wobei die Vorketten zur Diesel-, Polyethylen- und Stahlbereitstellung sowie der im Anschluss erfolgte Transport mit dem LKW über 20 Kilometer zum Heiz(kraft)werk nicht gezeigt werden. Die englischen Inputs in der Abbildung bezeichnen jeweils die verwendeten Hintergrundprozesse aus ecoinvent v2.2. Zusätzlich wird der Hintergrundprozess des Schmieröltransportes gezeigt, hier erfolgt ein LKW Transport des Öls zum Einsatzort über 100 Kilometer.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

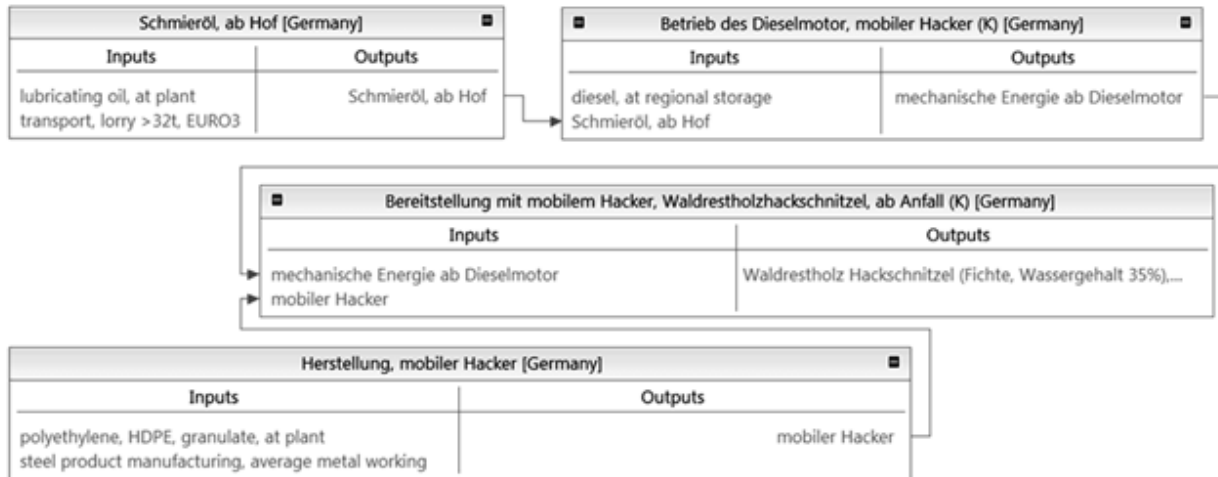


Abbildung 7-5: Prozesskette der Waldrestholzbereitstellung

Für die Bereitstellung der Waldrestholzhackschnitzel werden als Energie für die Ernte ( $W_{\text{Ernte, WRH}}$ ) inklusive Vorliefern und Rücken des Holzes 40 kWh pro Tonne Holz benötigt [König 2009]. Der Energieverbrauch für das Zerkleinern ( $W_{\text{Zerkleinern, WRH}}$ ) des Holzes liegt nach [König 2009] im Hacker bei 40,8 kWh pro Tonne Holz, wobei die Schüttdichte ( $\rho_{\text{Schütt, WRH}}$ ) des Waldrestholzes nach [Wolff 2004] 213 kg/ m<sup>3</sup> beträgt.

Tabelle 7-11 zeigt die zur Modellierung der Input- und Outputflüsse des Prozesses abgeleiteten Werte.

	Bezeichnung	Formel	Wert
Input	Mobiler Hacker	$\frac{1 \text{ Stück}}{LD_{\text{Dieselhacker}} * h_{\text{Betrieb, Dieselhacker}} * \dot{V}_{\text{Holz, Dieselhacker}} * \rho_{\text{Schütt, WRH}}} * 1,02 \text{ kg}$	4,0E-9 Stück
	Mechanische Energie ab Dieselmotor	$\frac{(W_{\text{Zerkleinern, WRH}} + W_{\text{Ernte, WRH}})}{1.000} * 1,02 \text{ kg}$	0,0824 kWh
Output	Waldrestholzhackschnitzel (Fichte, Wassergehalt 35%), ab Wald	-	1 kg

Tabelle 7-11: Waldrestholzbereitstellung

### 7.4.1.2 Landschaftspflegeholz hackschnitzel

Wie in Abbildung 7-6 zu sehen ist, erfolgt die Bereitstellung der Landschaftspflegeholz hackschnitzel fast analog zu der des Waldrestholzes. Es werden lediglich andere Energiemengen zur Ernte und zum Zerkleinern benötigt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

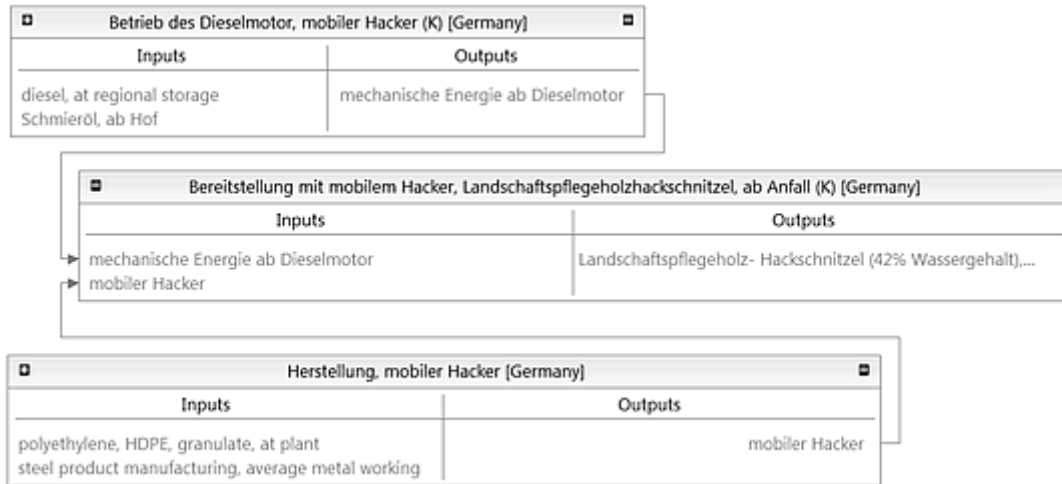


Abbildung 7-6: Prozesskette der Landschaftspflegeholzbereitstellung

Die Kenndaten der Bereitstellung sind in Tabelle 7-12 zu finden.

Kenndaten	Wert	Quelle
Schüttdichte des Landschaftspflegeholzes ( $\rho_{\text{Schütt, LPH}}$ )	314 kg/Sm <sup>3</sup>	Wolff 2004
Energieverbrauch Ernte ( $W_{\text{Ernte, LPH}}$ )	25 kWh/t <sub>Holz</sub> (feucht)	Wolff 2004
Energieverbrauch Zerkleinern ( $W_{\text{Zerkleinern, LPH}}$ )	$\frac{\dot{V}_{\text{Diesel}} * H_{u,\text{Diesel}} * \rho_{\text{Diesel}}}{\rho_{\text{Schütt,LPH}} * \dot{V}_{\text{Holz,Dieselhacker}}} * \frac{1}{3,6 \frac{\text{kWh}}{\text{MJ}}} = 8,65 \frac{\text{kWh}}{\text{t}_{\text{Holz}} (\text{feucht})}$	-
Energieverbrauch Ein- und Ausladevorgänge ( $W_{\text{ein- und Ausladen}}$ )	6 kWh/t <sub>Holz</sub> (feucht)	Wolff 2004

Tabelle 7-12: Kenndaten der Landschaftspflegeholzbereitstellung

Hieraus wurden die in Tabelle 7-13 gezeigten Inputs und Outputs abgeleitet.

	Bezeichnung	Formel	Wert
Input	Mobiler Hacker	$\frac{1 \text{ Stück}}{LD_{\text{Dieselhacker}} * h_{\text{Betrieb,Dieselhacker}} * \dot{V}_{\text{Holz,Dieselhacker}} * \rho_{\text{Schütt,LPH}}} * 1,02\text{kg}$	2,7E-9 Stück
	Mechanische Energie ab Dieselmotor	$\frac{(W_{\text{Zerkleinern,LPH}} + W_{\text{Ernte,LPH}} + W_{\text{Ein- und Ausladen}})}{1.000 \frac{\text{kg}}{\text{t}}} * 1,02\text{kg}$	0,04 kWh
Output	Landschaftspflegeholzhackschnitzel (Wassergehalt 42%), ab Anfall	-	1 kg

Tabelle 7-13: Landschaftspflegeholzbereitstellung

### 7.4.2 Industrierestholzhackschnitzelbereitstellung mit stationärem Stromhacker

Für die Industrierestholzhackschnitzelbereitstellung kommt im Sägewerk nach [Miekley 2012] ein stationärer elektrischer Großhacker mit einer Antriebsleistung von 1.000 kW zum Einsatz. Der verwendete Hacker „VTH 125/85/14“ stammt von der Firma VECOPLAN und die Daten hierzu wurden im November 2011 erfragt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

VECOPLAN gibt als Gesamtgewicht für den Hacker 50 Tonnen an, das nach den Angaben aus GEMIS 4.81 "Hacker-groß/Holz-HS-Wald-DE-2000" auf Stahl (95 Prozent der Masse) und Polyethylen (5 Prozent der Masse) aufgeteilt werden kann.

Die technischen Daten des Hackers sind in Tabelle 7-14 zusammengefasst.

Technische Daten	Wert
Durchsatz des Hackers ( $\dot{V}_{\text{Holz,Stromhacker}}$ )	50.000 kg/h
Lebensdauer des Hackers ( $LD_{\text{Stromhacker}}$ )	15 Jahre
Betriebsstunden des Hackers pro Jahr ( $h_{\text{Betrieb, Stromhacker}}$ )	4.000 h/a
Spezifischer Hydraulikölbedarf ( $\dot{V}_{\text{Öl}}$ )	250 l/2.000h
Dichte Hydrauliköl ( $\rho_{\text{Öl}}$ )	0,865 kg/l

Tabelle 7-14: Daten des stationären Hackers [Miekley 2012]

Abbildung 7-7 zeigt die in openLCA modellierte Prozesskette der Industrierestholzbereitstellung in vereinfachter Form. Nicht gezeigt sind hier die Hintergrundprozesse zur Stahl-, Polyethylen-, Schmieröl- und Strombereitstellung sowie der im Anschluss erfolgte Transport der Hackschnitzel mit einem LKW über 20 Kilometer zum Ort der Nutzung.

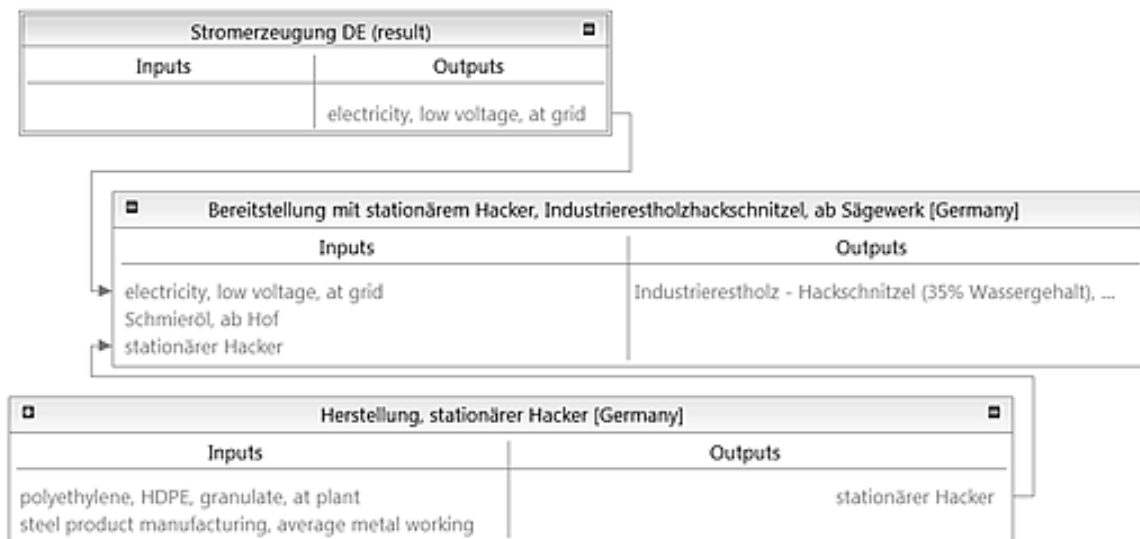


Abbildung 7-7: Prozesskette der Industrierestholzbereitstellung

Für die Modellierung des Hackers gelten die in Tabelle 7-15 gezeigten Input- und Outputströme.

	Bezeichnung	Formel	Wert
Input	Stationärer Hacker	$\frac{1 \text{ Stück}}{LD_{\text{Stromhacker}} * h_{\text{Betrieb, Stromhacker}} * \dot{V}_{\text{Holz, Stromhacker}}} * 1,01kg$	3,37E-10 Stück
	Strom	-	0,0102 kWh
	Schmieröl, ab Hof	$\frac{\dot{V}_{\text{Öl}}}{\dot{V}_{\text{Holz, Stromhacker}}} * \rho_{\text{Öl}} * 1,01kg$	2,18 mg
Output	Industrierestholz-hackschnitzel (Wassergehalt 35%), ab Sägewerk	-	1 kg

Tabelle 7-15: Bereitstellung mit stationärem Hacker



### 7.4.3 Pelletbereitstellung

Als Ausgangsstoffe zur Pelletproduktion werden einerseits Industrierestholzhackschnitzel (hergestellt wie in Kapitel 7.4.2 beschrieben) sowie Sägemehl und Hobelspäne genutzt. Hierbei müssen die Hackschnitzel zunächst nassvermahlen und getrocknet werden, bevor sie zusammen mit den anderen Holzsortimenten trockenvermahlen und pelletiert werden können [Miekley 2012].

Die Prozesskette der Pelletherstellung ist in Abbildung 7-8 gezeigt, wobei auch hier wieder die Hintergrundprozesse zur Strom-, Stahl-, Schmieröl-, Wasser- und Maisstärkebereitstellung nicht zu sehen sind. Die zur Trocknung benötigte Wärme wird durch einen Hackschnitzelkessel mit 800 kW (beschrieben in Kapitel 7.5.1) bereitgestellt und die Pellets werden nach der Pelletierung mit einem LKW über 20 Kilometer zum Einsatzort transportiert.

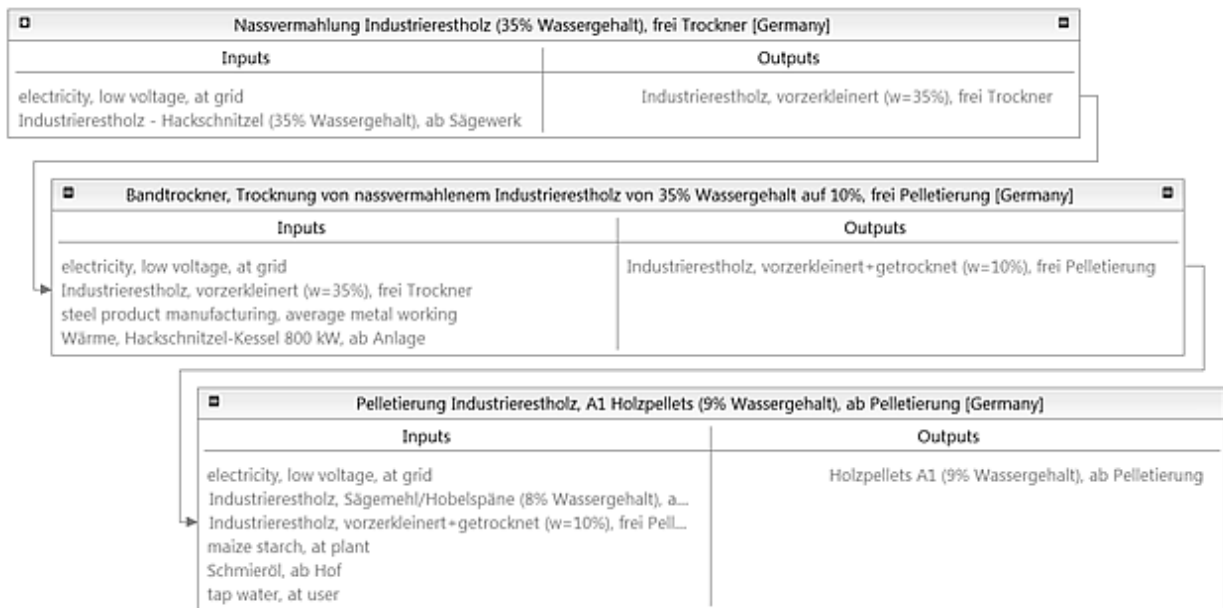


Abbildung 7-8: Prozesskette der Pelletbereitstellung [Miekley 2012]

Für die Nassvermahlung des Holzes mit einem Wassergehalt ( $w_{IRH}$ ) von 35 Prozent kommen die in Tabelle 7-16 gezeigten Parameter zum Einsatz, wobei die Vermahlungsverluste nach [König 2009] ein Prozent betragen und zur Nassvermahlung nach [Miekley 2012] ein spezifischer Strombedarf ( $W_{el, spez, Vermahlung}$ ) von 0,1 MJ/ kg Holz atro benötigt wird.

	Bezeichnung	Formel	Wert
Input	Industrierestholzhackschnitzel (Wassergehalt 35%), ab Sägewerk	-	1,01kg
	Strom	$W_{el, spez, Vermahlung} * (1 - w_{IRH})$	0,0655 MJ
Output	Industrierestholz, vorzerkleinert ( $w=35\%$ ), frei Trockner	-	1 kg

Tabelle 7-16: Nassvermahlung

Die technischen Kenndaten des verwendeten Bandtrockners sind in Tabelle 7-17 gezeigt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Technische Kenndaten	Wert
Betriebsstunden des Trockners ( $h_{\text{Betrieb, Trockner}}$ )	7.500 h/a
Lebensdauer des Trockners ( $LD_{\text{Trockner}}$ )	20 a
Wassergehalt, ein ( $w_{\text{ein}}$ )	0,35
Wassergehalt, aus ( $w_{\text{aus}}$ )	0,1
Masse des Trockners ( $m_{\text{Trockner}}$ )	22.000 kg
Verdampfungsleistung ( $\dot{V}_{\text{H}_2\text{O, verdampft}}$ )	600 kg <sub>H2O</sub> / h
Spezifischer Strombedarf des Trockners ( $W_{\text{el, spez, Trockner}}$ )	0,134 MJ/ kg <sub>H2O</sub>
Spezifischer Wärmebedarf des Trockners ( $Q_{\text{th, spez, Trockner}}$ )	4,32 MJ/ kg <sub>H2O</sub>

**Tabelle 7-17: Daten des Bandtrockners [Miekley 2012]**

Hieraus werden die in Tabelle 7-18 gezeigten Input- und Outputdaten des Prozesses abgeleitet.

	Bezeichnung	Formel	Wert
<b>Input</b>	Industrierestholz, vorzerkleinert ( $w=35\%$ ), frei Trockner	$\frac{1 - w_{\text{aus}}}{1 - w_{\text{ein}}} * 1 \text{ kg}$	1,385 kg
	Strom	$W_{\text{el, spez, Trockner}} * \frac{w_{\text{ein}} - w_{\text{aus}}}{1 - w_{\text{ein}}} \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	0,052 MJ
	Wärme	$Q_{\text{th, spez, Trockner}} * \frac{w_{\text{ein}} - w_{\text{aus}}}{1 - w_{\text{ein}}} \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}$	1,662 MJ
	Stahl	$\frac{m_{\text{Trockner}}}{LD_{\text{Trockner}} * h_{\text{Betrieb, Trockner}} * \dot{V}_{\text{H}_2\text{O, verdampft}} * \frac{1}{1 - w_{\text{ein}}} \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}}$	94 mg
<b>Output</b>	Industrierestholz, vorzerkleinert +getrocknet ( $w=10\%$ ), frei Pelletierung	-	1 kg

**Tabelle 7-18: Bandtrockner [Miekley 2012]**

Die Kenndaten der Pelletierung zeigt Tabelle 7-19.

Kenndaten	Wert
Durchsatz der Pelletierung ( $\dot{V}_{\text{Holz, Pelletierung}}$ )	6.667 kg/h
Spezifischer Schmierölbedarf ( $\dot{V}_{\text{Schmieröl}}$ )	0,1 kg/h

**Tabelle 7-19: Daten der Pelletierung [Miekley 2012]**

Daraus entstehen die In- und Outputs aus Tabelle 7-20.

	Bezeichnung	Formel	Wert
<b>Input</b>	Schmieröl	$\frac{\dot{V}_{\text{Schmieröl}}}{\dot{V}_{\text{Holz, Pelletierung}}}$	1,5 mg
	Strom	-	0,115 kWh <sub>el</sub>
	Maisstärke	-	0,01 kg
	Industrierestholz, vorzerkleinert +getrocknet ( $w=10\%$ ), frei Pelletierung	-	0,24 kg
	Späne	-	0,76 kg
<b>Output</b>	Holzpellets A1 (9% Wassergehalt), ab Pelletierung	-	1 kg

**Tabelle 7-20: Pelletierung [Miekley 2012]**

7.4.4 Stromerzeugung

Auf Grund der relativ stark veralteten Daten zum deutschen Strommix aus dem Jahr 2004 in ecoinvent v2.2 wird in allen Prozessketten ein angepasster Datensatz für den Strommix verwendet. Dieser nutzt die statistischen Daten zur Zusammensetzung des deutschen Strommix des [UBA 2013] aus dem Jahr 2011. Die Zusammensetzung des Strommix in Deutschland im Jahr 2011 zeigt Abbildung 7-9.

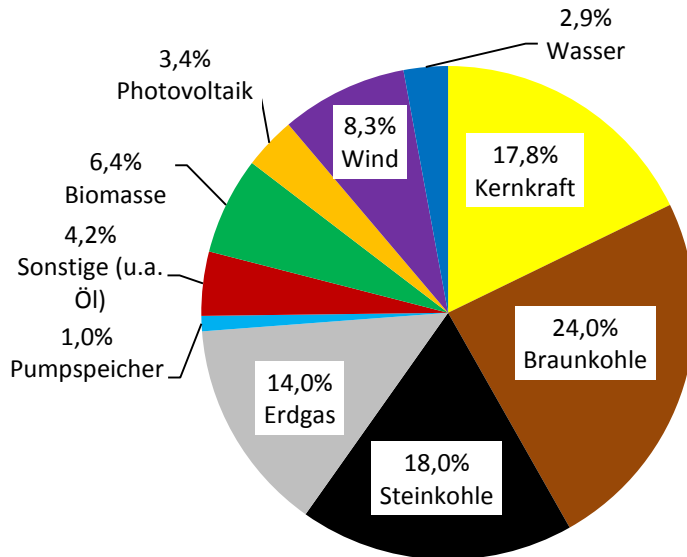


Abbildung 7-9: Nettostromerzeugung in Deutschland 2011 nach Primärenergieträgern [UBA 2013]

Die Hintergrundprozesse zur Stromerzeugung stammen aus ecoinvent v2.2 und Tabelle 7-21 zeigt den angepassten Stromerzeugungsmix.

	Fluss	Kategorie	Einheit	Menge
<b>Inputs</b>	electricity, at cogen ORC 1400kWth, wood, allocation exergy	Wood energy/ cogeneration	kWh	0,0196
	Electricity, at cogen with biogas engine, allocation exergy	Biomass/ cogeneration	kWh	0,0443
	Electricity, at wind power plant	Wind power/ power plants	kWh	0,083
	Electricity, hard coal, at power plant	Hard coal/ power plants	kWh	0,18
	Electricity, hydropower, at power plant	Hydro power/ power plants	kWh	0,029
	Electricity, hydropower, at pumped storage power plant	Hydro power/ power plants	kWh	0,01
	Electricity, lignite, at power plant	Lignite/ power plants	kWh	0,24
	Electricity, natural gas, at power plant	Natural gas/ power plants	kWh	0,14
	Electricity, nuclear, at power plant	Nuclear power/ power plants	kWh	0,178
	Electricity, oil, at power plant	Oil/ power plants	kWh	0,042
	Electricity, production mix photovoltaic, at power plant	photovoltaic/ power plants	kWh	0,034
<b>Output</b>	Electricity mix	Electricity/ supply mix	kWh	1,0

Tabelle 7-21: Prozess „Strommix Deutschland 2011“

Bei allen Prozessketten in denen Strom benötigt wird, wird mit diesem Strommix gerechnet.

## 7.5 Modellierung der Holzheiz(kraft)werke und Holzheizungen

In diesem Kapitel wird auf die Modellierung der Biomassekonversionsanlagen eingegangen. Die Prozessketten sind unterteilt in einen oder mehrere Prozesse zum Anlagenbau und mindestens einen Prozess zum Anlagenbetrieb, bei dem auch die biogenen Verbrennungsemissionen und die benötigten Betriebsmittel mitbilanziert werden. Die Biomassebereitstellung erfolgt wie in Kapitel 7.4 beschrieben. Für alle weiteren Hintergrundprozesse wird die Datenbank ecoinvent v2.2 eingesetzt. Die Prozessketten der Konversionsanlagen basieren dabei ebenfalls auf für das Projekt BioEnergieDat modellierten Datensätzen.

Wichtig für den Anlagenbetrieb sind die Verbrennungseigenschaften der Holzbrennstoffe Waldrest-, Industrierest- und Landschaftspflegeholz hackschnitzel sowie der A1 Holzpellets, die in Tabelle 7-22 zusammengefasst sind.

	Waldrestholz	Industrierestholz	Landschaftspflegeholz	Pellets
Aschegehalt (AG)	1,6 Gew.% der TM	1,0 Gew.% der TM	8,7 Gew.% der TM	0,7 Gew.% der TM
Wassergehalt (w)	35%	35%	42%	9%
Heizwert ( $H_{it}$ )	11,355 MJ/kg	11,196 MJ/ kg	9,729 MJ/ kg	16,63 MJ/ kg
Anteil Feinasche	20%			
Anteil Grobasche	80%			

Tabelle 7-22: Verbrennungseigenschaften des Holzes

In den folgenden Kapiteln 7.5.1 bis 7.5.6 wird die Modellierung der Holzkonversionsanlagen ausführlich erläutert.

### 7.5.1 Hackschnitzelkessel mit 800 kW

Die Prozesskette für den Hackschnitzelkessel mit 800 kW stammt im Wesentlichen aus BioEnergieDat und sieht aus wie in Abbildung 7-10 gezeigt. Diese Prozesskette besteht neben der Biomassebereitstellung (gezeigt in Kapitel 7.4) aus dem Anlagenbau, dem Anlagenbetrieb, der Ascheentsorgung und dem Eigenstrombedarf.

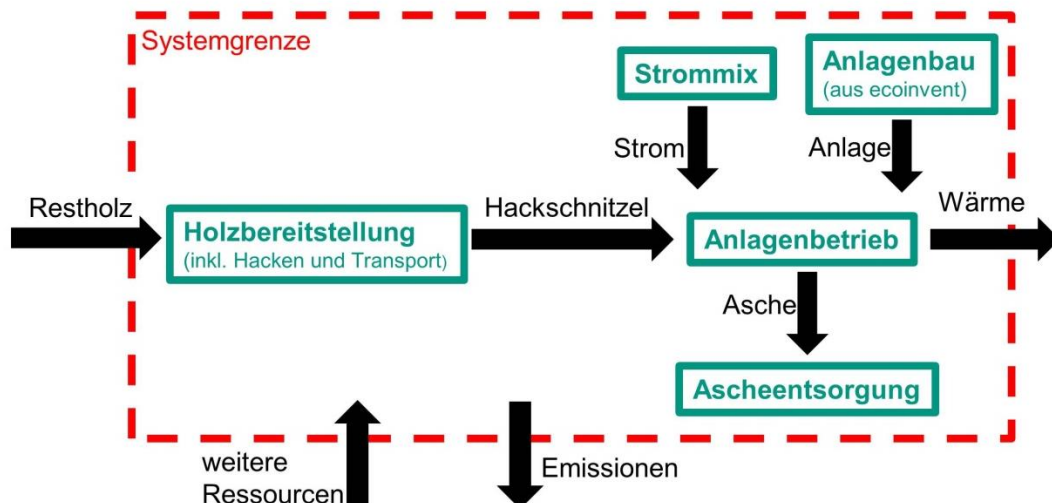


Abbildung 7-10: Schematische Darstellung: Hackschnitzelkessel 800 kW

Da für den Anlagenbau in BioEnergieDat nur ein sehr allgemein gehaltener Wert für den Stahlverbrauch angegeben ist, wird für diese Arbeit stattdessen der Anlagenbau aus ecoinvent v2.2 übernommen. Dabei ist der dort angegebene Datensatz für einen Hackschnitzelkessel mit 1 MW<sub>th</sub> laut ecoinvent v2.2. auch für Anlagen in einem Leistungsbereich zwischen 700 kW und bis zu einer Leistung von wenigen MW gültig. Daher können die in ecoinvent v2.2 enthaltenen Bauaufwendungen des Hackschnitzelkessels mit 1 MW übernommen werden.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Neben einem mit Waldrestholz betriebenen Hackschnitzelkessel wird ein weiterer Kessel modelliert, der jeweils zur Hälfte mit Landschaftspflege- und Industrierestholzhackschnitzeln betrieben wird.

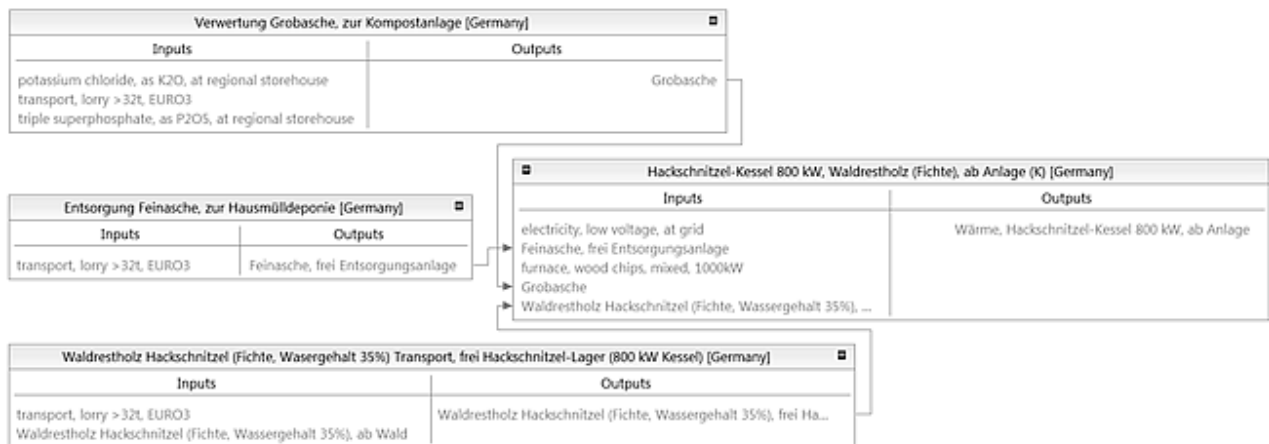
Die technischen Daten des modellierten Hackschnitzelkessels mit 800 kW sind in Tabelle 7-23 zusammengefasst.

Technische Kenndaten	Wert
Leistung thermisch ( $P_{th}$ )	800 kW
Thermischer Nutzungsgrad ( $\eta_{th}$ )	85%
Volllaststunden Wärme ( $h_{Volllast, th}$ )	6.000 h/a
Eigenstrombedarf ( $W_{el, eigen}$ )	0,02 MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>th</sub>
Lebensdauer ( $LD_{HS \text{ Kessel } 800 \text{ kW}}$ )	20 Jahre

**Tabelle 7-23: Technische Kenndaten des Hackschnitzelkessels 800 kW**

Die Zahl von 6.000 Volllaststunden pro Jahr entspricht dabei in etwa der mittleren Volllaststundenzahl des Hackschnitzelkessels in den semi- zentralen Wärmenetzen.

Abbildung 7-11 zeigt die Prozesskette am Beispiel des Hackschnitzelkessels mit Waldrestholz in openLCA.



**Abbildung 7-11: Prozesskette Hackschnitzelkessel 800 kW mit Waldrestholz**

Die hier gezeigte Ascheentsorgung bleibt für alle modellierten Heiz(kraft)werke gleich. Bei der Verbrennung des Holzes in den Heiz(kraft)werken fallen die beiden Aschefraktionen Grobasche (80 Prozent Anteil an der Gesamtaschemenge) und Feinasche (20 Prozent Anteil an der Gesamtaschemenge) an. Während die Feinasche mit dem LKW abtransportiert (Transportdistanz 100 Kilometer nach [Tonn et al. 2009]) und dann in einer Sondermülldeponie deponiert wird, kann die Grobasche als Düngemittel ausgebracht werden (siehe auch Kapitel 2.1.6). In BioEnergieDat ist eine Gutschrift implementiert bei der anhand des Gehaltes an Kaliumoxid und Phosphorpentoxid in der Grobasche eine Düngemittelgutschrift erfolgen kann. Die meisten Kraftwerke entsorgen jedoch nach [Wolff 2004] ihre Grobasche ebenfalls über eine Hausmülldeponie, so dass sie nicht als Dünger zum Einsatz kommt. Da somit kein konventioneller Dünger ersetzt wird, erfolgt in dieser Arbeit keine Düngemittelgutschrift. Nach [Wolff 2004] liegt die mittlere Transportentfernung für die Grobasche bei 20 Kilometern.

Tabelle 7-24 zeigt die Input- und Outputflüsse der Prozesse „Hackschnitzel- Kessel 800 kW, Waldrestholz (Fichte), ab Anlage“ und „Hackschnitzelkessel 800 kW, Industrierest- und Landschaftspflegeholz“ in Anlehnung an [BioEnergieDat].

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

	<b>Bezeichnung</b>	<b>Formel</b>	<b>Wert</b>
<b>Input</b>	<i>Furnace, wood chips, mixed, 1.000kW</i>	1 Stück	2,9E-9 Stück
		$h_{Vollast,th} * P_{th} * LD_{HS\ Kessel\ 800\ kW} * 3,6 \frac{MJ}{kWh}$	
	<i>Strom</i>	-	0,02 MJ <sub>el</sub>
	<i>Grobasche</i>	$0,8 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{th} * 1MJ * H_u}$	0,86 g (WRH)
			2,56 g (LPH + IRH)
	<i>Feinasche</i>	$0,2 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{th} * 1MJ * H_u}$	0,22 g (WRH)
			0,64 g (LPH + IRH)
	<i>Holz hackschnitzel</i>	$\frac{1}{\eta_{th} * 1MJ * H_u}$	0,104 kg
			0,056 kg LPH + 0,056 kg IRH
<b>Output</b>	<i>Wärme</i>	-	1 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-24: Inputs und Outputs des Hackschnitzelkessels 800 kW pro MJ**

Die im Prozess entstehenden Verbrennungsemissionen zeigt Tabelle 7-25. Dabei werden die in [BioEnergieDat] enthaltenen Emissionen um die Methan-, Kohlenmonoxid- und TCDD- Emissionen ergänzt anhand der Originalquelle in GEMIS 4.81 "Holz-HS- Waldholz-Heizwerk-1MW-2005". Leider macht GEMIS keine Angabe darüber, welche Staubabscheidemethoden zum Einsatz kommen. Der angegebene Reingasstaubgehalt von 13 mg/Nm<sup>3</sup> legt jedoch die Nutzung eines Multizyklons und eines Elektrofilters nahe, so dass die Aufteilung der Staubfraktionen nach [Wolff 2004] möglich war. Für den Hackschnitzelkessel mit Landschaftspflege- und Industrierestholz kamen nach [Wolff 2004] ein Multizyklon und ein Rauchgaskondensator zum Einsatz. Damit werden Partikel größer 10 µm vollständig herausgefiltert.

<b>Luftschadstoff</b>	<b>Emissionen für Waldrestholz nach GEMIS 4.81</b>	<b>Emissionen für Landschaftspflege- und Industrierestholz nach [Wolff 2004]</b>
<i>Kohlenmonoxid</i>	86 mg	230 mg
<i>Methan</i>	6 mg	k. A.
<i>Lachgas</i>	1 mg	k. A.
<i>Stickoxide</i>	64 mg	170 mg
<i>Partikel &lt;2,5 µm</i>	3,7 mg	66 mg
<i>Partikel &gt;2,5 und &lt; 10 µm</i>	3 mg	3 mg
<i>Partikel &gt;10 µm</i>	1,7 mg	0 mg
<i>Schwefeldioxid</i>	38 mg	17 mg
<i>Chlorwasserstoff</i>	3,6 mg	k. A.
<i>NM VOC</i>	12,8 mg	k. A.
<i>PAH</i>	0,5 µg	k. A.
<i>TCDD</i>	5,44 * 10 <sup>-16</sup> kg	k. A.

**Tabelle 7-25: Emissionsdaten der Hackschnitzelkessel 800 kW pro MJ**

**7.5.2 Hackschnitzelkessel 50 kW**

Die Modellierung des Hackschnitzelkessels mit 50 kW und Waldrestholz ist ähnlich wie für den größeren Hackschnitzelkessel, auch hier wird auf dem BioEnergieDat- Datensatz aufgebaut.

Die technischen Daten des Hackschnitzelkessels mit 50 kW unter Nutzung von Waldrestholz hackschnitzeln zeigt Tabelle 7-26.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Technische Kenndaten	Wert
Leistung thermisch ( $P_{th}$ )	50 kW
Thermischer Nutzungsgrad ( $\eta_{th}$ )	85%
Volllaststunden Wärme ( $h_{Volllast, th}$ )	1.914 h/a (bei Verwendung im Mehrfamilienhaus)
Eigenstrombedarf ( $W_{el, eigen}$ )	0,015 MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>th</sub>
Lebensdauer ( $LD_{HS\ Kessel\ 50\ kW}$ )	15 Jahre

**Tabelle 7-26: Technische Kenndaten des Hackschnitzelkessels 50 kW**

Die Prozesskette ohne Vorketten ist in Abbildung 7-12 zu sehen. Auch hier wird der Anlagenbau aus ecoinvent v2.2. genutzt. Im Gegensatz zu den Heiz(kraft)werken wird von einer anderen Ascheentsorgung ausgegangen. Beide Aschefractionen werden in den Hausmüll entsorgt und daher in der Hausmüllverbrennung behandelt, die ebenfalls aus ecoinvent v2.2 stammt.

Hackschnitzel-Kessel 50 kW, Waldrestholz (Fichte), ab Anlage (K) [Germany]	
Inputs	Outputs
disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration electricity, low voltage, at grid furnace, wood chips, mixed, 50kW Waldrestholz Hackschnitzel (Fichte, Wassergehalt 35%), frei Hackschnitzel-Lager ...	Wärme, Hackschnitzel-Kessel 50 kW, ab Anlage

**Abbildung 7-12: Prozesskette Hackschnitzelkessel 50 kW**

Tabelle 7-27 zeigt eine Auflistung der Inputs und Outputs des Prozesses „Hackschnitzel- Kessel 50 kW, Waldrestholz (Fichte), ab Anlage“.

	Bezeichnung	Formel	Wert
<b>Input</b>	<i>Furnace, wood chips, mixed, 50 kW</i>	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{Volllast, th} * P_{th} * LD_{HS\ Kessel\ 50\ kW} * 3,6 \frac{MJ}{kWh}}$	$1,5 * 10^{-7}$ Stück
	<i>Strom</i>	-	0,015 MJ <sub>el</sub>
	<i>disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration</i>	$AG_{WRH} * (100\% - w_{WRH}) * \frac{1}{\eta_{th} * 1MJ * H_{u,WRH}}$	1,05 g
	<i>Waldrestholz Hackschnitzel (Fichte, Wassergehalt 35%), frei Hackschnitzel- Lager</i>	$\frac{1}{\eta_{th} * 1MJ * H_{u,WRH}}$	0,101 kg
<b>Output</b>	<i>Wärme</i>	-	1 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-27: Inputs und Outputs des Hackschnitzelkessels 50 kW pro MJ**

Die in Tabelle 7-28 gezeigten Emissionen stammen aus BioEnergieDat und werden wieder durch Angaben zu den Kohlenmonoxid- und TCDD- Emissionen aus GEMIS 4.81 „Holz-HS-Waldholz-Heizung-50 kW-2010“ ergänzt. Zudem werden, auf Grund fehlender Methanemissionen in GEMIS, diese aus ecoinvent v2.2 übernommen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Luftschadstoff	Emissionswert
Kohlenmonoxid	110 mg
Methan	0,7 mg (ecoinvent v2.2)
Lachgas	1,4 mg
Stickoxide	110 mg
Partikel <2,5 µm	30 mg
Partikel >2,5 und < 10 µm	12,7 mg
Partikel >10 µm	1,3 mg
Schwefeldioxid	29,7 mg
Chlorwasserstoff	3,5 mg
NMVOC	35,1 mg
PAH	2,2 µg
TCDD	2,2*10 <sup>-15</sup> kg

Tabelle 7-28: Emissionsdaten des Hackschnitzelkessel 50 kW pro MJ

### 7.5.3 Pelletzentralheizung

Für die Pelletzentralheizung ist die schematische Darstellung der Prozesskette in Abbildung 7-13 gezeigt. Diese Prozesskette entstand im Rahmen der Diplomarbeit [Miekley 2012] für das Projekt BioEnergieDat.

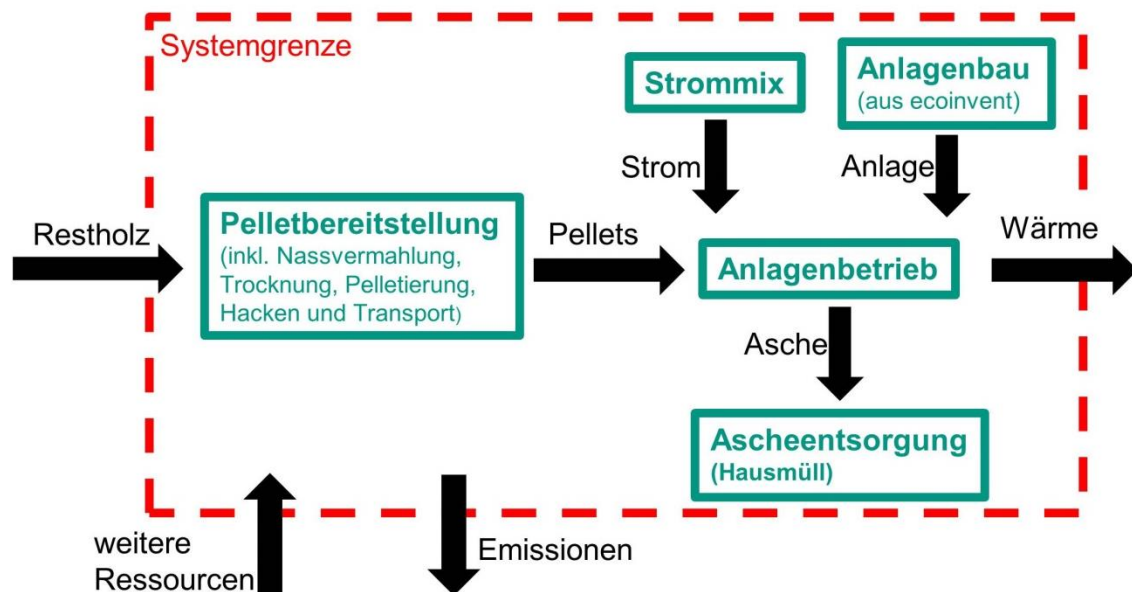


Abbildung 7-13: Schematische Darstellung: Prozesskette der Pelletzentralheizung 10 kW

Die Asche der Pelletzentralheizung wird über den Hausmüll entsorgt. Der Anlagenbau wird aus ecoinvent v2.2 übernommen.

Die technischen Daten der Pelletzentralheizung zeigt Tabelle 7-29.

Leistung thermisch ( $P_{th}$ )	10 kW
Thermischer Nutzungsgrad ( $\eta_{th}$ )	78,9%
Volllaststunden Wärme ( $h_{Volllast, th}$ )	1.770 h/a
Eigenstrombedarf ( $W_{el, eigen}$ )	0,015 MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>th</sub>
Lebensdauer ( $LD_{Pelletkessel}$ )	20 Jahre

Tabelle 7-29: Technische Kenndaten Pellet 10 kW



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Modellierung der Pelletzentralheizung (ohne Vorketten) ist in Abbildung 7-14 zu sehen.

Pelletzentralheizung 10 kW, A1 Holzpellets, ab Anlage (K) [Germany]	
Inputs	Outputs
disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration electricity, low voltage, at grid furnace, pellets, 15kW Holzpellets A1 (10% Wassergehalt), frei Haus	Wärme, Pelletkessel 10kW, ab Kessel

Abbildung 7-14: Prozesskette Pellet 10 kW

Tabelle 7-30 zeigt die Inputs und Outputs des Prozesses „Pelletzentralheizung 10 kW, A1 Holzpellets, ab Anlage“.

Input	Bezeichnung	Formel	Wert
	<i>Furnace, pellets, 15kW</i>	$1 \text{ Stück}$	$5,2 \cdot 10^{-7} \text{ Stück}$
	<i>Strom</i>	$h_{\text{Volllast,th}} * P_{\text{th}} * LD_{\text{Pelletkessel}} * 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} * \frac{2}{3}$	0,015 MJ <sub>el</sub>
	<i>disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration</i>	$AG_{\text{Pellet}} * (100\% - w_{\text{Pellet}}) * \frac{1}{\eta_{\text{th}} * 1\text{MJ} * H_{\text{u,Pellet}}}$	48,5 g
	<i>Holzpellets A1 (10% Wassergehalt), frei Haus</i>	$\frac{1}{\eta_{\text{th}} * 1\text{MJ} * H_{\text{u,Pellet}}}$	0,0762 kg
<b>Output</b>	<i>Wärme</i>	-	1 MJ <sub>th</sub>

Tabelle 7-30: Inputs und Outputs der Pelletzentralheizung 10 kW pro MJ

Die in Tabelle 7-31 gezeigten Emissionen stammen aus BioEnergieDat.

Luftschadstoff	Emissionswert
<i>Kohlenmonoxid</i>	69,1 mg
<i>Methan</i>	3,45 mg
<i>Lachgas</i>	1,38 mg
<i>Stickoxide</i>	82,9 mg
<i>Partikel &lt;2,5 µm</i>	13,38 mg
<i>Partikel &gt;2,5 und &lt; 10 µm</i>	5,73 mg
<i>Partikel &gt;10 µm</i>	0,59 mg
<i>Schwefeldioxid</i>	36,6 mg
<i>Chlorwasserstoff</i>	3,31
<i>NMVO</i>	15,3 mg
<i>PAH</i>	0,00137 mg
<i>TCDD</i>	1,37 µg

Tabelle 7-31: Emissionsdaten der Pelletzentralheizung 10 kW pro MJ

Die Aufteilung der Staubemissionen erfolgt nach [Wolff 2004] unter der Annahme, dass ein Multizyklon zum Einsatz kommt.

### 7.5.4 Organic Rankine Cycle Anlage

Die Prozessketten für die ORC- Anlagen wurden selber für BioEnergieDat modelliert. Sie bestehen wie in Abbildung 7-15 gezeigt aus der Holzbereitstellung, dem Anlagenbetrieb, der Ascheentsorgung (näher beschrieben in Kapitel 7.5.1) und dem Anlagenbau. Dabei ist der Anlagenbau nach [Briem et al. 2004] in vier Teilprozesse unterteilt: die Bautechnik, die Maschinenteknik, die Elektrotechnik und das ORC- Modul, wobei die unterschiedlichen Anlagenteile auch unterschiedliche Lebensdauern haben.

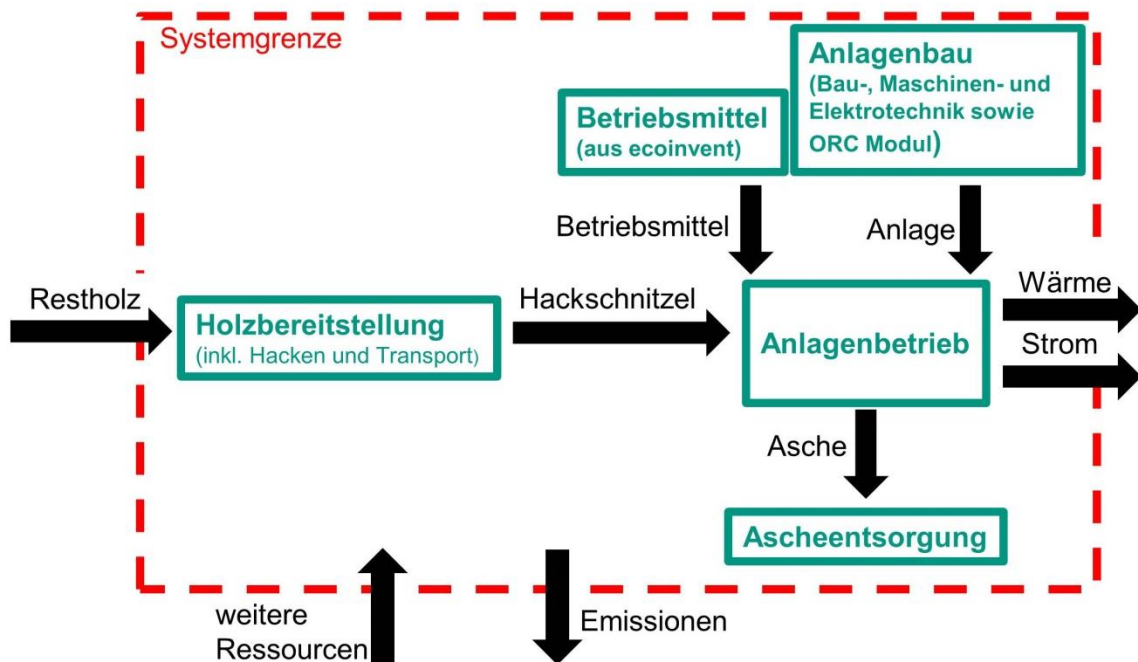


Abbildung 7-15: Schematische Darstellung der Prozesskette zur ORC- Anlage

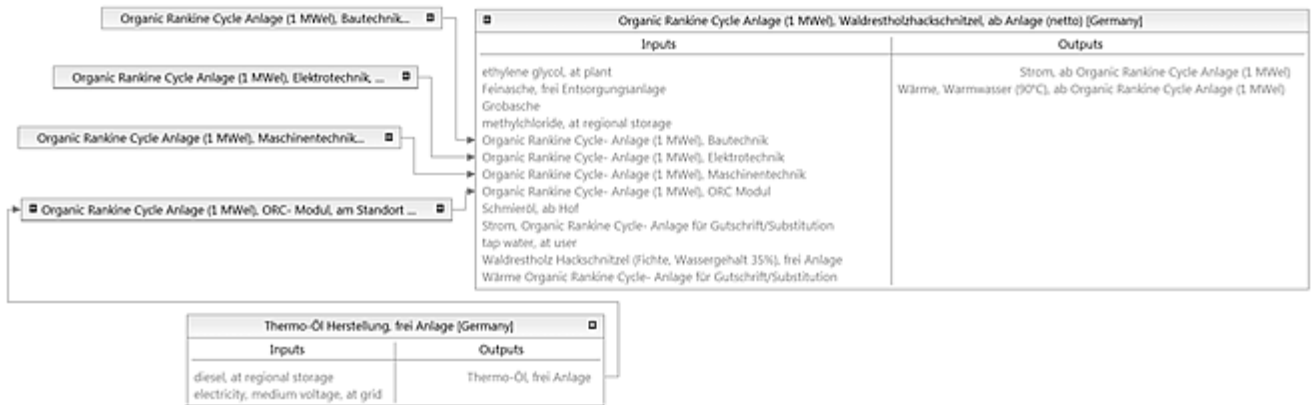
Die betrachtete ORC- Anlage stammt von der Firma Kohlbach und wurde im Jahr 2004 in Betrieb genommen. Betreiber ist eine gemeinsam von den Stadtwerken Esslingen, der Stadt Ostfildern und der KWA Contracting AG gegründete Gesellschaft und der Standort ist die Kommune Scharnhäuser Park. Sie hat eine Leistung von 1 MW<sub>el</sub> bzw. 6,26 MW<sub>th</sub> (4,65 MW ORC- Modul und 1,61 MW Heißwassereconomiser), eine Feuerungswärmeleistung von 8,7 MW bzw. eine Kesselleistung von 7,61 MW bei einem Kesselwirkungsgrad von 87,5 Prozent. Die Anlage wird wärmegeführt gefahren. Weitere technische Kenndaten zeigt Tabelle 7-32.

Kenndaten	Wert
Elektrischer Nutzungsgrad ( $\eta_{el}$ )	10,6 %
Eigenstrombedarf ( $W_{el}$ )	16,8%
Thermischer Nutzungsgrad ( $\eta_{th}$ )	70,4%
Gesamtnutzungsgrad	81%
Volllaststunden Wärme ( $h_{Vollast, th}$ )	4.890 h/a
Volllaststunden Strom	4.600 h/a
Leistung elektrisch	1 MW
Leistung thermisch ( $P_{th}$ )	6,26 MW
Temperatur der Wärme	90°C

Tabelle 7-32: Kenndaten der ORC- Anlage

Abbildung 7-16 zeigt am Beispiel der ORC- Anlage mit Waldrestholz wie die Prozesskette in openLCA in vereinfachter Form aussieht. Die Vorkette zur Biomassebereitstellung wird nicht gezeigt; diese ist dargestellt in Kapitel 7.4. Für Industrierestholz und Landschaftspflegeholz ergibt sich ein analoges Bild.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 7-16: Prozesskette der ORC- Anlage mit Waldrestholz**

Während der Anlagenbetrieb „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Waldrestholzhackschnitzel, ab Anlage (netto)“, „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Industrierestholzhackschnitzel, ab Anlage (netto)“ und „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Landschaftspflegeholzhackschnitzel, ab Anlage (netto)“ für jeden Brennstoff unterschiedlich ist, bleiben die sonstigen Prozesse gleich. Im Gegensatz zu BioEnergieDat wird hier davon ausgegangen, dass das Hauptprodukt der ORC- Anlage Wärme anstelle von Strom ist. Damit wird der benötigte Eigenstrombedarf selber, und nicht aus dem Stromnetz, gedeckt (siehe auch Kapitel 8.3.2).

Die Prozesse zum Anlagenbau werden nach Angaben aus [Briem et al. 2004] modelliert und sind im Anhang 2 näher beschrieben. Während Maschinen- und Elektrotechnik eine Lebensdauer ( $LD_{\text{Maschinen-/ Elektrotechnik}}$ ) von 20 Jahren aufweisen, hält die Bautechnik ( $LD_{\text{Bautechnik}}$ ) 50 Jahre, das ORC- Modul ( $LD_{\text{ORC- Modul}}$ ) hingegen nur 15 Jahre. Die Daten zum Wasser-, Ethylenglykol- (Frostschutzmittel), Silikonöl- und Schmierölverbrauch stammen ebenfalls aus [Briem et al. 2004]. Da in ecoinvent v.2.2 keine Daten zum verwendeten Silikonöl Polydimethylsiloxan verfügbar sind, wird mit Daten von Methylchlorid, eine Vorstufe in der Silikonölherstellung gearbeitet. Auf Grund der geringen Silikonölmenge und dem sehr geringen Einfluss des Methylchlorids kann davon ausgegangen werden, dass hierdurch ein vernachlässigbarer Fehler entsteht.

Die Inputs und Outputs der Prozesse „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Waldrestholzhackschnitzel, ab Anlage (netto)“, „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Industrierestholzhackschnitzel, ab Anlage (netto)“ und „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Landschaftspflegeholzhackschnitzel, ab Anlage (netto)“ bezogen auf ein MJ Wärme werden in Tabelle 7-33 gezeigt.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

	<b>Bezeichnung</b>	<b>Formel</b>	<b>Wert</b>
<b>Input</b>	<i>Ethylenglykol</i>	-	1,1 mg
	<i>Silikonöl</i>	-	2,3 mg
	<i>Bautechnik</i>	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{\text{Volllast,th}} * P_{\text{th}} * LD_{\text{Bautechnik}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}}} * \frac{20 \text{ Jahre}}{50 \text{ Jahre}}$	$1,8 * 10^{-10}$ Stück
	<i>ORC- Modul</i>	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{\text{Volllast,th}} * P_{\text{th}} * LD_{\text{ORC-Modul}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}}} * \frac{20 \text{ Jahre}}{15 \text{ Jahre}}$	$6,0 * 10^{-10}$ Stück
	<i>Elektrotechnik</i>	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{\text{Volllast,th}} * P_{\text{th}} * LD_{\text{Maschinen- / Elektrotechnik}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}}}$	$4,5 * 10^{-10}$ Stück
	<i>Maschinentechnik</i>		
	<i>Schmieröl</i>	-	2,7 mg
	<i>Wasser</i>	-	2,0 mg
	<i>Grobasche</i>	$0,8 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{\text{th}} * 1 \text{ MJ} * H_u}$	1,04 g (WRH) 0,66 g (IRH) 5,85 g (LPH)
	<i>Feinasche</i>	$0,2 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{\text{th}} * 1 \text{ MJ} * H_u}$	0,26 g (WRH) 0,16 g (IRH) 1,46 g (LPH)
	<i>Holzmenge</i>	$\frac{1}{\eta_{\text{th}} * 1 \text{ MJ} * H_u}$	125 g (WRH) 127 g (IRH) 145 g (LPH)
<b>Output</b>	<i>Strom</i>	$\frac{h_{\text{Volllast,el}}}{h_{\text{Volllast,th}}} * \frac{P_{\text{el}} * (100\% - W_{\text{el}})}{P_{\text{th}}} * 1 \text{ MJ}_{\text{el}}$	0,125 MJ <sub>el</sub>
	<i>Wärme</i>	-	1 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-33: ORC- Anlage: Inputs und Outputs der ORC- Anlage pro MJ<sub>th</sub>**

Weiterhin entstehen als Outputs aus den Prozessen Verbrennungsemissionen die in Tabelle 7-34 zusammengefasst sind.

	<b>Waldrestholz</b>	<b>Industrierestholz</b>	<b>Landschaftspflegeholz</b>
<i>Kohlenmonoxid</i>	76,5 mg	62,1 mg	0,8 mg
<i>Methan</i>	2,9 mg	-	-
<i>Lachgas</i>	0,6 mg	-	-
<i>Stickoxide</i>	130 mg	120 mg	190 mg
<i>Partikel &lt;2,5 µm</i>	1,4 mg	6,8 mg	3,9 mg
<i>Partikel &gt;2,5 und &lt; 10 µm</i>	1,1 mg	5,6 mg	3,2 mg
<i>Partikel &gt;10 µm</i>	0,6 mg	3,1 mg	1,6 mg
<i>Schwefeldioxid</i>	38,4 mg	51,7 mg	-
<i>NMVOC</i>	4,8 mg	-	-

**Tabelle 7-34: Emissionsdaten der ORC- Anlagen pro MJ<sub>th</sub>**

Die Verbrennungsemissionen für das Waldrestholz werden dem GEMIS 4.81 Datensatz "Holz-HS-Waldholz-ORC-HKW 5MW DE 2010-th/en" entnommen. Die im BioEnergieDat- Datensatz für Waldrestholz enthaltenen Schwermetallemissionen sind hier nicht aufgeführt, da aus Gründen der Vergleichbarkeit keine Toxizität verglichen wird. Die Emissionen für Industrierestholz stammen aus [Briem et al. 2004] und werden für die Kohlenwasserstoffemissionen um den Grenzwert nach der TA Luft von 10 mg/Nm<sup>3</sup> bei 11 Vol.% Sauerstoff ergänzt. Für Landschaftspflegeholz stammen die Emissionen aus einem Messprotokoll von [Fink 2007] der Anlage im Scharnhäuser Park (schlechtester Fall) bei der 70 Prozent Landschaftspflegeholz und 30 Prozent Waldrestholz verbrannt werden, wobei der Heizwert mit 0,65 MWh/m<sup>3</sup> und der Wassergehalt mit 55 Prozent deutlich von den geforderten Angaben abweichen. Um von den in den Originalquellen angegebenen allgemeinen Staubemissionen auf die unterschiedlichen Staubfraktionen zu kommen, wird eine Aufteilung der Staubemissionen (Multizyklon und Elektrofilter) nach [Wolff 2004] vorgenommen (siehe auch Kapitel 2.1.5.1).

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Zur Aufteilung der Umweltlasten auf die beiden Nebenprodukte Strom und Wärme wird eine exergetische Allokation angewendet, wobei der exergetische Faktor 0,22 beträgt.

### 7.5.5 Dampfturbinen- Heizkraftwerk

Die modellierte Prozesskette für das Dampfturbinen- Heizkraftwerk ist in Abbildung 7-17 gezeigt. Sie wurde selber für das Projekt BioEnergieDat modelliert.

Die Prozesskette besteht aus der Holzbereitstellung, der Ascheentsorgung (analog zum Hackschnitzelkessel mit 800 kW) und dem Anlagenbau. Dieser Anlagenbau wird in zwei Prozesse unterteilt: die Bautechnik und die Maschinen- und Elektrotechnik. Datengrundlage hierfür sind die in [Briem et al. 2004] enthaltenen Baupläne und Materialmengen des Biomasse-HKW Pfaffenhofen/Ilm in Bayern.

Auch hier wird, wie bei der ORC- Anlage bereits beschrieben, von einer Nettobetrachtung ausgegangen, bei welcher der Eigenstrombedarf durch den selbst erzeugten Strom gedeckt wird.

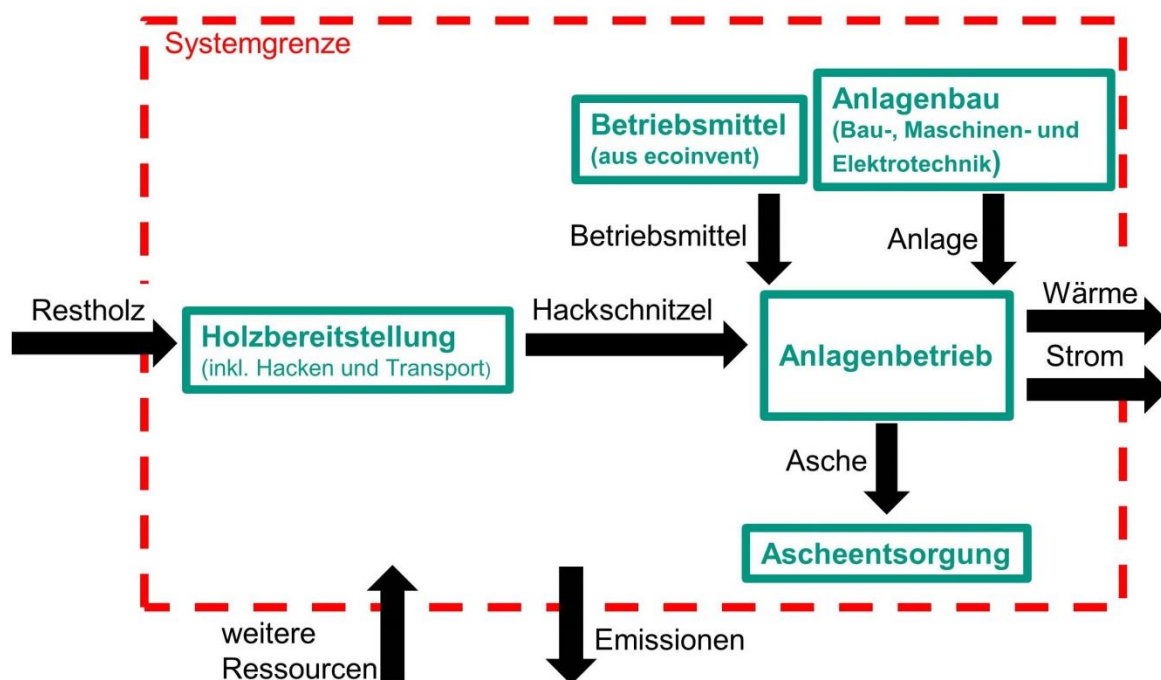


Abbildung 7-17: Schematische Darstellung: Prozesskette der Heizkraftwerke

Die Bautechnik wird im Prozess „Heizkraftwerk (Dampfturbine mit 6,1 MW<sub>el</sub>), Bautechnik, am Standort“ bilanziert. Zur Bautechnik gehören das Betriebsgebäude, das Verwaltungsgebäude, die Außenanlagen, die Baugrube und die Kanalleitungen wobei die Lebensdauer (LD<sub>Bautechnik</sub>) 50 Jahre beträgt. Da die Gesamtanlage 20 Jahre in Betrieb sein soll, beträgt der Bedarfsfaktor für die Bautechnik 0,4. Im Prozess „Heizkraftwerk (Dampfturbine mit 6,1 MW<sub>el</sub>), Elektro- und Maschinenteknik, am Standort“ werden die Maschinenteknik und die Elektrotechnik bilanziert. Die Maschinenteknik enthält dabei Kessel und Dampferzeuger, Brennstofflager und -zufuhr, Asche- und Schlackeabfuhr, Speisewasserhaltung und Pumpen, Primär- und Sekundärluftzufuhr, Rauchgasführung und -reinigung, Turbine mit Zubehör, Wärmetauscher und die Nebenaggregate. Unter die Elektrotechnik fallen der Generator, der Drehstromtransformator, die elektrischen Leitungen und die Steuerungskomponenten. Sowohl Maschinen- als auch Elektrotechnik haben eine Lebensdauer (LD<sub>Maschinen-/ Elektrotechnik</sub>) von 20 Jahren. Eine genaue Auflistung der Inputs für die Prozesse zum Anlagenbau ist im Anhang 2 zu finden.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

In Tabelle 7-35 werden die technischen Daten der beiden Heizkraftwerke aus [Briem et al. 2004] und GEMIS 4.81 gezeigt. Während das Heizkraftwerk aus [Briem et al. 2004] wärmegeführt betrieben wird, wird das Heizkraftwerk aus GEMIS 4.81 mit 7.000 Volllaststunden pro Jahr stromgeführt gefahren. Daher wird hier angenommen, dass bei diesem ein Teil der Wärme nicht genutzt wird und für die Wärme nur von einer Volllaststundenzahl analog zur ORC- Anlage von 4.890 h/a ausgegangen werden kann. Nur diese nutzbare Wärme wird bei der Ökobilanzierung mitbetrachtet.

	Waldrestholz	Industrierestholz
Leistung elektrisch ( $P_{el}$ )	6,1 MW <sub>el</sub>	5 MW <sub>el</sub>
Leistung thermisch ( $P_{th}$ )	nicht angegeben	12,5 MW <sub>th</sub>
Volllaststunden Strom ( $h_{Volllast, el}$ )	4.660 h/a	7.000 h/a
Volllaststunden Wärme ( $h_{Volllast, th}$ )	6.560 h/a	4.890 h/a (eigene Annahme)
Elektrischer Nutzungsgrad ( $\eta_{el}$ )	19,5% (brutto)	24,8999% (netto)
Gesamtnutzungsgrad ( $\eta_{ges}$ )	69,7%	nicht angegeben
Eigenstrombedarf ( $W_{el}$ )	10%	nicht angegeben

**Tabelle 7-35: Technische Daten der Heizkraftwerke [Briem et al. 2004] und [GEMIS 4.81]**

Die Inputs und Outputs des Prozesses „Heizkraftwerk (Dampfturbine mit 6.1 MW<sub>el</sub>), Waldrestholzhackschnitzel, ab Anlage (netto)“ werden in Tabelle 7-36 gezeigt. Nach [Briem et al. 2004] werden 0,45 MJ<sub>th</sub> Wärme pro MJ<sub>el</sub> bei 85°C erzeugt. Diese Angabe wird genutzt um den Datensatz auf die funktionelle Einheit von einem MJ Wärme bei 85°C umzurechnen.

	Bezeichnung	Formel	Wert
<b>Input</b>	<i>Ethylenglykol</i>	-	1,1 mg
	<i>Bautechnik</i>	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{Volllast, el} * P_{el} * LD_{Bautechnik} * 3600 \frac{MJ}{MWh}} * \frac{20 \text{ Jahre}}{50 \text{ Jahre}} * \frac{1}{0,45}$	3,1*10 <sup>-10</sup> Stück
	<i>Maschinen- und Elektrotechnik</i>	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{Volllast, el} * P_{el} * LD_{Maschinen- / Elektrotechnik} * 3600 \frac{MJ}{MWh}} * \frac{1}{0,45}$	7,7*10 <sup>-10</sup> Stück
	<i>Schmieröl</i>	-	0,2 g
	<i>Wasser</i>	-	0,7 g
	<i>Grobasche</i>	$0,8 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{el} * 1MJ * H_u} * \frac{1}{0,45}$	8,4 g
	<i>Feinasche</i>	$0,2 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{el} * 1MJ * H_u} * \frac{1}{0,45}$	2,1 g
	<i>Holz</i>	$\frac{1}{\eta_{el, brutto} * 1MJ * H_u} * \frac{1}{0,45}$	1,0036 kg
<b>Output</b>	<i>Strom</i>	-	2,0 MJ <sub>el</sub>
	<i>Wärme (85°C)</i>	-	1 MJ <sub>th</sub>
	<i>Wärme (130°C)</i>	-	2,233 MJ <sub>th</sub>
	<i>Prozessdampf (13 bar und 210°C)</i>	-	2,056 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-36: Inputs und Outputs des Heizkraftwerkes mit Waldrestholz pro MJ<sub>th</sub>**

Die exergetischen Faktoren für die Wärme auf den unterschiedlichen Temperaturniveaus zeigt Tabelle 7-37.

Temperatur der Wärme	Exergetischer Gewichtungsfaktor
210 °C	0,41
130 °C	0,30
85°C	0,21

**Tabelle 7-37: Exergetische Gewichtungsfaktoren**

Da in GEMIS 4.81 keine Daten zum Bau der Anlage enthalten sind, wird auch für das Heizkraftwerk mit 5 MW<sub>el</sub> und Industrierestholz der Anlagenbau aus [Briem et al. 2004] verwendet.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Tabelle 7-38 zeigt die In- und Outputflüsse des Prozesses „Heizkraftwerk (Dampfturbine mit 5 MW<sub>el</sub>), Industrierestholz hackschnitzel, ab Anlage (netto)“.

	Bezeichnung	Formel	Wert
<b>Input</b>	Ethylenglykol	-	0,3 mg
	Bautechnik	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{Volllast,el} * P_{el} * LD_{Bautechnik} * 3600 \frac{MJ}{MWh}} * \frac{20 a}{50 a} * \frac{P_{el}}{P_{th}} * \frac{h_{Volllast,el}}{h_{Volllast,th}}$	9,1*10 <sup>-11</sup> Stück
	Maschinen- und Elektrotechnik	$\frac{1 \text{ Stück}}{h_{Volllast,el} * P_{el} * LD_{Maschinen- / Elektrotechnik} * 3600 \frac{MJ}{MWh}} * \frac{P_{el}}{P_{th}} * \frac{h_{Volllast,el}}{h_{Volllast,th}}$	2,3*10 <sup>-10</sup> Stück
	Schmieröl	-	5,8 mg
	Wasser	-	1,8 mg
	Grobasche	$0,8 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{el} * 1MJ * H_u} * \frac{P_{el}}{P_{th}} * \frac{h_{Volllast,el}}{h_{Volllast,th}}$	1,07 g
	Feinasche	$0,2 * AG * (100\% - w) * \frac{1}{\eta_{el} * 1MJ * H_u} * \frac{P_{el}}{P_{th}} * \frac{h_{Volllast,el}}{h_{Volllast,th}}$	0,27 g
	Holz	$\frac{1}{\eta_{el,netto} * 1MJ * H_u} * \frac{P_{el}}{P_{th}} * \frac{h_{Volllast,el}}{h_{Volllast,th}}$	205 g
<b>Output</b>	Strom	-	0,5726 MJ <sub>el</sub>
	Wärme (90°C)	-	1 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-38: Inputs und Outputs des Heizkraftwerkes mit Industrierestholz pro MJ<sub>th</sub>**

Weiterhin entstehen als Outputs aus den Prozessen die in Tabelle 7-39 zusammengefassten Verbrennungsemissionen.

	Waldrestholz	Industrierestholz
Kohlenmonoxid	910 mg	44,3 mg
Methan	-	3,5 mg
Lachgas	-	1,8 mg
Stickoxide	610 mg	220 mg
Partikel <2,5 µm	63,7 mg	1,8 mg
Partikel >2,5 und < 10 µm	2,7 mg	1,5 mg
Partikel >10 µm	0 mg	0,8 mg
Schwefeldioxid	-	74,8 mg
NMVO	-	4,4 mg

**Tabelle 7-39: Emissionsdaten der Heizkraftwerke pro MJ<sub>th</sub>**

Die Emissionsdaten und die Angaben zum Nutzungsgrad des Heizkraftwerkes mit Industrierestholz stammen aus GEMIS 4.81 "Holz-Industrieholz-HKW-GD-DE-2010 (IST)/en". Die Aufteilung der Staubemissionen erfolgt wieder nach [Wolff 2004] (Elektrofilter). Der in BioEnergieDat enthaltene Datensatz wird nicht benutzt, da in der neuen GEMIS 4.81 Version aktuellere Daten enthalten sind.

Die Emissionsdaten des Heizkraftwerkes mit Waldrestholz stammen aus [Briem et al. 2004]. Die Aufteilung des Staubes erfolgt nach [Wolff 2004], wobei ein Multizyklon, Elektrofilter und Rauchgaskondensator zum Einsatz kommen.

### 7.5.6 Holzvergaser- Blockheizkraftwerk

Die Prozesskette für das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk wird im Wesentlichen aus GEMIS 4.6 übernommen.

Es erfolgt eine Unterteilung der Prozesskette in zwei Hauptprozesse: Die Vergasung und die Nutzung des Holzgases im Blockheizkraftwerk, wie in Abbildung 7-18 gezeigt wird.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

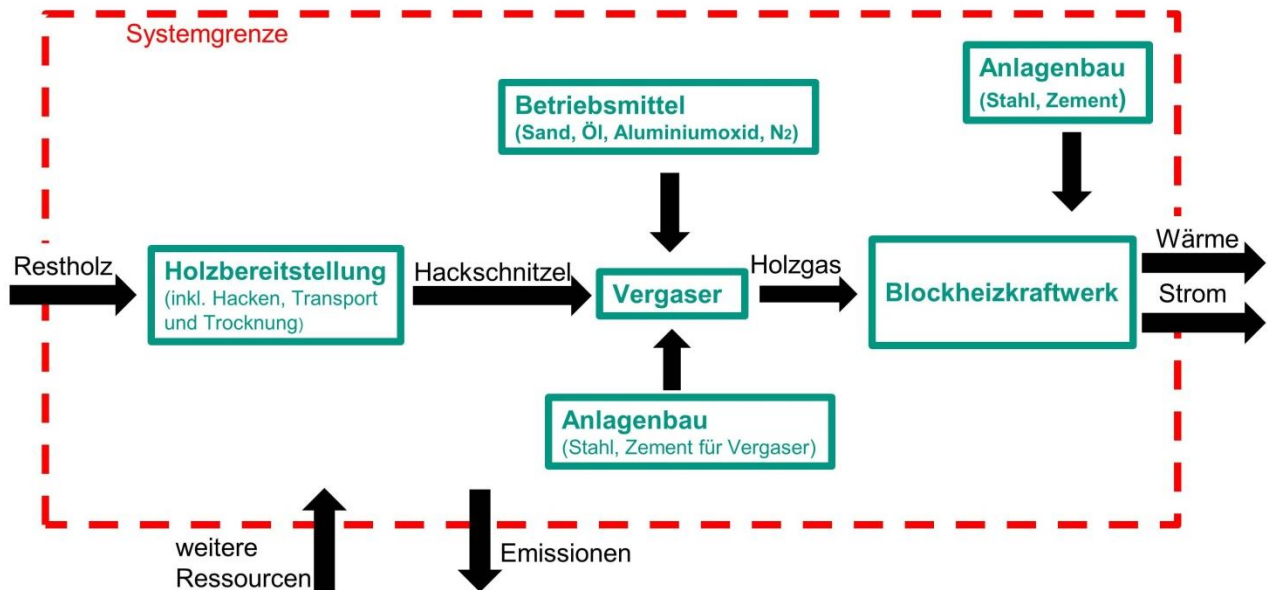


Abbildung 7-18: Schematische Darstellung: Prozesskette Holzvergaser- Blockheizkraftwerk

Der Vergaser arbeitet mit einer atmosphärischen zirkulierenden Wirbelschicht- Vergasung (wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben). Er hat eine Leistung von 9,36 MW. Die Prozesskette ist angelehnt an eine Referenzanlage von Fraunhofer UMSICHT in Oberhausen (Deutschland). Nach der Vergasung wird das Gas für die nachfolgende Nutzung mit Hilfe eines katalytischen Teereformers und eines Gewebefilter aufbereitet, um ein teearmes und entstaubtes Produktgas zu erhalten. Dafür wird als Reinigungsmedium Stickstoff benötigt. Der Vergaser kann Waldrestholzhackschnitzel mit einem Wassergehalt zwischen 15 und 25 Prozent verarbeiten. Schließlich wird das Gas im Blockheizkraftwerk mit 1 MW elektrischer Leistung umgesetzt [GEMIS 4.6].

Die technischen Daten der beiden Anlagenteile sind in Tabelle 7-40 zusammengefasst. Hier wird mit den mittleren Volllaststunden für die Verwendung des Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes im Netz gearbeitet.

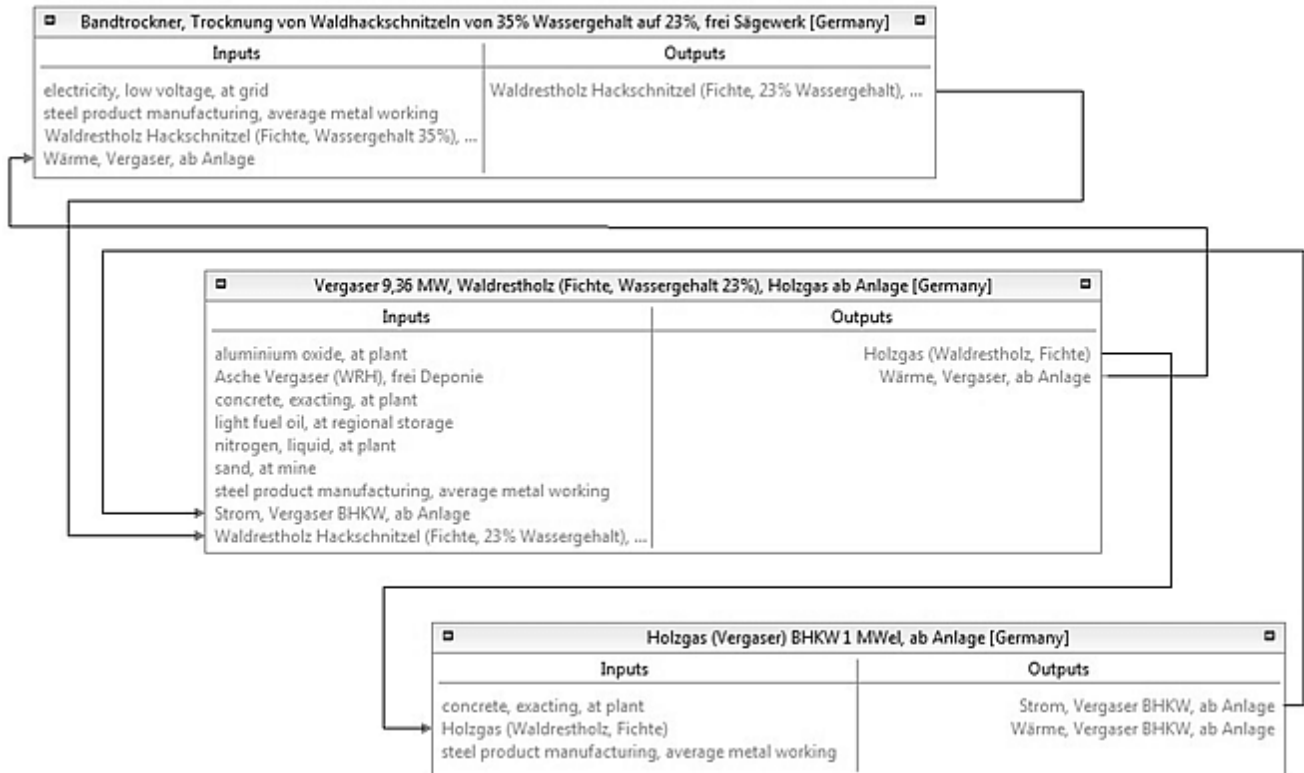
	<b>Vergaser</b>	<b>BHKW</b>
Leistung ( $P_{\text{Vergaser}}$ bzw. $P_{\text{el, BHKW}}$ )	9,36 MW	1 MW <sub>el</sub>
Volllaststunden ( $h_{\text{Volllast, Vergaser}}$ bzw. $h_{\text{Volllast, BHKW}}$ )	2.570 h/a	6.570 h/a
Gasnutzungsgrad ( $\eta_{\text{Gas}}$ )	78%	-
Lebensdauer Vergaser ( $LD_{\text{Vergaser}}$ ) bzw. BHKW ( $LD_{\text{BHKW}}$ )	15 Jahre	20 Jahre
Elektrischer Nutzungsgrad ( $\eta_{\text{el}}$ )	-	35% (netto)
Spezifischer Strombedarf ( $W_{\text{el, spez, Vergaser}}$ )	0,029167 MJ <sub>el</sub> / MJ <sub>Gas</sub>	-
Wassergehalt ( $w_{\text{WRH, Vergaser}}$ )	0,23	-
Heizwert $H_{u, \text{WRH, 23\% w}}$	13,9 MJ/ kg	-
Heizwert Holzgas ( $H_{u, \text{Holzgas}}$ )	-	4,34 MJ/Nm <sup>3</sup>
Spezifische Betonmenge ( $m_{\text{Beton, spez, Vergaser}}$ bzw. BHKW)	641.026 kg/ MW	200.000 kg/MW
Dichte Beton ( $\rho_{\text{Beton}}$ )		2.300 kg/ m <sup>3</sup>
Spezifische Stahlmenge ( $m_{\text{Stahl, spez, Vergaser}}$ bzw. BHKW)	21367,5 kg/ MW	20.000 kg/MW

Tabelle 7-40: Technische Daten des Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes [GEMIS 4.6]

Die Prozesskette (ohne Waldrestholzbereitstellung, Transporte, Ascheentsorgung und Hintergrundprozesse) in openLCA zeigt Abbildung 7-19.



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 7-19: Prozesskette Holzvergaser- Blockheizkraftwerk**

Bevor das Waldrestholz im Vergaser umgesetzt werden kann muss es zunächst von einem Wassergehalt von 35 Prozent auf einen Wassergehalt von 23 Prozent getrocknet werden. Dafür kommt ein Bandrockner zum Einsatz wie er bereits bei der Pelletbereitstellung in Kapitel 7.4.3 gezeigt wurde. Dieser Trockner kann mit der Abwärme aus dem Vergaser betrieben werden.

Die Menge des zur Vergasung benötigten Sandes und des Aluminiumoxids, sowie des Stickstoffes für die Staubabscheidung und des leichten Heizöls stammen aus GEMIS 4.6. Leider sind hier keine ausführlichen Daten zum Anlagenbau enthalten, so dass nur allgemein mit einer Beton- und Stahlmenge gerechnet werden kann.

Der für den Vergaser benötigte Eigenstrombedarf wird über den selber erzeugten Strom des Blockheizkraftwerkes gedeckt.

In Tabelle 7-41 werden die Inputs und Outputs des Prozesses „Vergaser 9,36 MW, Waldrestholz (Fichte, Wassergehalt 23%), Holzgas ab Anlage“ gezeigt.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

	<b>Bezeichnung</b>	<b>Formel</b>	<b>Wert</b>
<b>Input</b>	<i>Betonmenge</i>	$\frac{m_{\text{Beton, spez, Vergaser}} * P_{\text{Vergaser}}}{h_{\text{Vollast, Vergaser}} * P_{\text{Vergaser}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}} * LD_{\text{Vergaser}} * \eta_{\text{Gas}} * \rho_{\text{Beton}}}$	2,5*10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup>
		$\frac{m_{\text{Stahl, spez, Vergaser}} * P_{\text{Vergaser}}}{h_{\text{Vollast, Vergaser}} * P_{\text{Vergaser}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}} * LD_{\text{Vergaser}} * \eta_{\text{Gas}}}$	
	<i>Stahlmenge</i>	$\frac{m_{\text{Stahl, spez, Vergaser}} * P_{\text{Vergaser}}}{h_{\text{Vollast, Vergaser}} * P_{\text{Vergaser}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}} * LD_{\text{Vergaser}} * \eta_{\text{Gas}}}$	0,2 g
	<i>Aluminiumoxid</i>	-	20 mg
	<i>Stickstoff, flüssig</i>	-	120 mg
	<i>Heizöl, leicht</i>	-	60 mg
	<i>Sand</i>	-	1,78 g
	<i>Asche, zur Deponie</i>	-	1,14 g
	<i>Waldrestholz Hackschnitzel (Fichte, Wassergehalt 23%), frei Vergaser</i>	$\frac{1}{\eta_{\text{Gas}} * 1\text{MJ} * H_{\text{u, WRH, 23\%w}}}$	922,3 g
	<i>Strom</i>	-	0,029 MJ <sub>el</sub>
<b>Output</b>	<i>Holzgas</i>	-	1 MJ
	<i>Wärme</i>	-	0,17436 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-41: Inputs und Outputs des Vergasers pro MJ<sub>Holzgas</sub> [GEMIS 4.6]**

Die Luftemissionen des Vergasers sind in Tabelle 7-42 zusammengefasst, sie stammen aus GEMIS 4.6 „Vergaser-aZWS+Reinigung\Gas-Waldholz (für BHKW/GT)“.

<i>Kohlendioxid</i>	190,7 g
<i>Kohlenmonoxid</i>	1 mg
<i>Methan</i>	0,2 mg
<i>Lachgas</i>	0,1 mg
<i>Stickoxide</i>	0,5 mg
<i>Staub, allgemein</i>	0,1 mg
<i>Schwefeldioxid</i>	0,6 mg
<i>NMVOC</i>	0,3 mg

**Tabelle 7-42: Emissionsdaten des Vergasers pro MJ<sub>Holzgas</sub> [GEMIS 4.6]**

In Tabelle 7-43 sind die Inputs und Outputs des Prozesses „Holzgas (Vergaser) BHKW 1 MW<sub>el</sub>, ab Anlage“ gezeigt.

	<b>Bezeichnung</b>	<b>Formel</b>	<b>Wert</b>
<b>Input</b>	<i>Beton</i>	$\frac{m_{\text{Beton, spez, BHKW}} * P_{\text{el, BHKW}}}{h_{\text{Vollast, BHKW}} * P_{\text{el, BHKW}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}} * LD_{\text{BHKW}} * \rho_{\text{Beton}}}$	1,8*10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup>
		$\frac{m_{\text{Stahl, spez, BHKW}} * P_{\text{el, BHKW}}}{h_{\text{Vollast, BHKW}} * P_{\text{el, BHKW}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}} * LD_{\text{BHKW}}}$	
	<i>Stahl</i>	$\frac{m_{\text{Stahl, spez, BHKW}} * P_{\text{el, BHKW}}}{h_{\text{Vollast, BHKW}} * P_{\text{el, BHKW}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}} * LD_{\text{BHKW}}}$	42 mg
	<i>Holzgas (Waldrestholz, Fichte)</i>	$\frac{1}{\eta_{\text{el, BHKW}}} * 1\text{MJ}_{\text{Gas}}$	2,86 MJ <sub>Gas</sub>
<b>Output</b>	<i>Strom</i>	-	1 MJ <sub>el</sub>
	<i>Wärme</i>	-	1,314 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-43: Inputs und Outputs des Blockheizkraftwerkes**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Luftemissionen des Blockheizkraftwerkes sind in Tabelle 7-44 zusammengefasst und werden aus GEMIS 4.6 „Holzgas-aZWS-Waldholz-BHKW-GM 1 MW-2010/brutto“ übernommen.

<i>Kohlenmonoxid</i>	38,9 mg
<i>Methan</i>	5,7 mg
<i>Lachgas</i>	4,8 mg
<i>Stickoxide</i>	188 mg
<i>Staub, allgemein</i>	4,8 mg
<i>Schwefeldioxid</i>	0,1 mg
<i>NMVOC</i>	3,6 mg

**Tabelle 7-44: Emissionsdaten des Blockheizkraftwerkes pro MJ<sub>th</sub> (nicht allokiert) [GEMIS 4.6]**

Insgesamt können Vergaser und Blockheizkraftwerk nach Abzug der zur Holz Trocknung benötigten Wärme 1,6 MW<sub>th</sub> bereitstellen.

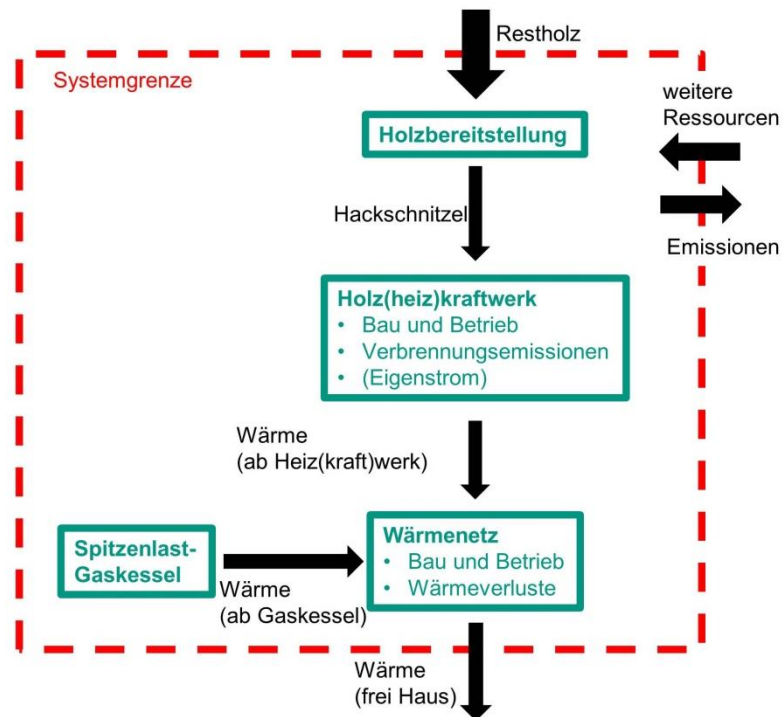
### 7.6 Modellierung der Wärmenetze

Nachdem in den Kapiteln 7.4 und 7.5 die Modellierung der Biomassebereitstellung und der Konversionsanlagen gezeigt wurde, erfolgt nun eine Erweiterung der Systemgrenze um die Wärme beim Endverbraucher bilanzieren zu können.

In diesem Kapitel wird zunächst in Kapitel 7.6.1 auf die Modellierung der Wärmenetzinfrastruktur für die verschiedenen semi- zentralen Netze eingegangen. Danach wird in Kapitel 7.6.2 der zentrale Vergleichsfall beschrieben.

#### 7.6.1 Modellierung der semi- zentralen Wärmenetze

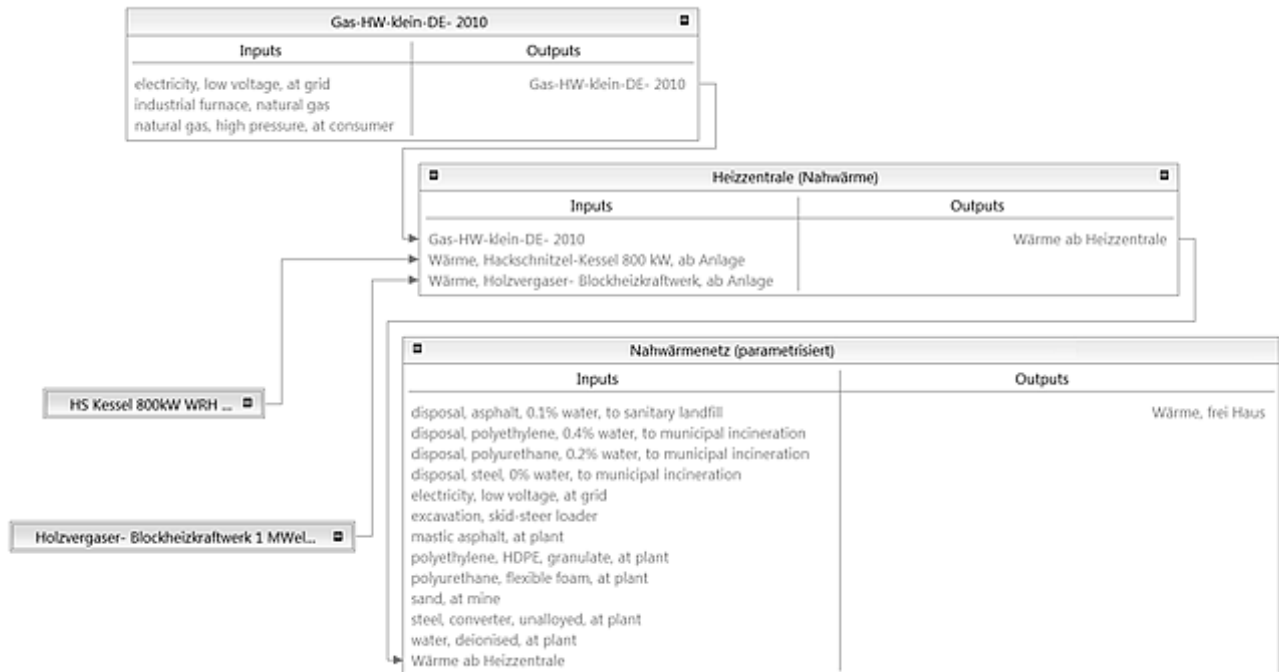
Eine schematische Darstellung der Prozesskette für die semi- zentrale Wärmebereitstellung zeigt Abbildung 7-20. Die gesamte Prozesskette besteht, wie auch in Kapitel 6.1 gezeigt, aus der Holzbereitstellung, den Konversionsanlagen und der Verteilung der Wärme über das Wärmenetz.



**Abbildung 7-20: Schematische Darstellung der Prozesskette mit (semi-) zentralem Wärmenetz**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Prozesskette in openLCA ist in Abbildung 7-21 gezeigt. Sie sieht für alle Varianten des semi- zentralen Wärmenetzes gleich aus. Neben der Wärmebereitstellung aus Holzreststoffen (gezeigt in Kapitel 6.3) wird ein Gasspitzenlastkessel benötigt. Die Aufteilung der Wärme auf die verschiedenen Konversionsanlagen erfolgt in der Heizzentrale.



**Abbildung 7-21: Prozesskette semi- zentrales Wärmenetz (allgemein)**

Allgemein müssen für die Modellierung in openLCA die abgenommene Nahwärme ab Hausübergabestation ( $Q_{ab\ HÜS}$ ) und Wärmeverluste (aus RDesign), der Strombedarf ( $W_{el, pro\ Jahr}$ ) (aus RDesign), die Aufteilung in Grund- und Spitzenlast (aus WDesign) und die Stahlmasse ( $m_{Stahl}$ ), die Wassermasse ( $m_{H_2O}$ ), die Masse an Polyethylen hoher Dichte ( $m_{HDPE}$ ), die Masse an Polyurethan ( $m_{PUR}$ ), die Sandmasse ( $m_{Sand}$ ), der Aushub ( $V_{Aushub}$ ) und die Asphaltmasse ( $m_{Asphalt}$ ) (aus Excel) übernommen werden. Die Auslegung der Wärmenetze, der Wärmeerzeuger und die Berechnung der Materiallisten wurde in Kapitel 5 gezeigt.

Zusätzlich werden die Lebensdauer des Netzes ( $LD_{Netz}$ ) mit 35 Jahren nach [RDesign] und die Lebensdauer der Hausübergabestationen ( $LD_{HÜS}$ ) mit 20 Jahren nach [Miekley 2012] angesetzt. Da davon ausgegangen werden kann, dass das Wärmenetz im Betrieb kontinuierlich kleinere Menge Wasser verliert, muss dieser Wasserverlust durch Frischwasser ausgeglichen werden. Dieser wird mit 10 Prozent abgeschätzt. Die Inputs und Outputs des Prozesses an Baumaterialien, Betriebsmittel (Wärme ab Heizzentrale, Strom und Wasser) sowie die Aushubarbeiten des allgemeinen, parametrisierten Prozesses „Nahwärmenetz“ werden in Tabelle 7-45 gezeigt. Dieselbe Menge an Material wie zum Bau benötigt wird, muss jeweils auch am Ende der Lebensdauer des Netzes entsorgt werden.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

	Bezeichnung	Formel bzw. Wert
Input	Strom	$\frac{Q_{el}}{Q_{ab\ HÜS}}$
	Asphalt	$\frac{m_{Asphalt}}{Q_{ab\ HÜS} * LD_{Asphalt}}$
	Aushub	$\frac{V_{Aushub}}{Q_{ab\ HÜS} * LD_{Netz}}$
	HDPE	$\frac{m_{HDPE\ bzw.\ Sand\ bzw.\ PUR}}{Q_{ab\ HÜS} * LD_{Netz}}$
	Sand	
	PUR	
	Stahl	$\frac{1}{Q_{ab\ HÜS}} * \left( \frac{m_{Stahl,Netz}}{LD_{Netz}} + \frac{m_{Stahl,HÜS}}{LD_{HÜS} * \eta_{HÜS}} \right)$
	Wasser	$\frac{m_{H_2O} * (1 + V_{Wasser})}{Q_{ab\ HÜS} * LD_{Netz}}$
	Wärme ab Heizzentrale	$I + Q_{Verlust}$
	Output	Wärme, frei Haus

Tabelle 7-45: Inputs und Outputs des Prozesses „Nahwärmenetz“ pro MJ

Zusätzlich wird ein Spitzenlastgaskessel mit 1 MW ( $P_{th}$ ) benötigt, dieser wird aus GEMIS 4.81 („Gas-HW-klein-DE-2010“) entnommen und um den Anlagenbau und die Gasbereitstellung aus ecoinvent v2.2 ergänzt.

Die Lebensdauer des Gaskessels ( $LD_{Gas}$ ) beträgt 15 Jahre, seine Auslastung liegt bei den semi- zentralen Wärmenetzen im Mittel bei 1.000 Vollaststunden pro Jahr ( $h_{Vollast}$ ) und der thermische Nutzungsgrad ( $\eta_{th}$ ) ist 87,5 Prozent. Seine Inputs und Outputs sind in Tabelle 7-46 zu sehen.

	Bezeichnung	Formel	Wert
Input	Industrial furnace, natural gas	$\frac{1\text{Stück}}{LD_{Gas} * h_{Vollast} * P_{th} * 3600 \frac{MJ}{MWh}}$	$1,85 * 10^{-8}$ Stück
	Natural gas, high pressure, at costumer	$\frac{1}{\eta_{th}} * 1MJ$	1,143 MJ
	Strom	-	0,02 MJ <sub>el</sub>
Output	Wärme	-	1 MJ
	Kohlendioxid, fossil	-	63,85 g
	Kohlenmonoxid, fossil	-	23,95 mg
	Lachgas	-	1,15 mg
	Methan, fossil	-	5,74 mg
	NMVO	-	5,74 mg
	Schwefeldioxid	-	0,46 mg
	Staub, allgemein	-	0,16 mg
	Stickoxide	-	63,87 mg

Tabelle 7-46: Inputs und Outputs des Gaskessels 1 MW pro MJ

### 7.6.2 Modellierung des zentralen Wärmenetzes

Als zentraler Vergleichsfall wird ein Wärmenetz modelliert, das dem real bestehenden Wärmenetz im Scharnhäuser Park bei Stuttgart ähnlich ist.

Das Wärmenetz im Scharnhäuser Park versorgte Ende 2010 etwa 7.500 Einwohner auf über 150 Hektar und mit über 600 Hausübergabestationen in Appartementblocks, Reihenhäusern, Einfamilienhäusern, Geschäften und öffentlichen Einrichtungen mit Wärme [Erhart et al. 2011], [Ben Hassine, Eicker 2011]. Genutzt wird ein erdverlegtes, vermaschtes Wärmenetz mit einer Länge von etwa 13,5 Kilometern, wobei die Verbraucher

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

indirekt (also über Wärmetauscher) an das Netz angeschlossen sind [Ben Hassine, Eicker 2011]. Das Wärmenetz wird versorgt durch eine wärmegeführte ORC- Anlage mit 1 MW<sub>el</sub> (6,26 MW<sub>th</sub>) und zwei Spitzenlastgaskessel mit 5 bzw. 10 MW<sub>th</sub>. Über 80 Prozent der Wärme im Netz stammt aus der ORC- Anlage [Strzalka et al. 2010]. Nach [Fink 2007] werden jährlich etwa 37.000 MWh benötigt, wobei davon 30.601 MWh durch die ORC- Anlage bereitgestellt werden.

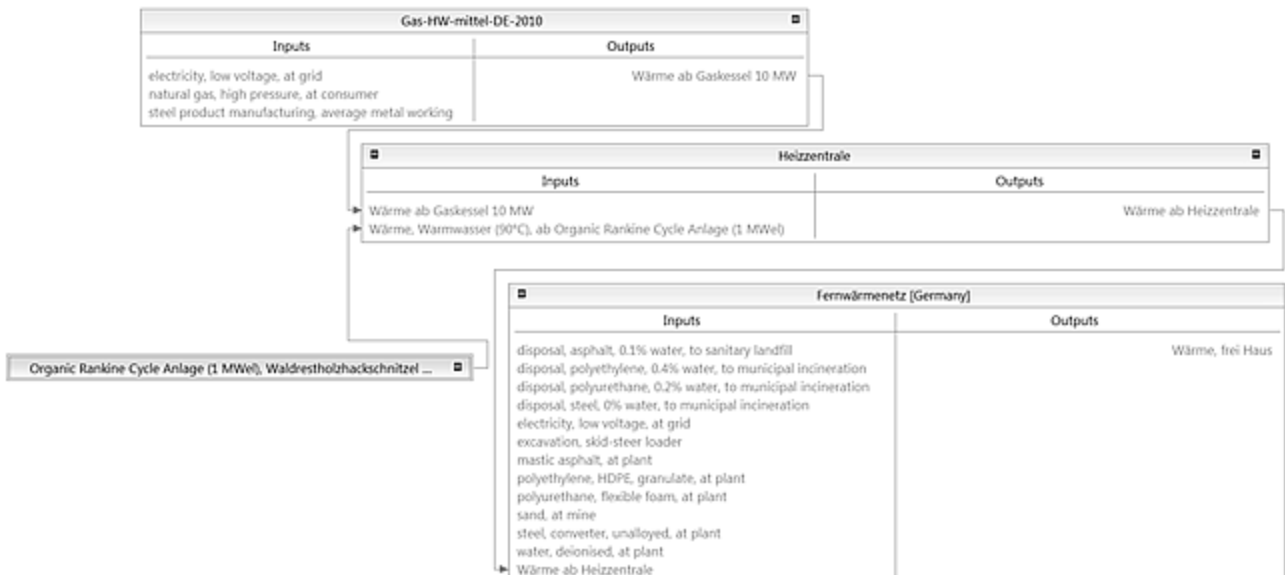
Die weiteren Netzparameter sind in Tabelle 7-47 zusammengefasst.

Netzparameter	Eigenschaft	Quelle
Rohrleitungstyp	Kunststoffmantelrohr, einfach isoliert von logstor	nach [Fink 2007]
Länge des Netzes	13,5 km	nach [Ben Hassine, Eicker 2011]
Verwendete Durchmesser	DN25 bis DN300	nach [Fink 2007]
Volumen	280 m <sup>3</sup>	nach [Fink 2007]
Netzpumpen	3 x 18,5 kW	nach [Fink 2007]
Maximallast	16 MW	nach [Fink 2007]
Vorlauftemperatur	70 bis 90°C	nach [Fink 2007]
Wärmeverluste	13%	[Ben Hassine, Eicker 2011]
Strombedarf für Netzpumpen	35,6 MWh/a	[Ben Hassine, Eicker 2011]

**Tabelle 7-47: Netzparameter Scharnhäuser Park**

Die Modellierung in dieser Arbeit erfolgt nach den oben genannten Netzparametern, wobei als Wärmeerzeuger eine 1 MW<sub>el</sub> ORC- Anlage mit Waldrestholz hackschnitzeln und als Spitzenlast ein 10 MW (P<sub>th</sub>) Gaskessel eingesetzt werden. Der Gesamtwärmebedarf pro Jahr von 37.700 MWh wird in der Heizzentrale so aufgeteilt, dass 30.600 MWh durch die ORC- Anlage und der restliche Bedarf durch den Gaskessel gedeckt werden.

Die Prozesskette des zentralen Wärmenetzes ist in Abbildung 7-22 gezeigt. Sie unterteilt sich in die bereits in Kapitel 7.5.4 gezeigte Modellierung der ORC- Anlage, die Modellierung der Heizzentrale, die Modellierung des Spitzenlastgaskessels und die Modellierung des Wärmenetzes.



**Abbildung 7-22: Prozesskette zentrales Wärmenetz**

Der Prozess „Gas-HW-mittel-DE-2010“ stammt aus GEMIS 4.81 und wird um die Vorkette zur Gasbereitstellung nach ecoinvent v2.2 ergänzt. Die Lebensdauer des Gaskessels (LD<sub>Gas</sub>) beträgt 15 Jahre, seine

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Auslastung liegt nach [Fink 2007] bei 710 Vollaststunden pro Jahr ( $h_{\text{Vollast, th}}$ ) und der thermische Nutzungsgrad ( $\eta_{\text{th}}$ ) ist 90 Prozent. Seine Inputs und Outputs sind in Tabelle 7-48 zu sehen.

	Bezeichnung	Formel	Wert
<b>Input</b>	<i>steel product manufacturing, average metal working</i>	$\frac{3.000 \frac{\text{kg}}{\text{MW}} * P_{\text{th}}}{LD_{\text{Gas}} * h_{\text{Vollast}} * 3600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}} * P_{\text{th}}}$	78 mg
	<i>Natural gas, high pressure, at costumer</i>	$\frac{1}{\eta_{\text{th}}} * 1\text{MJ}$	1,111 MJ
	<i>Strom</i>	-	0,02 MJ <sub>el</sub>
<b>Output</b>	<i>Wärme</i>	-	1 MJ <sub>th</sub>
	<i>Kohlendioxid, fossil</i>	-	62,0796 g
	<i>Kohlenmonoxid, fossil</i>	-	23,284 mg
	<i>Lachgas</i>	-	1,118 mg
	<i>Methan, fossil</i>	-	5,588 mg
	<i>NMVOC</i>	-	5,588 mg
	<i>Schwefeldioxid</i>	-	0,452 mg
	<i>Staub, allgemein</i>	-	0,155 mg
	<i>Stickoxide</i>	-	62,091 mg

**Tabelle 7-48: Inputs und Outputs des Gaskessels 10 MW pro MJ<sub>th</sub>**

Für die Modellierung des zentralen Netzes wird davon ausgegangen, dass die Wassermenge im Netz 280.000 kg (entspricht dem Volumen von 280 m<sup>3</sup>) beträgt und ein Wasserverlust von 10 Prozent ausgeglichen werden muss. Die Lebensdauer des Netzes wird mit 35 Jahren angesetzt. Zum Einsatz kommen Kunststoffmantelrohre der Firma logstor der Dämmserie 1.

Für den Bau des zentralen Wärmenetzes gibt es keine Materiallisten, daher wird die Menge an benötigten Rohren grob abgeschätzt. Eine Untersuchung der semi- zentralen Netze hat ergeben, dass im Mittel 90 Prozent der gesamten Trassenlänge auf die Rohre entfallen, die restlichen 10 Prozent bestehen aus Abzweigern und Reduktionen.

Das Wärmenetz im Scharnhäuser Park hat eine Trassenlänge von 13,5 Kilometern und somit wird hier von einer gesamten Rohrlänge von 24.300 Metern ausgegangen. Anhand einer Karte des Wärmenetzes in [Fink 2007] und GoogleMaps werden die unterschiedlichen Trassenlängen bestimmt. Die Zuleitung von der Heizzentrale bis zum ersten Abzweiger (40 Meter Trassenlänge) wird als Rohr mit dem größten Durchmesser (DN300) angenommen. Alle Ringleitungen (2.675 Meter Trassenlänge) werden mit einem mittleren Durchmesser von DN200 angesetzt. Die Stichleitungen werden als DN100 angenommen und haben eine Trassenlänge von 3.925 Metern. Damit bleiben 5.510 Meter Trassenlänge übrig, die auf der Karte nicht verzeichnet sind. Diese werden als Zuleitungen zu den einzelnen Abnehmern angenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Abnehmer jeweils zur Hälfte aus Mehrfamilienhäusern, die ein Rohr mit DN32 nutzen, und zur anderen Hälfte aus Einfamilienhäusern, die ein Rohr mit DN25 nutzen, angeschlossen sind.

Analog zu der Modellierung der semi- zentralen Wärmenetze wird aus den benötigten Rohrlängen abgeschätzt welche Menge an Stahl, Polyethylen, Polyurethan, Sand und Asphalt benötigt werden und wie viel Aushub anfällt. Wird die Wassermenge über das Volumen der Rohre bestimmt liegt diese mit 271.800 kg nur geringfügig unter der Literaturangabe von 280.000 kg.

Alle weiteren Baumaterialien wie Abzweiger, Muffen und Reduktionen werden vernachlässigt. Bei der Modellierung der semi- zentralen Netze zeigt sich jedoch, dass die Hauptumweltlasten der Wärmebereitstellung für den Endkunden durch die Wärmeerzeugung und die Netzverluste anfallen, so dass der durch die grobe Abschätzung verursachte Fehler nicht zu groß sein dürfte. Zudem machen die Rohre bei den semi- zentralen Netzen jeweils etwa 90 Prozent des Materials aus, nur 10 Prozent entfallen auf die sonstigen Bauteile, womit ihr Einfluss gering ist.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die zur Modellierung verwendeten Daten des zentralen Netzes sind noch einmal in Tabelle 7-49 zusammengefasst.

Eigenschaft	Menge
Asphaltmasse ( $m_{\text{Asphalt}}$ )	637.875 kg
Aushubmenge ( $V_{\text{Aushub}}$ )	6.679 m <sup>3</sup>
Masse an Polyethylen hoher Dichte ( $m_{\text{HDPE}}$ )	45.230 kg
Masse an Polyurethan ( $m_{\text{PUR}}$ )	20.017 kg
Sandmasse ( $m_{\text{Sand}}$ )	5.691.275 kg
Stahlmasse ( $m_{\text{Stahl}}$ )	233.130 kg
Wassermasse ( $m_{\text{H}_2\text{O}}$ )	280.000 kg
Wasserverlust ( $V_{\text{Wasser}}$ )	9,7%
Strombedarf ( $W_{\text{el, pro Jahr}}$ )	35,6 MWh/a
Wärmeverluste ( $Q_{\text{Verlust}}$ )	0,13
Lebensdauer der Asphaltdecke ( $LD_{\text{Asphalt}}$ )	15 Jahre
Lebensdauer des Netzes ( $LD_{\text{Netz}}$ )	30 Jahre
abgenommene Nahwärme ab Hausübergabestation ( $Q_{\text{ab,HÜS}}$ )	37.700 MWh/a

**Tabelle 7-49: Daten des zentralen Wärmenetzes**

Damit ergeben sich für die Modellierung des Prozesses „Fernwärmenetz“ folgende in Tabelle 7-50 gezeigten In- und Outputs.

	Bezeichnung	Formel	Wert
<b>Input</b>	<i>Strom</i>	$\frac{W_{\text{el, pro Jahr}}}{Q_{\text{ab HÜS}}}$	944 mg
	<i>Asphalt</i>	$\frac{m_{\text{Asphalt}}}{Q_{\text{ab HÜS}} * LD_{\text{Asphalt}} * 3.600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}}}$	313 mg
	<i>Aushub</i>	$\frac{V_{\text{Aushub}}}{Q_{\text{ab HÜS}} * LD_{\text{Netz}} * 3.600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}}}$	1,41*10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup>
	<i>HDPE</i>	$\frac{m_{\text{HDPE bzw. Sand bzw. Stahl bzw. PUR}}}{Q_{\text{ab HÜS}} * LD_{\text{Netz}} * 3.600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}}}$	9,52 mg
	<i>Sand</i>		1,2 g
	<i>Stahl</i>		49,1 mg
	<i>PUR</i>		6,1 mg
	<i>Wasser</i>	$\frac{m_{\text{H}_2\text{O}} * (100\% + V_{\text{Wasser}})}{Q_{\text{ab HÜS}} * LD_{\text{Netz}} * 3.600 \frac{\text{MJ}}{\text{MWh}}}$	64,7 mg
	<i>Wärme ab Heizzentrale</i>	$(1 + Q_{\text{Verlust}}) * 1 \text{ MJ}_{\text{th}}$	1,128 MJ <sub>th</sub>
<b>Output</b>	<i>Wärme, frei Haus</i>	-	1 MJ <sub>th</sub>

**Tabelle 7-50: Inputs und Outputs des Prozesses „Fernwärmenetz“ pro MJ<sub>th</sub>**



## 8 Umweltwirkungen und ausgewählte Kosten der holzbasierten Wärmeversorgung

In diesem Kapitel werden die Umweltwirkungen der unterschiedlichen holzbasierten Wärmeversorgungskonzepte betrachtet. Die verschiedenen semi- zentralen Konzepte werden untereinander verglichen und der zentralen und dezentralen Wärmebereitstellung gegenübergestellt. Dazu werden, wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben, verschiedene Wirkungskategorien (Treibhausgase, Versauerung, Eutrophierung, kumulierter Energieaufwand, Sommersmog, Ozonabbau und terrestrische Eutrophierung) verglichen. Teilweise wird auch auf die Ergebnisse der Sachbilanz eingegangen. Um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wird bei allen Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen mit einer exergetischen Allokation gearbeitet, wie sie in Kapitel 4.1.2 beschrieben ist. Zudem wird angenommen, dass die Konversionsanlagen, soweit möglich, ihren Eigenstrombedarf selber decken.

Die Prozessketten der unterschiedlichen Wärmeversorgungskonzepte sind noch einmal in Abbildung 8-1 gezeigt. Dabei ist links in der Abbildung die dezentrale Wärmeversorgung aus Holz und rechts die (semi-) zentrale Wärmeversorgung dargestellt.

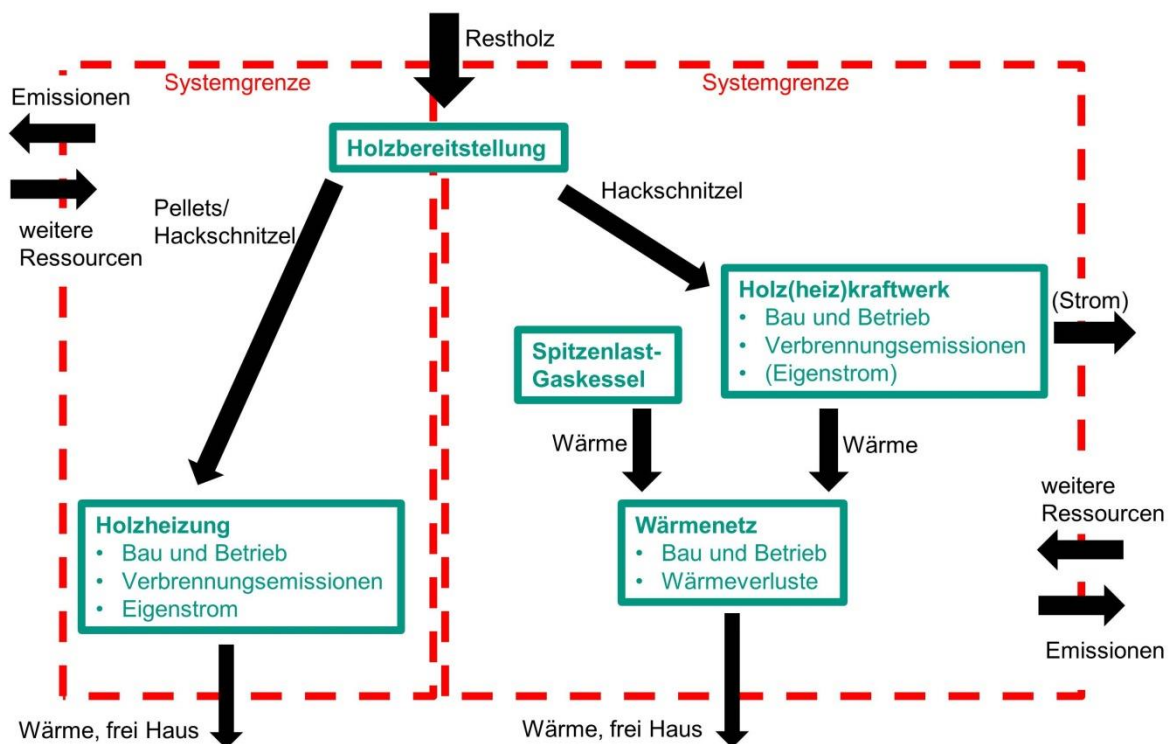


Abbildung 8-1: Prozessketten der Wärmebereitstellung aus Holz

Wie bereits in Kapitel 3.1 ausgeführt, liegt der Unterschied zwischen semi- zentralem und zentralem Netz in der Netzgröße. Bei einem semi- zentralen Netz haben die Wärmeerzeuger eine Leistung von unter  $5 \text{ MW}_{\text{th}}$ , versorgen nicht mehr als 500 Abnehmer und befinden sich in Kundenähe.

Ein Überblick über alle betrachteten Konversionstechnologien und Brennstoffe und ihre Zuordnung zu den unterschiedlichen Wärmebereitstellungskonzepten wurde in Kapitel 7.1 in Tabelle 7-1 bereits gegeben.

Im Folgenden werden zunächst in Kapitel 8.1 die Umweltauswirkungen der Bereitstellung der unterschiedlichen Holzbrennstoffe gezeigt. Diese sind unabhängig von der Art der Wärmebereitstellung. Anschließend wird in Kapitel 8.2 auf die Umweltwirkungen der dezentralen Wärmeversorgung aus Holz

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

eingegangen und diese mit der dezentralen Gasnutzung verglichen. Kapitel 8.3 zeigt die Umweltwirkungen der Wärmeerzeugung im Heiz(kraft)werk. In Kapitel 8.3.1 werden die unterschiedlichen Konversionstechnologien miteinander verglichen. Kapitel 8.3.2 zeigt beispielhaft an der ORC- Anlage wie sensitiv die Umweltwirkungen auf die Deckung des Eigenstrombedarfes und auf die verwendete Allokationsmethode reagieren. Es dient als Begründung dafür warum in dieser Arbeit mit einer exergetischen Allokation gearbeitet wird und warum der Eigenstrom der Anlagen (soweit möglich) selber, und nicht aus dem Stromnetz, gedeckt wird. In Kapitel 8.3.3 wird die Auswirkung der Holzbrennstoffwahl auf die Umweltwirkungen der Konversionsanlagen untersucht und allgemeine Trends zu den Staub-, Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen abgeleitet.

Abschließend beschäftigen sich die Kapitel 8.4 bis 8.6 mit den Umweltwirkungen der gesamten Prozesskette zur (netzbasierten) Wärmebereitstellung. Eine Übersicht über die hierfür untersuchten semi- zentralen Netzvarianten ist in Kapitel 5.1 gezeigt. In Kapitel 8.4 werden die unterschiedlichen semi- zentralen Wärmenetzkonzepte im Hinblick auf ihre Umweltwirkungen und ihre Wärmegestehungskosten untereinander verglichen um den Einfluss der Abnehmergröße, der Rohrart, der Abstände zwischen den Häusern und zur Heizzentrale und der verwendeten Konversionsanlage zu untersuchen. Kapitel 8.5 stellt die semi- zentrale Wärmeversorgung eines Einfamilien- und eines Mehrfamilienhauses der dezentralen Wärmeversorgung gegenüber. Schließlich wird in Kapitel 8.6 am Beispiel einer gemischten Wohnsiedlung gezeigt wie die semi- zentrale Wärmeversorgung gegenüber einer zentralen und einer dezentralen Wärmeversorgung abschneidet.

### 8.1 Umweltwirkungen der Holzbrennstoffbereitstellung

Mögliche Brennstoffe für die Wärmebereitstellung aus Holzreststoffen sind Waldrestholz hackschnitzel, Landschaftspflegeholz hackschnitzel, Industrierestholz hackschnitzel und Pellets aus Industrierestholz. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Bereitstellungsverfahren der Holzsortimente zeigen die Kapitel 2.1.2 bis 2.1.4. Demnach wird das Industrierestholz mit einem stationären elektrischen Hacker zerkleinert, während für die Bereitstellung von Landschaftspflege- und Waldrestholz ein mobiler Dieselhacker zum Einsatz kommt. Für die Pelletherstellung muss das Industrierestholz außerdem noch getrocknet, feinvermahlen und gepresst werden.

Den Prozesskettenabschnitt zur Holzbereitstellung zeigt Abbildung 8-2. Prozesse welche außerhalb der eingezeichneten Systemgrenze liegen werden hier noch nicht betrachtet.

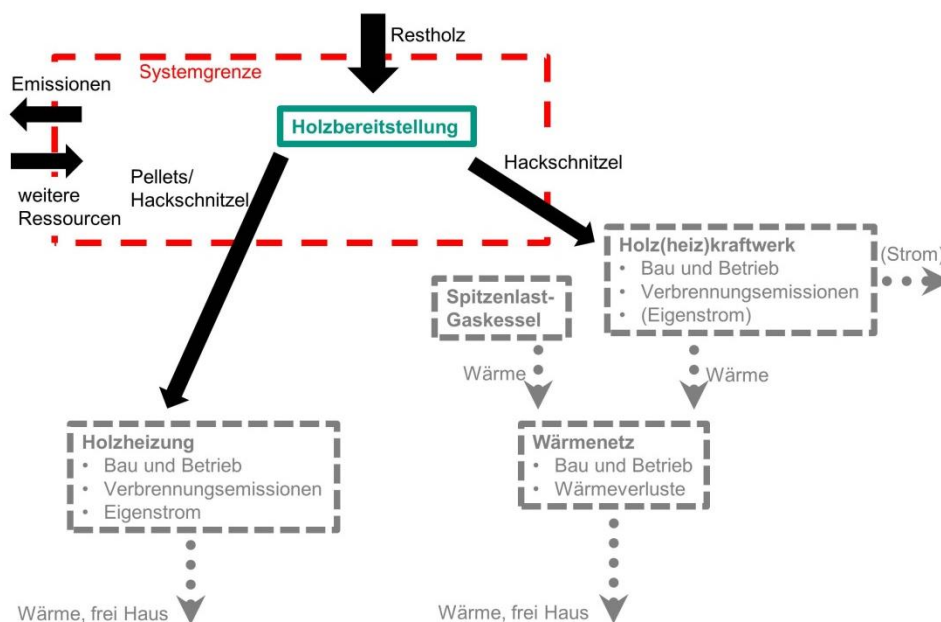
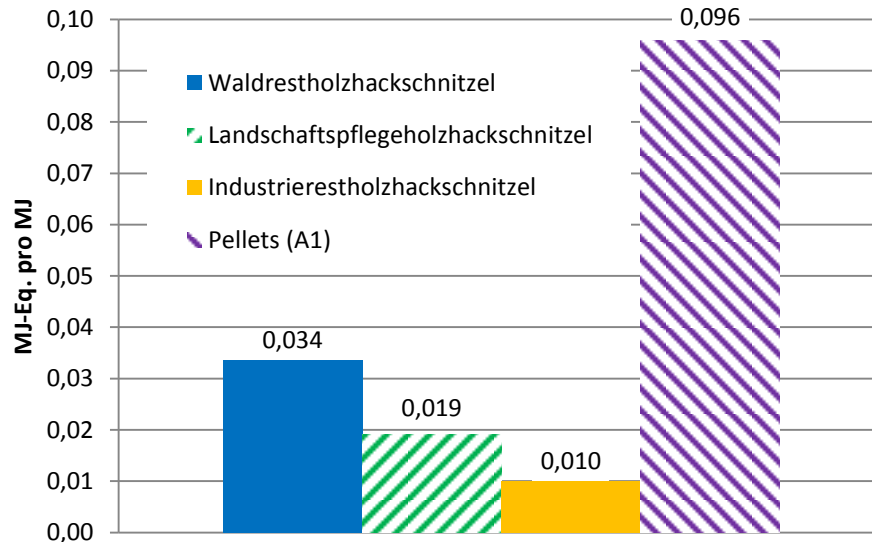


Abbildung 8-2: Prozesskettenabschnitt der Holzbereitstellung

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die verschiedenen Brennstoffsortimente weisen, wie in Kapitel 7.5 (Tabelle 7-22) gezeigt, unterschiedliche Brennstoffeigenschaften auf. Ausschlaggebend für die spätere Nutzung im Kraftwerk ist der jeweilige Heizwert. Daher werden alle Ergebnisse jeweils pro MJ im Holz enthaltene Brennstoffenergie angegeben.

Der kumulierte nicht- regenerative Energieaufwand in Abbildung 8-3 zeigt, dass sehr unterschiedliche Energiemengen benötigt werden, um die verschiedenen Brennstoffsortimente bereitzustellen.

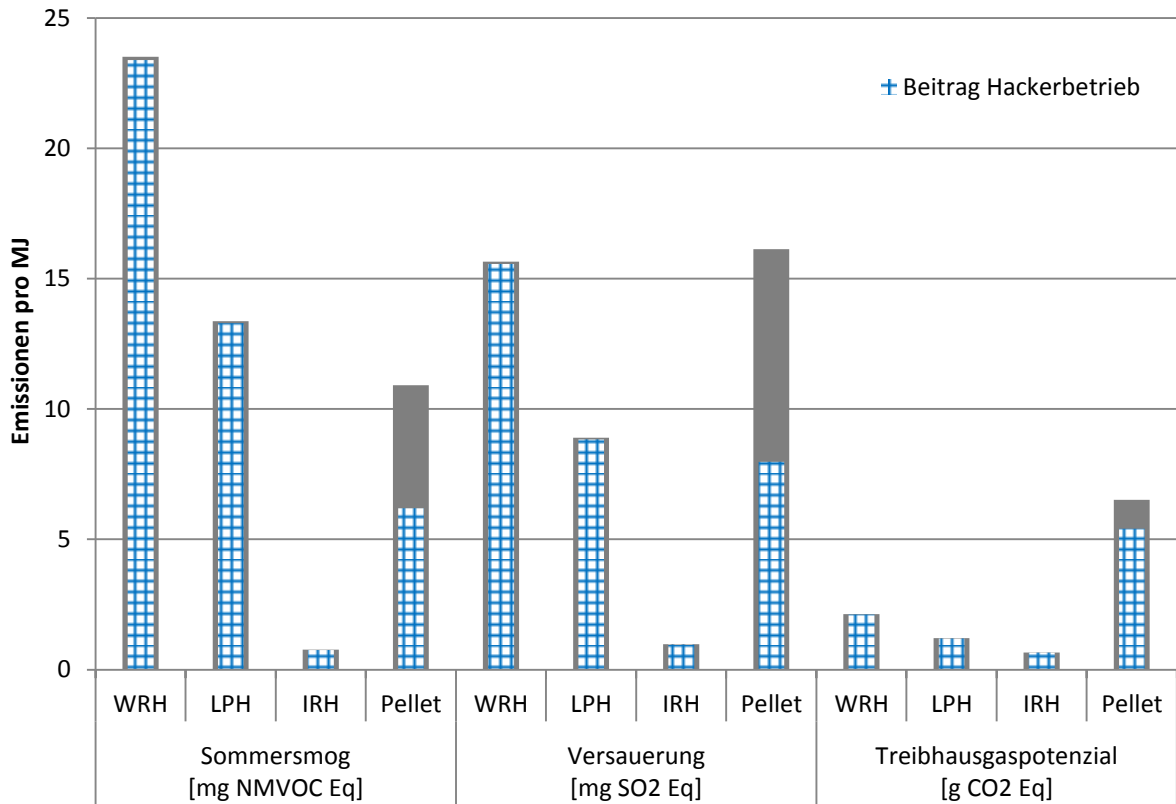


**Abbildung 8-3: Kumulierter nicht- regenerativer Energieaufwand der Holzbereitstellung pro MJ<sub>Holz</sub>**

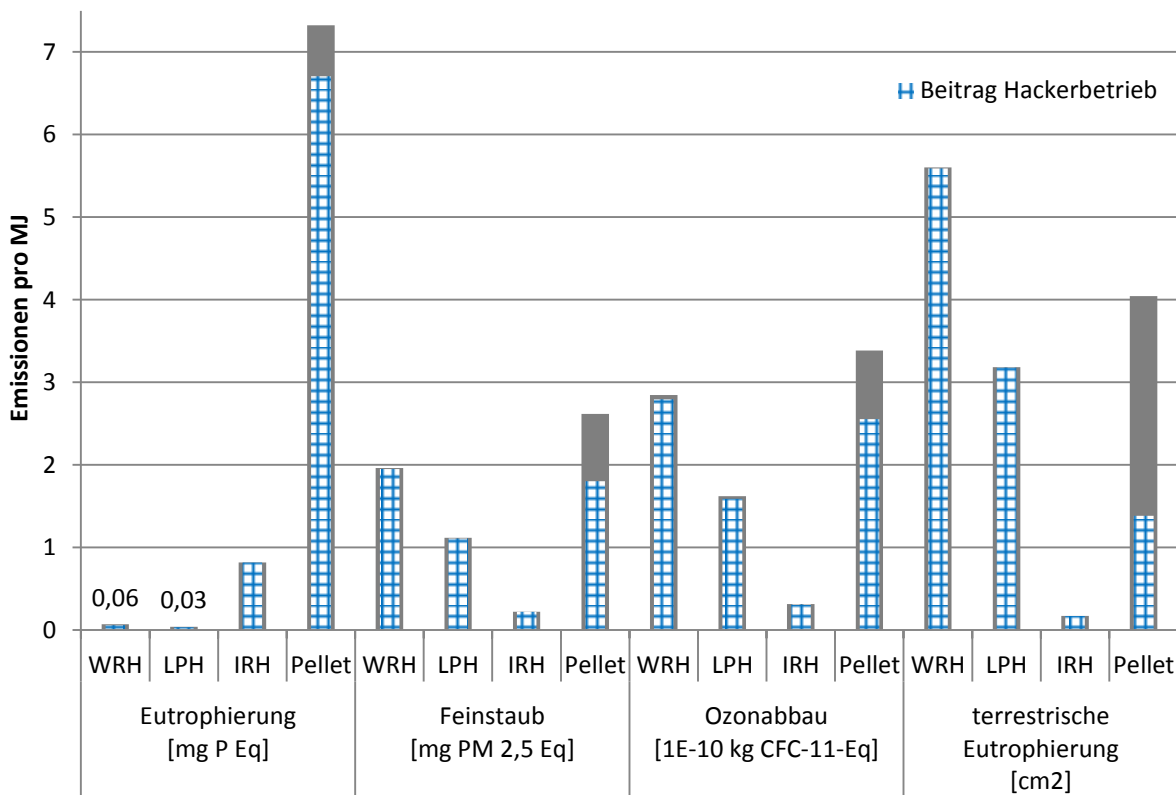
Der geringste Energiebedarf tritt bei der Industrierestholz hackschnitzelbereitstellung mit stationärem Hacker auf. Der Energieaufwand für die Pelletbereitstellung ist deutlich höher, da für die Vermahlung und Pelletierung weiterer Strom benötigt wird. Die Trocknungswärme für die Pelletherstellung wird durch einen Hackschnitzelkessel mit 800 kW unter Nutzung von Waldrestholz bereitgestellt. Würde anstelle des Holzes ein fossiler Brennstoff zum Einsatz kommen, wäre der kumulierte nicht- regenerative Energieaufwand um etwa 0,03 MJ bzw. 30 Prozent höher.

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Wirkungskategorien zeigen Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**



**Abbildung 8-4: Sommermog, Versauerung und Treibhausgase der Holzbereitstellung**



**Abbildung 8-5: Eutrophierung, Feinstaub, Ozonabbau und terr. Eutrophierung der Holzbereitstellung**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Umweltwirkungen der Holzbereitstellung sind fast ausschließlich durch die Nutzung des Dieselhackers (Dieselbereitstellung und Verbrennung) bzw. die Nutzung von konventionellem Strom zum Hacken bestimmt. Eine Ausnahme bildet die Pelletbereitstellung, bei welcher die zur Trocknung der Pellets benötigte Wärme aus dem Hackschnitzelkessel ebenfalls einen großen Einfluss auf die Umweltwirkungen hat.

Treibhausgaspotenzial, Feinstaub, Ozonabbau und Versauerung werden dominiert durch die benötigten Energiemengen. Daher schneiden analog zum kumulierten nicht- regenerativen Energieaufwand die Holzpellets am schlechtesten und die Landschaftspflegeholzhackschnitzel am besten ab. Auf Grund des höheren Sommersmogs und der größeren terrestrischen Eutrophierung bei der Dieselverbrennung gegenüber der Strombereitstellung haben Waldrest- und Landschaftspflegeholzhackschnitzel hier die höheren Emissionen. Vorteilhaft ist das Verwenden von Diesel anstelle von Strom jedoch im Bereich der Eutrophierung.

Derzeit werden alle Umweltauswirkungen aus der Vorkette der Industrierestholzbereitstellung der stofflichen Nutzung des Hauptproduktes zugerechnet. Diese in BioEnergieDat gewählte Vorgehensweise erscheint jedoch auf Grund der hohen Holzbrennstoffpreise aus [C.A.R.M.E.N.] nicht mehr zeitgemäß, so dass den Industrierestholzhackschnitzeln und den Pellets in Zukunft höhere Emissionen zuzurechnen wären.

### 8.2 Umweltwirkungen der Hausheizungen

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Konversionstechnologien zur dezentralen Wärmebereitstellung aus Holz verglichen und der dezentralen Wärmebereitstellung aus Gas gegenübergestellt. Bei den Holzheizungen werden eine Pelletzentralheizung mit 10 kW (Pellet 10 kW) und ein Hackschnitzelkessel mit 50 kW (HS Kessel 50 kW) betrachtet.

Den untersuchten Prozesskettenabschnitt der Holzheizungen zeigt Abbildung 8-6.

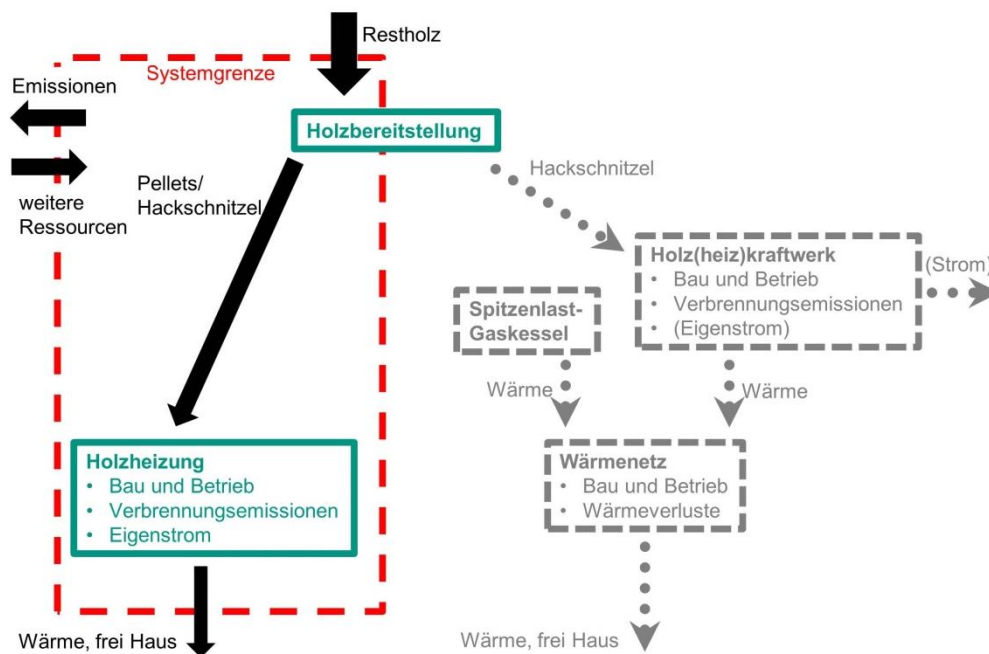


Abbildung 8-6: Prozesskettenabschnitt der Heizung

Nicht in der Abbildung gezeigt sind die beiden für die Vergleiche genutzten Gasheizungen mit 10 bzw. <100 kW. Für den Gaskessel 10 kW (Gas 10 kW) werden die Emissionen des GEMIS 4.81 Prozesses „Gas-Heizung-DE-2010“ mit dem Anlagenbau aus ecoinvent v2.2 („gas boiler“) kombiniert. Der Gaskessel <100 kW (Gas <100 kW) wird aus ecoinvent v2.2 „heat, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW (RER)“ übernommen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Bei der Auswertung der Umweltwirkungen zeigt sich, dass es drei Lebenswegabschnitte gibt, welche hauptsächlich für die Umweltlasten verantwortlich sind. Einer dieser Lebenswegabschnitte ist die Brennstoffbereitstellung (für Holz untersucht in Kapitel 8.1). Die weiteren Lebenswegabschnitte sind: der Eigenstrom und die Verbrennung. Daher werden im Folgenden die Anteile dieser Unterprozesskettenabschnitte an den Umweltwirkungen in den Abbildungen jeweils getrennt ausgewiesen.

### 8.2.1.1 Treibhausgase

Die Treibhausgasemissionen der Anlagen sind in Abbildung 8-7 gezeigt.

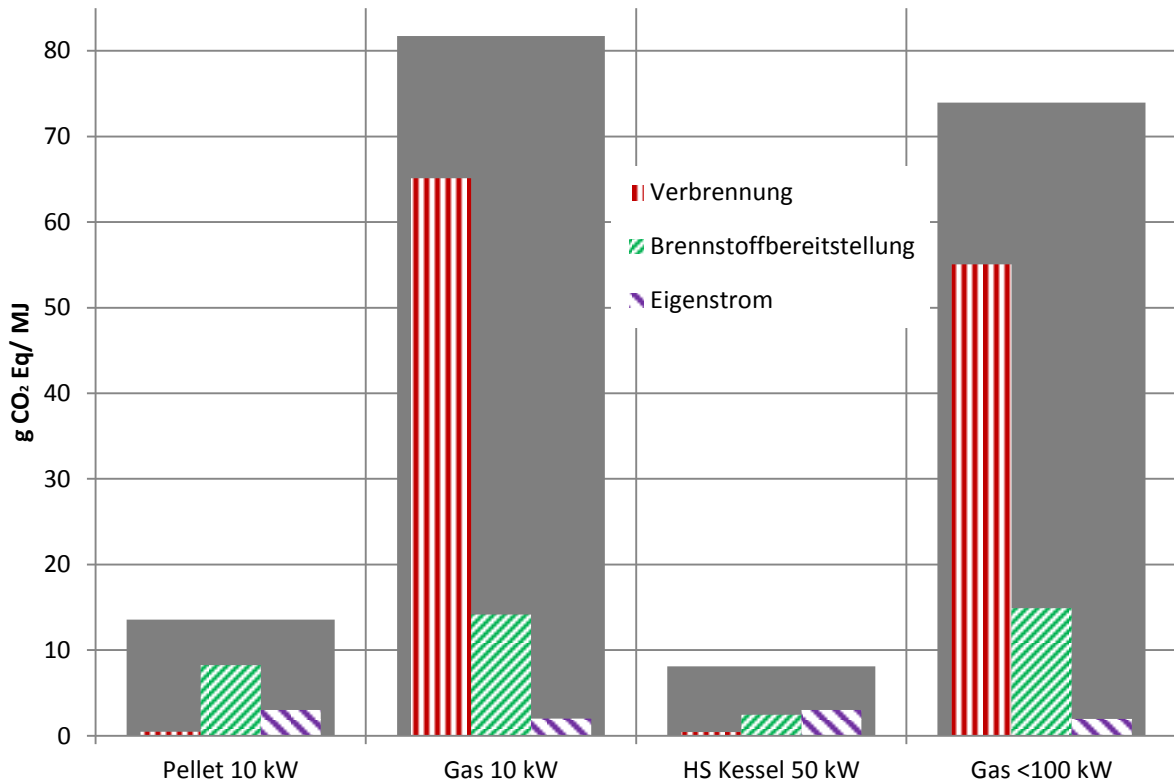


Abbildung 8-7: Treibhausgase der Hausheizungen

Wie in dieser Abbildung zu sehen ist, schneiden die beiden Holzheizungen gegenüber den Gaskesseln bei den Treibhausgasen mindestens 80 Prozent besser ab. Die meisten Treibhausgase entstehen bei der Verbrennung des fossilen Brennstoffes Gas und bei dessen Bereitstellung. Bei den Holzheizungen werden die Treibhausgasemissionen durch den Eigenstrombedarf und die Holzbereitstellung bestimmt. Daher schneidet der Hackschnitzelkessel auf Grund der geringeren Treibhausgasemissionen zur Bereitstellung der Waldrestholzhackschnitzel gegenüber dem Pelletkessel 40 Prozent besser ab.

8.2.1.2 Feinstaub

Die Feinstaubemissionen sind in Abbildung 8-8 aufgetragen.

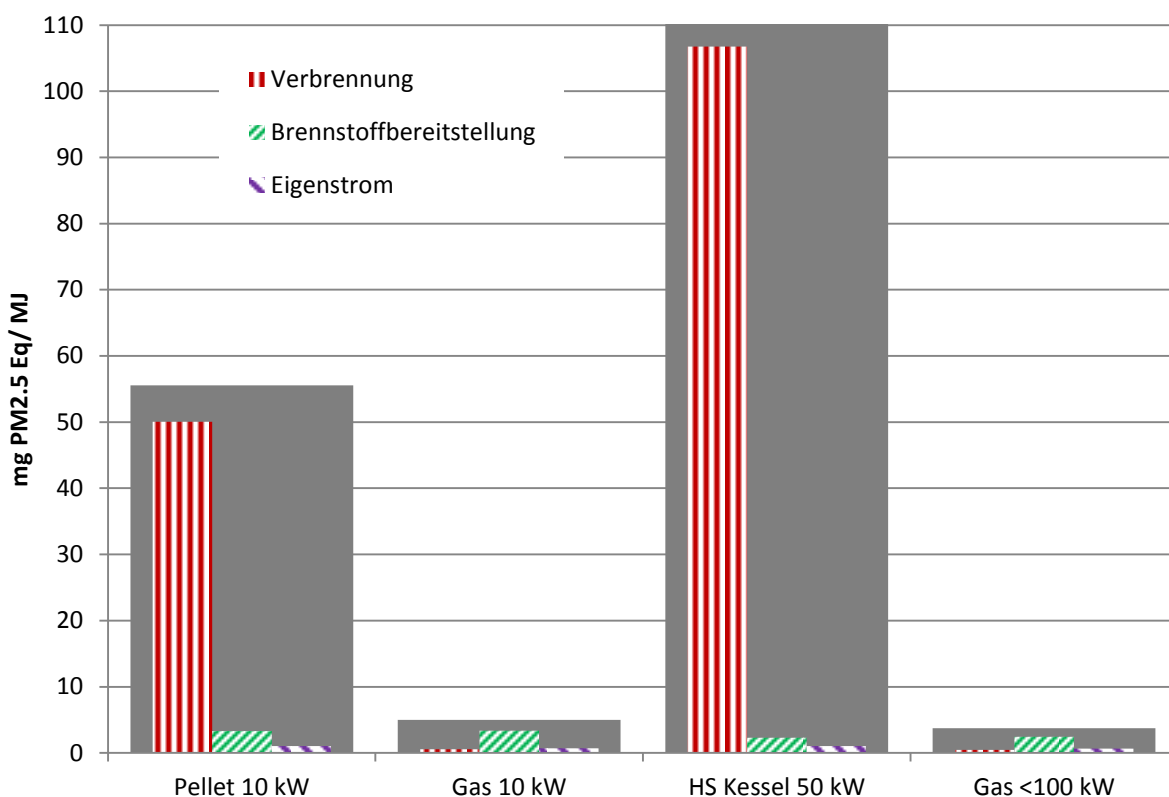


Abbildung 8-8: Feinstaub der Hausheizungen

Im Bereich der Feinstaubemissionen hingegen haben die beiden Holzheizungen die deutlich höheren Umweltlasten als die Gaskessel. Die Feinstaubemissionen der Gasheizungen betragen nur etwa 10 Prozent der Feinstaubemissionen der Holzheizungen. Der Hackschnitzelkessel 50 kW schneidet deutlich schlechter ab als der Pelletkessel, da bei der Verbrennung von Hackschnitzeln etwa doppelt so hohe Staubemissionen auftreten, wie bei der Verbrennung von Holzpellets.

8.2.1.3 Ozonabbau und Eutrophierung

In Abbildung 8-9 wird das Ozonabbaupotenzial und die Eutrophierung gezeigt. Beide Indikatoren hängen nur von der Brennstoffbereitstellung, dem Eigenstrombedarf und dem Bau und Betrieb ab.

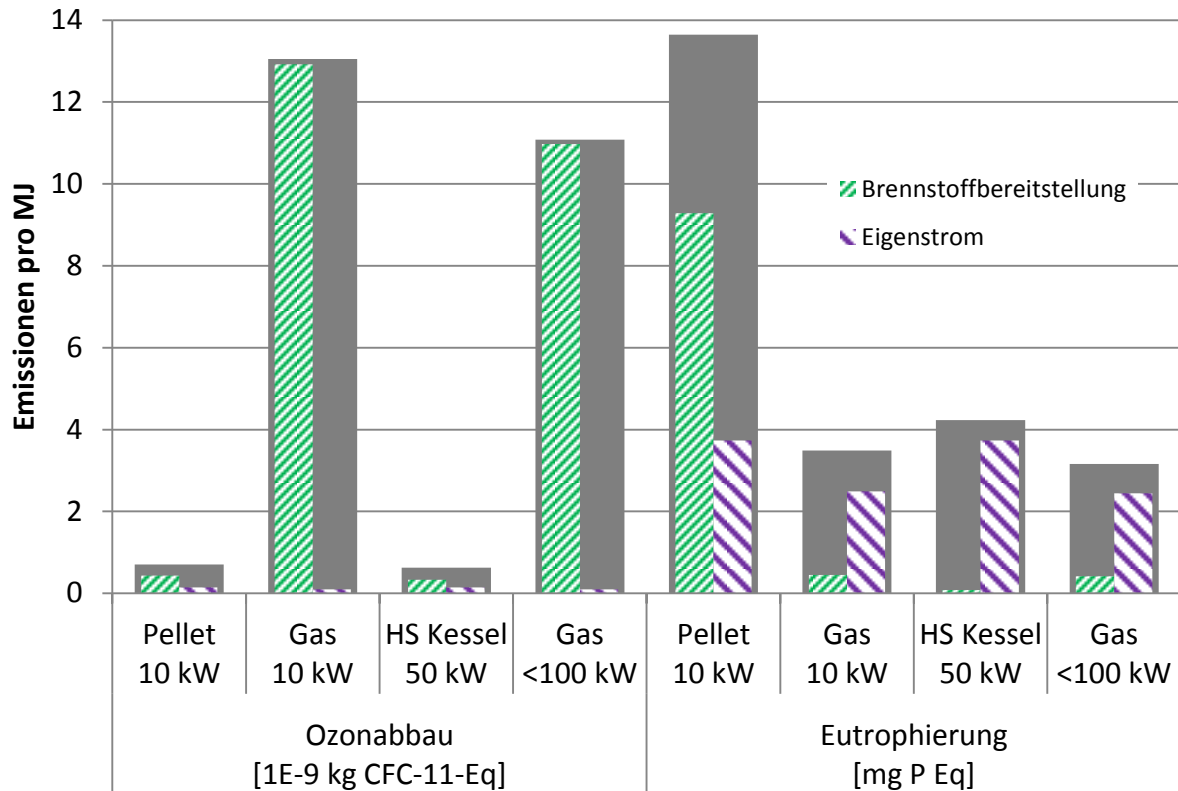


Abbildung 8-9: Ozonabbau und Eutrophierung der Hausheizungen

Die beiden Holzheizungen haben ein achtzehnmal geringeres Ozonabbaupotenzial als die Gaskessel, auf Grund des sehr hohen Ozonabbaupotenzials bei der Gasbereitstellung. Während der Hackschnitzelkessel 50 kW und die beiden Gasheizungen bei der Eutrophierung ähnlich abschneiden, hat der Pelletkessel durch den großen Einfluss der Pelletbereitstellung gegenüber der Gasheizung 10 kW um 290 Prozent höhere Umweltlasten, da hierfür viel Strom benötigt wird.



8.2.1.4 Sommersmog, Versauerung und terrestrische Eutrophierung

Abbildung 8-10 zeigt den Sommersmog, die Versauerung und die terrestrische Eutrophierung.

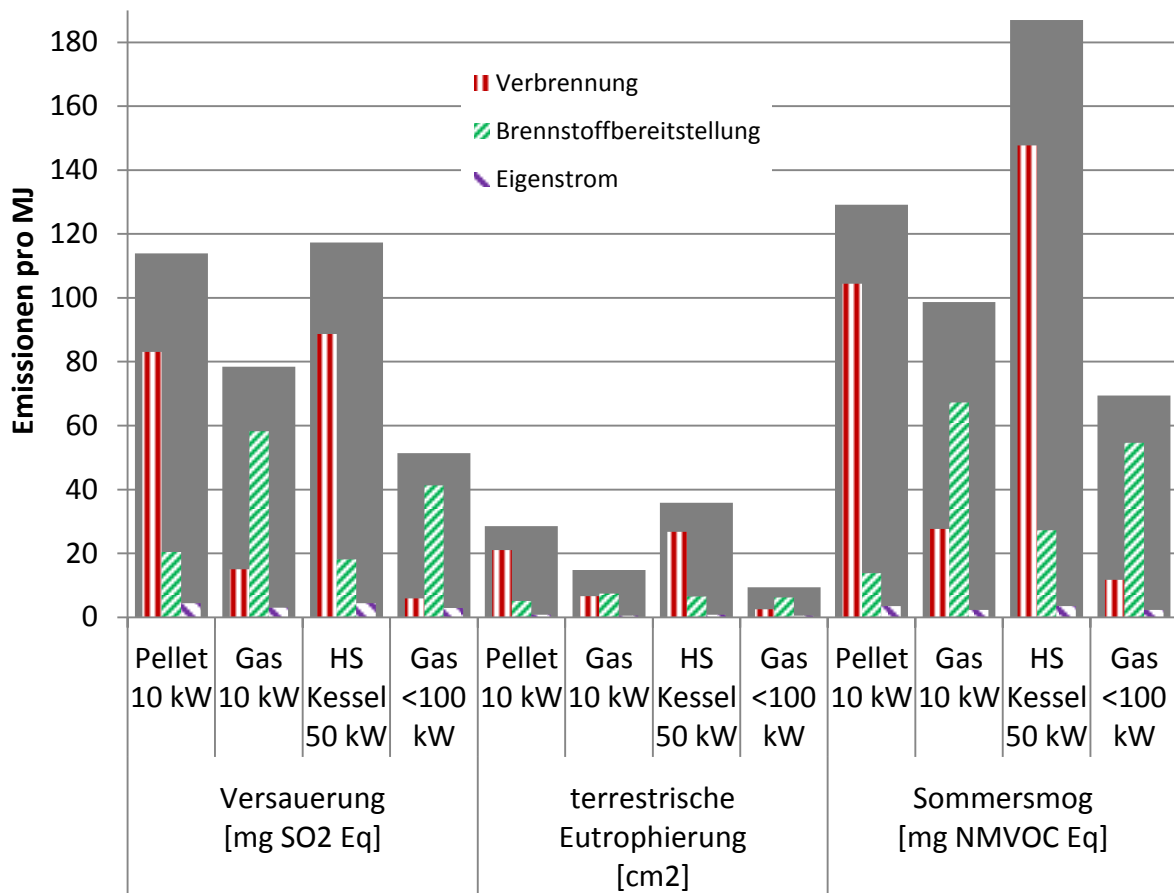


Abbildung 8-10: Versauerung, terrestrische Eutrophierung und Sommersmog der Hausheizungen

Während die Versauerung durch die Holzheizungen von der Holzverbrennung bestimmt wird, stammt bei den Gaskesseln der größte Teil der Umweltlasten aus der Gasbereitstellung. Bei der Versauerung und der terrestrischen Eutrophierung haben die beiden Holzheizungen ähnliche Umweltwirkungen. Bedingt durch die höheren Verbrennungsemissionen verursacht der Hackschnitzelkessel gegenüber der Pelletzentralheizung allerdings mehr Sommersmog.

8.2.1.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die beiden Holzheizungen gegenüber den Gasheizungen einen achtzehnfach geringeren Ozonabbau aufweisen als die Holzheizungen. Zudem haben sie mindestens 80 Prozent weniger Treibhausgasemissionen. Dafür liegen die Umweltwirkungen der Holzheizungen in allen anderen Wirkungskategorien höher. Besonders schlecht schneiden diese bei den Feinstaubemissionen ab. So betragen die Feinstaubemissionen bei den Gasheizungen nur etwa 10 Prozent der Feinstaubemissionen der Holzheizungen.

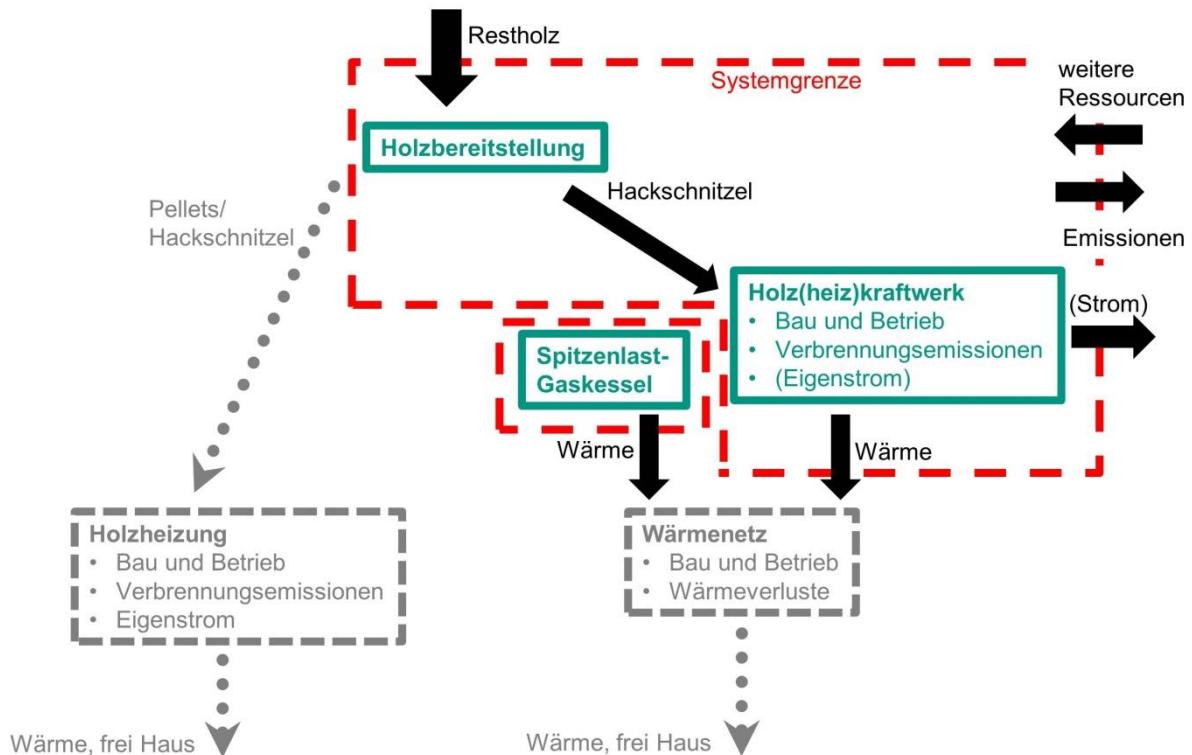
8.3 Umweltwirkungen der Heiz(kraft)werke

In Kapitel 8.3.1 werden die Umweltwirkungen der für die Wärmenetzmodellierung eingesetzten Heiz(kraft)werke pro MJ erzeugte Wärme verglichen. Neben der Wärmebereitstellung aus Holz (genutzt als Grundlast für das Wärmenetz) wird auch auf die Wärmebereitstellung aus Gas (Spitzenlast) kurz eingegangen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Als Holzheiz(kraft)werke für das semi- zentrale Wärmenetz werden das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk (Vergaser- BHKW 1 MW<sub>el</sub>) und der Hackschnitzelkessel mit 800 kW (HS Kessel 800 kW) untersucht, sowie der 1 MW Spitzenlastgaskessel (Gas 1 MW). Für das zentrale Wärmenetz kommen eine ORC- Anlage (ORC- Anlage 1 MW<sub>el</sub>) zum Einsatz und ein Spitzenlastgaskessel mit 10 MW (Gas 10 MW). Alle Holzheiz(kraft)werke werden mit Waldrestholzhackschnitzeln betrieben. Gegenübergestellt wird außerdem die Wärmebereitstellung in einem Dampfturbinen- Heizkraftwerk durch Industrierestholzhackschnitzel (IRH HKW 5 MW<sub>el</sub>), welche ebenfalls bei einem zentralen Wärmenetz zum Einsatz kommen könnte.

Die jeweils untersuchten Prozesskettenabschnitte zeigt Abbildung 8-11.



**Abbildung 8-11: Prozesskettenabschnitt der Wärmebereitstellung im Heiz(kraft)werk**

Im Anschluss daran wird in Kapitel 8.3.2 am Beispiel der ORC- Anlage die Sensitivität der Ergebnisse auf die Verwendung unterschiedlicher Allokationsmethoden und den Wechsel zwischen einer Brutto und einer Netto Betrachtung gezeigt.

In Kapitel 8.3.3 wird darauf eingegangen welchen Einfluss die Nutzung unterschiedlicher Holzbrennstoffe auf die Umweltwirkungen der Konversionsanlagen hat.

### 8.3.1 Umweltwirkungen der Holzheiz(kraft)werke und Gaskessel

Wie bereits in Kapitel 8.2 beschrieben werden auch hier drei Unterprozesskettenabschnitte gezeigt: die Biomassebereitstellung, der Eigenstrom (soweit dieser aus dem Stromnetz gedeckt wird) und die Verbrennung.

8.3.1.1 Kumulierter Energieaufwand

Zunächst wird in Abbildung 8-12 der kumulierte Energieaufwand gezeigt und der Anteil des nicht-regenerativen kumulierten Energieaufwandes wird gezeigt.

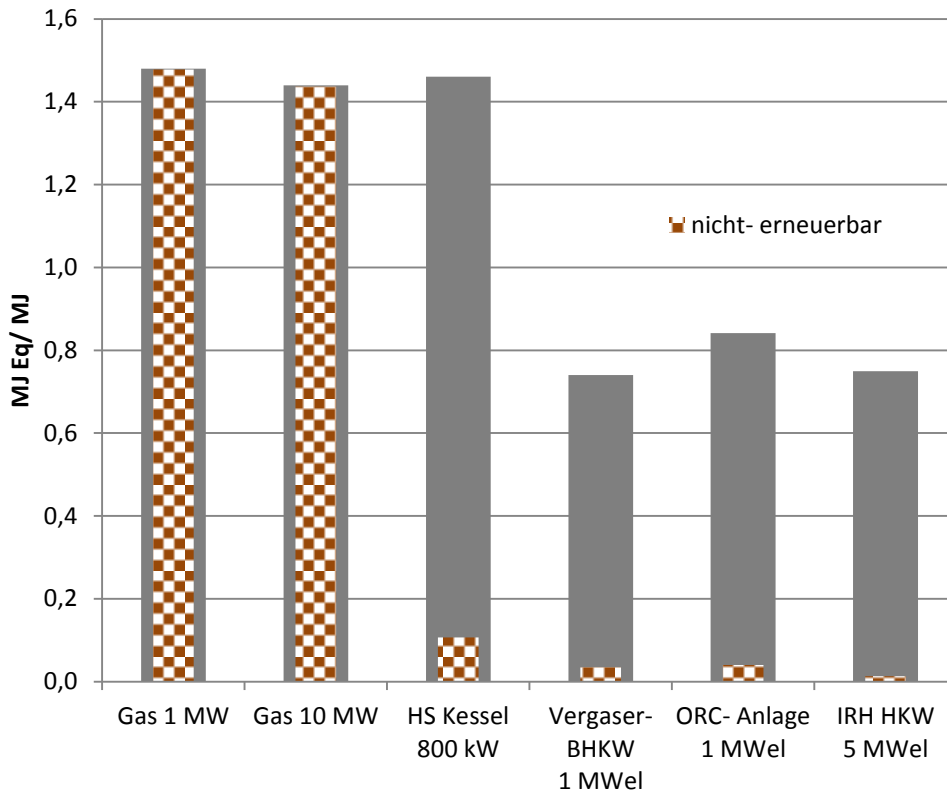


Abbildung 8-12: Kumulierter Energieaufwand der Heiz(kraft)werke

Der kumulierte Energieaufwand wird bei allen Anlagen vom Nutzungsgrad bestimmt. Da die Kraft- Wärme-Kopplungsanlagen die größeren Gesamtnutzungsgrade aufweisen, schneiden sie bis zu 50 Prozent besser ab als die reine Wärmeerzeugung. Da bei den Gaskesseln der fossile Brennstoff Erdgas zum Einsatz kommt stammt der gesamte kumulierte Energieaufwand hier aus nicht- regenerativen Quellen. Bei den Holz(heiz)kraftwerken hingegen wird ein deutlich geringerer nicht- regenerativer Energieaufwand erhalten, der fast vollständig aus der Vorkette der Holzbereitstellung stammt.

8.3.1.2 Treibhausgase

Für das in Abbildung 8-13 gezeigte Treibhausgaspotenzial zeigt sich, dass größere Anlagen und Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen besser abschneiden. Alle Holzheiz(kraft)werke haben gegenüber den beiden Gaskessels etwa um den Faktor 10 geringere Treibhausgasemissionen. Außerdem schneiden alle Anlagen, die ihren Eigenstrombedarf selber decken besser ab, da der deutsche Strommix derzeit noch hohe Treibhausgasemissionen aufweist.

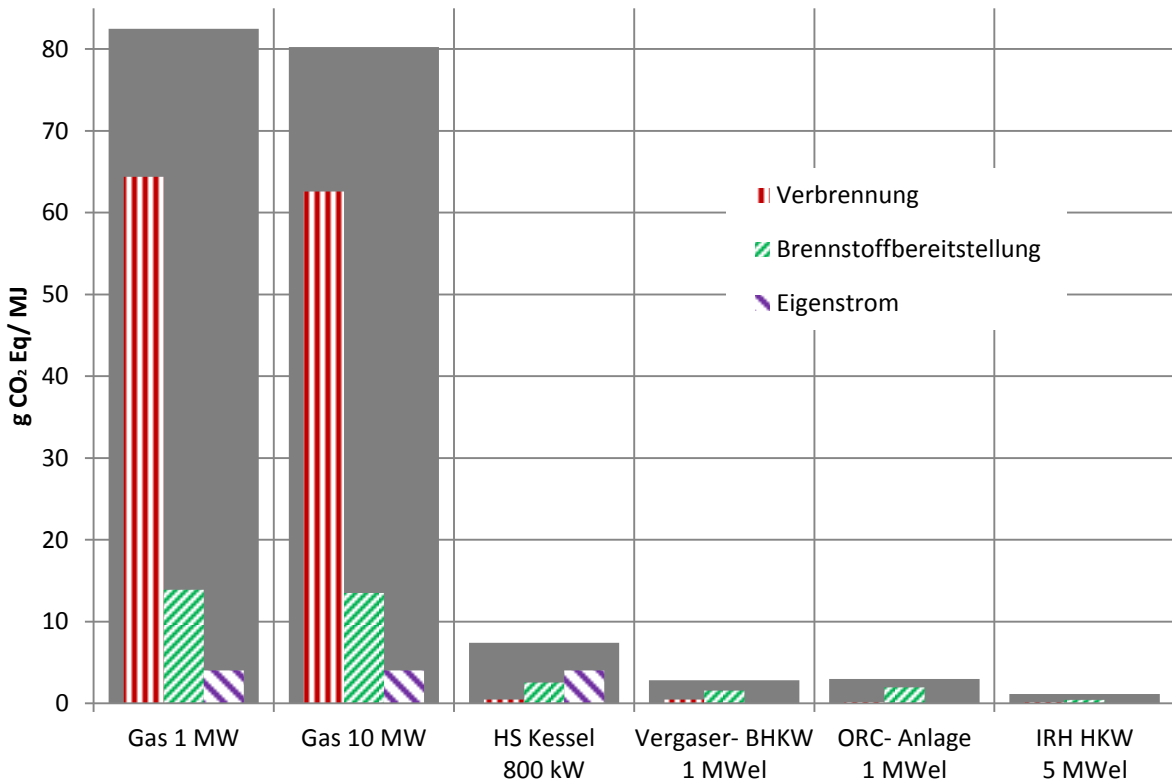


Abbildung 8-13: Treibhausgaspotenzial der Heiz(kraft)werke

Die Gasbereitstellung weist gegenüber der Holzbereitstellung deutlich höhere Treibhausgasemissionen auf. Die Methanemissionen sind dabei auf Grund des Methanschlupf beim Gastransport besonders groß und liegen um den Faktor 100 höher als die Methanemissionen aus der Holzbereitstellung (in der Abbildung nicht gezeigt). Auch die Verbrennungsemissionen des Gaskessels sind deutlich höher als die der Holzessel, da hier fossiles Kohlendioxid freigesetzt wird.

8.3.1.3 Feinstaub

Abbildung 8-14 zeigt die Feinstaubemissionen der Heiz(kraft)werke.

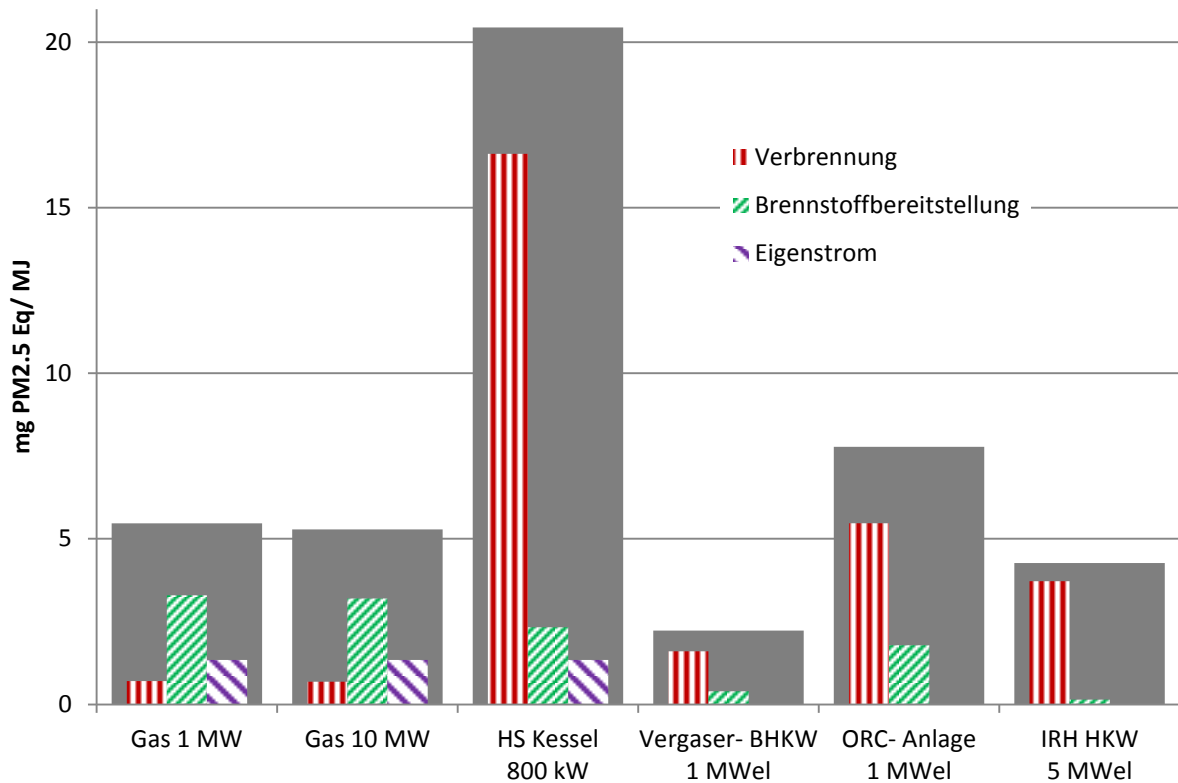


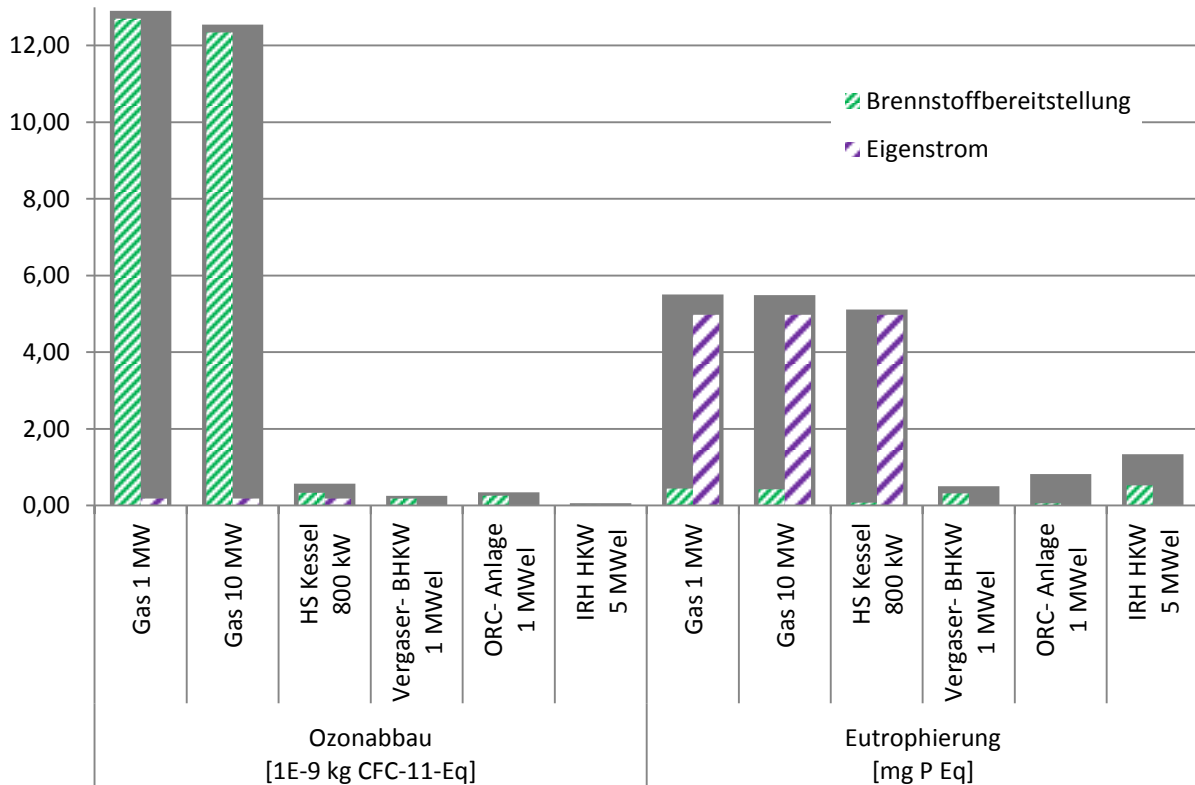
Abbildung 8-14: Feinstaubemissionen der Heiz(kraft)werke

Die Feinstaubemissionen werden stark durch die Emissionen aus der Holzverbrennung dominiert. Dabei sind die Feinstaubemissionen beim Hackschnitzelkessel 800 kW etwa viermal so hoch wie bei den Gaskesseln. Das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk weist hingegen sehr geringe Feinstaubemissionen auf, da bei der Holzgasverbrennung kaum Feinstaub entsteht. Diese liegen sogar noch unterhalb der beiden Gaskessel. Während das Dampfturbinen- Heizkraftwerk leicht geringere Feinstaubemissionen hat als die Gaskessel, haben die ORC- Anlage und der Hackschnitzelkessel 800 kW um 44 bzw. sogar 280 Prozent höhere Emissionen als die Gaskessel. Die Feinstaubemissionen der Gaskessel werden dominiert durch die Feinstaubemissionen aus der Gasbereitstellung. Speziell die Schwefeldioxid- und Kohlenmonoxidemissionen, welche zur Bildung von Feinstaub führen können, sind hier deutlich höher als bei der Holzbereitstellung (in Abbildung nicht gezeigt).

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

### 8.3.1.4 Sonstige Wirkungskategorien

In Abbildung 8-15 ist die Eutrophierung und das Ozonabbaupotenzial gezeigt.

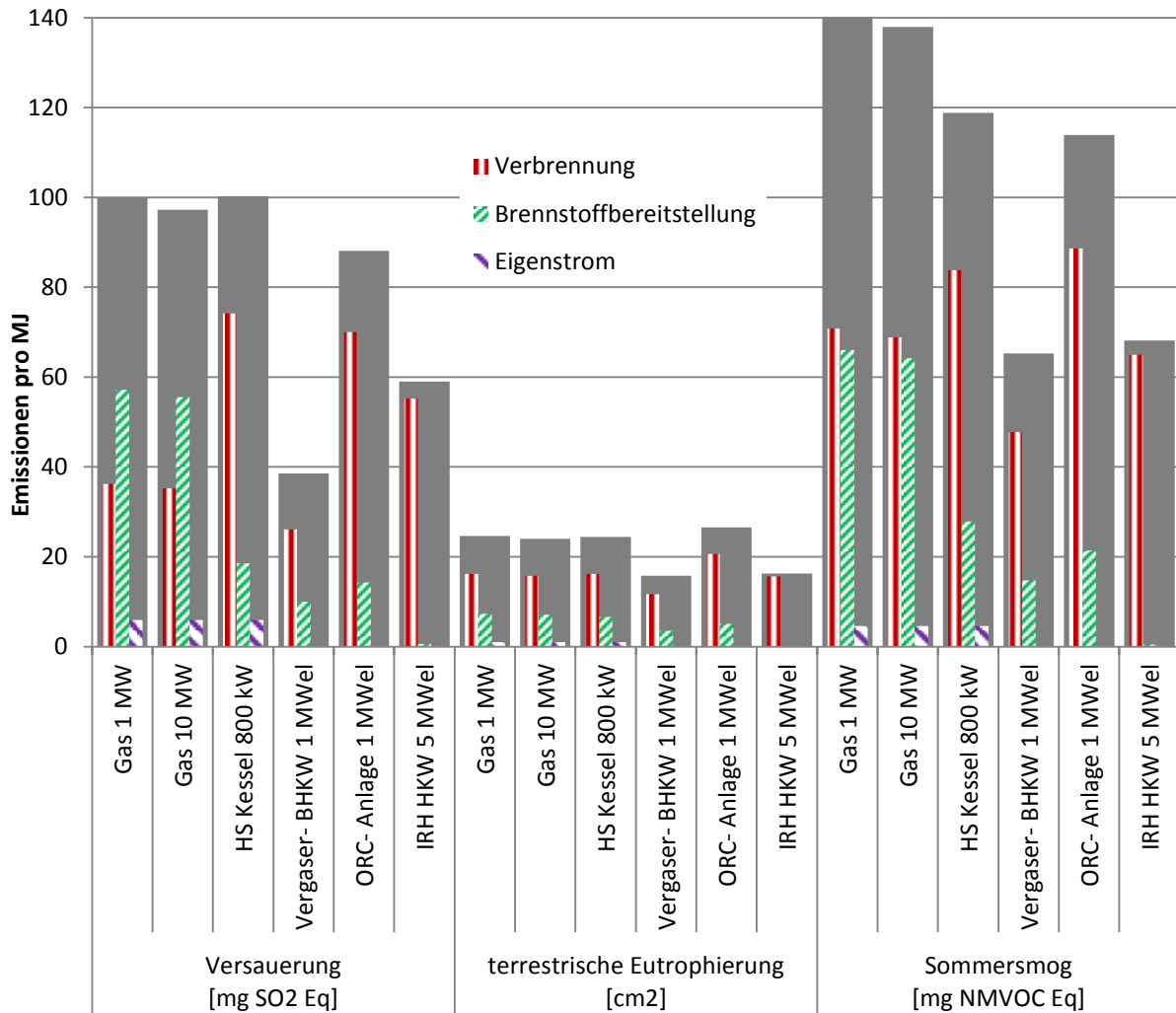


**Abbildung 8-15: Ozonabbau und Eutrophierung der Heiz(kraft)werke**

Während die Eutrophierung bei den Gaskesseln ähnliche Werte wie bei der Nutzung des Hackschnitzelkessels 800 kW aufweist, liegt sie bei den Holzheizkraftwerken um 75 bis 91 Prozent niedriger, da der aus dem Stromnetz gedeckte Eigenverbrauch einen sehr großen Einfluss hat. Die größten Unterschiede zwischen der Holznutzung und den Gaskesseln zeigen sich beim Ozonabbau. So liegen die Umweltlasten der Holzheiz(kraft)werke um bis zu 100 Prozent unter denen der Gaskessel. Diese großen Umweltlasten stammen beim Gaskessel fast vollständig aus der Gasbereitstellung.

Abbildung 8-16 zeigt den Sommersmog, die Versauerung und die terrestrische Eutrophierung.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 8-16: Sommersmog, Versauerung und terrestrische Eutrophierung der Heiz(kraft)werke**

Die Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen haben eine geringere Versauerung als die restlichen Anlagen. Besonders gut schneiden das Dampfturbinen- Heizkraftwerk und das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk ab. Sie haben 40 bzw. 60 Prozent geringere Umweltlasten im Bereich der Versauerung als die Gaskessel. Durch die erhöhten Schwefeldioxidemissionen aus der Verbrennung (im Bild nicht gezeigt), welche wichtig für die Versauerung sind, schneidet die ORC- Anlage schlechter ab, da auch hier die Gesamtumweltlasten stark durch die Verbrennung dominiert werden. Bei den Gaskesseln dominieren die Umweltlasten aus der Brennstoffbereitstellung.

Bei der terrestrischen Eutrophierung schneiden die Holzheiz(kraft)werke ähnlich ab wie die Gaskessel. Hier werden die Umweltlasten jeweils durch die Emissionen aus der Verbrennung (insbesondere die nicht im Bild gezeigten Stickoxide) dominiert.

Beim Sommersmog schneiden alle Holzheiz(kraft)werke mindesten um 14 Prozent besser ab als die Gaskessel. Besonders geringe Emissionen haben wiederum das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk und das Dampfturbinen- Heizkraftwerk (über 50 Prozent geringer als die Gaskessel). Diese Wirkungskategorie wird stark durch die NMVOC- Emissionen aus der Verbrennung (in der Abbildung nicht gezeigt) dominiert, welche bestimmend für den Sommersmog sind.

### 8.3.1.5 Zusammenfassung

Bei den Holzheiz(kraft)werken haben in fast allen Wirkungskategorien die Emissionen aus der Holzverbrennung einen sehr großen Einfluss (außer beim Ozonabbau und bei der Eutrophierung). Ebenfalls wichtig sind die Holzbereitstellung und der Eigenstrombedarf, während der Bau und Betrieb der Anlage geringere Auswirkungen hat. Allgemein ist es vorteilhaft den Eigenstrombedarf selber zu decken und nicht aus dem Netz zu beziehen. Außerdem schneiden tendenziell die Anlagen mit größerer Leistung auf Grund ihres höheren Nutzungsgrades besser ab. Da durch die Kraft- Wärme- Kopplung die Brennstoffausnutzung steigt, sinken die Umweltlasten, sofern ausreichend Wärmeabnehmer vorhanden sind.

In allen Wirkungskategorien mit Ausnahme der Feinstaubemissionen schneiden die Holzheiz(kraft)werke ähnlich oder besser ab als die Gaskessel. Besonders beim Ozonabbau und bei den Treibhausgasen führt der Einsatz von Holzheiz(kraft)werken gegenüber den Gaskesseln zu hohen Emissionsminderungen. Beim Feinstaub schneidet die ORC- Anlage etwas schlechter, das Dampfturbinen- Holzheizkraftwerk und das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk etwas besser ab. Der Hackschnitzelkessel 800 kW hat sehr hohe Umweltwirkungen, die deutlich über denen aller anderen Anlagen liegen.

### 8.3.2 Sensitivitätsanalyse am Beispiel der ORC- Anlage mit Waldrestholz

Für die Modellierung der Prozessketten wurden zwei methodische Entscheidungen getroffen, deren Auswirkungen auf die Ökobilanzergebnisse am Beispiel einer Sensitivitätsanalyse für die ORC- Anlage mit Waldrestholz dargestellt werden.

So musste die verwendete Allokationsmethode ausgewählt werden, wobei sowohl eine Stromgutschrift (mit dem deutschen Strommix), eine energetische Allokation, eine ökonomische Allokation oder eine exergetische Allokation möglich waren (siehe auch Kapitel 4.1.2).

Für die ORC- Anlage mit Waldrestholz werden in Abbildung 8-17 die Sachbilanzergebnisse der unterschiedlichen Allokationsmethoden gegenübergestellt. Dabei wird für die ökonomische Allokation von einem Strompreis von 20,80 Cent/ kWh (Vergütung nach EEG 2009) und einem Wärmepreis von 7 Cent/ kWh ausgegangen (Fernwärmepreis von 8,3 Cent/ kWh nach [AGFW 2013] abzüglich pauschalen 15 Prozent als Kosten für das Wärmenetz und die Wärmeverluste).



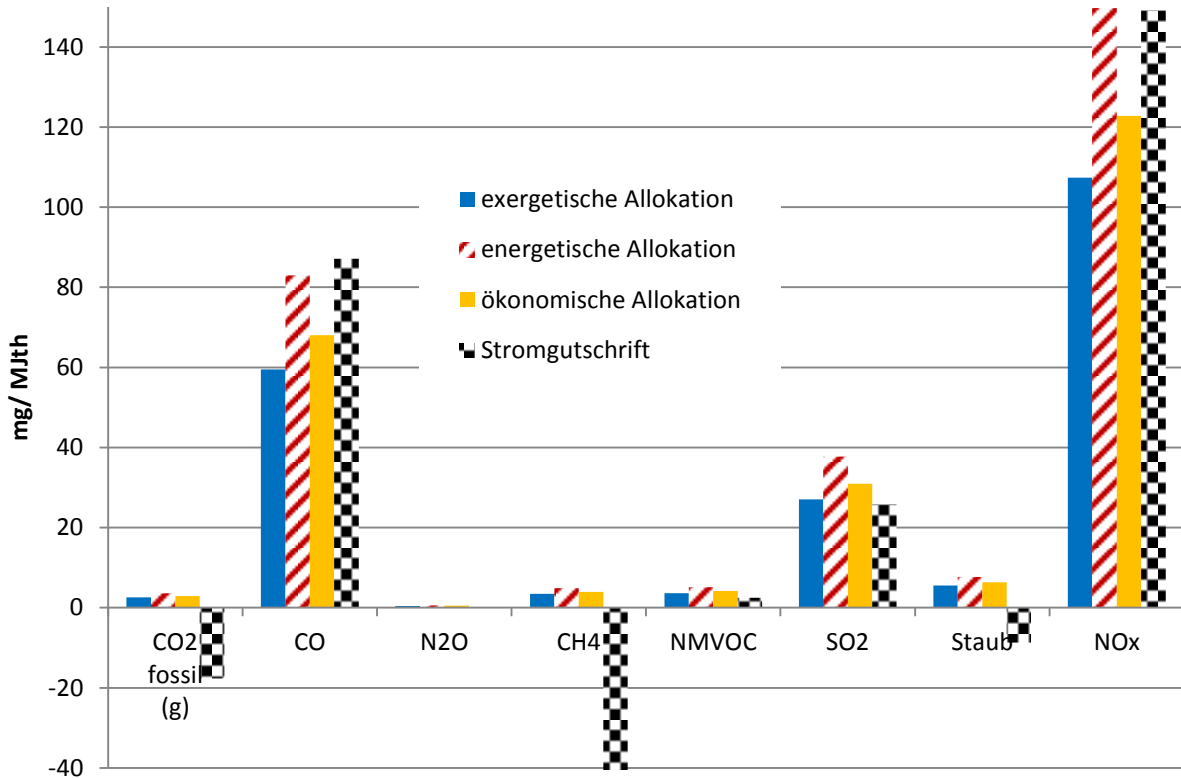


Abbildung 8-17: Sensitivität durch Allokationsmethoden

Grundsätzlich zeigen ökonomische und exergetische Allokation ähnliche Ergebnisse. Allerdings veralten die Abnahmepreise für Wärme und Strom sehr schnell, so dass eine ökonomische Allokation immer nur eine Momentaufnahme der aktuellen Gegebenheiten darstellen kann. Um nur den nutzbaren Teil der Wärme zu betrachten (Exergie) ist eine exergetische Allokation immer einer energetischen vorzuziehen, da sonst die Umweltlasten für die Wärme zu hoch angesetzt würden.

Die größten Unterschiede in den Umweltwirkungen treten bei einer Stromgutschrift auf. Hier hängen die Umweltlasten sehr stark vom verwendeten Strommix ab und es kommt zu teilweise negativen Emissionen. Der deutsche Strommix verändert sich im Laufe der Zeit stark, so dass bei der Nutzung einer Stromgutschrift die Ergebnisse schnell veralten würden. Zudem wäre eine genauere Überprüfung welche anderen Stromerzeuger vom Markt verdrängt werden durch den zusätzlichen Strom aus den Holzheizkraftwerken notwendig.

Daher wird in dieser Arbeit immer mit einer exergetischen Allokation gearbeitet. Eine Überprüfung der anderen Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen hat gezeigt, dass die Auswirkungen der unterschiedlichen Allokationsmethoden ähnlich zu denen der ORC- Anlage sind, und somit die exergetische Allokation sich für alle Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen bewährt.

Weiterhin musste entschieden werden, ob die Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen ihren Eigenstrombedarf über den selber erzeugten Strom decken, oder aus dem Netz. Gerade bei den ORC- Anlagen finden sich in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben zum Eigenstrombedarf. Während [Briem et al. 2004] von einem Eigenstrombedarf von nur 10 Prozent ausgeht, kann dieser laut [DBFZ 2012] bei einer ORC- Anlage bis zu 25 Prozent betragen. Daher wird hier der Eigenstrombedarf der ORC- Anlage variiert (zwischen 10 und 25 Prozent) und mit dem Referenzfall eines Eigenstrombedarfes von 16,8 Prozent (Messwert nach [Fink 2007] der Anlage im Scharnhäuser Park) verglichen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Wird der Eigenstrombedarf aus dem Netz gedeckt, kommt es zu den in Abbildung 8-18 gezeigten prozentualen Abweichungen zwischen dem Nennzustand und dem maximalen und minimalen Eigenstrombedarf.

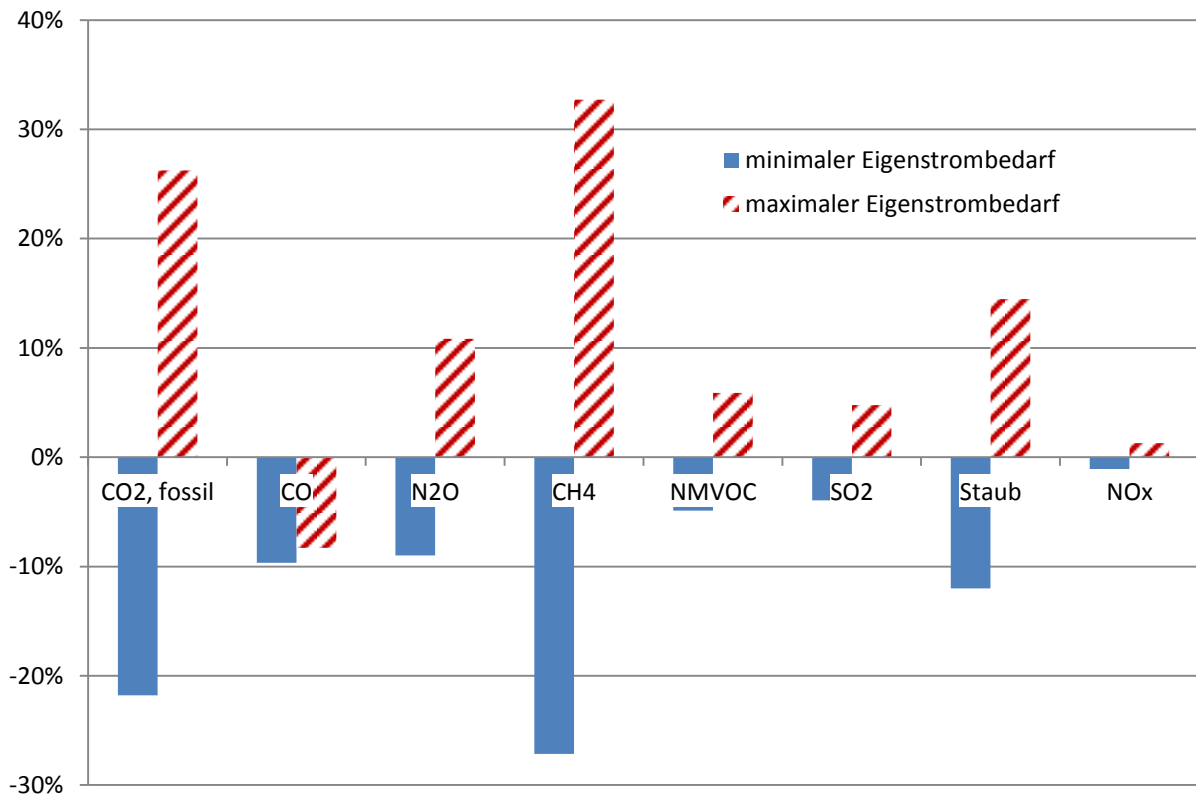


Abbildung 8-18: Sensitivität: Deckung des Eigenstrombedarfes aus dem Netz

Die Abweichungen bei den Umweltlasten unterscheiden sich deutlich für die unterschiedlichen betrachteten Sachbilanzergebnisse und liegen bei bis zu 30 Prozent.

Wird der Eigenbedarf selber gedeckt, fallen die Abweichungen deutlich geringer aus. Sie liegen für alle ausgewählten Sachbilanzergebnisse konstant bei -2,9 Prozent (minimaler Eigenstrombedarf) bzw. +3,7 Prozent (maximaler Eigenstrombedarf).

Ähnliches gilt auch für die anderen in dieser Arbeit untersuchten Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen.

Auf Grund ihrer geringeren Anfälligkeit auf Schwankungen im Eigenstromverbrauch wird daher angenommen, dass alle Kraft- Wärme-Kopplungsanlagen ihren Eigenstrombedarf aus dem selber erzeugten Strom decken. Da von Wärme als Hauptprodukt und Strom als Nebenprodukt ausgegangen wird, ist diese Annahme gerechtfertigt. Allerdings ist es aus wirtschaftlicher Sicht oft attraktiver den EEG- Strom vollständig zu verkaufen und den (günstigeren) Netzstrom zum Anlagenbetrieb einzusetzen. Dies führt beim heutigen Strommix zu deutlich höheren Emissionen im Bereich der Treibhausgase, des Ozonabbaus und vor allem der Eutrophierung während die Ergebnisse in den anderen Wirkungskategorien ähnlich bleiben.

### 8.3.3 Einfluss der verschiedenen Holzreststoffe auf die Umweltwirkungen

In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich die Umweltwirkungen der Heiz(kraft)werke verändern, wenn unterschiedliche Holzbrennstoffe eingesetzt werden. Hierzu wird der Betrieb einer ORC- Anlage mit Waldrestholz- (ORC- Anlage 1 MW<sub>el</sub> WRH), Industrierestholz- (ORC- Anlage 1 MW<sub>el</sub> IRH) und Landschaftspflegeholzhackschnitzeln (ORC- Anlage 1 MW<sub>el</sub> LPH) betrachtet. Außerdem werden die beiden

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

Heizkraftwerke mit Waldrestholz hackschnitzeln (WRH HKW 6,1 MW<sub>el</sub>) und Industrierestholz hackschnitzeln (IRH HKW 5 MW<sub>el</sub>) gegenübergestellt sowie der Betrieb eines Hackschnitzelkessels mit 800 kW mit Waldrestholz (HS Kessel 800 kW WRH) zu dem mit einer Mischung aus 50 Prozent Industrierest- und 50 Prozent Landschaftspflegeholz hackschnitzeln (HS Kessel 800 kW LPH+IRH). Diese werden jeweils anhand ausgewählter Sachbilanzergebnisse verglichen. Da für die Anlagen (wie in Kapitel 4.1.3 gezeigt) teilweise nicht alle Emissionen vorhanden waren, werden hier nur die Kohlenmonoxid-, Staub- und Stickoxidemissionen sowie die fossilen Kohlendioxidemissionen verglichen. Wiederum wird eine Unterteilung in die verschiedenen Lebenswegabschnitte vorgenommen.

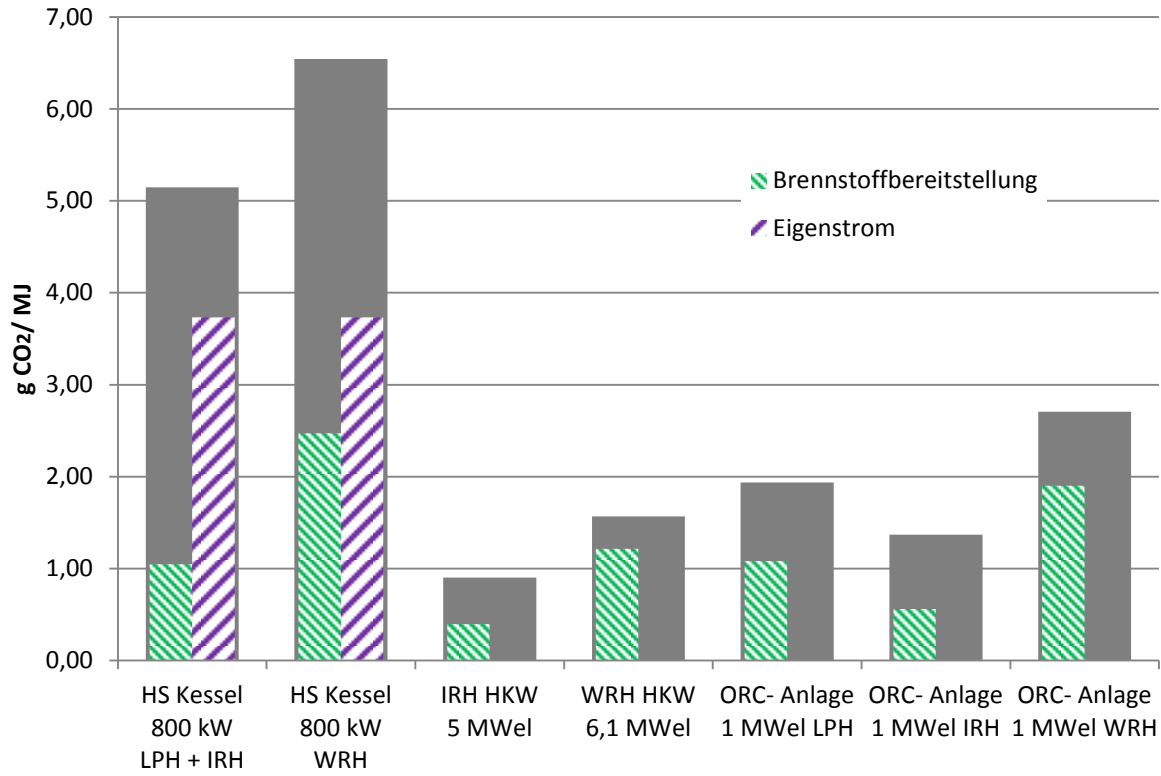
Bei den ORC- Anlagen und beim Hackschnitzelkessel wird jeweils die gleiche Anlage mit unterschiedlichem Brennstoff verglichen. Dabei werden, trotz gleicher Anlagenwirkungsgrade, auf Grund der unterschiedlichen Wassergehalte und Heizwerte der Brennstoffe unterschiedliche Holzmengen benötigt, so dass, auch auf Grund der unterschiedlichen Vorketten, die Emissionen aus der Biomassebereitstellung unterschiedlich sind. Bau und Betrieb der Anlage sind hier jeweils gleich, auch wenn durch die unterschiedlichen Aschegehalte verschiedene Aschemengen anfallen, die entsorgt werden müssen. Die Ascheentsorgung (enthalten in Bau und Betrieb) hat jedoch einen sehr geringen Einfluss auf die Umweltlasten insgesamt. Selbst bei der ORC- Anlage mit Landschaftspflegeholz, das einen sehr hohen Aschegehalt aufweist, sind kaum Unterschiede zu erkennen. Große Unterschiede treten jedoch bei den Verbrennungsemissionen auf.

Die beiden Heizkraftwerke weisen unterschiedliche Leistungen (5 MW<sub>el</sub> bei Industrierestholz und 6,1 MW<sub>el</sub> bei Waldrestholz) sowie unterschiedliche Nutzungsgrade auf. Während das 5 MW<sub>el</sub>- Heizkraftwerk den höheren elektrischen Nutzungsgrad hat, weist das 6,1 MW<sub>el</sub>- Heizkraftwerk dennoch einen sehr hohen Brennstoffnutzungsgrad auf, da es Wärme und Dampf auf unterschiedlichsten Temperaturniveaus auskoppelt und nutzt (nähere Beschreibung hierzu siehe Kapitel 7.5.5). Der Anlagenbau für beide Kraftwerke ist jedoch der gleiche.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

**8.3.3.1 Fossile Kohlendioxidemissionen**

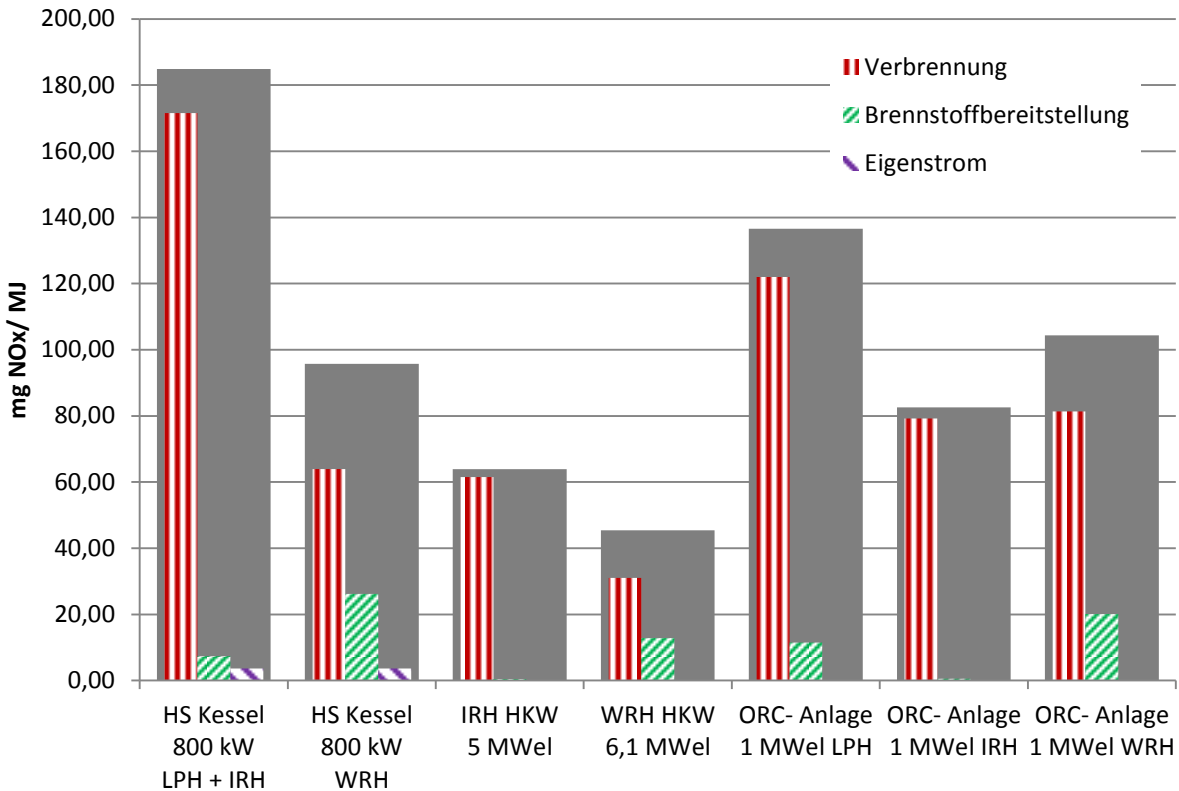
Die in Abbildung 8-19 gezeigten fossilen Kohlendioxidemissionen liegen am höchsten für Waldrestholz und am niedrigsten für Industrierestholz. Diese Ergebnisse spiegeln direkt die in Kapitel 8.1 gezeigten Ergebnisse aus der Biomassebereitstellung wider.



**Abbildung 8-19: Fossile Kohlendioxidemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen**

### 8.3.3.2 Stickoxidemissionen

Abbildung 8-20 zeigt die Stickoxidemissionen der Anlagen bei der Verwendung unterschiedlicher Holzreststoffe.



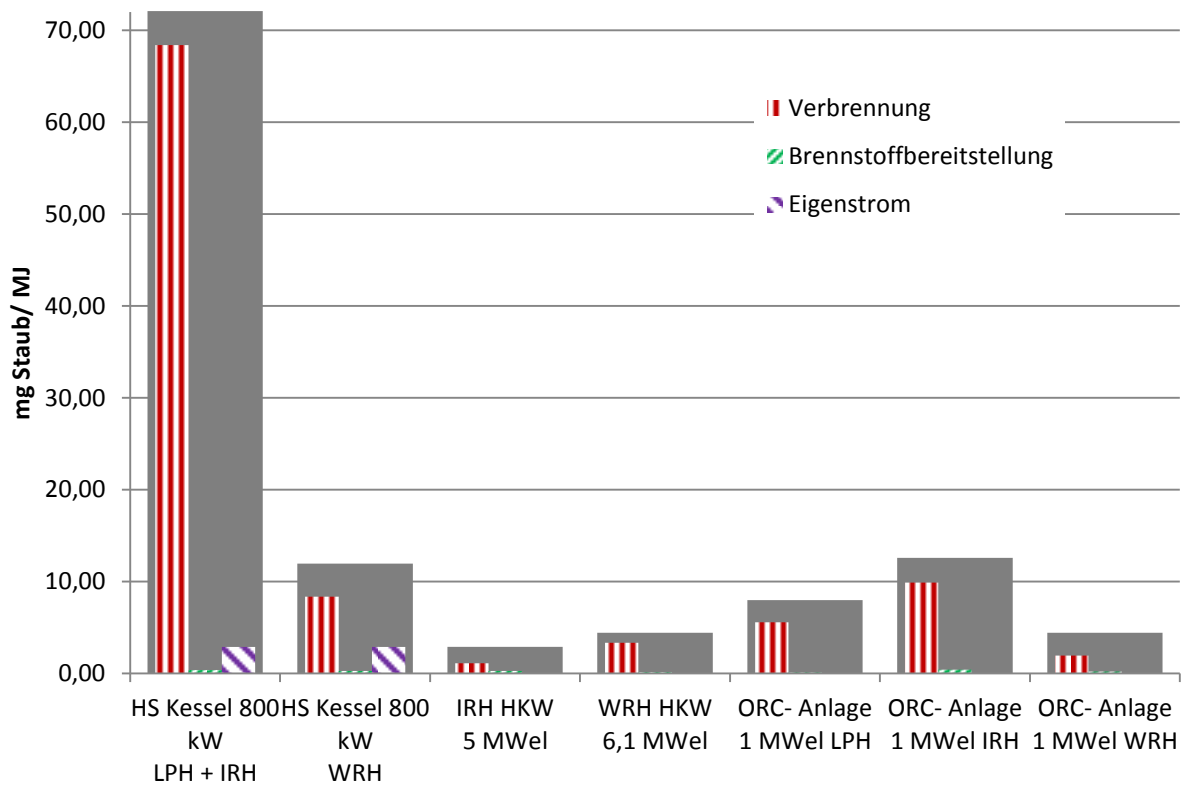
**Abbildung 8-20: Stickoxidemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen**

Die in der Abbildung gezeigten Stickoxidemissionen aus der Verbrennung sind bei der ORC- Anlage für Waldrest- und Industrierestholz sehr ähnlich. Bei der ORC- Anlage sind die Stickoxidemissionen aus der Landschaftspflegeholzverbrennung etwa 50 Prozent höher als bei Waldrestholz. Auch beim Hackschnitzelkessel mit Landschaftspflege- und Industrierestholz sind sie 168 Prozent höher, wenn anstelle von Waldrestholz Industrierest- und Landschaftspflegeholz eingesetzt werden. Dies ist nach [Fink 2007] auf den höheren Brennstoffstickstoffgehalt im Landschaftspflegeholz zurückzuführen (bis zu 1,14 Prozent im Gegensatz zu Waldhackschnitzeln mit 0,15 Prozent).

### 8.3.3.3 Staubemissionen

Die Staubemissionen in Abbildung 8-21 werden hauptsächlich durch die Art der Abgasnachbehandlung bestimmt. Während beim Hackschnitzelkessel mit Waldrestholz und bei allen ORC- Anlagen und Heizkraftwerken eine Staubminderung mit Multizyklon und Elektrofilter durchgeführt wird, hat der Hackschnitzelkessel mit Landschaftspflege- und Industrierestholz einen Multizyklon und einen Rauchgaskondensator, was zu 500 Prozent höheren Staubemissionen als beim Hackschnitzelkessel mit Landschaftspflege- und Industrierestholz führt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 8-21: Staubemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen**

Werden die restlichen Ergebnisse verglichen, lässt sich kein Trend ableiten, welche Brennstoffe in der Verbrennung bei den Staubemissionen schlechter abschneiden. Während die Emissionsdaten der ORC- Anlage mit Industrierestholz laut [Briem et al. 2004] von den beiden österreichischen Anlagen in Lienz und Admont stammen und aus dem Jahr 2003 sind, werden für die Verbrennung von Landschaftspflegeholz Daten aus einem offiziellen Emissionsmessprotokoll von 2006 des Kraftwerkes im Scharnhäuser Park nach [Fink 2007] genutzt. Die aktuellsten Daten für die Verbrennung des Waldrestholzes stammen nach GEMIS 4.81 aus dem Jahr 2010. Ähnliches gilt für die Daten des Industrierestholz- Heizkraftwerkes, die laut GEMIS 4.81 von 2010 sind gegenüber den älteren Daten aus [Briem et al. 2004] für das Waldrestholz- Heizkraftwerk. Je aktueller also die Anlagen sind, desto geringer fallen die Staubemissionen aus, obwohl die Abgasgrenzwerte dieselben sind.

### 8.3.3.4 Kohlenmonoxidemissionen

Auffällig sind in Abbildung 8-22 die extremen Abweichungen (von über 2.000 Prozent) bei den Kohlenmonoxidemissionen.

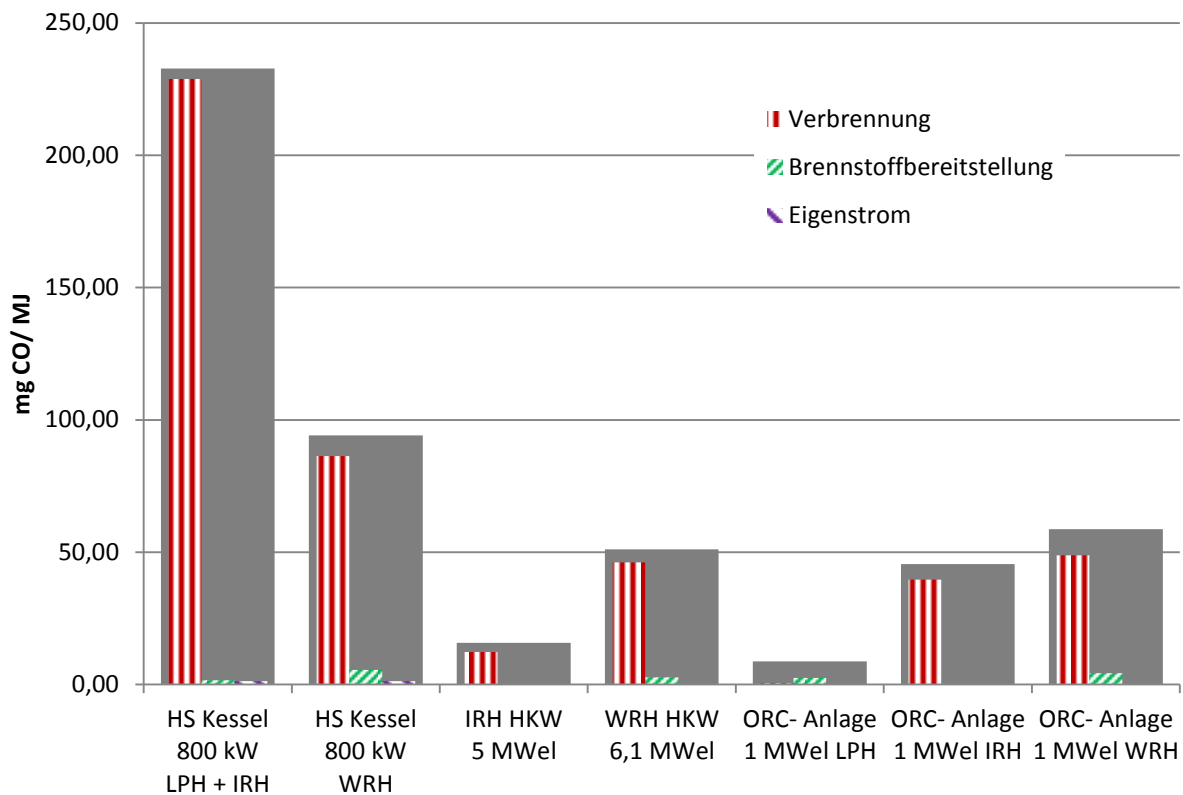


Abbildung 8-22: Kohlenmonoxidemissionen der Konversionsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen

Speziell für die extrem hohen Emissionen beim Hackschnitzelkessel mit Landschaftspflege- und Industrierestholz sowie die sehr geringen Emissionen bei der ORC- Anlage mit Landschaftspflegeholz von lediglich  $0,9 \text{ mg/m}^3$  bei 11 Vol.% Sauerstoff nach [Fink 2007] kann keine Erklärung gefunden werden.

### 8.3.3.5 Zusammenfassung

Allgemein lassen sich aus diesen Ergebnissen einige Aussagen ableiten, die für alle Holz(heiz)kraftwerke gelten, wenn der Brennstoff gewechselt wird:

- Durch die Verwendung von Landschaftspflegeholzhackschnitzeln kommt es zu erhöhten Stickoxidemissionen.
- Die Staubemissionen hängen in erster Linie von der Abgasnachbehandlung und ansonsten vom Anlagenalter ab.
- Die fossilen Kohlendioxidemissionen werden bei allen Holzheiz(kraft)werken durch die Holzbereitstellung bestimmt. Sie sind am geringsten beim Einsatz von Industrierestholz, da hier wie in Kapitel 8.1 beschrieben alle Umweltlasten aus der Vorkette der stofflichen Nutzung zugerechnet werden. Die höchsten Emissionen werden beim Einsatz von Waldrestholz erhalten.

## 8.4 Umweltwirkungen und Kosten der semi- zentralen Wärmeversorgungskonzepte

In diesem Kapitel wird zunächst in Kapitel 8.4.1 der Einfluss der unterschiedlichen Abnehmertypen auf die Umweltwirkungen der semi- zentralen Netze untersucht. Anschließend wird in Kapitel 8.4.2 der Einfluss des verwendeten Rohrsystems auf die Umweltwirkungen der semi- zentralen Netze am Beispiel des Netzes „EFH“

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

gezeigt. Zudem wird, ebenfalls am Beispiel des Netzes „EFH“, in Kapitel 8.4.3 der Einfluss des Hausabstandes und des Abstandes zur Heizzentrale gezeigt. Abschließend untersucht Kapitel 8.4.4. den Einfluss des verwendeten Heiz(kraft)werkes.

Der betrachtete Prozesskettenabschnitt ist in Abbildung 8-23 zu sehen.

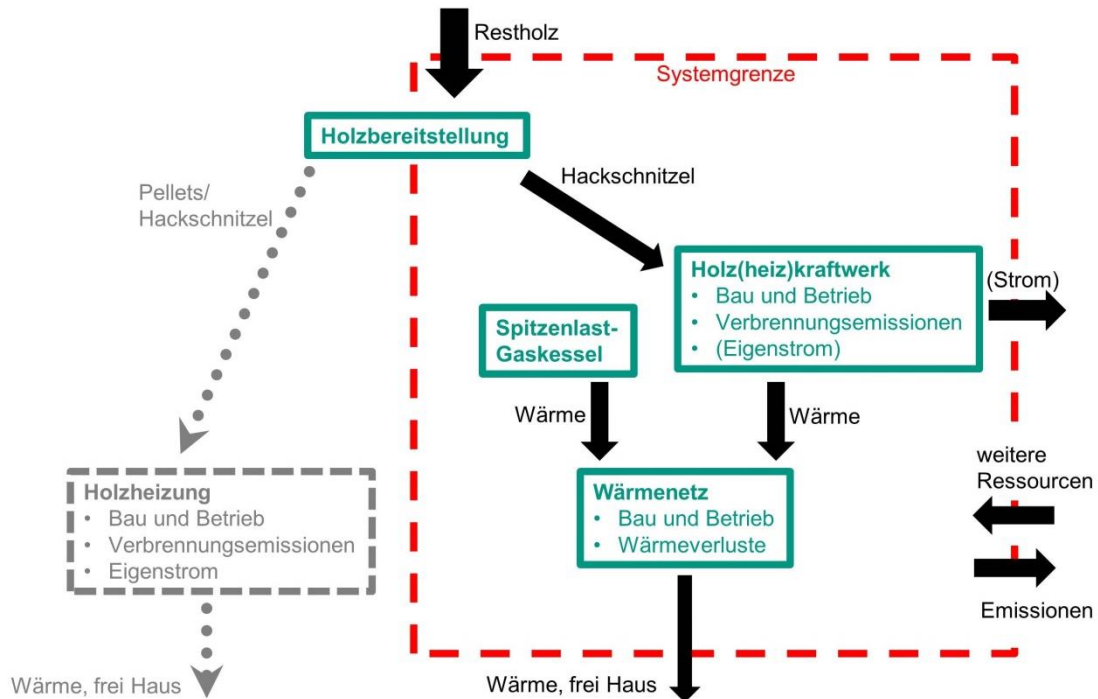


Abbildung 8-23: Prozesskettenabschnitt der semi- zentralen Wärmenetze

### 8.4.1 Relevanz unterschiedlicher Abnehmergrößen

In diesem Kapitel werden folgende der in Kapitel 5.1.4 gezeigten semi- zentrale Netzvarianten verglichen: Die Einfamilienhäusersiedlung mit Neubau-Einfamilienhäusern nach EnEV 2009 und KfW 55 Effizienzhäusern (KfW 55 und EFH), eine Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser (MFH) und die Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern (2- Spänner). Alle Netzvarianten nutzen einen Hackschnitzelkessel mit 800 kW und Waldrestholz sowie einen 1 MW Spitzenlastgaskessel zur Wärmeerzeugung und das Netz ist aus Rohren der Dämmserie 1 aufgebaut.

In Tabelle 8-1 sind die wichtigsten Angaben zu den Wärmeabnehmern zusammengefasst. Außerdem wird die Anzahl der Wärmeabnehmer im Netz angegeben, der Holzenergieanteil und die Wärmeverluste im Netz werden ausgewiesen und die Netzlänge wird gezeigt.

	KfW 55	EFH	MFH	2-Spänner
Anzahl Abnehmer	468	312	44	2x6 MFH 2x6 große MFH
Leistung	7,2 kW	10 kW	50 kW	100 kW (MFH) 200 kW (große MFH)
Volllaststunden	1.500 h/a	1.770 h/a	1.914 h/a	1.914 h/a
Heizgrenzleistung	20,2%	12,2%	13,6%	13,6%
Holzenergieanteil	88,2%	82,5%	83,8%	82,0%
Wärmeverluste	16,45%	22,8%	7,2%	3,9%
Netzlänge	9.593 m	6.473 m	1.384 m	571 m

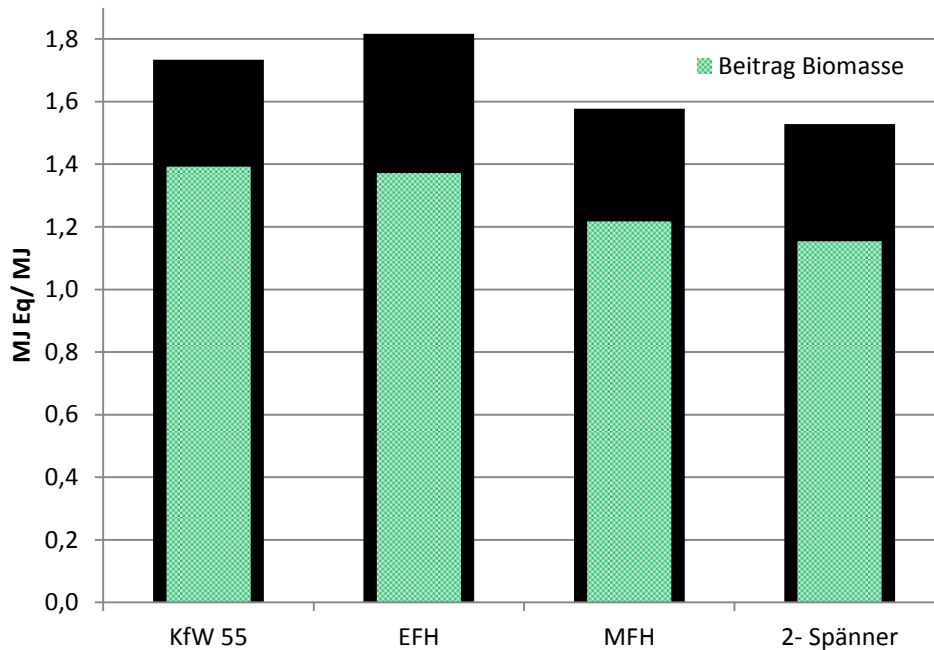
Tabelle 8-1: Kenndaten der semi- zentralen Wärmeversorgung der Einfamilienhäusersiedlung



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Da die Leistung der Heizzentrale vorgegeben ist, können umso mehr Häuser versorgt werden, je kleiner die Leistung der einzelnen Abnehmer wird. Jedoch steigt dann auch die Netzlänge sehr stark an. Zudem treten bei den kleineren Abnehmern die höheren Wärmeverluste (bis zu 23 Prozent) im Netz auf. Auf Grund der geringeren Volllaststunden des KfW 55 Effizienzhauses ist das Wärmenetz insgesamt weniger Stunden im Jahr in Betrieb. Damit hat es auch geringere Wärmeverluste als bei den Einfamilienhäusern nach EnEV 2009. Durch die höhere Heizgrenzleistung wird zudem der Holzenergieanteil erhöht, da prozentual mehr Energie für die Warmwassererzeugung benötigt wird, die gleichmäßiger nachgefragt wird als die Heizwärme.

Wie in Abbildung 8-24 zu sehen ist, wird der kumulierte Energieaufwand der semi- zentralen Wärmeversorgung umso geringer, je geringer die Wärmeverluste im Netz (gezeigt in Tabelle 8-1) ausfallen.



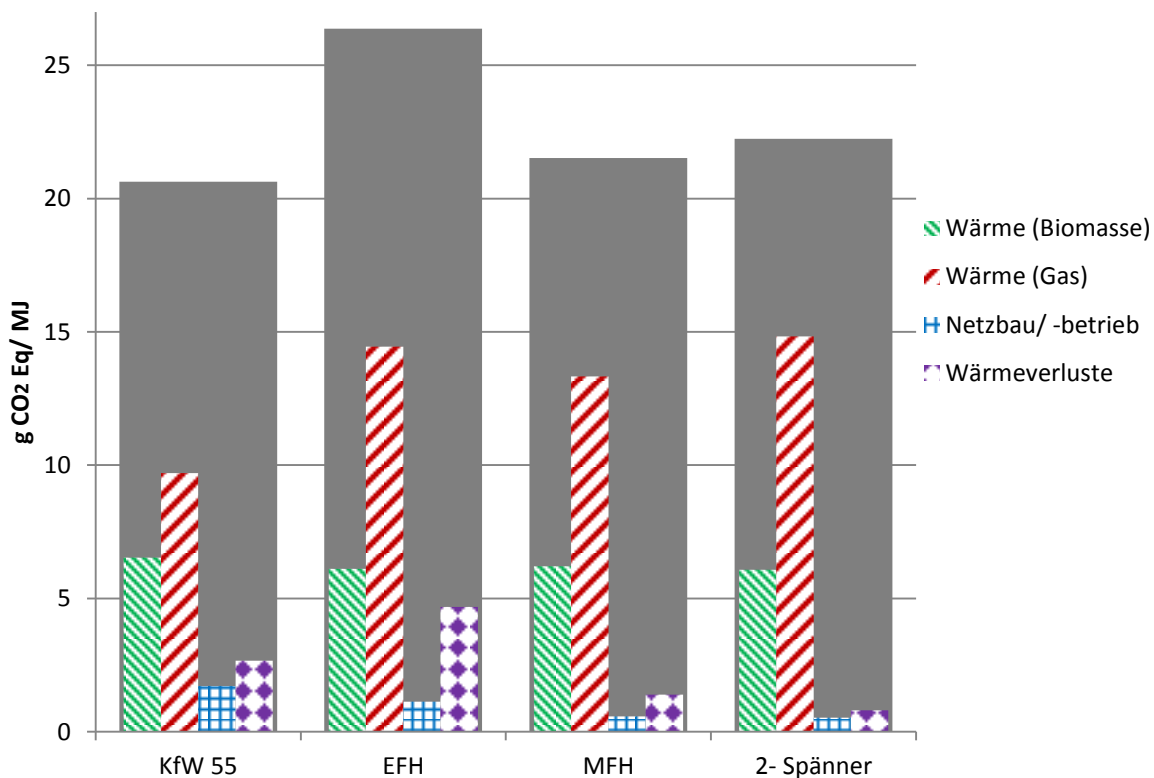
**Abbildung 8-24: Kumulierter Energieaufwand der semi- zentralen Wärmenetze**

Bei der Auswertung der Umweltwirkungen der semi- zentralen Netzvarianten wird eine Unterteilung der Umweltwirkungen vorgenommen. Dabei werden die Umweltwirkungen aus der Wärmeerzeugung aus Holz bzw. aus Gas getrennt gezeigt, sowie die Umweltwirkungen, die auf Wärmeverluste und auf den Bau und Betrieb des Netzes zurückzuführen sind.

In Abbildung 8-25 sind die Treibhausgasemissionen der verschiedenen Netzvarianten gezeigt. Den größten Beitrag zu den Treibhausgasemissionen leistet die Wärmebereitstellung aus Gas, daher schneiden die Netze mit höherem Holzenergieanteil (gezeigt in Tabelle 8-1) besser ab.

Alle Varianten haben ähnlich hohe Treibhausgasemissionen, nur das Netz „EFH“ schneidet hier deutlich schlechter ab. Trotz des höheren Energieaufwandes zur Versorgung der Netzvariante „KfW 55“ steigen die Treibhausgasemissionen nicht an, da der Holzenergieanteil im Netz hier deutlich höher liegt.

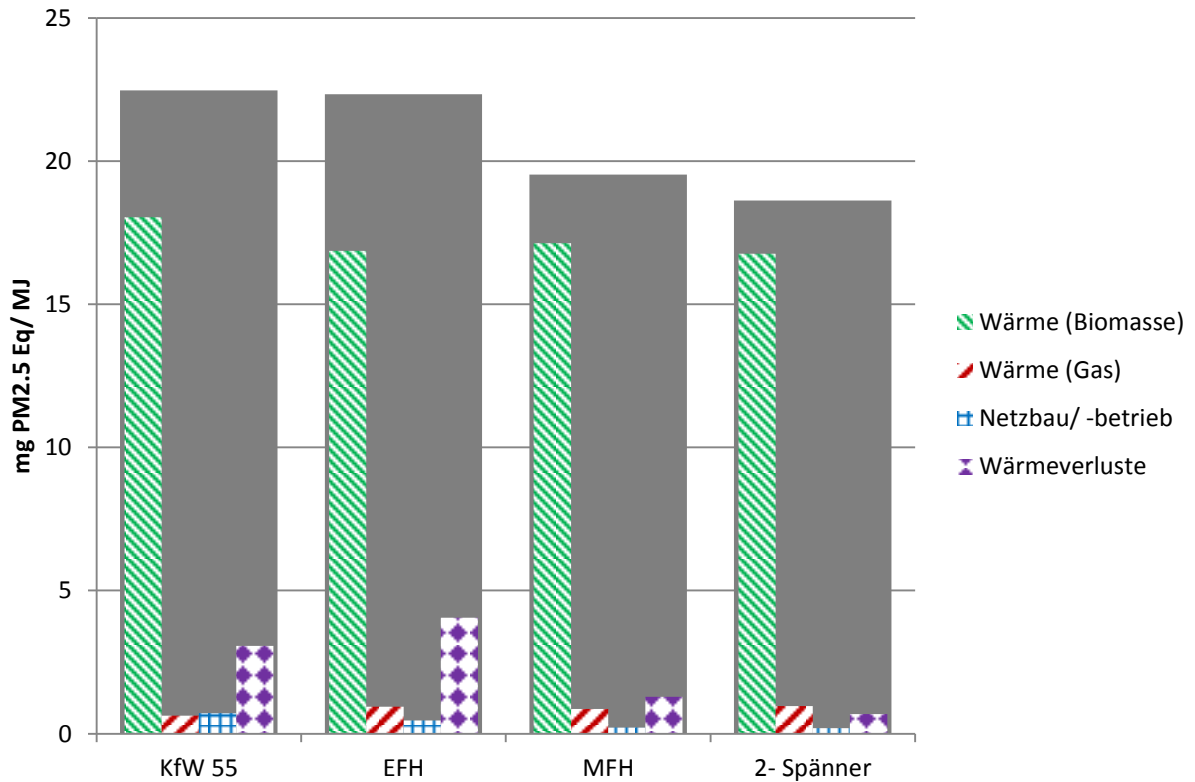
## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 8-25: Treibhausgasemissionen der semi- zentralen Wärmenetze**

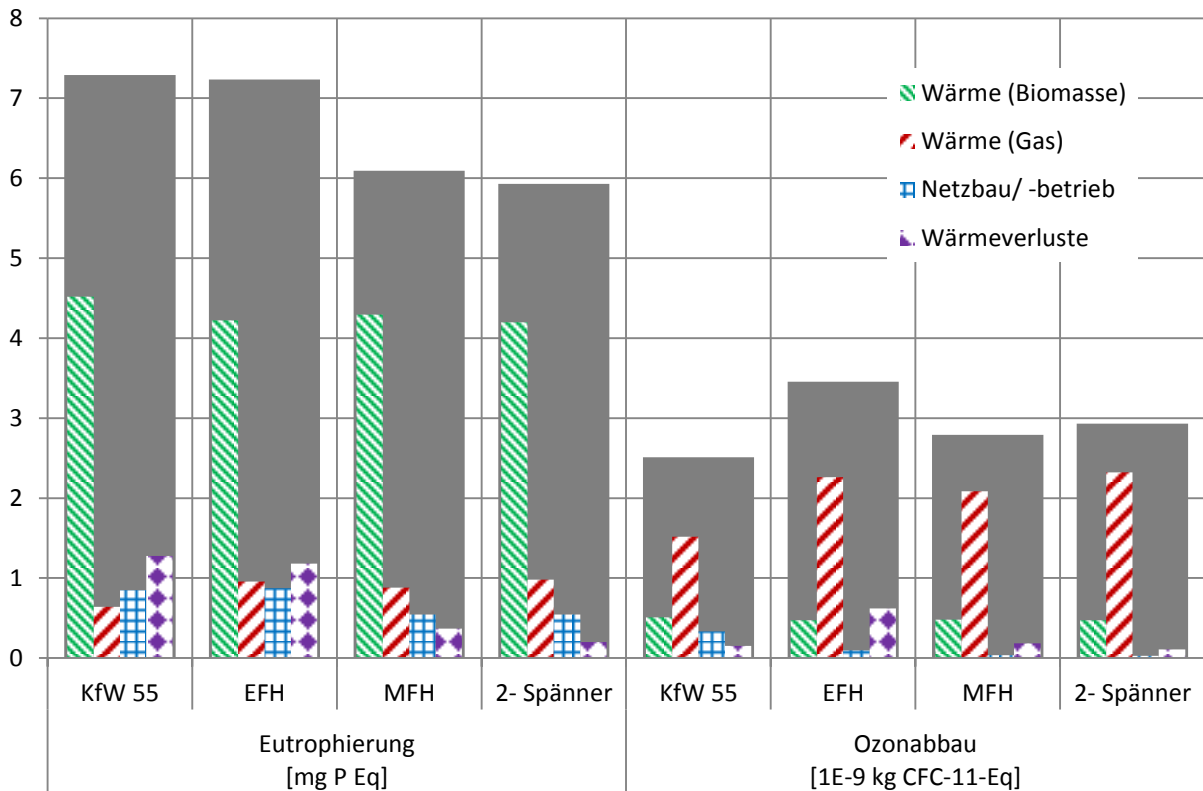
Bei den in Abbildung 8-26 gezeigten Feinstaubemissionen hat das Netz mit den größten Abnehmern die geringsten, das mit den kleinsten Abnehmern die höchsten Emissionen. Auf Grund der hohen Feinstaubemissionen des Hackschnitzelkessels (welche die gesamten Feinstaubemissionen dominieren) zeigt sich hier ein umgekehrter Effekt zu den Treibhausgasen und Netze mit hohem Holzanteil schneiden schlechter ab.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**



**Abbildung 8-26: Feinstaubemissionen der semi- zentralen Wärmenetze**

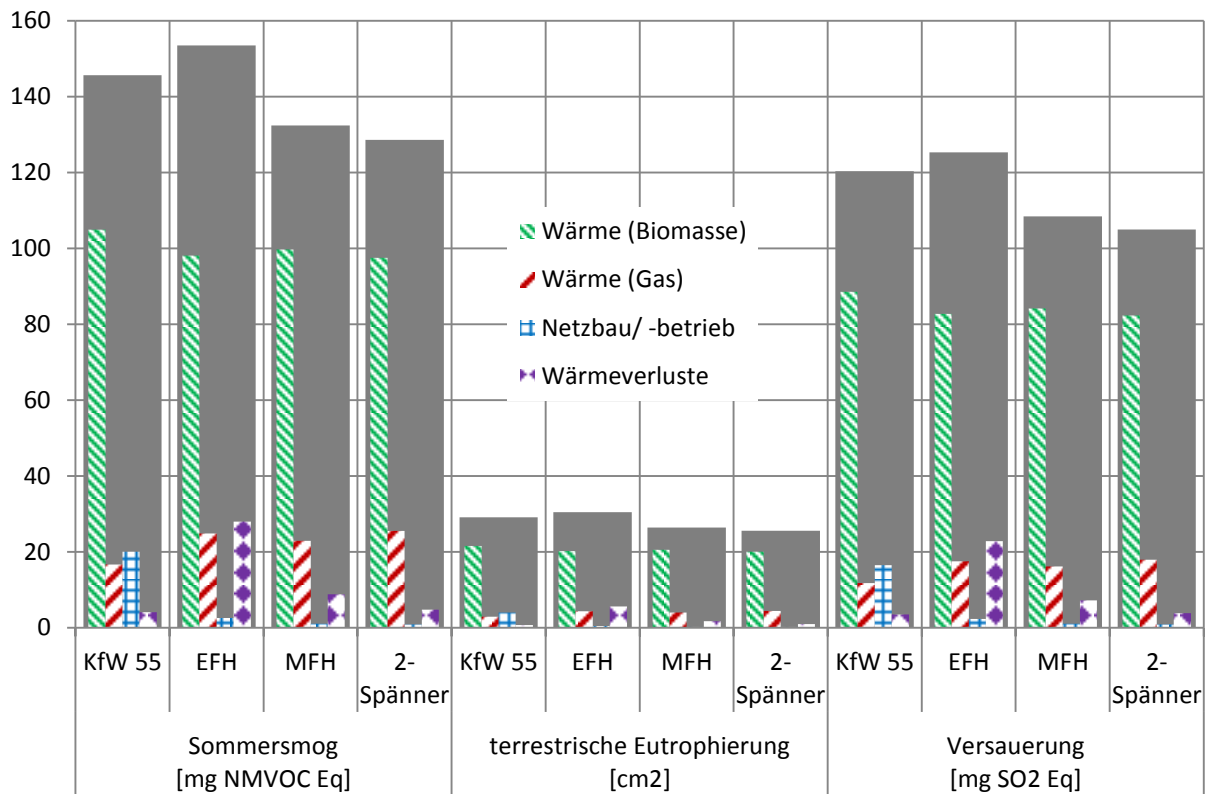
Abbildung 8-27 zeigt die Eutrophierung und den Ozonabbau.



**Abbildung 8-27: Eutrophierung und Ozonabbau der semi- zentralen Wärmenetze**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Abbildung 8-28 zeigt den Sommersmog, die terrestrische Eutrophierung und die Versauerung.



**Abbildung 8-28: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung und Versauerung der semi- zentralen Netze**

Bei der Eutrophierung, dem Sommersmog, der Versauerung und der terrestrischen Eutrophierung haben wiederum die größeren Abnehmer die geringeren Umweltwirkungen. Teilweise schneidet das Netz mit KfW 55 Effizienzhäusern besser ab (Sommersmog, terrestrische Eutrophierung und Versauerung) als das Netz mit Einfamilienhäusern. Beim Ozonabbau schneidet das Netz KfW 55 Effizienzhäusern sogar auf Grund des geringen Gasanteils im Netz am besten ab. Für alle Umweltwirkungen zeigt sich, dass das Netz mit KfW 55 Effizienzhäusern auf Grund der deutlich größeren benötigten Rohrmengen höhere Umweltlasten für den Netzbau und -betrieb aufweist.

Zusammenfassend zeigt sich, dass zwischen den kleinen Mehrfamilienhäusern (MFH) und der Zeilenbebauung mit 2- Spännern kaum Unterschiede bestehen. Einzig die Netze EFH und KfW 55 schneiden fast immer schlechter ab, mit Ausnahme der niedrigeren Treibhausgasemissionen und des niedrigeren Ozonabbaupotenzials durch den höheren Holzenergieanteil beim Netz mit KfW 55.

Abschließend werden in Abbildung 8-29 die Wärmegestehungskosten pro kWh Wärme beim Kunden ausgewertet und mit dem durchschnittlichen Fernwärmepreis von 8 Cent/ kWh im Jahr 2010 nach [AGFW 2013] verglichen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

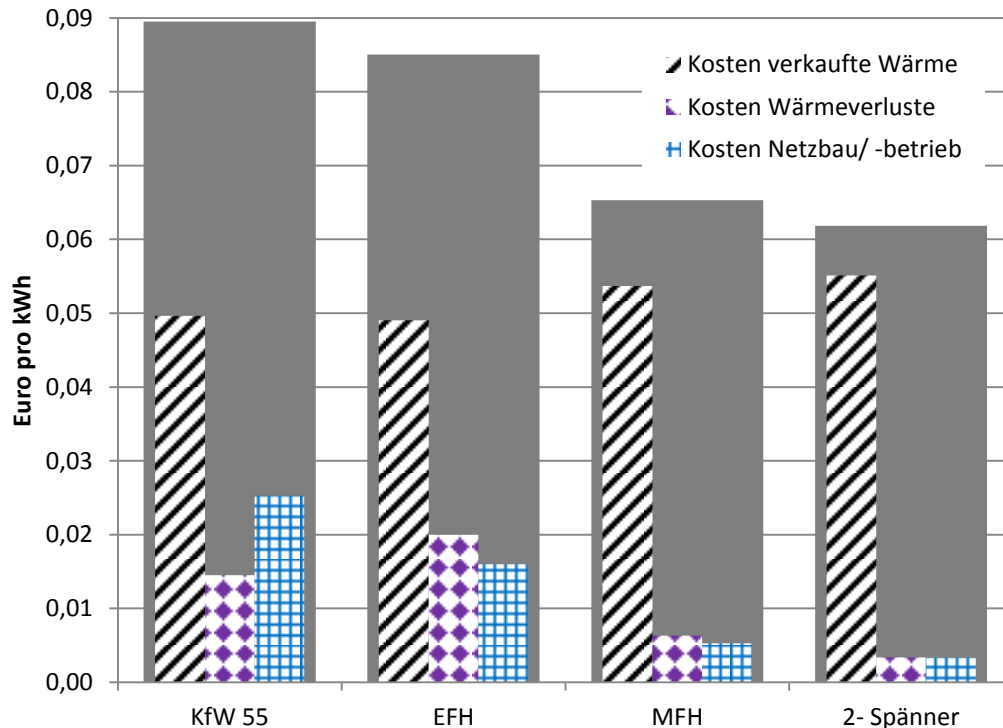


Abbildung 8-29: Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Netze

Hierbei sind ähnliche Trends wie bei den Umweltwirkungen zu sehen: Die Haupteinflüsse auf die Kosten haben die Wärmekosten und die Kosten für die Wärmeverluste, allerdings hat auch der Netzbau und –betrieb (speziell bei den Netzen mit vielen kleineren Abnehmern) einen deutlichen Einfluss. Wiederum schneiden die größeren Abnehmer besser ab. Auffällig ist, dass beide Netze mit Einfamilienhäusern Wärmegestehungskosten aufweisen, die leicht über dem Fernwärmepreis liegen und damit nicht wirtschaftlich sind.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Art und Größe der Abnehmer einen sehr großen Einfluss auf die Umweltwirkungen haben. Dabei haben die Netze mit den geringeren Kosten und den größeren Abnehmern in fast allen Wirkungskategorien auch die geringeren Emissionen. Dieser Effekt ist auf die geringeren Netzlängen pro abgenommene Leistung und auf die damit ebenfalls geringeren Wärmeverluste zurückzuführen. Ausnahmen sind die Treibhausgase und der Ozonabbau, die, durch die starke Dominanz der Umweltlasten aus der Wärmebereitstellung aus Gas, nur vom Holzenergieanteil abhängen.

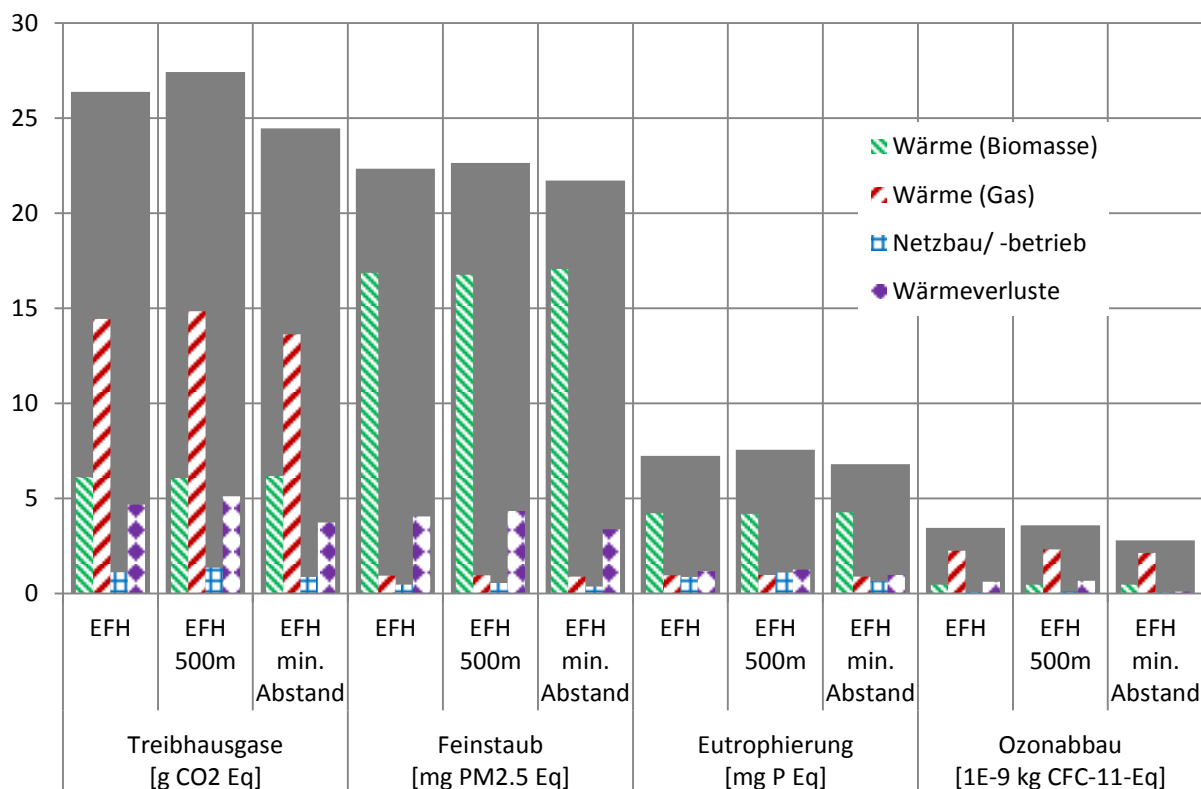
### 8.4.2 Relevanz der Hausabstände und der Entfernung zur Heizzentrale am Beispiel der Einfamilienhäusersiedlung

In diesem Kapitel wird am Beispiel der Einfamilienhäusersiedlung (EFH) der Einfluss des Abstandes der Häusern untereinander und der Abstand zur Heizzentrale auf die Umweltwirkungen untersucht.

Der Referenzfall hat einen Hausabstand von 10 Metern und einen Abstand zur Heizzentrale von 100 Metern. Einmal wird der Abstand zur Heizzentrale auf 500 Meter (EFH 500m) erhöht, einmal der Hausabstand auf den minimalen Hausabstand von 6,15 Metern (EFH min. Abstand) gesetzt. Der Wärmeverluste steigt beim Abstand von 500 Metern auf 24,5 Prozent, bzw. sinkt bei einer Verringerung des Hausabstandes auf 18,9 Prozent.

Abbildung 8-30 zeigt die Treibhausgasemissionen, den Feinstaub, die Eutrophierung und den Ozonabbau der drei Netzvarianten.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

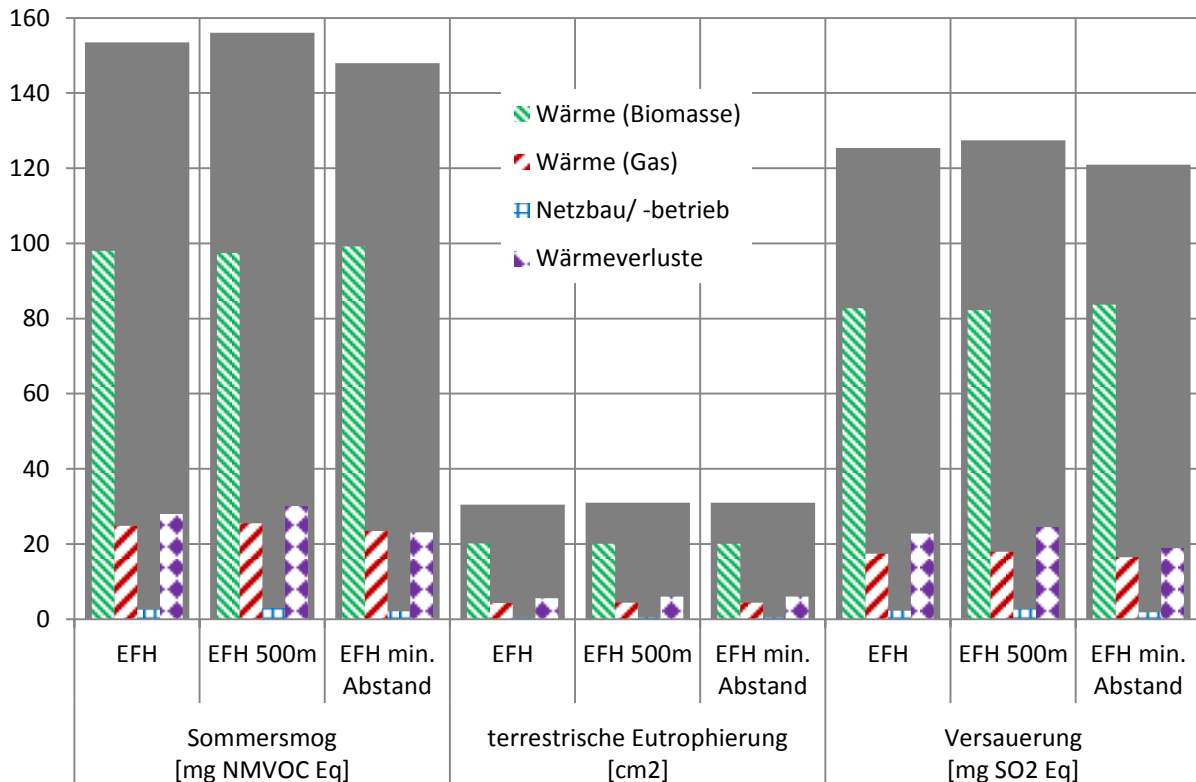


**Abbildung 8-30: Treibhausgase, Feinstaub, Eutrophierung und Ozonabbau: Variation der Abstände**

Wie erwartet steigen die Umweltlasten bei der Variante mit 500 Metern und sinken beim minimalen Hausabstand. Allerdings fallen die Unterschiede in den Umweltwirkungen relativ gering aus.

Gleiches gilt bei der Betrachtung des Sommersmog, der terrestrischen Eutrophierung und der Versauerung in Abbildung 8-31.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 8-31: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung und Versauerung: Variation der Abstände**

Die Umweltwirkungen reagieren also nur wenig sensitiv auf größere Hausabstände oder eine längere Strecke zwischen Heizzentrale und erstem Knotenpunkt.

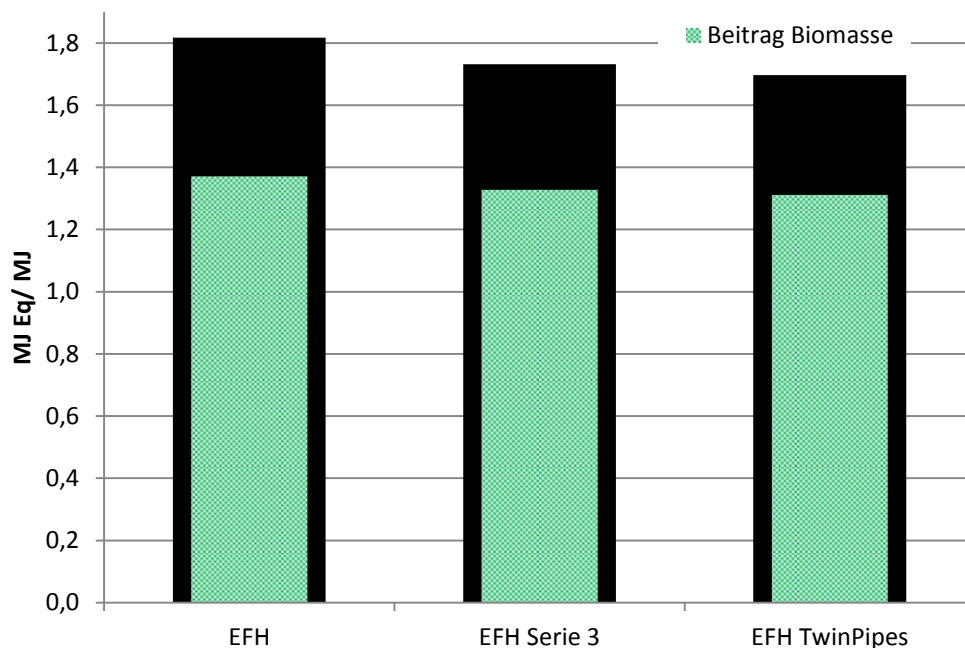
Auch bei den Kosten treten zwischen den drei Varianten nur sehr geringe Unterschiede auf.

### 8.4.3 Relevanz unterschiedlicher Rohrsysteme auf die Umweltwirkungen am Beispiel der Einfamilienhäusersiedlung

Um die sehr hohen Wärmeverluste bei der Einfamilienhäusersiedlung zu reduzieren, können anstelle der einfach gedämmten KMR Rohre der Serie 1 auch besser gedämmte Rohre der Serie 3 eingesetzt werden. Zudem verspricht der Einsatz von TwinPipes eine Kostenreduktion. Daher wird im Folgenden untersucht, wie die Umweltwirkungen und Kosten sich ändern beim Einsatz der beiden alternativen Rohrsysteme. Hierfür wird bei der Netzvariante „EFH“ mit 312 Einfamilienhäusern und der Nutzung eines Hackschnitzelkessels das Rohrsystem variiert.

Der kumulierte Energieaufwand in Abbildung 8-32 zeigt eine kleine Reduktion der benötigten Energie für die Serie 3 und eine weitere leichte Reduktion beim Wechsel auf TwinPipes.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 8-32: Kumulierter Energieaufwand bei Variation des Rohrsystems**

Bedingt wird dies durch die in Tabelle 8-2 gezeigten sinkenden Wärmeverluste. Zudem steigt der Holzenergieanteil im Netz leicht an.

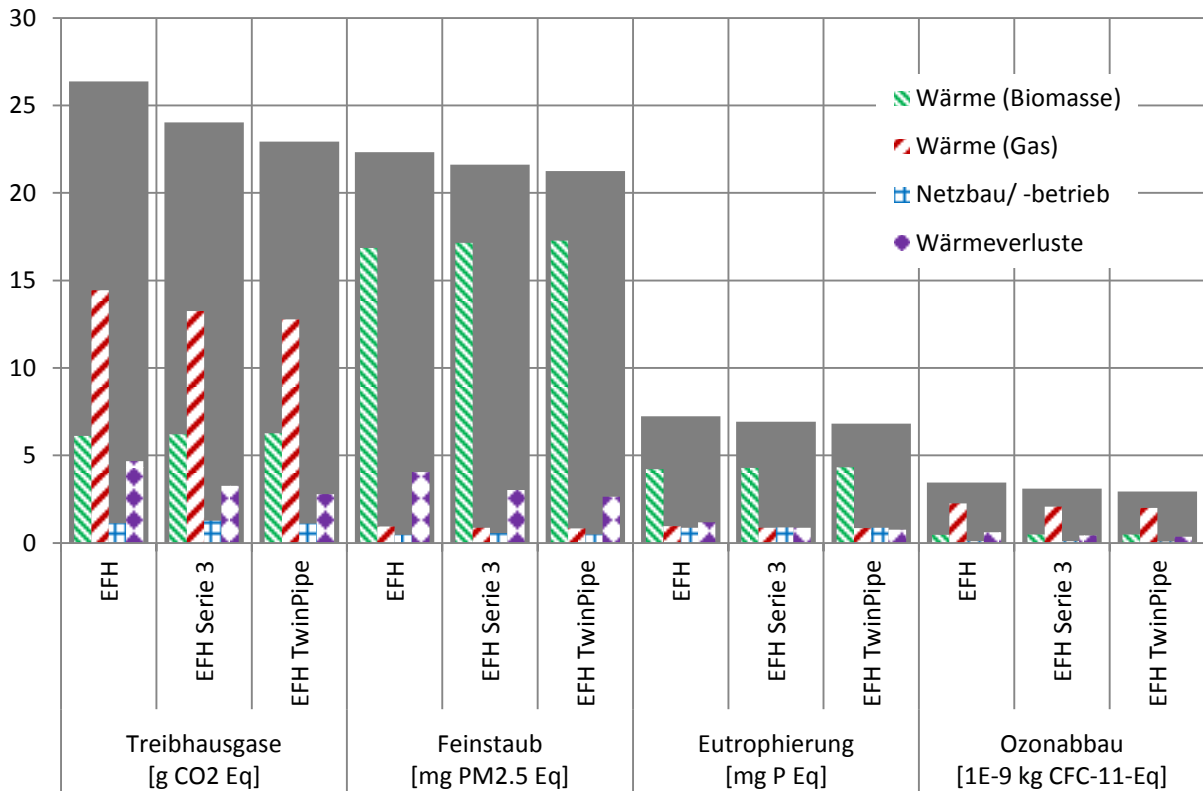
	EFH	EFH Serie 3	EFH TwinPipes
Holzenergieanteil	82,5%	83,9%	84,48%
Wärmeverluste	22,8%	16,8%	14,6%

**Tabelle 8-2: Wärmeverluste und Holzenergieanteil bei Variation des Rohrsystems**

Bei den in Abbildung 8-33 gezeigten Treibhausgasemissionen, dem Feinstaub und dem Ozonabbau schneidet jeweils das Netz mit TwinPipes am besten ab, das mit Rohren der Serie 3 am zweitbesten. Speziell bei den Treibhausgasen kommt es durch die geringeren Wärmeverluste und den höheren Holzenergieanteil zu um 13 Prozent geringere Umweltlasten. Dafür sinken die Umweltlasten beim Ozonabbau um 15 Prozent.

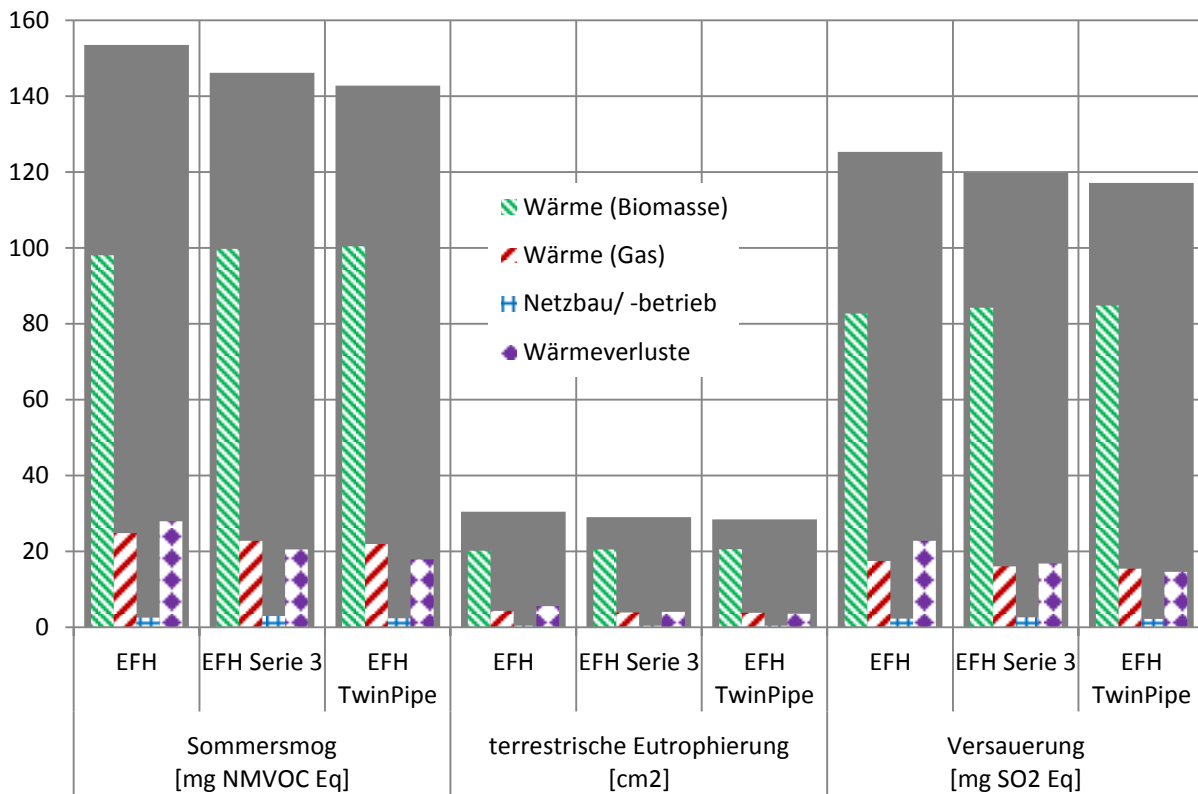


**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**



**Abbildung 8-33: Treibhausgase, Feinstaub, Eutrophierung und Ozonabbau bei Variation des Rohrsystems**

Bei dem in Abbildung 8-34 gezeigten Sommersmog, der terrestrischen Eutrophierung und der Versauerung sinken die Umweltlasten ebenfalls, allerdings deutlich weniger.



**Abbildung 8-34: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung, Versauerung bei Variation des Rohrsystems**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Netze mit unterschiedlichen Rohrsystemen zeigt Abbildung 8-35.

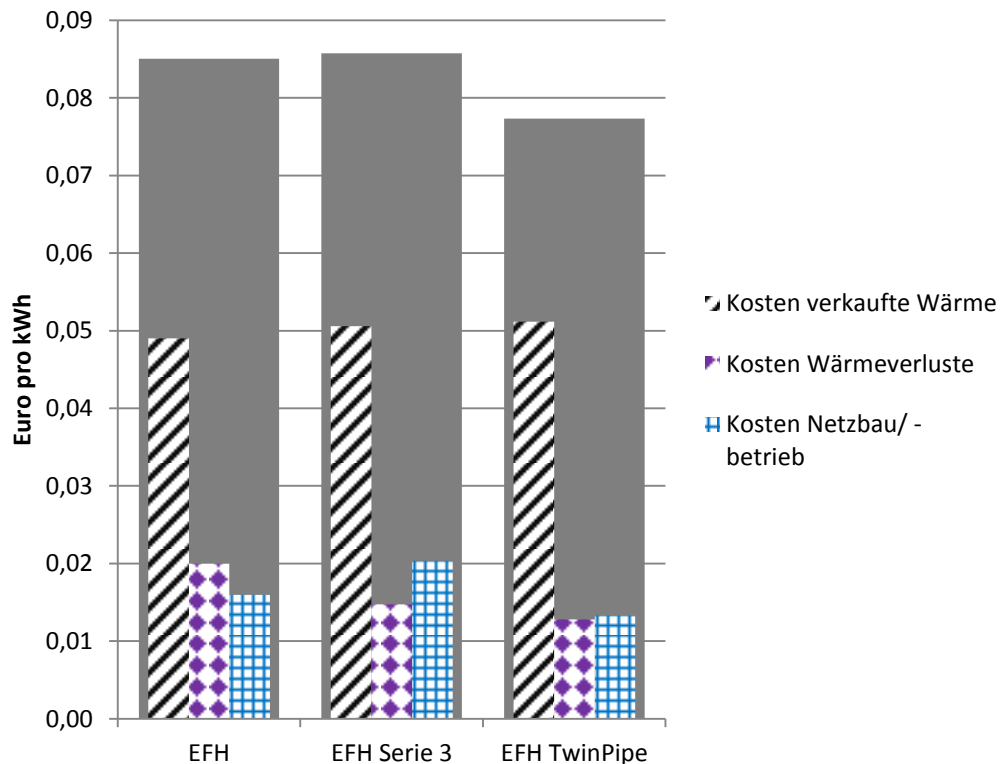


Abbildung 8-35: Wärmegestehungskosten bei Variation der Rohre

Bei Nutzung der Serie 3 werden die Kostenersparnisse durch die vermiedenen Wärmeverluste durch die erhöhten Kosten für Netzbau und –betrieb ausgeglichen. Die Nutzung von TwinPipes hingegen bringt eine Kostenersparnis, da hier sowohl die Wärmeverluste sinken, als auch die Kosten für den Netzbau geringer ausfallen. Es ist auch die einzige der drei Netzvarianten mit Einfamilienhäusern bei der die Wärmegestehungskosten unter den Fernwärmepreis fallen.

Sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht lohnt sich also eine Umstellung auf TwinPipes. Die hier gefundenen Ergebnisse gelten auch für andere Wärmenetze, allerdings fallen die Einsparungen bei Netzen mit größeren Abnehmern deutlich geringer aus.

### 8.4.4 Einfluss der verwendeten Heiz(kraft)werke am Beispiel der Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser

In diesem Kapitel wird der Einfluss des verwendeten Heiz(kraft)werkes auf die Umweltwirkungen und Wärmegestehungskosten der semi- zentralen Wärmenetzvarianten zur Versorgung einer Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser untersucht.

Tabelle 8-3 zeigt die Anzahl der kleinen Mehrfamilienhäuser im Netz, ihre Wärmeabnahmeeigenschaften, den Holzenergieanteil im Netz, die Wärmeverluste sowie die Netzlänge.

Das kleinere Netz hat 44 Abnehmer und wird über einen Hackschnitzelkessel (beschrieben in Kapitel 7.5.1) versorgt. Das größere Netz mit 120 Abnehmern erhält seine Wärme von dem in Kapitel 7.5.6 beschriebenen Holzvergaser- Blockheizkraftwerk.

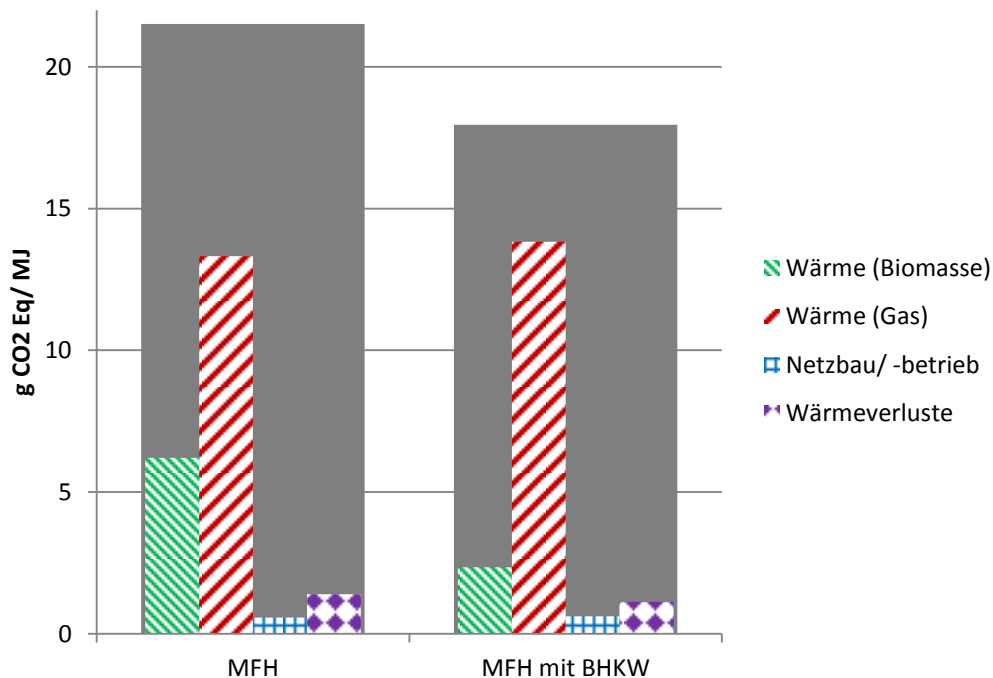
## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

	MFH	MFH mit BHKW
Anzahl Abnehmer	44	120
Konversionsanlagen	Hackschnitzelkessel 800kW <sub>th</sub> Spitzenlastgaskessel 1 MW <sub>th</sub>	Holzvergaser- Blockheizkraftwerk 2 Spitzenlastgaskessel zu je 1 MW <sub>th</sub>
Leistung		50 kW
Volllaststunden		1.914 h/a
Heizgrenzleistung		13,6%
Holzenergieanteil	83,8%	83,2%
Wärmeverluste	7,2%	7,0%
Netzlänge	1.384 m	3.284 m

**Tabelle 8-3: Kenndaten der semi- zentralen Wärmeversorgung der Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser**

Grund für die Auswahl der beiden Netze waren die vergleichbaren Holzenergieanteile im Netz sowie die sehr ähnlichen Wärmeverluste.

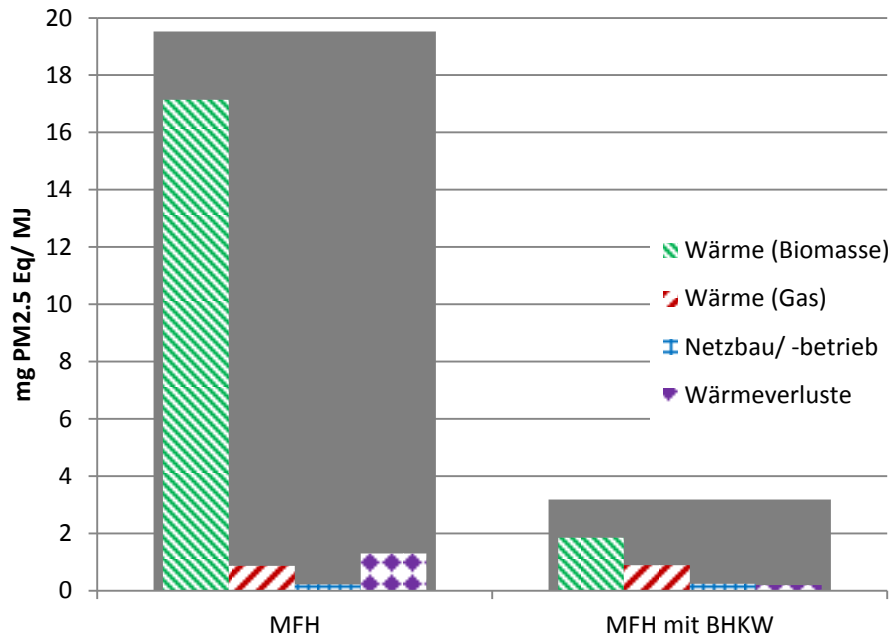
Bei den in Abbildung 8-36 gezeigten Treibhausgasen schneidet das größere Netz mit Holzvergaser-Blockheizkraftwerk etwa 17 Prozent besser ab.



**Abbildung 8-36: Treibhausgase bei Variation des Holzheiz(kraft)werkes**

Große Unterschiede treten im Bereich der Feinstaubemissionen (gezeigt in Abbildung 8-37) auf. Hier hat das Netz mit Holzvergaser-Blockheizkraftwerk um 84 Prozent geringere Umweltlasten als das Netz mit Hackschnitzelkessel.

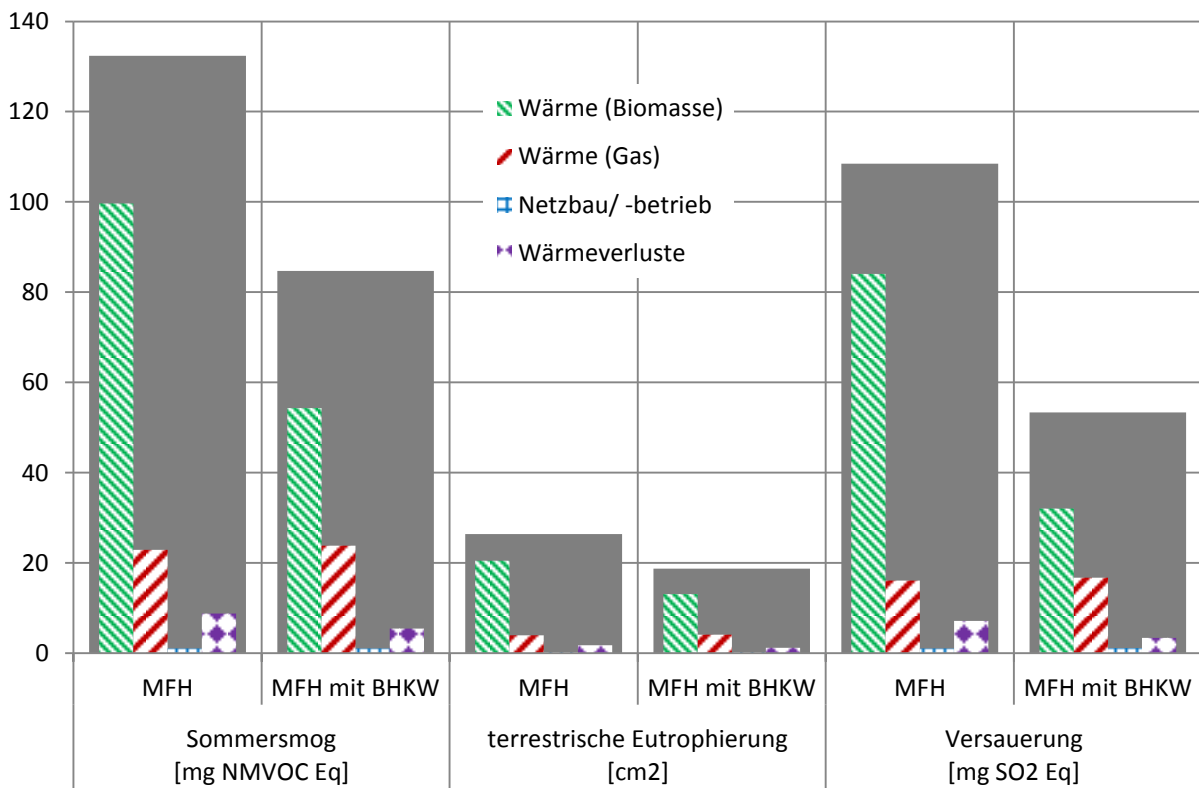
**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**



**Abbildung 8-37: Feinstaub bei Variation des Holzheiz(kraft)werks**

Grund dafür sind die in Kapitel 8.3.1 gezeigten deutlich höheren Feinstaubemissionen bei der direkten Holznutzung gegenüber der Holzvergasung.

In Abbildung 8-38 sind der Sommersmog, die terrestrische Eutrophierung und die Versauerung gezeigt.

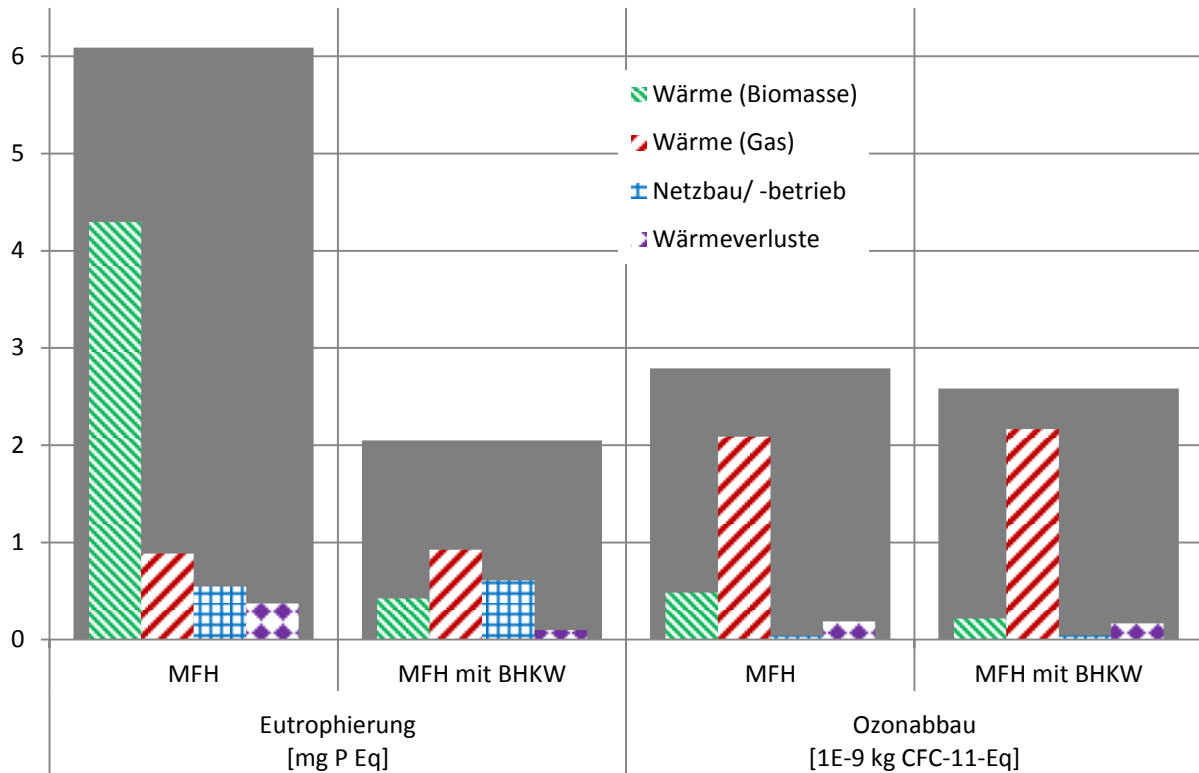


**Abbildung 8-38: Sommersmog, terrestrische Eutrophierung, Versauerung bei Variation des Holzheiz(kraft)werks**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Während bei der terrestrischen Eutrophierung kaum ein Unterschied zu erkennen ist, schneidet bei den anderen Kategorien das Wärmenetz mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk besser ab. Beim Sommersmog beträgt der Unterschied 36 Prozent, bei der Versauerung 51 Prozent.

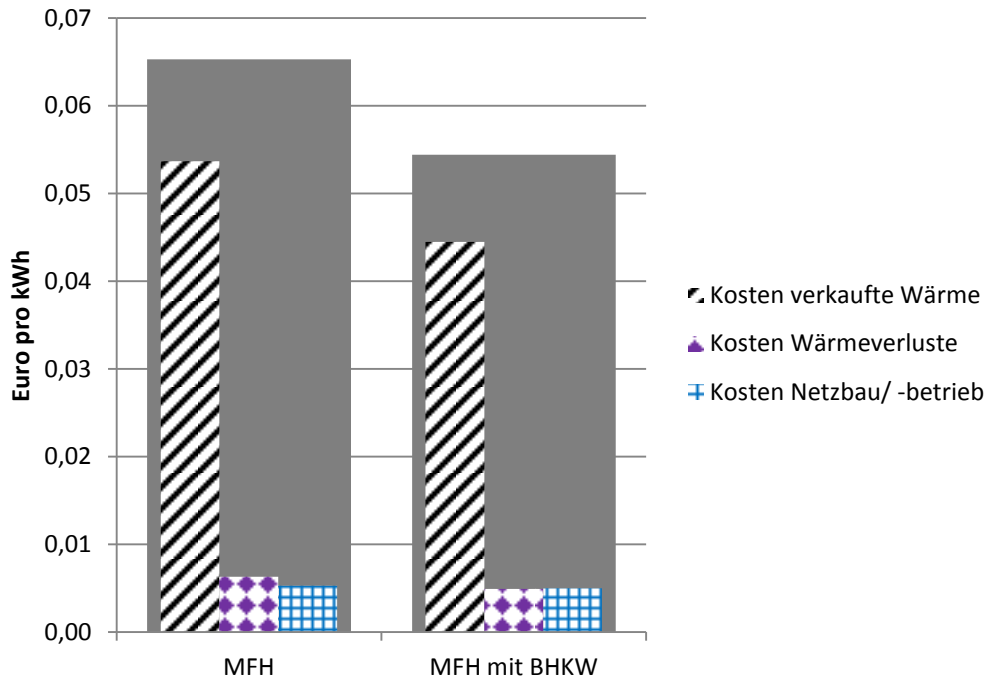
Die Ergebnisse für den Ozonabbau und die Eutrophierung sind in Abbildung 8-39 gezeigt.



**Abbildung 8-39: Eutrophierung und Ozonabbau bei Variation des Holzheiz(kraft)werks**

Während der Unterschied beim Ozonabbau mit unter 10 Prozent eher gering ist, beträgt die Eutrophierung beim Netz mit Hackschnitzelkessel etwa das Dreifache derjenigen beim Netz mit Holzvergaser-Blockheizkraftwerk. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Hackschnitzelkessel im Gegensatz zum Holzvergaser-Blockheizkraftwerk seinen Eigenstrombedarf aus dem Stromnetz deckt und hierfür eine hohe Eutrophierung auftritt.

Abschließend wird auf die Wärmegestehungskosten der beiden Netzvarianten eingegangen. Diese sind zu sehen in Abbildung 8-40.



**Abbildung 8-40: Wärmegestehungskosten bei Variation des Holzheiz(kraft)werks**

Beide Wärmenetze haben Wärmegestehungskosten, welche unterhalb des Fernwärmepreises liegen und sind damit wirtschaftlich betreibbar. Dabei schneidet das Netz mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk um etwa einen Cent pro Kilowattstunde besser ab, als das Netz mit Hackschnitzelkessel.

Ein größeres mit einem Holzvergaser- Blockheizkraftwerk betriebenes Netz hat nicht nur ökologische Vorteile in allen Wirkungskategorien, sondern ist auch kostengünstiger zu realisieren.

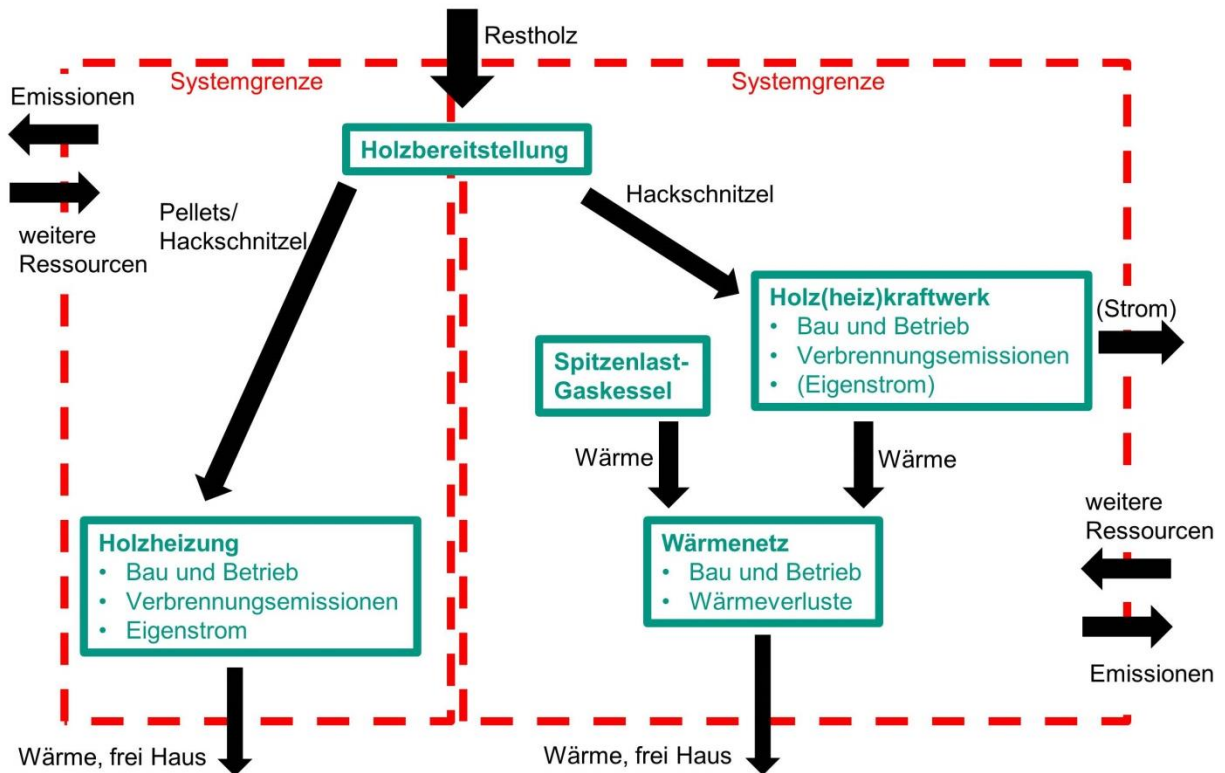
Würde die EEG- Vergütung für das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk jedoch wie am Ende von Kapitel 6.1 beschrieben auf 12 Cent sinken, würden die Wärmegestehungskosten des Netzes mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk auf über 8 Cent pro kWh ansteigen. Damit wäre dieses Netz vermutlich nicht mehr wirtschaftlich betreibbar und hätte höhere Kosten als das Netz mit Holz hackschnitzelkessel.

### **8.5 Umweltwirkungen der Wärmeversorgung eines Wohnhauses: Vergleich dezentraler und semi- zentraler Wärmeversorgungskonzepte**

Im Folgenden wird die semi- zentrale Wärmeversorgung eines Einfamilienhauses und eines kleinen Mehrfamilienhauses nach EnEV 2009 (Netzvarianten „EFH TwinPipes“ und „MFH“ sowie „MFH mit BHKW“) mit der dezentralen Wärmeversorgung durch eine Holzheizung und eine Gasheizung verglichen. Da nur für diese beiden Häuser mit 10 kW bzw. 50 kW Übergabestation auch Datensätze für die dezentrale Wärmebereitstellung aus Holz oder Gas zur Verfügung stehen, ist nur hier ein Vergleich mit der semi- zentralen Wärmebereitstellung möglich.

Die beiden vollständigen Prozessketten sind in Abbildung 8-41 gezeigt.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

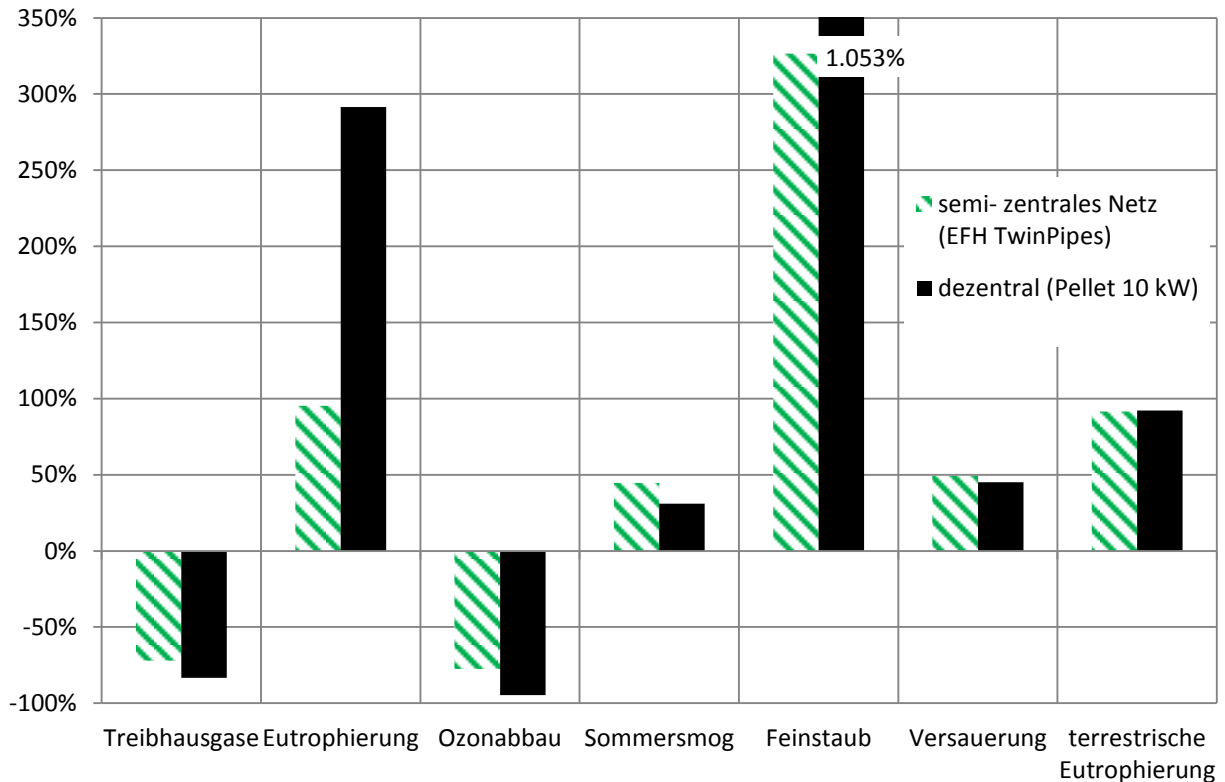


**Abbildung 8-41: Prozessketten der dezentralen und semi- zentralen Wärmeerzeugung aus Holz**

Als fossile Referenz wird die dezentrale Wärmeversorgung über Gasheizungen genutzt, so dass in den Abbildungen Werte größer als 0 höhere und Werte kleiner 0 niedrigere Emissionen gegenüber der dezentralen Gasnutzung bedeuten.

In Abbildung 8-42 werden die unterschiedlichen Wärmeversorgungsmöglichkeiten für das Einfamilienhaus (Neubau nach EnEV 2009) mit einer benötigten Wärmeleistung von 10 kW gezeigt. Zum Vergleich wird eine 10 kW Gasheizung genutzt. Betrachtet wird hier nur die semi- zentrale Netzvariante unter Nutzung von TwinPipes, welche am besten abschneidet (siehe Kapitel 8.4.3).

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



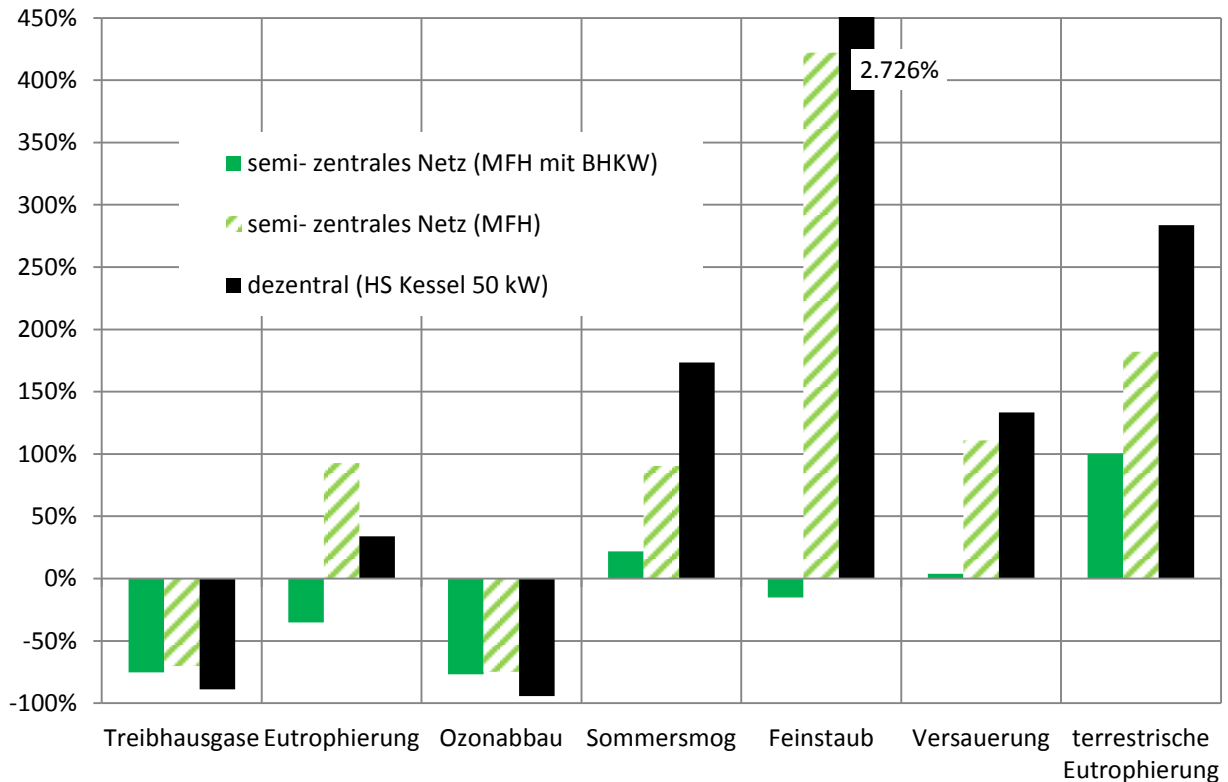
**Abbildung 8-42: Dezentrale und semi- zentrale Wärmeversorgung von Einfamilienhäusern**

Wird eine Treibhausgasmindeung angestrebt, ist es vorteilhaft die Gaseinzelheizungen durch ein Wärmenetz zu ersetzen. Noch höhere Treibhausgasmindeungen können jedoch durch den Einsatz dezentraler Pelletkessel erzielt werden. Gegenüber dem Netz weist der Pelletkessel auch leicht geringere Umweltwirkungen beim Ozonabbau, bei der Versauerung, beim Sommersmog und bei der terrestrischen Eutrophierung auf. Deutlich höhere Umweltlasten entstehen allerdings beim Feinstaub und bei der Eutrophierung.

In Abbildung 8-43 werden die Umweltlasten der Versorgung des Mehrfamilienhauses (Neubau nach [EnEV 2009]) mit einer benötigten Wärmeleistung von 50 kW mit denen einer Gasheizung aus ecoinvent v2.2. („heat, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW (RER)“) und denen eines Hackschnitzelkessel mit 50 kW verglichen.



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 8-43: Dezentrale und semi- zentrale Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern**

Es zeigen sich ähnliche Ergebnisse wie bei der Betrachtung der Einfamilienhäuser: Der Ersatz der Gasheizungen durch ein Wärmenetz verringert die Treibhausgasemissionen und das Ozonabbaupotenzial nennenswert. Noch besser schneidet jedoch auch hier der Hackschnitzelkessel ab. Die Eutrophierung des Hackschnitzelkessels liegt niedriger als bei der netzgebundenen Versorgung, aber oberhalb des fossilen Referenzfalles. Lediglich das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk führt zu einer geringeren Eutrophierung, da hier der Eigenstrombedarf nicht aus dem Stromnetz gedeckt werden muss. Im Bereich des Sommersmog, der Versauerung und der terrestrischen Eutrophierung schneiden die netzgebundenen Versorgungsvarianten besser ab als der Hackschnitzelkessel und schlechter als der Gaskessel. Dabei hat jeweils das Netz mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk die geringsten Emissionen, die allerdings immer noch leicht über denen des dezentralen fossilen Vergleichsfalls liegen. Bei den Feinstaubemissionen kommt es zu sehr viel höheren Feinstaubemissionen bei der Nutzung des Hackschnitzelkessels gegenüber dem Gaskessel und zu deutlich erhöhten Feinstaubemissionen bei der Betrachtung des mit Hilfe des Hackschnitzelkessels 800 kW versorgten Wärmenetzes. Der Einsatz des Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes mindert jedoch die Feinstaubemissionen. Außer bei den Treibhausgasen und beim Ozonabbau schneidet die Wärmenetzversorgung mit Holzvergaser-Blockheizkraftwerk besser ab als die mit Hackschnitzelkessel.

Allgemein ist zu sehen, dass die Nutzung von Holz bis zu 100 Prozent geringere Umweltauswirkungen bedeutet als die Gasnutzung, wenn nur das Treibhausgaspotenzial und der Ozonabbau betrachtet werden, sowie zu einer Schonung fossiler Ressourcen führt. In allen anderen Wirkungskategorien (Versauerung, Eutrophierung, Sommersmog) führt die Holznutzung jedoch zu teilweise deutlich höheren Umweltwirkungen.

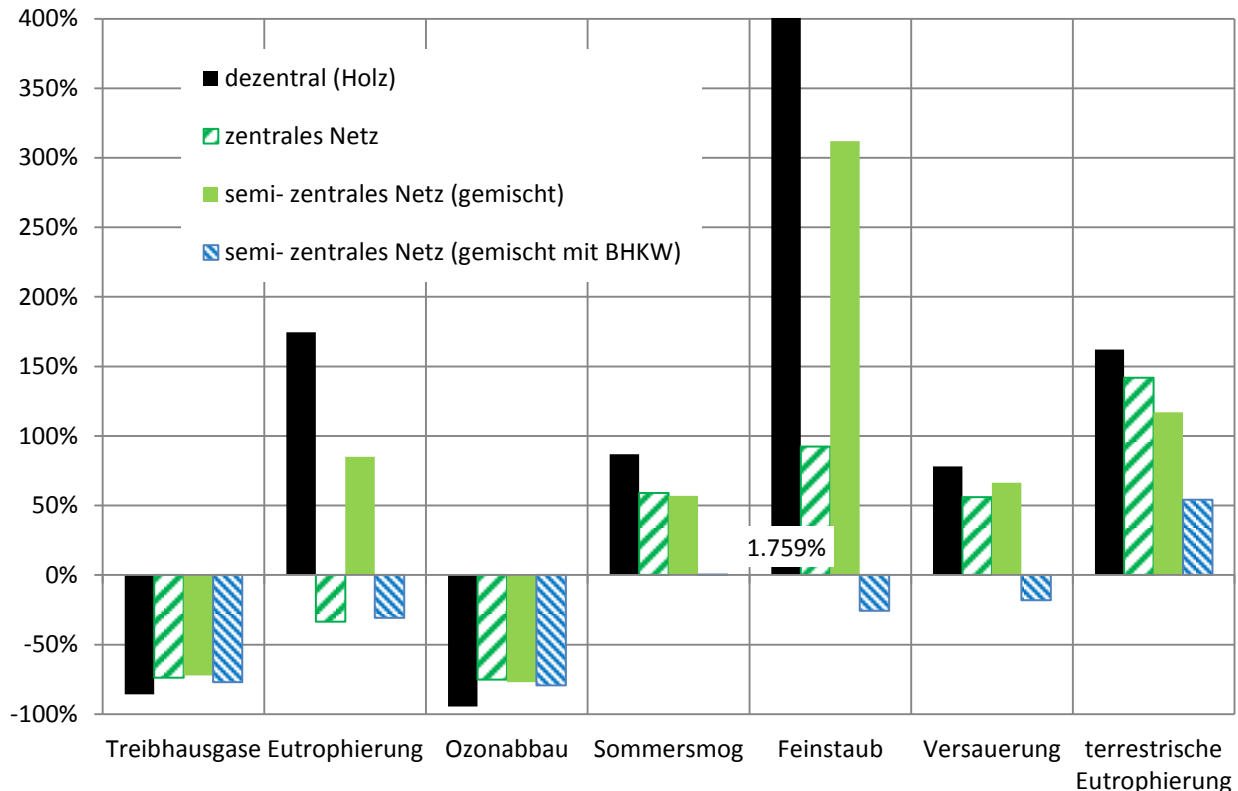
### 8.6 Umweltwirkungen der Wärmeversorgung einer typischen deutschen Wohnsiedlung: Vergleich dezentraler, semi- zentraler und zentraler Wärmeversorgungskonzepte

In diesem Kapitel wird die Versorgung einer durchschnittlichen deutschen Wohnsiedlung aus Neubauten nach [EnEV 2009] mit Hilfe eines semi- zentralen Netzes der über ein zentrales Netz und über Gas- bzw.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Holzeinzelheizungen gegenübergestellt. Dabei wird angenommen, dass alle Einfamilien- und Doppelhaushälften über einen 10 kW Pelletkessel oder einen 10 kW Gaskessel versorgt werden. Alle Mehrfamilienhäuser werden über einen oder zwei 50 kW Hackschnitzelkessel oder einen bis zu 100 kW großen Gaskessel versorgt. Zwei semi- zentrale Netze werden gegenübergestellt, ein größeres Netz, das über ein Holzvergaser- Blockheizkraftwerk versorgt wird („gemischt mit BHKW“) und ein kleineres Netz das über einen Hackschnitzelkessel mit 800 kW verfügt („gemischt“). Alle Netze nutzen KMR Rohre der Serie 1, wie sie auch beim Scharnhäuser Park zum Einsatz kommen.

Abbildung 8-44 zeigt den Vergleich der verschiedenen Wirkungskategorien. Wiederum bedeuten Werte über 0 höhere, Werte unter 0 geringere Emissionen gegenüber der dezentralen Versorgung über Gasheizungen.



**Abbildung 8-44: Dezentrale, semi- zentrale und zentrale Wärmeversorgung im Vergleich**

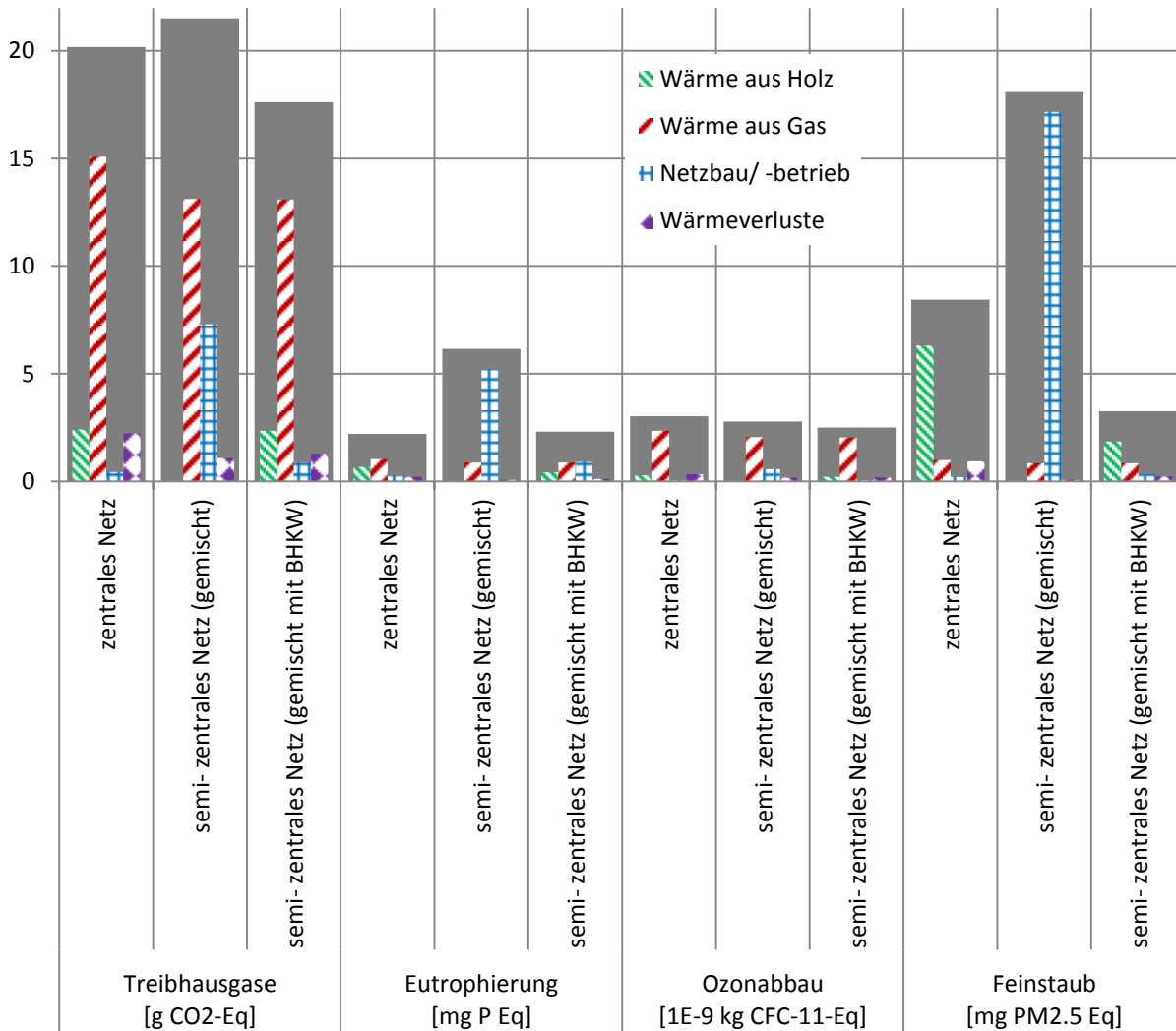
Gegenüber der dezentralen Versorgung mit Gas haben alle holzbasierten Wärmekonzepte im Bereich der Treibhausgase, des kumulierten nicht- regenerativen Energieaufwandes (nicht abgebildet) und des Ozonabbaus einen Vorteil. Sie weisen jedoch im Bereich der terrestrischen Eutrophierung höhere Emissionen auf.

Besonders hohe Feinstaubemissionen (mehr als 1.700 Prozent höher als die der Gasheizungen) treten bei der dezentralen Wärmeversorgung mit Holz auf. Auch die (semi-) zentrale Wärmeversorgung über einen Hackschnitzelkessel oder eine ORC- Anlage führt zu erhöhten Feinstaubemissionen und zu einer vermehrten Versauerung; lediglich durch den Einsatz des Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes können diese gemindert werden. Bei der Eutrophierung weisen das zentrale Netz und das semi- zentrale Netz mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk geringere, das semi- zentrale mit Hackschnitzelkessel oder die dezentrale Versorgung über Holz jedoch höhere Umweltlasten gegenüber den Gasheizungen auf. Der Sommersmog liegt bei der dezentralen Versorgung durch Holz sowie bei der zentralen und semi- zentralen Versorgung höher als bei der dezentralen Gasnutzung. Außer bei den Treibhausgasen, dem kumulierten nicht- regenerativen Energieaufwand und beim Ozonabbau schneiden alle netzgebundenen Versorgungsvarianten besser ab als die dezentrale Versorgung durch Holzheizungen ab.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Abbildung 8-45 und die Abbildung 8-46 zeigen einen Vergleich des zentralen Netzes mit den beiden semi-zentralen gemischten Netzen mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk und Hackschnitzelkessel. Dabei werden die Umweltwirkungen auf die unterschiedlichen Lebenswegabschnitte aufgeteilt. Der Anteil der Wärmeverluste, der Anteil des Netzbau und Betriebs, sowie der Anteil an den Umweltlasten welche auf den Gas- bzw. Holzessel entfallen werden (inklusive der Vorketten) jeweils einzeln gezeigt.

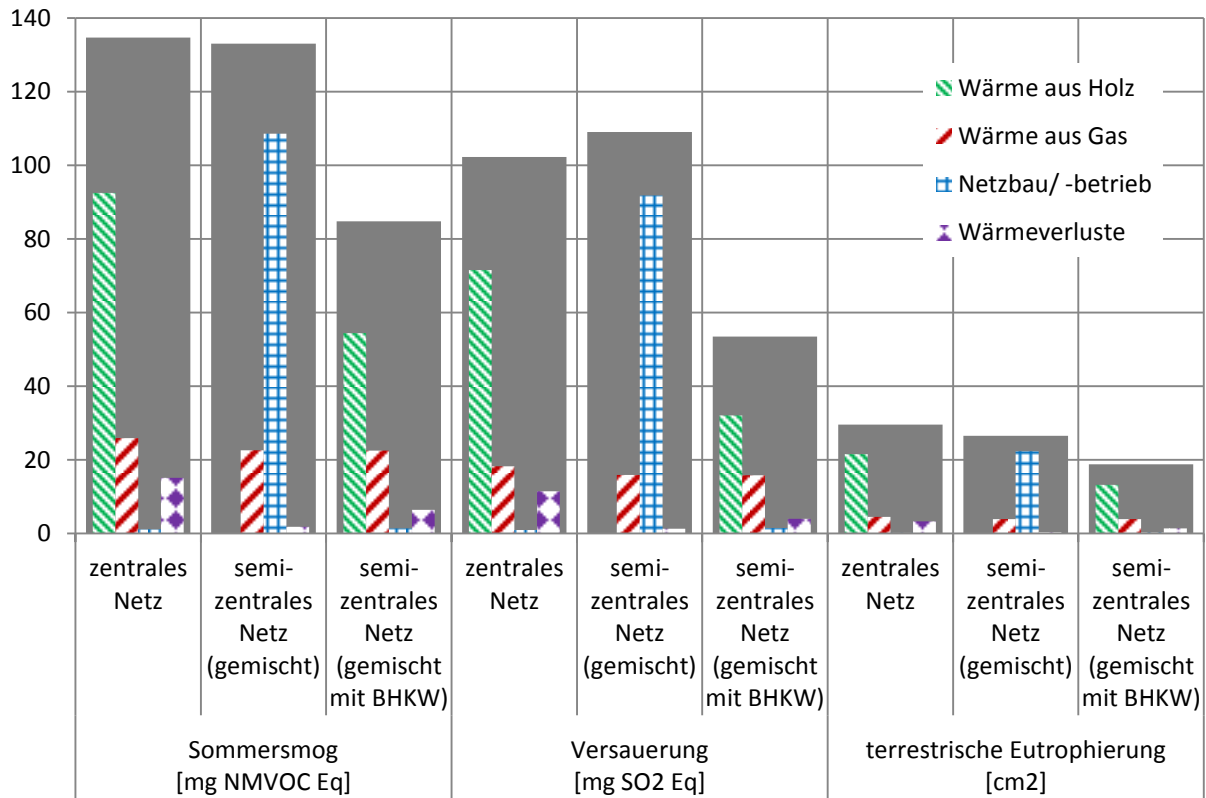
Zunächst sind in Abbildung 8-45 die Treibhausgase, die Eutrophierung, der Ozonabbau und der Feinstaub gezeigt.



**Abbildung 8-45: Treibhausgase, Eutrophierung, Ozonabbau und Feinstaub beim zentralen und semi-zentralen Netz mit gemischten Abnehmern**

In Abbildung 8-46 werden der Sommersmog, die Versauerung und die terrestrische Eutrophierung verglichen.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen



**Abbildung 8-46: Sommersmog, Versauerung und terrestrische Eutrophierung beim zentralen und semi-zentralen Netz mit gemischten Abnehmern**

Entscheidend für die Umweltwirkungen sind unter anderem die auftretenden Wärmeverluste von 12,8 Prozent beim zentralen Netz sowie 7,9 Prozent beim semi- zentralen Netz mit Holzvergaser-Blockheizkraftwerk und 7,6 Prozent beim semi- zentralen Netz mit Hackschnitzelkessel. Außerdem werden beim zentralen Netz 83 Prozent des Wärmebedarfes über die ORC- Anlage gedeckt, beim semi- zentralen jeweils 84 Prozent über den Hackschnitzelkessel bzw. über das Holzvergaser- Blockheizkraftwerk.

Die Umweltwirkungen von Netzbau und –betrieb müssten beim zentralen Netz größer sein, da hier Teile der Infrastruktur auf Grund mangelnder Daten vernachlässigt wurden. Im Allgemeinen ist der Anteil des Netzes allerdings so gering, dass der dadurch entstehende Fehler vernachlässigbar sein dürfte.

Die terrestrische Eutrophierung und das Ozonabbaupotenzial werden hauptsächlich bestimmt durch den Gaskessel und sind bei allen drei Netzen vergleichbar. Sommersmog, Treibhausgase und Versauerung sind beim semi- zentralen Netz mit Hackschnitzelkessel und dem zentralen Netz vergleichbar. Sie sind am geringsten beim Holzvergaser- Blockheizkraftwerk, da die Wärmeerzeugung über den Hackschnitzelkessel oder die ORC- Anlage zu höheren Emissionen führt. Die Eutrophierung ist beim zentralen Netz und beim semi- zentralen Netz mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk vergleichbar. Höher fällt sie beim semi- zentralen Netz mit Hackschnitzelkessel aus, da hier der Eigenstrombedarf aus dem Stromnetz gedeckt werden muss.

Die größten Unterschiede treten bei den Feinstaubemissionen auf. Das semi- zentrale Netz mit Hackschnitzelkessel hat gegenüber dem zentralen Netz um 114 Prozent höhere Emissionen. Um 61 Prozent geringere Emissionen werden jedoch beim Vergleich zwischen zentralem und semi- zentralem Netz mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk erhalten, da die Emissionen sehr stark durch die Holzverbrennung dominiert werden.

## 9 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 9.1 Zusammenfassung

Zentrale Problemstellung dieser Arbeit war die Frage, unter welchen Rahmenbedingungen eine holzbasierte semi- zentrale Hauswärmeversorgung aus ökologischen Gesichtspunkten empfehlenswert ist.

Zunächst wurden unterschiedliche holzbasierte semi- zentrale Wärmeversorgungskonzepte mit Hilfe einer Ökobilanz untersucht. Diese semi- zentralen Wärmeversorgungskonzepte wurden dann mit einer dezentralen und einer zentralen Wärmeversorgung verglichen. Eine holzbasierte semi- zentrale Wärmeversorgung liegt dann vor, wenn die Wärmeenergie hauptsächlich aus Holzreststoffen stammt. Zudem haben semi- zentrale Wärmenetze nur kurze Trassenlängen. Außerdem haben die Wärmeerzeuger in diesen Netzen eine Leistung von unter 5 MW<sub>th</sub> und versorgen nicht mehr als 500 Abnehmer.

Für die Auswertung der Ökobilanzergebnisse wurde mit verschiedenen Wirkungsabschätzungskategorien gearbeitet, wobei aus Gründen der Transparenz kein Summenindikator verwendet wurde. Dabei wurde der kumulierte Energieaufwand dazu genutzt, zu zeigen, welchen direkten und indirekten Energieverbrauch an fossilen Brennstoffen oder Biomasse die Prozessketten aufwiesen. Außerdem wurden die Treibhausgase, der Ozonabbau, der Feinstaub und der Sommersmog betrachtet, sowie die (terrestrische und aquatische) Eutrophierung und die Versauerung.

Dabei hat sich gezeigt, dass eine semi- zentrale Wärmeversorgung durch Holzreststoffe gegenüber der heute vorherrschenden dezentralen Nutzung von Erdgas ein großes Potenzial zur Reduktionen von Treibhausgasemissionen, der Schonung von fossilen Ressourcen und der Verringerung des Ozonabbaus hat. Gleichzeitig führt die semi- zentrale Holznutzung allerdings zu stark erhöhten Feinstaubemissionen. Auch der Sommersmog, die Versauerung, die terrestrische Eutrophierung und teilweise auch die aquatische Eutrophierung steigen an.

Pauschale Aussagen zu den Vorteilen und Nachteilen einer holzbasierten semi- zentralen Wärmeversorgung gegenüber anderen Wärmeversorgungskonzepten sind jedoch schwierig zu treffen, da die Umweltwirkungen von vielen Faktoren abhängen. Im Folgenden werden jedoch einige allgemeine Tendenzen gezeigt und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet.

### 9.2 Diskussion der Ergebnisse

Zunächst wurde untersucht, welche Umweltwirkungen bei der holzbasierten semi- zentralen Wärmebereitstellung auftreten, wenn die Infrastruktur für die Wärmenetze mitbetrachtet wird.

Dabei ist zu sehen, dass die Umweltwirkungen der semi- zentralen Wärmeversorgung aus Holzreststoffen sehr stark durch die Wärmebereitstellung dominiert werden. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass eine Betrachtung der Umweltlasten beim Wärmeerzeuger nicht ausreichend ist. Zwar hat der eigentliche Netzbau außer bei der Eutrophierung geringe Umweltauswirkungen, diese steigen jedoch bei weit ausgedehnten Netzen mit vielen kleinen Abnehmern stark an.

Anschließend wurden die Haupteinflussfaktoren auf die Umweltwirkungen der holzbasierten semi- zentralen Wärmeversorgung bestimmt, indem die Rahmenbedingungen variiert wurden.

Zu sehen ist, dass es zwei Haupteinflussfaktoren auf die Umweltwirkungen der semi- zentralen Wärmeversorgung gibt: Die Wärmeerzeugung in den Konversionsanlagen und der Siedlungstyp, bzw. die dadurch bestimmten Wärmeabnehmer sowie die Netzstruktur. Die Auswirkungen beider Haupteinflussfaktoren werden im Folgenden diskutiert.

### ***Konversionsanlagen und Holzbrennstoffe***

Eine Untersuchung unterschiedlicher Wärmeerzeugungsanlagen hat ergeben, dass bei der Wärmeerzeugung aus Holzreststoffen größere Anlagen und Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen am besten abschneiden. Daher wird empfohlen in Wärmenetzen bevorzugt Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen einzusetzen, um die Ressourcen optimal zu nutzen. Allerdings sollten diese Anlagen immer wärmegeführt gefahren werden und über ausreichend Wärmeabnehmer verfügen.

Gegenüber der Wärmeerzeugung aus Gas verursachen alle Holzheiz(kraft)werke deutlich geringere Treibhausgasemissionen und einen geringeren Ozonabbau. Allerdings muss bei der Nutzung von Holzheiz(kraft)werken immer auf die höhere Feinstaubbelastungen geachtet werden. Einzig der Einsatz eines Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes hat das Potenzial die Feinstaubemissionen zu verringern.

Die Umweltwirkungen aller Konversionsanlagen werden durch die Emissionen aus der Holzverbrennung sowie durch die Holzbereitstellung und, sofern dieser aus dem Stromnetz gedeckt wird, den Eigenstrombedarf bestimmt. Daher wird empfohlen den Stromeigenbedarf soweit möglich selber zu decken, um die Treibhausgase, den Ozonabbau und die Eutrophierung zu verringern. Auch der benötigte Energieaufwand für die Brennstoffbereitstellung sollte möglichst gering gehalten werden, um die Umweltlasten zu senken. Der höchste Energieaufwand wird derzeit für die Pelletbereitstellung benötigt. Bei den Hackschnitzeln ist der Einsatz von Waldrestholz mit dem höchsten, und der von Industrierestholz mit dem niedrigsten Energieaufwand verbunden. Dabei verhalten sich die in Kapitel 8.2 gezeigten Umweltwirkungen bei den Treibhausgasen, dem Feinstaub, dem Ozonabbau und der Versauerung analog zum Energieaufwand. Neben dem Energieaufwand ist für die Umweltwirkungen jedoch auch ausschlaggebend, ob Strom oder Diesel zum Hacken eingesetzt wird. So haben die mit Diesel bereitgestellten Landschaftspflege- und Waldrestholzhackschnitzel höhere Sommersmogemissionen, als die mit Strom erzeugten Industrierestholzhackschnitzel.

Wird der Holzbrennstoff bei den Anlagen variiert, ändern sich neben den Emissionen aus der Bereitstellung auch die Verbrennungsemissionen (zu sehen in Kapitel 8.3.3). Dabei kommt es bei der Verwendung von Landschaftspflegeholzhackschnitzeln zu erhöhten Stickoxidemissionen. Die Staubemissionen sind für die Holzhackschnitzel weitestgehend Brennstoff unabhängig und liegen etwas höher als für die Pellets. Sie werden durch die Art der Abgasnachbehandlung und das Alter der Konversionsanlage bestimmt.

### ***Wärmeabnehmer und Netzstruktur***

Die Untersuchung unterschiedlicher realistischer Siedlungstypen in Kapitel 8.4 hat gezeigt, dass die Wärmeabnehmer und die Netzstruktur entscheidend für den im Netz vorliegenden Holzenergieanteil (d.h. den Anteil der Wärme der aus Holzreststoffen produziert wird) und die Wärmeverluste sind. Diese wiederum beeinflussen maßgeblich die Umweltwirkungen der holzbasierten semi- zentralen Wärmebereitstellung.

Die Wärmeverluste bei den in dieser Arbeit untersuchten Netzen variieren zwischen vier Prozent für große Mehrfamilienhäuser und 23 Prozent für Einfamilienhäuser. Dies zeigt, dass eine pauschalisierte Annahme eines durchschnittlichen Wärmeverlustes zu großen Fehlern bei der Berechnung der Umweltlasten führen kann. Speziell bei vielen kleinen Wärmeabnehmern ist eine Minimierung der Wärmeverluste sehr wichtig. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Umstellung auf TwinPipes (Doppelrohre bei denen Vorlauf- und Rücklaufrohr in einer gemeinsamen Isolierung untergebracht sind) sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht empfehlenswert ist. Die Einsparungen durch TwinPipes fallen bei Netzen mit vielen kleinen Abnehmern am größten aus.

Der Holzenergieanteil im Netz bestimmt vor allem die Treibhausgase, den Ozonabbau, die fossile Ressourcennutzung und den Feinstaub. Sollen die Treibhausgasemissionen, der Ozonabbau und die fossile Ressourcennutzung verringert werden, ist ein höherer Holzenergieanteil im Netz anzustreben. Allerdings treten dann auch erhöhte Feinstaubemissionen auf. Eine Erhöhung des Holzenergieanteils kann erreicht

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

werden, indem die Wärme erzeugungsanlagen so ausgelegt werden, dass das Holzheiz(kraft)werk auf eine hohe Volllaststundenzahl kommt.

Grundsätzlich haben besser gedämmte Abnehmer einen geringeren Wärmebedarf und benötigen weniger Zeit pro Jahr Wärme. Obwohl dadurch das Wärmenetz eine geringere Auslastung hat, hat ein Anstieg der Heizgrenze auch positive Effekte, da hierdurch das Wärmenetz gleichmäßiger ausgelastet wird und der Holzenergieanteil steigt. Wie in Kapitel 8.4.1 erklärt wurde, wirkt dies einem weiteren Anstieg der Umweltlasten teilweise entgegen.

### **Wirtschaftlichkeit**

Eine Überprüfung der Wirtschaftlichkeit hat gezeigt, dass eine Umstellung auf eine holzbasierte semi- zentrale Hauswärmeversorgung für Mehrfamilienhäusersiedlungen ökonomisch realisierbar ist. Holzbasierte semi- zentrale Netze in Einfamilienhäusersiedlungen lohnen sich jedoch aus wirtschaftlichen Gründen oft nicht.

Die Untersuchung der Wärme gestehungskosten der holzbasierten semi- zentralen Wärmeversorgung in Kapitel 8.4 hat ergeben, dass die Kosten ähnlich wie bei den Umweltwirkungen durch die Wärmebereitstellung, die Wärmeverluste und, stärker als bei den Umweltwirkungen, durch den Bau und Betrieb des Netzes bestimmt werden. Bei den Siedlungen mit Mehrfamilienhäusern liegen die Wärme gestehungskosten mit 6 Cent pro kWh deutlich unterhalb dem durchschnittlichen Fernwärmepreis von 8 Cent pro kWh im Jahr 2010. Die semi- zentralen Netze mit Einfamilienhäusern weisen hingegen Wärme gestehungskosten auf, welche etwa einen Cent über diesem Preis liegen, und damit nicht wirtschaftlich sind.

Empfohlen wird daher eine Umstellung auf ein anderes Rohrsystem wie sie in Kapitel 8.4.3 untersucht wurde. Dabei werden für die besser gedämmten Rohre (KMR Serie 3) die Kostenersparnisse durch die vermiedenen Wärmeverluste von den erhöhten Kosten für den Netzbau ausgleichen. Durch die Verwendung von TwinPipes hingegen sinken nicht nur die Kosten für Bau und Betrieb des Netzes, sondern auch die Wärmeverlustkosten. Damit liegen die Kosten für das Netz mit Einfamilienhäusern bei knapp unter 8 Cent pro kWh.

Eine weitere Kostensenkung kann durch den Einsatz von Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen erreicht werden. So weist zum Beispiel das Netz mit Mehrfamilienhäusern bei der Nutzung eines Holzvergaser- Blockheizkraftwerkes mit 5,4 Cent pro kWh geringere Kosten auf als das Netz mit Mehrfamilienhäusern und Hackschnitzelkessel mit 6,5 Cent pro kWh (gezeigt in Kapitel 8.4.4). Allerdings sollte in Zukunft bei sinkender EEG- Vergütung vermehrt auf eine gute Auslastung der Anlagen geachtet werden.

### **Vergleich dezentrale, semi- zentrale und zentrale Wärmebereitstellung**

Abschließend wurde in den Kapiteln 8.5 und 8.6 untersucht, wie die holzbasierte semi- zentrale Wärmeversorgung gegenüber der dezentralen Wärmeversorgung aus Holz oder Gas und der holzbasierten zentralen Wärmeversorgung abschneidet. Dabei diente als Referenz jeweils die derzeitige vorherrschende dezentrale Gasnutzung.

In Tabelle 9-1 sind die Ergebnisse dieser Analyse kurz zusammengefasst. Dabei bedeutet ⊕ dass das betrachtete Wärme bereitstellungskonzept 25 bis 100 Prozent besser abschneidet als die dezentrale Gasnutzung. ⊖ gibt an, dass eine Verschlechterung von 25 bis 100 Prozent gegenüber der dezentralen Gasnutzung vorliegt. Bei ⊖⊖ ist diese Verschlechterung zwischen 100 und 1.000 Prozent und bei ⊖⊖⊖ liegt sie sogar bei über 1.000 Prozent.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

	Dezentral (Holz)	Semi- zentrales Netz mit HS Kessel	Semi- zentrales Netz mit Verg.- BHKW	Zentrales Netz
Treibhausgase	⊕	⊕	⊕	⊕
Eutrophierung	⊖⊖ (bzw. ⊖ für MFH)	⊖	⊕	⊕
Ozonabbau	⊕	⊕	⊕	⊕
Sommersmog	⊖ (bzw. ⊖⊖ für MFH)	⊖	0	⊖
Feinstaub	⊖⊖⊖	⊖⊖	⊕	⊖
Versauerung	⊖ (bzw. ⊖⊖ für MFH)	⊖ (bzw. ⊖⊖ für MFH)	0 (bzw. + für MFH)	⊖
Terrestrische Eutrophierung	⊖⊖ (bzw. ⊖ für EFH)	⊖⊖ (bzw. ⊖ für EFH)	⊖ (bzw. ⊖⊖ für MFH)	⊖⊖
Kumulierter Energieaufwand (fossil)	⊕	⊕	⊕	⊕

**Tabelle 9-1: Vor-/ Nachteile der holzbasierten Wärmeversorgungskonzepte gegenüber Gas**

Wird eine Minderungen der Treibhausgasemissionen, des Ozonabbaus und eine Schonung der fossilen Ressourcen angestrebt, lohnt sich eine Umstellung von einer dezentralen Gasheizung auf die Wärmeversorgung durch ein holzbasiertes semi- zentrales oder zentrales Wärmenetz. Jedoch steigen die Feinstaubemissionen beim zentralen Netz um bis zu 100 Prozent und beim semi- zentralen Netz mit Hackschnitzelkessel sogar um über 100 Prozent an. Daher wird empfohlen ein semi- zentrales Netz mit Holzvergaser- Blockheizkraftwerk einzusetzen, da hier gleichbleibende bis leicht verringerte Feinstaubemissionen zu erwarten sind. Terrestrische Eutrophierung, Versauerung und Sommersmog liegen beim semi- zentralen und zentralen Netz höher als bei der dezentralen Gasnutzung.

Ähnliches gilt auch für die dezentrale holzbasierte Wärmeversorgung. Auch hier liegen die Vorteile bei weniger Treibhausgasen, geringerem Ozonabbau und der Schonung fossiler Ressourcen, während die anderen Wirkungskategorien durchweg höher liegen. Allerdings treten bei der dezentralen Holznutzung extrem hohe Feinstaubbelastungen auf, welche mehr als 1.000 Prozent über denen der dezentralen Gasheizungen liegen.

### Fazit

In dieser Dissertation wurde gezeigt, dass Veränderungen im Bereich der Hauswärmeversorgung großes Potenzial haben bei der Erreichung der deutschen Klimaziele, der Reduktion des Primärenergiebedarfes und der verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien zu helfen. Dabei werden Einsparmaßnahmen, regenerative Energien, Effizienzsteigerungen der Wärmeerzeugungsanlagen und die Verwendung von Wärmenetzen gemeinsam dazu beitragen müssen, die Hauswärmebereitstellung umweltfreundlicher zu gestalten. Allerdings steht die verbesserte Wärmedämmung der Häuser oftmals im Widerspruch zur Verwendung von Wärmenetzen, denn je mehr Wärme auf kleinem Raum abgenommen wird, desto effizienter kann ein Wärmenetz arbeiten.

Die in dieser Arbeit gezeigten Ergebnisse können als Datenbasis bei zukünftigen Entscheidungen über die Art der Hauswärmeversorgung helfen. Allerdings sind die Randbedingungen bei der Wärmeversorgung von Wohnsiedlungen so vielfältig, dass jeweils für jeden Einzelfall geprüft werden muss, welches der vorgestellten Konzepte am besten geeignet ist.

### 9.3 Ausblick

Für die zukünftige Hauswärmeversorgung sind sowohl (semi-) zentrale als auch dezentrale Konzepte relevant.

Mögliche Verbesserungen bei den Umweltwirkungen der (semi-) zentralen Wärmenetze könnten durch die Verwendung von Wärmenetzen für größere Abnehmer oder die Einbeziehung alternativer Wärmequellen



erreicht werden. Dabei wird sich vermutlich der in dieser Arbeit gezeigte Trend fortsetzen, dass größere Netze mit höherer Wärmeabnahmedichte die niedrigeren Umweltwirkungen zeigen. Attraktiv wäre auch weitere Wärmeabnehmer wie städtische Großverbraucher (z.B. Hallenbäder) oder Industrie in die Netze mit aufzunehmen. Als weitere (regenerative) Wärmequellen für die Netze kämen unter anderem die Nutzung von Anbaubiomasse oder nicht holzartigen Reststoffen in Frage. Während die ökologische Vorteilhaftigkeit von Anbaubiomasse in letzter Zeit in Frage gestellt wurde [Leopoldina 2012], ist die Wärmeerzeugung aus nicht holzartigen Reststoffen (z.B. Verbrennung von Stroh im Heizkraftwerk oder Vergärung von Gras und Nutzung im Blockheizkraftwerk) in Zukunft eine attraktive Option [Kaltschmitt et al. 2009], die jedoch durch ihre schlechtere Brennstoffqualität höhere Anforderungen an die Wärmeerzeugungsanlagen stellt. Attraktiv wäre auch die Einbindung bisher ungenutzter Abwärme in die Netze. Derzeit werden etwa 50 Prozent der Industrieabwärme weltweit nicht genutzt, sondern weggekühlt [Bosch 2014]. Die so ins Netz eingebundene Wärme stünde theoretisch umsonst zur Verfügung, allerdings müsste hier ein Vergleich mit anderen Nutzungsmöglichkeiten wie z.B. der Verstromung der Abwärme über Niedrigtemperatur- ORC- Anlagen erfolgen. Werden bei der Nutzung als Fernwärme bis zu 25 Prozent Wärmeverluste angenommen, können etwa 75 Prozent der Abwärme genutzt werden. Eine Niedrigtemperatur- ORC- Anlage hingegen kommt maximal auf Wirkungsgrade von 13 Prozent [Bosch 2014]. Welches Konzept daher vorteilhafter wäre, hängt stark vom gewählten Vergleichssystem ab.

In Zukunft werden Wärmenetze jedoch auch verstärkt gegen alternative dezentrale Wärmeerzeugungskonzepte im Wettbewerb stehen. So werden bereits heute im Neubaubereich 25 Prozent der Häuser mit strombetriebenen Wärmepumpen ausgestattet [BDEW 2012]. Diese weisen jedoch bisher, auf Grund der hohen Umweltwirkungen der konventionellen Stromerzeugung, noch hohe Umweltlasten auf. Nach einem Datensatz in ecoinvent v2.2 braucht eine Wärmepumpe etwa 0,35 MJ Strom pro MJ Wärme. Damit würden bei der Nutzung einer Wärmepumpe mit dem aktuellen deutschen Strommix in fast allen Wirkungskategorien sowohl höhere Emissionen gegenüber dem semi- zentralen Wärmenetz mit Hackschnitzelkessel, als auch gegenüber der dezentralen Pelletzentralheizung auftreten. Da der ecoinvent Datensatz jedoch aus dem Jahr 1998 stammt, wäre es interessant neuere Daten zu Wärmepumpen aufzunehmen und zu prüfen, ob diese besser abschneiden. Alternativ könnte die dezentrale Wärmeversorgung dadurch verbessert werden, dass Teile der Wärme über Solarkollektoren bereitgestellt werden. Laut ecoinvent v2.2. können 25 Prozent der benötigten Wärme für ein Einfamilienhaus durch Solarkollektoren bereitgestellt werden. Wird die restliche Wärme über den dezentralen Pelletkessel mit 10 kW bereitgestellt, kommt es zu 7 bis 20 Prozent geringeren Umweltwirkungen in den unterschiedlichen Wirkungskategorien.

## Literaturverzeichnis

- [Aberle 2013] R. Aberle: Persönliche Auskunft zum Preis eine Hackschnitzelkessels der Firma Fröling Heizkessel- und Behälterbau Ges.m.b.H mit 800 kWth im September 2013.
- [Adam, Milbert 2013] B. Adam, A. Milbert: Deutsche Großstädte und Metropolen im Vergleich – Eine exemplarische Übersicht. RaumPlanung 168 3-2013, 2013.
- [AGFW 2010] AGFW Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: AGFW Hauptbericht 2010.  
[https://www.agfw.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes\\_menu/zahlen\\_und\\_statistiken/Version\\_1\\_HB2010.pdf&t=1412009486&hash=fdd1c0bc6a9545f653472b31a3650019da216da4](https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menu/zahlen_und_statistiken/Version_1_HB2010.pdf&t=1412009486&hash=fdd1c0bc6a9545f653472b31a3650019da216da4)  
abgerufen am 28.9.2014
- [AGFW 2011] AGFW Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: AGFW Hauptbericht 2011.  
[https://www.agfw.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes\\_menu/zahlen\\_und\\_statistiken/Version\\_1\\_HB2011.pdf&t=1412009486&hash=444f2baaf98561488666dd338cd2e1b40750337](https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menu/zahlen_und_statistiken/Version_1_HB2011.pdf&t=1412009486&hash=444f2baaf98561488666dd338cd2e1b40750337)  
abgerufen am 28.9.2014
- [AGFW 2012] AGFW Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: AGFW Hauptbericht 2012.  
[https://www.agfw.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes\\_menu/zahlen\\_und\\_statistiken/Version\\_1\\_HB2012.pdf&t=1412009347&hash=d1ef6ad836f6e4058a84be40e54551ed31adb738](https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menu/zahlen_und_statistiken/Version_1_HB2012.pdf&t=1412009347&hash=d1ef6ad836f6e4058a84be40e54551ed31adb738)  
abgerufen am: 28.9.2014
- [AGFW 2013] AGFW Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: Fernwärme Preisübersicht (Stichtag 1.1.2013)- Webexemplar, 2013.  
[https://www.agfw.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes\\_menu/wirtschaft\\_und\\_markt/markt\\_und\\_preise/Preisbildung-Anpassung/AGFW-Preisuebersicht\\_2013\\_Versand\\_Internetexemplar.pdf&t=1404387616&hash=d129b2555c05f3d28cbc65d305fa068aa18ecf59](https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menu/wirtschaft_und_markt/markt_und_preise/Preisbildung-Anpassung/AGFW-Preisuebersicht_2013_Versand_Internetexemplar.pdf&t=1404387616&hash=d129b2555c05f3d28cbc65d305fa068aa18ecf59)
- [Baumann, Tillman 2004] H. Baumann, A.-M. Tillman: The hitchhiker's guide to LCA- An orientation in life cycle assessment methodology and application, Studentlitteratur AB, Lund, Sweden 2004.
- [BBA 2014] BBA Kompensatoren und Rohrleitungstechnik Vertriebsgesellschaft mbH: Webseite. 2014. <http://www.bba-austria.at/BOAGAZ.html&lan=1&c=1>  
abgerufen am 28.9.2014
- [BDEW 2012] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Energie-Info – Entwicklung der Energieversorgung 2012.  
[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/7AACA6D65A6442A7C1257B3500510242/\\$file/353\\_Energie-Info\\_Entwicklung\\_der\\_Energieversorgung\\_2012.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/7AACA6D65A6442A7C1257B3500510242/$file/353_Energie-Info_Entwicklung_der_Energieversorgung_2012.pdf)  
abgerufen am 28.9.2014

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

- [BDEW 2013] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW Strompreisanalyse Mai 2013 - Haushalte und Industrie. 2013. [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW Strompreisanalyse Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW%20Strompreisanalyse%20Mai%202013.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Ben Hassine, Eicker 2011] I. Ben Hassine, U. Eicker: Simulation and optimization of the district heating network in Scharnhäuser Park. Proceedings of 2nd Polygeneration Conference (2nd ECP), Tarragona, 2011.
- [BlmSchG 2013] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG), 2013. <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschg/gesamt.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [BioEnergieDat 2013] L. Schebek, Y. Cikovani, K. Biemann et al.: Schlussbericht Vorhaben BioEnergieDat – Bereitstellung einer aktuellen und harmonisierten Datenbasis als Beitrag zur Weiterentwicklung einer nachhaltigen Bioenergiestrategie. 2013.
- [BioEnergieDat] BioEnergieDat Datenbank (2012). [www.bioenergiesdat.de](http://www.bioenergiesdat.de)
- [Björklund 2002] A. E. Björklund: Survey of approaches to improve reliability in LCA. Int. J. LCA 7 (2) 64-72, 2002.
- [Blesl et al. 2009] M. Blesl, S. Kempe, M. Ohl, U. Fahl, A. König, T. Jenssen, L. Eltrop: Wärmetatlas Baden-Württemberg – Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. Endbericht, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, 2009.
- [Bodenseekreis] Bodenseekreis- Amt für Abfallwirtschaft: Deponiegebühren Selbstanlieferung Gewerbe. 2013. <http://www.bodenseekreis.de/umwelt-landnutzung/abfallentsorgung-gewerbe/gebuehren-fuer-gewerbebetriebe/deponiegebuehren.html> abgerufen am 28.9.2014
- [Bosch 2014] Bosch KWK Systeme: ORC- Systeme. 2014. <http://www.bosch-kwk.de/de/loesungen/bosch-kwk-systeme-orc-systeme/> abgerufen am 28.9.2014
- [Briem et al. 2004] S. Briem et al.: Lebenszyklusanalysen ausgewählter Stromerzeugungstechniken, 2004.
- [Bundesbank] Deutsche Bundesbank: Zinsstatistik. 2014. [http://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld\\_Und\\_Kapitalmaerkte/Zinssaetze\\_Renditen/S11BATHYP.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld_Und_Kapitalmaerkte/Zinssaetze_Renditen/S11BATHYP.pdf?__blob=publicationFile) abgerufen am 28.9.2014
- [Bundesregierung 2012] Die Bundesregierung: Nationale Nachhaltigkeitsstrategie- Fortschrittsbericht der Bundesregierung 2012. [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/2012-05-21-fortschrittsbericht-2012-barrierefrei.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Anlagen/Nachhaltigkeit-wiederhergestellt/2012-05-21-fortschrittsbericht-2012-barrierefrei.pdf?__blob=publicationFile&v=1) abgerufen am 28.9.2014

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

- [C.A.R.M.E.N.] Centrales Agrar- Rohstoff- Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N.): Webseite zum Thema Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln und Holzpellets. abgerufen am 28.9.2014.  
<http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte>  
<http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/jahresmittelwerte/121-der-pellet-preis-index-jahresmittelwerte>
- [DBFZ 2012] Deutsches BiomasseForschungsZentrum: Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse- Endbericht zur EEG-Periode 2009 bis 2011, Leipzig, März 2012.  
[http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user\\_upload/Berichte Projekt Datenbank/3330002\\_Stromerzeugung\\_aus\\_Biomasse\\_Endbericht\\_Ver%C3%B6ffentlichung\\_FINAL\\_FASSUNG.pdf](http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Berichte_Projekt Datenbank/3330002_Stromerzeugung_aus_Biomasse_Endbericht_Ver%C3%B6ffentlichung_FINAL_FASSUNG.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Destatis] Datenbanken des statistischen Bundesamtes, 2013.
- [Destatis 2012] Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch – Deutschland und Internationales. 2012.
- [Destatis 2010] Statistisches Bundesamt: STATISTISCHES JAHRBUCH 2010 Für die Bundesrepublik Deutschland mit »Internationalen Übersichten«. 2010.
- [DIN 2011] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 14961 Feste Biobrennstoffe- Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 2: Holzpellets für nichtindustrielle Verwendung; Deutsche Fassung EN 14961-2:2011, September 2011.
- [DIN EN ISO 6708] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 6708: Rohrleitungsteile – Definition und Auswahl von DN (Nennweite). 1995.
- [Duvia et al. 2009] A. Duvia, A. Guercio, C. Rossi di Schio: Technical and economic aspects of biomass fuelled CHP plants based on ORC turbogenerators feeding existing district heating networks. Turboden, 2009.  
[http://www.turboden.eu/de/public/downloads/09A06400\\_paper\\_orc\\_turboden\\_clotilde.pdf](http://www.turboden.eu/de/public/downloads/09A06400_paper_orc_turboden_clotilde.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [ecoinvent v2.2] Ecoinvent v2.2 (Ökobilanzdatenbank): Ecoinvent Centre c/o EMPA St. Gallen.
- [EEG 2009] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG). 2009.
- [EEG 2014] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014). 2014.
- [EEWärmeG] Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG). 2008.
- [EnEV 2009] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). 2009.
- [Erhart et al. 2011] T. Erhart, R. Strzalka, U. Eicker, D. Infield: Performance Analysis of a Biomass ORC Polygeneration System. Proceedings of 2nd Polygeneration Conference

- (2nd ECP), Tarragona, 2011. [https://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Publikationen/publikationen\\_download/2011/Erhart\\_Strzalka\\_Eicker\\_Infield\\_ECP\\_2011.pdf](https://www.hft-stuttgart.de/Forschung/Kompetenzen/zafh/Publikationen/publikationen_download/2011/Erhart_Strzalka_Eicker_Infield_ECP_2011.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Esch et al. 2011] T. Esch, H. Taubenböck, C. Geiß, C. Schillings, M. Nast, A. Metz, W. Heldens, M. Keil: Endbericht zum Vorhaben: Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale. 2011. [http://elib.dlr.de/76816/1/Waermenetzpotenzial\\_DLR\\_Endbericht\\_final.pdf](http://elib.dlr.de/76816/1/Waermenetzpotenzial_DLR_Endbericht_final.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Eurostat] Datenbanken zur amtlichen Statistik der EU, Statistisches Amt der Europäischen Union. Luxemburg.
- [Fink 2007] J. Fink: Holzheizkraftwerk Scharnhäuser Park. Vortrag bei der deutschen Umwelthilfe am 29.11.2007. [http://www.duh.de/uploads/media/6\\_Fink\\_291107\\_01.pdf](http://www.duh.de/uploads/media/6_Fink_291107_01.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [FNR 2005] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. 2005. [http://fnr-server.de/cms35/fileadmin/biz/pdf/leitfaden/leitfaden\\_bioenergie.pdf](http://fnr-server.de/cms35/fileadmin/biz/pdf/leitfaden/leitfaden_bioenergie.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [FNR 2013] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Pelletheizungen – Marktübersicht. 2013. [http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/m/u/mu\\_pellet2\\_013\\_web.pdf](http://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/m/u/mu_pellet2_013_web.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Fritsche et al. 2004] U.R. Fritsche, G. Dehoust, W. Jenseit et al.: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Freiburg, Darmstadt, Berlin, 2004. <http://www.oeko.de/oekodoc/236/2004-025-de.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [Fröling et al. 2004] M. Fröling, C. Holmgren, M. Svanström: Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System – Part 1: Pipe Production. Int J LCA 9 (2) 130 – 136, 2004.
- [Fröling et al. 2005] M. Fröling, M. Svanström: Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System - Part 2: Network Construction. Int J LCA 10 (6) 425 – 435, 2005.
- [GEMIS 4.81] IINAS: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme Version 4.81. 2013. <http://www.iinas.org/GEMIS-de.html> abgerufen am 22.5.2013
- [GHG Protocol] Greenhouse Gas Protocol (2011): Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard. World Resource Institute and wbcscd [http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/public/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard\\_041613.pdf](http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/public/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Güssing] Wirbelschicht- Wasserdampf- Vergasung in der Anlage Güssing (A)- Betriebserfahrungen aus zwei Jahren Demonstrationsbetrieb, ohne Jahr. <http://members.aon.at/biomasse/freiberg.pdf> abgerufen am 28.9.2014

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

- [Hischier et al. 2010] R. Hischier, B. Weidema, H.J. Althaus et al.: Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2010.  
[http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03\\_LCIA-Implementation-v2.2.pdf](http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03_LCIA-Implementation-v2.2.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [IAB] Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung: Daten zur Entwicklung der Arbeitszeit und ihrer Komponenten. 2014
- [ILCD 2010] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010, EUR 24708 EN, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2010. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [IPCC 2007] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (Hrsg.): The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, 2007.
- [isoplus 2013] isoplus Fernwärmetechnik Vertriebsgesellschaft mbH: Persönliche Mitteilung mit einer Kostenschätzung für KMR Einzelrohrsystem und Doppelrohrsystem. 2013.
- [ISO 14040] DIN EN ISO 14040 deutsch: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, 2006.
- [ISO 14044] DIN EN ISO 14044 deutsch: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, 2006.
- [IWU 2011] Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Deutsche Gebäudetypologie – Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. 2011.  
[http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE\\_TABULA\\_TypologyBrochure\\_IWU.pdf](http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [JRC 2010] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators. First edition, March 2010, EUR 24586 EN, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2010.  
<http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-Requirements-ONLINE-March-2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [JRC 2011] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. First edition, November 2011, EUR24571EN, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2011.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

- <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/26229>  
abgerufen am 28.9.2014
- [Jungbluth et al. 2002] N. Jungbluth, R. Frischknecht, M. Faist: Ökobilanz für die Stromerzeugung aus Holzbrennstoffen und Altholz, Bundesamt für Energie (CH), 2002.
- [Kaltschmitt 2002] M. Kaltschmitt (Hrsg.): Bioenergieträger in Kraft- Wärme- Kopplungsanlagen, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2002.
- [Kaltschmitt et al. 2009] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer: Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Heidelberg 2009.
- [KfW] KfW Bankengruppe: Webseite zum KfW Effizienzhaus. 2014.  
<https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Neubau/Das-KfW-Effizienzhaus/> abgerufen am 28.9.2014
- [König 2009] A. König: Ganzheitliche Analyse und Bewertung konkurrierender energetischer Nutzungspfade für Biomasse im Energiesystem Deutschland bis zum Jahr 2030. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009.
- [Krimmling 2011] J. Krimmling: Energieeffiziente Nahwärmesysteme- Grundwissen, Auslegung, Technik für Energieberater und Planer. Fraunhofer IRB Verl., Stuttgart, 2011.
- [Leopoldina 2012] Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina: Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen- Empfehlungen. 2012.
- [Leistung 2011] J. Nitsch, T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. Luca de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt, M. Sterner, T. Trost, A. von Oehsen, R. Schwinn, C. Pape, H. Hahn, M. Wickert, B. Wenzel: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht, 2012.  
[http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal\\_2012\\_1/Leistung2011\\_bf.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/Leistung2011_bf.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [logstor 2013a] logstor: Kataloge und Manuals für KMR Rohre. 2013.  
<https://www.logstor.com/DE/District-Heating-and-Cooling/Documentation/Pages/Catalogs-and-Manuals.aspx> abgerufen am 28.9.2014
- [logstor 2013b] logstor: Dänische Preisliste. 2013.
- [May, Brennan 2003] J. R. May, D. J. Brennan: Application of data quality assessment methods to an LCA of electricity generation. Int. J. LCA 8 (4)215-225, 2003.
- [Miekley 2012] B. Miekley: Modellierung und Vergleich zweier Konzepte zur holzbasierten, dezentralen Wärmeversorgung einer Wohnsiedlung. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Karlsruhe 2012.
- [Musterbauordnung] Bauministerkonferenz: Musterbauordnung - Fassung November 2002.  
<http://www.is-ergeb.de/lbo/vtmb100.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [Netzwerk 2010] netzwerk BIO Festbrennstoff MOL: Infoblatt Heizen mit Hackschnitzeln. 2010.  
<http://www.holzweg->

- [mol.de/images/stories/holzweg/hackschnitzelheizung610.pdf](http://mol.de/images/stories/holzweg/hackschnitzelheizung610.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Nowack 2012] A. Nowack: Emissionsbegrenzungen bei der Erzeugung von Elektroenergie aus Holz, Elektroenergie aus Biomasse in dezentraler Anwendung – Technik, Ökonomie, Ökologie. Beiträge zum Fachkolloquium vom 03.-04. Mai 2012 in Zittau, Herausgegeben von der Hochschule Zittau/Görlitz 2012. [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Tagungen/Elektroenergie/2012/HSZG\\_Tagungsband\\_Elektroenergie\\_aus\\_Biomasse\\_2012\\_final.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Tagungen/Elektroenergie/2012/HSZG_Tagungsband_Elektroenergie_aus_Biomasse_2012_final.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Obernberger 2003] I. Obernberger: BiomasseKWK auf Basis des ORC- Prozesses- Vorstellung der EU Demonstrationsprojekte Holzindustrie STIA/ Admont und Fernheizkraftwerk Lienz (Österreich), Präsentation, 2003. <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Presentation-Obernberger-ORC-LienzAdmont-2003-11-26.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [Obernberger, Thek 2008] I. Obernberger, G. Thek: COST ASSESSMENT OF SELECTED DECENTRALISED CHP APPLICATIONS BASED ON BIOMASS COMBUSTION AND BIOMASS GASIFICATION. Proceedings of the 16<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, June 2008, Valencia (IT), 2008. <http://bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-Cost-assessment-CHP-BM-comustion-gasification-2008-05-30.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [OECD] Statistiken der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- [Oliver-Sola et al. 2009] J. Oliver-Sola, X. Gabarrell, J. Rieradevall: Environmental impacts of the infrastructure for district heating in urban neighbourhoods. Energy Policy 37 (2009) 4711–4719, 2009.
- [PEF 2012] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: Product Environmental Footprint (PEF) Guide. Consolidated version, 2013. <http://ec.europa.eu/environment/eusss/pdf/footprint/PEF%20methodology%20final%20draft.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [Persson et al. 2006] C. Persson, M. Fröling, M. Svanström: Life Cycle Assessment of the District Heat Distribution System - Part 3: Use Phase and Overall Discussion. Int J LCA 11 (6) 437 – 446, 2006.
- [Perzon et al. 2007] M. Perzon, K. Johansson, M. Fröling: Life Cycle Assessment of District Heat Distribution in Suburban Areas Using PEX Pipes Insulated with Expanded Polystyrene. Int J LCA 12 (5) 317–327, 2007.
- [Pfaffenberger et al. 2001] W. Pfaffenberger et al.: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft- Wärme- Kopplung und regenerativer Energien. 2001. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1212/pdf/PW1-Bd2-Teil1A.pdf> abgerufen am 28.9.2014



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmereitstellung aus Holzreststoffen

---

- [PFCR 2011] Product Footprint Category Rules (PFCR) for Intermediate Paper Products. Final document of the paper PFCR pilot project, 2011.
- [Rabl, Spadaro 2004] A. Rabl, J. V. Spadaro: The RiskPoll software, version is 1.051 (dated August 2004). [www.arirabl.com](http://www.arirabl.com) abgerufen am 28.9.2014
- [RDesign] ZAE Bayern: RDesign, Berechnungsprogramm zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung von Nahwärmenetzen. 2005.
- [Richtlinie 2004/26/EG] RICHTLINIE 2004/26/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. April 2004 zur Änderung der Richtlinie 97/68/EG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte. 2004. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:225:0003:0107:de:PDF> abgerufen am 28.9.2014
- [Rousseaux et al. 2001] P. Rousseaux, E. Labouze, Y.J. Suh et al.: An Overall Assessment of Life Cycle Inventory Quality-Application to the Production of Polyethylene Bottles. Int. J. LCA 6 (5) 299 – 306, 2001.
- [Schebek 2010] L. Schebek, A. Ciroth, C. Döpmeier et al.: Life Cycle Inventories for bioenergy: A German database for policy support. Buchbeitrag, Tagungsband EcoBalance 2010: Towards & Beyond 2020; Tokio, 10.11. - 12.11.2010.
- [Schubert 2012] D. Schubert: Die neue „neue“ Wohnungsnot. RaumPlanung 163 4-2012, 2012.
- [Schulzke 2011] T. Schulzke: ECONOMY OF SCALE FOR CHP PLANTS BASED ON AUTOTHERMAL FLUIDIZED BED GASIFICATION. 19<sup>th</sup> European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, Germany, June 6<sup>th</sup> to 10<sup>th</sup>, 2011, pp. 1485-1488.
- [Smith Cooper 2012] J. Smith Cooper, E. Kahn: Commentary issues in data quality analysis in life cycle assessment. Int. J. LCA, 17 499-503, 2012.
- [Statbank] Statistics Denmark, 2013. <http://www.statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1920> abgerufen am 28.9.2014
- [Steinbacher 2012] Steinbacher Dämmstoffe: Fernheizsysteme/ Sonderisolierungen Preise gültig ab 1.4.2012. [http://www.steinbacher.at/asp\\_service/upload/content/Fernwaerme.pdf](http://www.steinbacher.at/asp_service/upload/content/Fernwaerme.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Steuernagel 2011] Steuernagel Rohrleitungssysteme: Flexible, vorgedämmte Rohre für die Erdverlegung – Preisliste 2011. [http://www.steuernagel-handel.de/fileadmin/downloads/Steuernagel\\_Preisliste\\_2011\\_II.pdf](http://www.steuernagel-handel.de/fileadmin/downloads/Steuernagel_Preisliste_2011_II.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [Strzalka et al. 2010] R. Strzalka, R. Ulbrich, U. Eicker: Analysis of biomass ORC plant connected to district heating network. Proceedings of the 18<sup>th</sup> Biomass Conference, Lyon (FR), 2010.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

- [TA Luft 2002] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), 2002.
- [Tonn et al. 2009] B. Tonn B, U. Thumm, W. Claupein: Verbrennung von Grünlandaufwüchsen, CO<sub>2</sub>- und Energieeinsparpotenzial. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau 10, 117-120. 2009
- [TWS 2014] Booch, Thomas (Technische Werke Schussental): Persönliche Mitteilung vom 11.7.2014
- [UBA 2013] Umweltbundesamt: Nettostromerzeugung in Deutschland 2011 nach Primärenergieträgern. 2013.  
<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/bilder/dateien/strommix-karte.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [UNEP/ SETAC 2011] United Nations Environmental Programme: Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases - A Basis for Greener Processes and Products. 2011.  
<http://www.unep.org/pdf/Global-Guidance-Principles-for-LCA.pdf> abgerufen am 28.9.2014
- [van Loo, Koppejan 2009] S. van Loo, J. Koppejan: The handbook of biomass combustion and co- firing. Earthscan, London 2009.
- [VDI 2067: Blatt 1] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. VDI Richtlinie 2067: Blatt 1, 2012.
- [VDI 2067: Blatt 12] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung. VDI Richtlinie 2067: Blatt 12, 2000.
- [Viehmann, Thrän 2011] C. Viehmann, D. Thrän: Dezentrale und zentrale Bioenergieerzeugung – ein Vergleich. Vortrag auf der Auftaktveranstaltung „Wie weiter im Bereich Bioenergie?“ anlässlich der „Europäischen Biomassetage der Regionen 2011“ am 05.Oktober 2011 in Bernburg/Strenzfeld, 2011.
- [WDesign] ZAE Bayern: WDesign, Berechnungsprogramm zur technischen und wirtschaftlichen Beurteilung von Heiz(kraft)werken mit Nahwärmeverteilung. 2005.
- [Weidema, Wesnæs 1996] B.P. Weidema, M.S. Wesnæs: Data quality management for life cycle inventories — an example of using data quality indicators. J. Clean. Prod. 4, 167–174. 1996.
- [Weidema 1998] B. P. Weidema: Multi user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data. Int. J. LCA 3 (5) 259-265, 1998.
- [Weidema et al. 2013] B. P. Weidema, C. Bauer, R. Hischer et al.: Overview and methodology - Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen, The ecoinvent Centre, 2013.  
[http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/Data\\_Quality\\_Guidelines/01\\_DataQualityGuideline\\_v3\\_Final.pdf](http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/Data_Quality_Guidelines/01_DataQualityGuideline_v3_Final.pdf) abgerufen am 28.9.2014

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

---

- [Wilhelm 2007] H. Wilhelm: Vortrag: ORC Prozess in der Fernwärme. 2007.
- [WMO 1999] WMO: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44, ISBN 92-807-1722-7, Geneva. 1999
- [Wolff 2004] F. Wolff: Biomasse Baden- Württemberg- Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Nutzung der Ressource Holz als Energieträger, Dissertation, Universitätsverlag Karlsruhe, 2004.
- [Wolff, Jagnow 2011] D. Wolff, K. Jagnow: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung - Untersuchung von Nah- und Fernwärmenetzen. 2011.  
[http://www.zukunftsheizen.de/fileadmin/user\\_upload/3 Technik/3.5 Projekte und Studien/3.5.5 Nah- und Fernwaermenetze/Studie Untersuchung Nah- und Fernwaermenetze IWO.pdf](http://www.zukunftsheizen.de/fileadmin/user_upload/3_Technik/3.5_Projekte_und_Studien/3.5.5_Nah- und_Fernwaermenetze/Studie_Untersuchung_Nah- und_Fernwaermenetze_IWO.pdf) abgerufen am 28.9.2014
- [1. BImSchV 2010] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes- Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1.BImSchV), 2010.

## Anhang 1: Wirkungsabschätzungsmethoden

Elementarflüsse aus ecoinvent v2.2	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energieaufwand	Kumulierter Energieaufwand, Biomasse
Energy, gross calorific value, in biomass (MJ)	-	1 MJ
Coal, brown, in ground (kg)	9,9 MJ	
Coal, hard, unspecified, in ground (kg)	19,1 MJ	
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest (MJ)	1 MJ	
Gas, mine, off-gas, process, coal mining (m3)	39,8 MJ	
Gas, natural, in ground (m3)	38,293 MJ	
Oil, crude, in ground (kg)	45,8 MJ	
Peat, in ground (kg)	9,9 MJ	
Uranium, in ground (kg)	560.000 MJ	

**Tabelle A1-1: Kumulierter Energieaufwand in MJ Äquivalenten**

Elementarflüsse aus ecoinvent v2.2 (in kg)	Kategorie	Feinstaub (in kg PM2.5- Eq.)
Ammoniak	Hohe Bevölkerungsdichte Unspezifiziert Niedrige Bevölkerungsdichte Langzeit	0,06667
Kohlenmonoxid (biogen und fossil)	Unspezifiziert Langzeit	0,00036
Kohlenmonoxid (biogen und fossil)	Niedrige Bevölkerungsdichte	0,00023
Kohlenmonoxid (biogen und fossil)	Hohe Bevölkerungsdichte	0,00052
Stickstoffdioxid	Unspezifiziert	0,00722
Stickstoffmonoxid	Unspezifiziert	0,01107
Stickoxide	Unspezifiziert Niedrige Bevölkerungsdichte Langzeit	0,00722
Stickoxide	Hohe Bevölkerungsdichte	0,00778
Partikel, <2.5 µm	Niedrige Bevölkerungsdichte	0,35
Partikel, <2.5 µm	Langzeit Unspezifiziert Untere Stratosphäre+ Obere Troposphäre	1
Partikel, <2.5 µm	Hohe Bevölkerungsdichte	3,33333
Partikel, >2.5 µm und < 10 µm	Unspezifiziert Langzeit	0,22778
Partikel, >2.5 µm und < 10 µm	Niedrige Bevölkerungsdichte	0,09444
Partikel, >2.5 µm und < 10 µm	Hohe Bevölkerungsdichte	0,40556
Schwefeldioxid	Unspezifiziert Niedrige Bevölkerungsdichte Langzeit	0,06111
Schwefeldioxid	Hohe Bevölkerungsdichte	0,06667
Schwefeloxide	Unspezifiziert Niedrige Bevölkerungsdichte	0,06111
Schwefeltrioxid	Unspezifiziert Niedrige Bevölkerungsdichte Langzeit Untere Stratosphäre+ Obere Troposphäre	0,0489
Schwefeltrioxid	Hohe Bevölkerungsdichte	0,05334
Staub, unspezifiziert	Unspezifiziert	1

**Tabelle A1- 2: Feinstaub in kg PM2,5 Äquivalenten [Rabl, Spadaro 2004]**

## Anhang 2: Sachbilanzen des Heizkraftwerkanlagenbaus

### Bau der Organic Rankine Cycle Anlage

Für den Anlagenbau der ORC- Anlage werden die in [Briem et al. 2004] enthaltenen Planungsdaten aus den Jahren 2002/2003 verwendet, welche detaillierte Materiallisten des ORC- Kraftwerkes im Scharnhauser Park enthalten. Hier werden für die Prozesse des Anlagenbaus die Materiallisten aufgeführt, sowie die verwendeten Hintergrundprozesse zur Materialbereitstellung und –entsorgung aus ecoinvent v2.2 gezeigt.

Material	Menge	Herstellungsprozess	Entsorgung
Stahl, unlegiert	315.980 kg	Steel converter unalloyed, at plant	disposal, building, reinforcement steel, to sorting plant
PVC	2.558 kg	Polyvinylchloride, at regional storage	disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal
Beton	2.959.200 kg	Cement, unspecified, at plant	disposal, building, concrete, not reinforced, to final disposal
Kies, Schotter	174.000 kg	Gravel, crushed, at mine	Disposal, building, concrete gravel, to final disposal
Holz	23.450 kg bzw. 34 m <sup>3</sup>	Round wood, hardwood, under bark u =70%, at forest road	disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal

**Tabelle A2- 1: Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Bautechnik, am Standort (Lebensdauer 50 Jahre)**

Der Prozess „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Maschinenteknik, am Standort“ bilanziert die Materialaufwendungen zum Bau der Maschinenteknik (Feuerung, Thermoölkessel, Asche- und Schlackeabfuhr, Brennstofflager/-zuführung, Rauchgasreinigung/ -führung, Luftführung, Rohrsysteme, Wärmetauscher, Nebenanlagen) sowie den Abriss (ohne Mineralwolle, Schamott und Keramikfaser). Die Maschinenteknik hat eine Lebensdauer von 20 Jahren.

Material	Menge	Herstellungsprozess	Entsorgung
Stahl, unlegiert	233.492 kg	Steel converter unalloyed, at plant	disposal, building, reinforcement steel, to sorting plant
Stahl, niedrig legiert	106 kg	Steel, low alloyed, at plant	Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration
Stahl, hochlegiert	12.715 kg	Chromium steel 18/8, at plant	Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration
Gusseisen	3.199 kg	Cast iron, at plant	Disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant
Aluminium	1.612 kg	Aluminium, production mix, at plant	Disposal, copper, 0% water, to municipal incineration
Kupfer	2.476 kg	Copper, at regional storage	Disposal, copper, 0% water, to municipal incineration
Keramikfaser	1.000 kg	Ceramic tiles, at regional storage	-
Schamott	55.000 kg	Refractory, fireclay, packed, at plant	-
PVC	178 kg	Polyvinylchloride, at regional storage	disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal
Mineralwolle	1.084 kg	Rock wool, at plant	Disposal, building, mineral wool, to sorting plant
Rest	266 kg	-	

**Tabelle A2- 2: Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Maschinenteknik, am Standort**

Der Prozess „Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Elektrotechnik, am Standort“ enthält die Materialaufwendungen und die Entsorgung für die Transformatoren, Elektrokabel, Kraftwerkssteuerung und Instrumentierung. Sie hat ebenfalls eine Lebensdauer von 20 Jahren.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

<b>Material</b>	<b>Menge</b>	<b>Herstellungsprozess</b>	<b>Entsorgung</b>
Stahl, unlegiert	7.195 kg	Steel converter unalloyed, at plant	disposal, building, reinforcement steel, to sorting plant
Stahl, niedrig legiert	45 kg	Steel, low alloyed, at plant	Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration
Gusseisen	1.000 kg	Cast iron, at plant	Disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant
Aluminium	15 kg	Aluminium, production mix, at plant	Disposal, aluminium, 0% water, to municipal incineration
Kupfer	21.438 kg	Copper, at regional storage	Disposal, copper, 0% water, to municipal incineration
PVC	5.140 kg	Polyvinylchloride, at regional storage	disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal
Elektronik	170 kg	Electronic component	Disposal electronics for control units

**Tabelle A2- 3: Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), Elektrotechnik, am Standort**

Schließlich wird das ORC- Modul in einem eigenen Prozess modelliert. Es hat eine Lebensdauer von nur 15 Jahren.

<b>Material</b>	<b>Menge</b>	<b>Herstellungsprozess</b>	<b>Entsorgung</b>
Stahl, unlegiert	10.000 kg	Steel converter unalloyed, at plant	disposal, building, reinforcement steel, to sorting plant
Stahl, niedrig legiert	40.000 kg	Steel, low alloyed, at plant	Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration
Kupfer	5.000 kg	Copper, at regional storage	Disposal, copper, 0% water, to municipal incineration
Thermoöl	15.000 kg	Diesel, at regional storage	-

**Tabelle A2- 4: Organic Rankine Cycle- Anlage (1 MW<sub>el</sub>), ORC- Modul**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

### Dampfturbinen- Heizkraftwerk:

Auch beim Dampfturbinen- Heizkraftwerk wird mit Daten aus [Briem et. al. 2004] des Biomasseheizkraftwerkes Pfaffenhofen gearbeitet, wobei die Bautechnik wiederum eine Lebensdauer von 50 Jahren hat.

Material	Menge	Herstellungsprozess	Entsorgung
Aluminium	83 kg	Aluminium, production mix, at plant	Disposal, aluminium, 0% water, to municipal incineration
Putz	35.367 kg	Base plaster, at plant	Disposal, building, mineral plaster, to final disposal
Gusseisen	7.154 kg	Cast iron, at plant	Disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant
Baustahl	1.187.646 kg	Steel converter unalloyed, at plant	disposal, building, reinforcement steel, to sorting plant
Keramik	42.231 kg	Ceramic tiles, at regional storage	-
Kupfer	141 kg	Copper, at regional storage	Disposal, copper, 0% water, to municipal incineration
PVC	1.465 kg	Polyvinylchloride, at regional storage	disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal
Beton	7.602.405 kg	Cement, unspecified, at plant	disposal, building, concrete, not reinforced, to final disposal
Kies, Schotter	3.885.413 kg	Gravel, crushed, at mine	Disposal, building, concrete gravel, to final disposal
Holz	21.163 kg bzw. 30,7 m <sup>3</sup>	Round wood, hardwood, under bark u =70%, at forest road	disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal
Glas, Silikat	2.590 kg	Flat glass, uncoated, at plant	Disposal, building, glass sheet, to sorting plant
Glaswolle	536 kg	Glass wool mat, at plant	disposal, building, mineral wool, to sorting plant
Mauerwerk	976.706 kg	Light clay brick, at plant	Disposal, building, brick, to sorting plant
Kunststoffe	4.003 kg	Synthetic rubber, at plant	Disposal, rubber, unspecified, 0% water, to municipal incineration
Titanzink	188 kg	Titanium zinc plate, without pre-weathering, at plant	-
Zink	2.459 kg	Zinc, from combined metal production, at refinery	-
Bitumen	227.771 kg	Bitumen sealing, at plant	Disposal, building, bitumen sheet, to final disposal
Baggerarbeiten	16.097 m <sup>3</sup>	Excavation, hydraulic digger	
Raupenarbeiten	79.822 m <sup>3</sup>	Excavation, skid- steer loader	

**Tabelle A2- 5: Heizkraftwerk (Dampfturbine mit 6.1 MW<sub>el</sub>), Bautechnik, am Standort**

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Die Maschinen- und Elektrotechnik hat eine Lebensdauer von 20 Jahren.

Material	Menge	Herstellungsprozess	Entsorgung
Aluminium	838 kg	Aluminium, production mix, at plant	Disposal, aluminium, 0% water, to municipal incineration
Stahl, niedrig legiert	94.086 kg	Steel, low alloyed, at plant	Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration
Gusseisen	6.706 kg	Cast iron, at plant	Disposal, building, bulk iron (excluding reinforcement), to sorting plant
Stahl, unlegiert	806.039 kg	Steel converter unalloyed, at plant	disposal, building, reinforcement steel, to sorting plant
Keramik	3.584 kg	Ceramic tiles, at regional storage	-
Kupfer	185.255 kg	Copper, at regional storage	Disposal, copper, 0% water, to municipal incineration
PVC	26.150 kg	Polyvinylchloride, at regional storage	disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal
Stahl, hochlegiert	22.623 kg	Chromium steel 18/8, at plant	Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration
Aluminiumlegierungen	2.391 kg	Aluminium, production mix, wrought alloy, at plant	Disposal, aluminium, 0% water, to municipal incineration
Schamott	76.203 kg	Refractory, fireclay, packed, at plant	-
Glas, Silikat	132 kg	Flat glass, uncoated, at plant	Disposal, building, glass sheet, to sorting plant
Mineralwolle	11.509 kg	Rock wool, at plant	Disposal, building, mineral wool, to sorting plant
Polyester	13 kg	Polyester resin, unsaturated, at plant	-
Elektronik	1.340 kg	Electronic component, unspecified, at plant	Disposal electronics for control units
Graphit	14 kg	Graphite, at plant	-
Silikon	7 kg	Silicone product, at plant	-

**Tabelle A2- 6: Heizkraftwerk (Dampfturbine mit 6.1 MW<sub>el</sub>), Maschinen- und Elektrotechnik, am Standort**



## Anhang 3: Wärmenetzmodellierung

Wie in Kapitel 5 erklärt, werden die Daten aus der Netzauslegung in RDesign genutzt um die Materiallisten (Menge an Stahl, Polyethylen hoher Dichte, Polyurethan, Asphalt, Aushub, Wasser) zu bestimmen. Außerdem werden die benötigte Wärmemenge im Netz, die Wärmeverluste, die Anzahl der Hausübergabestationen und ihre Leistungen sowie der benötigte Strombedarf pro Jahr für die Ökobilanzierung in openLCA verwendet.

Diese Daten sind daher, zusammen mit dem Holzenergieanteil aus WDesign für alle betrachteten Netze (beschrieben in Kapitel 5) hier gezeigt:

	KfW 55	EFH	EFH Serie 3	EFH TwinPipes	MFH	MFH mit BHKW	2- Spänner	gemischt	gemischt mit BHKW
<b>Verkaufte Wärmemenge [MWh<sub>th</sub>/ a]</b>	5.011	5.522	5.522	5.522	4.209	11.478	3.444	4.448	11.414
<b>Wärmeverluste</b>	16,5%	22,8%	16,8%	14,6%	7,2%	7,0%	3,9%	7,6%	7,9%
<b>Strombedarf pro Jahr [kWh<sub>e</sub>/ a]</b>	22.117	16.859	16.861	16.985	8.562	26.186	7.082	9.766	39.2633
<b>Trassenlänge [m]</b>	9.593	6.473	6.473	6.473	1.384	3.284	571	1.583	3.748
<b>Holzenergieanteil</b>	88,2%	82,5%	83,9%	84,5%	83,8%	83,2%	82,0%	84,0%	84,1%

Tabelle A3- 1: Daten der modellierten Wärmenetzvarianten

Für jedes Netz werden die Stücklisten an Rohren, Abzweiger, Reduktionen und Muffen bestimmt und hier angegeben.

	KfW 55	EFH (+Serie 3)	EFH 500m	EFH min. Abstand	EFH TwinPipes	MFH	MFH mit BHKW	2- Spänner	gemischt	gemischt mit BHKW
<b>DN 25</b>	9.628	6.334	6.334	6.118	3.141	-	-	-	767	1.669
<b>DN 32</b>	903	551	551	305	271	1.038	2.452	158	584	979
<b>DN 40</b>	1.255	551	551	305	271	209	209	45	187	288
<b>DN 50</b>	4.493	2.310	2.310	1.294	1.131	429	429	317	451	1.334
<b>DN 65</b>	846	1.672	1.672	1.056	837	546	858	170	288	319
<b>DN 80</b>	93	93	93	93	47	134	1.076	111	211	480
<b>DN 100</b>	197	197	997	197	99	197	795	275	460	988
<b>DN 125</b>	-	-	-	-	-	-	-	158	-	889
<b>DN 150</b>	-	-	-	-	-	-	197	-	-	-

Tabelle A3- 2: Rohrmenge der modellierten Netzvarianten (in m)

Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

	KfW 55	EFH (+ Serie 3, 500m, min. Abstand)	EFH TwinPipes	MFH	MFH mit BHKW	2- Spänner	gemischt	gemischt mit BHKW
DN32/ DN25	8	8	4	-	-	-	4	4
DN40/ DN32	8	8	4	8	8	2	4	6
DN50/ DN40	8	8	4	8	8	2	2	6
DN65/ DN50	8	8	4	8	8	4	4	4
DN80/ DN65	4	4	2	4	8	2	2	4
DN100/ DN80	-	-	1	2	8	2	2	4
DN125/ DN100	-	-	-	-	-	-	-	2
DN150/ DN125	-	-	-	-	2	-	-	-

Tabelle A3- 3: Reduktionen der modellierten Netzvarianten (Stück)

	KfW 55	EFH (+Serie 3)	EFH 500m	EFH min. Abstand	EFH TwinPipes	MFH	MFH mit BHKW	2- Spänner	gemischt	gemischt mit BHKW
DN25	2.080	1.376	1.376	1.368	688	-	-	-	182	374
DN32	216	136	136	136	68	232	536	34	130	230
DN40	296	136	136	136	68	56	56	10	36	82
DN50	1.032	536	536	536	268	104	104	64	86	274
DN65	184	376	376	376	188	100	200	30	54	66
DN80	18	18	18	18	9	22	248	22	30	92
DN100	26	26	116	26	13	26	142	38	62	160
DN125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118
DN150	-	-	-	-	-	-	26	-	-	-

Tabelle A3- 4: Muffen der modellierten Netzvarianten (Stück)

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

	KfW 55	EFH (+ Serie 3, 500m, min. Abstand)	EFH TwinPipes	MFH	MFH mit BHKW	2- Spänner	gemischt	gemischt mit BHKW
DN25/DN25	88	48	24	-	-	-	24	24
DN32/DN25	104	64	32	-	-	-	26	32
DN32/DN32	-	-	-	8	8	-	2	2
DN40/DN25	144	64	32				6	32
DN40/DN32	-	-	-	16	16	2	4	4
DN50/DN25	512	264	132	-	-	-	-	64
DN50/DN32	-	-	-	32	32	4	8	8
DN50/DN50	-	-	-	-	-	2	2	2
DN65/DN25	80	176	88	-	-	-	-	-
DN65/DN32	-	-	-	24	64	4	12	16
DN65/DN50	-	-	-	-	-	2	2	2
DN80/DN32	-	-	-	-	80	-	-	20
DN80/DN50	-	-	-	-	-	4	4	4
DN80/DN65	4	4	2	4	-	-	-	-
DN100/DN32	-	-	-	-	32	-	-	22
DN100/DN40	-	-	-	-	-	-	2	-
DN100/DN50	-	-	-	-	-	2	4	14
DN100/DN65	-	-	-	-	-	2	2	-
DN100/DN80	2	2	1	2	-	-	-	-
DN100/DN100	-	-	-	-	4			-
DN125/DN50								14
DN125/DN100								2
DN150/DN100				-	2			-

**Tabelle A3- 5: Abzweiger der modellierten Netzvarianten (Stück)**

**Umrechnung in Materialien:**

Schließlich werden diese Stücklisten wie in Kapitel 5.2.3 gezeigt in Materialmassen umgerechnet um die Masse an Stahl, Polyethylen hoher Dichte, Polyurethan, Asphalt und Sand sowie den Aushub pro Netz zu bestimmen. Alle Angaben beziehen sich auf Bauteile der Firma logstor.

Die Masse an Polyethylen hoher Dichte pro Muffe hängt dabei nicht von der verwendeten Rohrart, sondern nur vom Außendurchmesser der Rohre ab, sie ist für alle drei Rohrarten (einfach gedämmte Kunststoffmantelrohre, besser gedämmte Kunststoffmantelrohre der Dämmserie 3 und TwinPipes) gleich.

Mantelrohr Außendurchmesser	Spezifische Masse an Polyethylen hoher Dichte
90	0,44 kg/ Stück
110	0,55 kg/ Stück
125	0,62 kg/ Stück
140	0,70 kg/ Stück
160	0,80 kg/ Stück
180	0,90 kg/ Stück
200	1,07 kg/ Stück
225	1,33 kg/ Stück
250	1,56 kg/ Stück
280	1,90 kg/ Stück
315	2,24 kg/ Stück

**Tabelle A3- 6: Spezifische Masse an Polyethylen hoher Dichte pro Stück Muffe**

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

**Einfach gedämmte Kunststoffmantelrohre (KMR Serie 1):**

	<b>Stahl</b>	<b>HDPE</b>	<b>PUR</b>	<b>Sand</b>	<b>Wasser</b>	<b>Aushub</b>
<b>DN 25</b>	1,99	0,78	0,33	123,38	0,64	0,180
<b>DN 32</b>	2,55	0,96	0,50	127,75	1,09	0,195
<b>DN 40</b>	2,93	0,96	0,47	127,75	1,46	0,195
<b>DN 50</b>	4,11	1,09	0,58	130,40	2,33	0,195
<b>DN 65</b>	5,24	1,23	0,67	145,51	3,88	0,211
<b>DN 80</b>	6,76	1,41	0,87	162,02	5,35	0,245
<b>DN 100</b>	9,83	1,88	1,34	181,43	9,01	0,263
<b>DN 125</b>	12,08	2,25	1,54	199,27	13,79	0,300
<b>DN 150</b>	16,21	2,65	1,68	251,93	20,18	0,356

**Tabelle A3- 7: Spezifische Masse pro Meter Rohr (KMR Serie 1) in kg/ m bzw. m<sup>3</sup>/ m (Aushub)**

	<b>Stahl</b>	<b>HDPE</b>	<b>PUR</b>	<b>Sand</b>	<b>Wasser</b>	<b>Aushub</b>
<b>DN32/ DN25</b>	3,41	1,30	0,62	188	1,29	0,28
<b>DN40/ DN32</b>	4,11	1,44	0,72	192	1,91	0,29
<b>DN50/ DN40</b>	5,28	1,54	0,78	194	2,84	0,29
<b>DN65/ DN50</b>	7,01	1,74	0,94	207	4,66	0,30
<b>DN80/ DN65</b>	9,00	1,97	1,15	231	6,92	0,34
<b>DN100/ DN80</b>	12,44	2,46	1,66	258	10,77	0,38
<b>DN125/ DN100</b>	16,43	3,10	2,17	286	17,10	0,42
<b>DN150/ DN125</b>	21,22	3,67	2,42	338	25,48	0,49

**Tabelle A3- 8: Spezifische Masse pro Stück Reduktion (KMR Serie 1) in kg/ Stück bzw. m<sup>3</sup>/ Stück (Aushub)**

	<b>Stahl</b>	<b>HDPE</b>	<b>PUR</b>	<b>Wasser</b>	<b>Aushub</b>	<b>Sand</b>
DN25/ DN25	4,81	1,40	0,59	0,99	0,32	222,08
DN32/ DN25	6,15	1,62	0,79	1,45	0,34	227,33
DN32/DN32	6,82	1,72	0,89	1,67	0,35	229,95
DN40/ DN25	6,85	1,62	0,75	1,86	0,34	227,33
DN40/DN32	7,52	1,72	0,86	2,09	0,34	229,95
DN50/ DN25	9,03	1,78	0,89	2,81	0,34	230,50
DN50/ DN32	9,70	1,89	0,99	3,04	0,34	233,13
DN50/ DN50	11,15	1,97	1,04	3,72	0,35	234,72
DN65/ DN25	12,99	2,26	1,16	5,34	0,42	290,08
DN65/ DN32	13,78	2,39	1,28	5,60	0,40	293,14
DN65/ DN50	15,46	2,48	1,34	6,40	0,41	295,00
DN80/ DN32	17,14	2,64	1,56	7,50	0,42	271,07
DN80/ DN50	18,82	2,73	1,62	8,29	0,43	318,10
DN80/ DN65	20,05	2,83	1,69	9,32	0,43	328,68
DN100/ DN32	23,67	3,30	2,23	12,34	0,47	294,37
DN100/ DN40	24,08	3,30	2,21	12,58	0,48	316,25
DN100/ DN50	25,35	3,40	2,28	13,13	0,48	345,29
DN100/ DN65	26,58	3,49	2,35	14,16	0,48	355,87
DN100/ DN80	28,26	3,62	2,49	15,11	0,49	367,42
DN100/DN100	31,53	3,95	2,82	17,53	0,55	381,01
DN125/ DN50	30,26	3,91	2,57	19,60	0,50	370,25
DN125/ DN100	36,44	4,46	3,10	24,00	0,54	405,98
DN150/DN100	45,75	5,02	3,30	32,50	0,59	479,71

**Tabelle A3- 9: Spezifische Masse pro Stück Abzweiger (KMR Serie 1) in kg/ Stück bzw. m<sup>3</sup>/ Stück (Aushub)**

Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Besser gedämmte Kunststoffmantelrohre (KMR Serie 3):

	Stahl	HDPE	PUR	Sand	Wasser	Aushub
DN 25	1,99	1,09	0,72	149,18	0,64	0,20
DN 32	2,55	1,23	0,89	169,07	1,09	0,21
DN 40	2,93	1,23	0,86	169,07	1,46	0,21
DN 50	4,11	1,41	1,10	192,78	2,33	0,25
DN 65	5,24	1,58	1,35	203,49	3,88	0,25
DN 80	6,76	1,88	1,63	229,50	5,35	0,26
DN 100	9,83	2,65	2,52	327,04	9,01	0,36

Tabelle A3- 10: Spezifische Masse pro Meter Rohr (KMR Serie 3) in kg/ m bzw. m<sup>3</sup>/ m (Aushub)

	Stahl	HDPE	PUR	Sand	Wasser	Aushub
DN32/ DN25	3,41	1,74	1,20	238,68	1,29	0,30
DN40/ DN32	4,11	1,84	1,31	253,60	1,91	0,32
DN50/ DN40	5,28	1,97	1,47	271,38	2,84	0,34
DN65/ DN50	7,01	2,24	1,84	297,20	4,66	0,37
DN80/ DN65	9,00	2,60	2,23	324,74	6,92	0,38
DN100/ DN80	12,44	3,40	3,11	417,40	10,77	0,46

Tabelle A3- 11: Spezifische Masse pro Stück Reduktion (KMR Serie 3) in kg/ Stück bzw. m<sup>3</sup>/ Stück (Aushub)

	Stahl	HDPE	PUR	Sand	Wasser	Aushub
DN25/ DN25	5,09	1,97	1,29	268,52	0,99	0,35
DN32/ DN25	6,51	2,13	1,50	292,38	1,45	0,37
DN40/ DN25	7,21	2,13	1,46	292,38	1,86	0,37
DN50/ DN25	9,48	2,34	1,75	320,84	2,81	0,41
DN65/ DN25	13,51	2,98	2,39	389,31	5,34	0,48
DN80/ DN65	20,76	3,74	3,22	463,74	9,32	0,51
DN100/ DN80	29,15	5,02	4,67	618,50	15,11	0,54

Tabelle A3- 12: Spezifische Masse pro Stück Abzweiger (KMR Serie 3) in kg/ Stück bzw. m<sup>3</sup>/ Stück (Aushub)

Kunststoffmantelrohre TwinPipes:

	Stahl	HDPE	PUR	Sand	Wasser	Aushub
DN 25	3,99	1,23	0,86	272,66	1,28	0,326
DN 32	5,10	1,41	1,11	292,99	2,17	0,350
DN 40	5,86	1,41	1,05	292,99	2,92	0,350
DN 50	8,21	1,88	1,66	334,43	4,67	0,400
DN 65	10,47	2,25	1,98	360,87	7,76	0,433
DN 80	13,53	2,65	2,37	387,72	10,69	0,468
DN 100	19,66	3,80	3,74	459,45	18,02	0,563

Tabelle A3- 13: Spezifische Masse pro Meter Rohr (KMR TwinPipes) in kg/ m bzw. m<sup>3</sup>/ m (Aushub)

	Stahl	HDPE	PUR	Sand	Wasser	Aushub
DN32/ DN25	5,00	1,45	1,08	311	1,90	0,37
DN40/ DN32	6,03	1,55	1,18	322	2,80	0,38
DN50/ DN40	7,74	1,81	1,62	376	4,55	0,45
DN65/ DN50	11,21	2,48	2,18	417	7,46	0,50
DN80/ DN65	14,40	2,94	2,61	449	11,07	0,54
DN100/ DN80	19,91	3,87	5,67	508	17,23	0,62

Tabelle A3- 14: Spezifische Masse pro Stück Reduktion (TwinPipes) in kg/ Stück bzw. m<sup>3</sup>/ Stück (Aushub)

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

	<b>Stahl</b>	<b>HDPE</b>	<b>PUR</b>	<b>Sand</b>	<b>Wasser</b>	<b>Aushub</b>
DN25/ DN25	8,38	2,58	1,81	572,58	2,68	0,68
DN32/ DN25	9,94	2,83	2,15	601,04	3,94	0,72
DN40/ DN25	11,00	2,83	2,07	601,04	4,98	0,72
DN50/ DN25	14,29	3,49	2,93	659,07	7,43	0,79
DN65/ DN25	17,45	4,01	3,38	696,08	11,76	0,83
DN80/ DN65	26,27	5,28	4,71	795,42	20,40	0,89
DN100/ DN80	36,99	7,18	6,89	914,63	32,71	0,96

**Tabelle A3- 15: Spezifische Masse pro Stück Abzweiger (TwinPipes) in kg/ Stück bzw. m<sup>3</sup>/ Stück (Aushub)**

Durch die Multiplikation der Rohrlängen in Meter mit den benötigten Materialien pro Meter Rohr, bzw. durch die Multiplikation der Anzahl an Reduktionen/ Abzweigern/ Muffen mit den Materialien pro Stück können die Gesamtmengen an Stahl, Polyethylen, Polyurethan, Sand, Wasser und Aushub pro Netz bestimmt werden. Diese werden in openLCA genutzt um die Sachbilanz wie in Kapitel 7.6.1 Tabelle 7-45 gezeigt zu erstellen.

Damit sind die Inputs für den Prozess „Nahwärmenetz“ der unterschiedlichen semi- zentralen Netzvarianten wie folgt:

<b>Input</b>	<b>KfW 55</b>	<b>EFH</b>	<b>EFH Serie 3</b>	<b>EFH TwinPipes</b>	<b>MFH</b>	<b>MFH mit BHKW</b>	<b>2- Spänner</b>	<b>gemischt</b>	<b>gemischt mit BHKW</b>
<i>Strom [GJ<sub>el</sub>]</i>	4,41	3,05	3,05	3,08	2,03	2,28	2,06	2,20	2,96
<i>m<sub>Asphalt</sub> [kg]</i>	1178,80	721,73	835,69	569,79	202,47	176,16	102,10	219,10	202,19
<i>V<sub>Aushub</sub> [m<sup>3</sup>]</i>	7,07	4,36	4,92	4,11	1,07	0,99	0,60	1,28	1,25
<i>m<sub>HDPE</sub> [kg]</i>	37,02	23,16	31,28	19,12	7,31	7,15	4,07	7,76	8,08
<i>m<sub>Sand</sub> [kg]</i>	4795,33	2966,14	2859,01	3440,62	717,27	666,15	406,97	867,42	844,66
<i>m<sub>PUR</sub> [kg]</i>	15,90	10,09	20,69	13,74	3,67	3,76	2,24	3,92	4,28
<i>m<sub>Stahl</sub> [kg]</i>	146,68	93,62	94,01	90,92	31,79	33,87	30,72	36,44	37,90
<i>m<sub>H2O</sub> [kg]</i>	53,08	37,41	37,41	37,79	16,47	20,74	12,94	19,08	25,54
<i>Wärme ab Heizzentrale [TJ]</i>	1,16	1,23	1,17	1,15	1,07	1,07	1,04	1,08	1,08

**Tabelle A3- 16: Inputs des Prozesses „Nahwärmenetz“ pro TJ Wärme beim Kunden**

## Anhang 4: Kosten der Wärmenetzinfrastruktur

Für die Kostenmodellierung der Wärmenetzinfrastruktur wird mit vier unterschiedlichen Quellen gearbeitet, deren Angaben jeweils auf Deutschland und das Jahr 2010 umgerechnet werden müssen. Dies sind Angaben aus RDesign (Jahr: 2001; Land: Österreich); ein Herstellerprospekt von [logstor 2013b] (Jahr: 2013; Land: Dänemark); ein Herstellerprospekt von Steinbacher (Jahr 2012; Land: Österreich) und ein Angebot von [isoplus 2013] (Jahr 2013; Land Deutschland). Zunächst werden alle Preisangaben auf das Preisniveau des jeweiligen Landes im Jahr 2007 umgerechnet. Danach werden diese vom jeweiligen Land auf das Preisniveau in Deutschland im Jahr 2007 gebracht. Schließlich werden sie auf das Preisniveau 2010 in Deutschland angepasst.

Dazu wird zunächst die Entwicklung des Preisniveaus im Straßenbau in Deutschland, Österreich und Dänemark benötigt.

	Deutschland	Österreich	Dänemark
2001	-	71,0%	-
2007	95,0%	89,6%	92,5%
2012	-	110,4%	-
2013	106,4%	-	107,5%

Tabelle A4- 1: Preisniveau im Straßenbau (Bezugsjahr 2010=100%) [Destatis], [Statbank]

Zudem muss der Unterschied im Preisniveau zwischen den Staaten bekannt sein.

	Preisniveau Bau (2007) (EU=100)
Deutschland	116%
Österreich	124%
Dänemark	163%

Tabelle A4- 2: Preisniveau im Bauwesen in der EU im Jahr 2007 [Eurostat]

Damit ist der Umrechnungsfaktor für die Angaben von logstor (Dänemark 2013) nach Deutschland 2010: 64,48 Prozent. Die Umrechnung der Angaben aus RDesign (Österreich 2001) erfolgt mit dem Faktor: 124,3 Prozent. Die Daten aus [Steinbacher 2012] (Österreich 2012) werden mit dem Faktor 80,0 Prozent multipliziert.

Zudem sind die dänischen Preise von logstor in Kronen angegeben, diese werden mit dem Umrechnungskurs von 0,134 Euro pro dänische Krone umgerechnet.

Grundsätzlich enthält ein Wärmenetz eine Vielzahl an Komponenten wie Hauseinführungen, Pumpen und Rohrleitungen (Rohre, Abzweiger, Reduktionen, Dehnkissen und Muffen) mit Montage, für die Preisdaten nötig sind. Weiterhin werden Hausübergabestationen benötigt, die jedoch oft das Eigentum des Wärmekunden sind, und daher hier nicht mitbetrachtet werden. Üblicherweise lässt sich der Wärmeversorger die Kosten für die Hauseinführung vom Kunden erstatten, diese werden daher ebenfalls bei den Kosten nicht mitbetrachtet.

Auf Grund des sehr geringen Einflusses der Investitionskosten für die **Netzpumpen** werden hier der Einfachheit halber die in RDesign enthaltenen Kostendaten beibehalten und lediglich auf die Verhältnisse in Deutschland im Jahr 2010 fortgeschrieben. Dabei werden zwei Pumpen benötigt. Die Pumpe mit 18 kW elektrischer Leistung (Förderdruck 10 bar und Volumenstrom 50 m<sup>3</sup>/h) kostet 4.400 € und die Pumpe mit 20 kW elektrischer Leistung (Förderdruck 15 bar, Volumenstrom: 40 m<sup>3</sup>/h) kostet 4.850 €.

Um die Kosten für die verwendeten **Muffen** zu bestimmen, werden zunächst die Daten aus den verschiedenen Quellen auf das Jahr 2010 und Deutschland bezogen und dann verglichen. Dabei sind die

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

Muffen nicht von der verwendeten Rohrart abhängig, sondern nur vom Außendurchmesser des Nahwärmerohres.

Mantelrohr Außendurchmesser (mm)	Preis logstor	Preis isoplus	Preis Steinbacher	Preis RDesign
90	18 €	-	51 €	-
110	21 €	-	57 €	52 bis 55 €
125	23 €	-	66 €	55 bis 60 €
140	26 €	-	71 €	59 bis 67 €
160	31 €	62 €	82 €	62 bis 73 €
180	34 €	-	110 €	66 bis 81 €
200	36 €	82 €	110 €	-
225	45 €	-	114 €	98 bis 103 €
250	53 €	101 €	125 €	104 bis 114 €
280	64 €	-	139 €	122 bis 128 €
315	-	131 €	159 €	-
400	-	-	186 €	149 bis 155 €
450	-	-	243 €	207 bis 211 €

**Tabelle A4- 3: Preis der Muffen [logstor 2013b], [isoplus 2013], [Steinbacher2012] und [RDesign]**

Auffallend an der Zusammenstellung ist, dass die meisten Preis sehr ähnlich sind und lediglich die Preise von logstor deutlich niedriger liegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei logstor im Preis nur die Muffen und nicht der benötigte Polyurethanschaum enthalten sind. Daher werden die Preise aus [Steinbacher 2012] ausgewählt.

Einziger Unterschied zwischen den Muffenkosten der beiden normalen Kunststoffmantelrohrsysteme und dem Doppelrohrsystem ist, dass für die TwinPipes in RDesign nur die halben Kosten pro Meter Rohr angegeben werden müssen.

Ebenfalls für alle betrachteten Rohrleitungssysteme gleich sind die verwendeten **Dehnkissen** deren Preisübersicht (wieder für Deutschland 2010) hier gezeigt ist.

Mantelrohr Außendurchmesser (mm)	Preis isoplus	Preis Steinbacher	Preis RDesign
90	16 €	22 €	-
110 bis 160	16 €	22 €	14 bis 22 €
180	23	39 €	14 bis 22 €
200	23 €	39 €	-
225 bis 280	23 €	39 €	21 bis 42 €
315	31 €	60 €	-
400	-	78 €	62 €
450	-	-	62 €

**Tabelle A4- 4: Preise der Dehnkissen [isoplus 2013], [Steinbacher 2012] und [RDesign]**

Bei den Dehnkissen zeigt sich eine breitere Kostenspanne, wobei die Werte für die kleineren Außendurchmesser von [isoplus 2013] und [Steinbacher 2012] noch im Bereich der Werte aus [RDesign] liegen und erst danach größere Abweichungen auftreten.

Ausgewählt werden hier auf Grund der größten Vollständigkeit die Kosten nach [Steinbacher 2012] wobei für den fehlenden Wert angenommen wird, dass der Preis eines Dehnkissen für einen Außendurchmesser von 450 mm gleich dem für 400 mm ist, wie auch in [RDesign] angegeben. Damit beträgt der Preis für ein Dehnkissen passend zu einem Rohr mit 450 mm Außendurchmesser ebenfalls 78 Euro.

Auch hier werden für das TwinPipe System nur die halben Kosten benötigt.



## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmereitstellung aus Holzreststoffen

Neben den Material- und Montagekosten werden zusätzlich die **Grabungskosten** für die Verlegung der Rohrleitungen benötigt. Diese sind für alle Kunststoffmantelrohrserien gleich, da sie nur vom Außendurchmesser der Rohre abhängen.

Verlässliche Angaben zu den Grabungskosten waren nur sehr schwer zu finden, daher werden hier die bereits in [RDesign] vorhandenen Werte fortgeschrieben und genutzt.

Außendurchmesser	Preis pro m Trasse
90	57 €
110	60 bis 61 €
125	65 €
140	69 €
160	75 €
180	91 €
200	111 €
225	111 €
250	119 €
280	130 €
315	<i>fehlt</i>
400	165 €
450	194 €

Tabelle A4- 5: Grabungskosten pro Meter Trasse [RDesign]

Hier ist der Preis pro m Trasse über dem Außendurchmesser des Rohres aufgetragen:

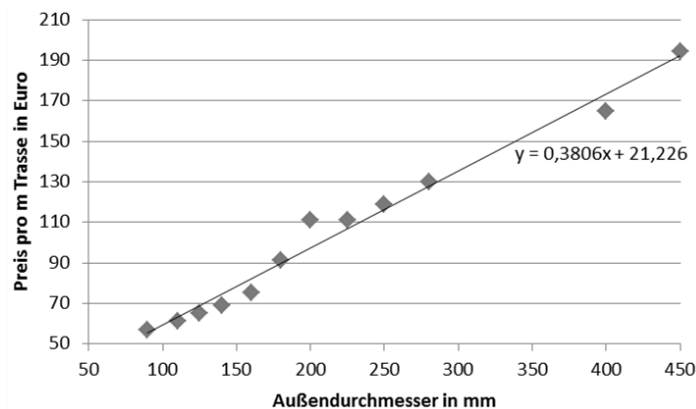


Abbildung A4- 1: Grabungskosten [RDesign]

Die Grabungskosten verhalten sich dabei etwa linear zum Außendurchmesser und anhand der im Diagramm gezeigten Formel kann der fehlende Wert bei 315 mm Außendurchmesser zu 141€ angenommen werden.

Im Bereich der Kosten für die Abzweiger und Reduktionen sowie die Rohre kommt es zu Unterschieden zwischen den verschiedenen Rohrsystemen. Da die Kosten pro Meter Nahwärmerohr jedoch auch die Montage der Rohre beinhalten, muss zunächst abgeschätzt werden, wie lange die Montage eines Rohres dauert und welche Kosten dadurch pro Meter Rohr anfallen.

Nach [isoplus 2013] kostet ein Monteur pro Stunde etwa 48,70 Euro. Für die Montagerichtzeiten konnte mit [Steuernagel 2011] nur eine Quelle für ein flexibles Rohrsystem gefunden werden. Nach [BBA 2014] beträgt die Zeitersparnis eines flexiblen Rohrsystems gegenüber einem festen System bis zu 70 Prozent. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen werden daher die Werte aus [Steuernagel 2011] um 333 Prozent erhöht, allerdings kann die Berechnung der Montagekosten somit nur als sehr grobe Abschätzung dienen.

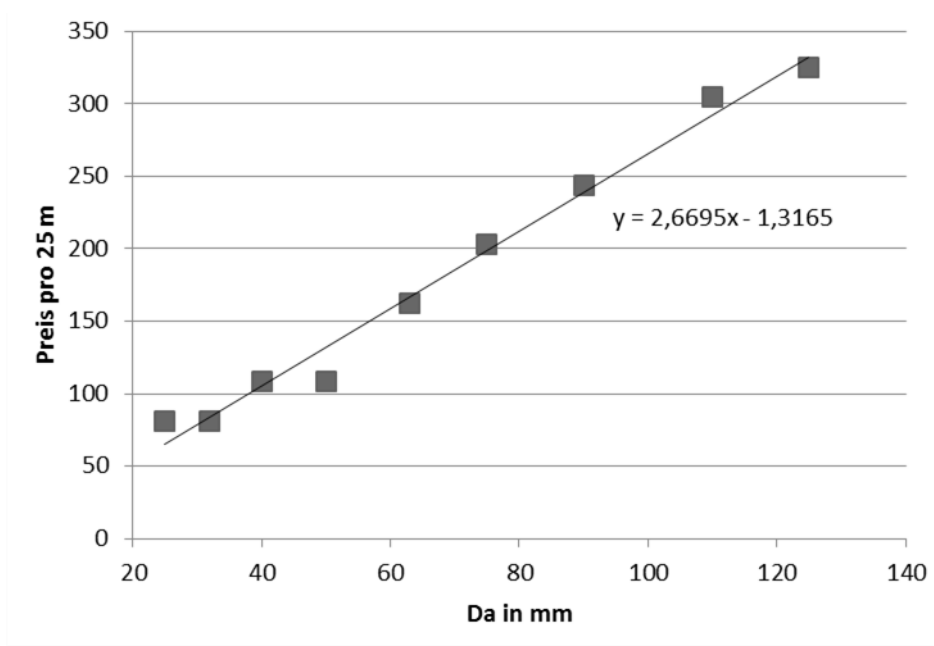
**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmehbereitstellung aus Holzreststoffen**

DN	Außendurchmesser in mm (flexible Rohre) nach [Steuernagle 2011]	Montagezeit in Minuten pro 25 m Rohr nach [Steuernagle]	Montagezeit für KMR Rohre pro 25 Meter (Zuschlag nach [BBA 2014])	Montagekosten pro 25 m Rohr KMR Serie 1
20	25	30	100	81,17 €
25	32	30	100	81,17 €
32	40	40	133,33	108,22 €
40	50	40	133,33	108,22 €
50	63	60	200	162,33 €
65	75	75	250	202,92 €
80	90	90	300	243,50 €
90	110	113	375	304,38 €
100	125	120	400	324,67 €

**Tabelle A4- 6: Montagezeiten und –kosten [Steuernagle 2011] und [BBA 2014]**

Die Plausibilität dieser Werte wird überprüft indem Angaben von [TWS 2014] gegenübergestellt werden. Demnach können etwa 0,94 Meter Kunststoffmantelrohre mit großem Durchmesser bei einer innerstädtischen Bebauung in einer Arbeitsstunde verlegt werden. Dieser Wert stimmt gut mit dem nach [Steuernagle 2011] und [BBA 2014] berechneten Wert von 1 m/h beim größten Außendurchmesser von 450 Millimetern überein.

Werden die Montagekosten in Abhängigkeit des Außendurchmessers aufgetragen ist zu erkennen, dass diese beiden Größen annähernd linear zusammenhängen. Somit können die weiteren benötigten Montagekosten mit Hilfe der im Diagramm gezeigten Formel berechnet werden.



**Abbildung A4- 2: Montagekosten der KMR Rohre**

Werden die fehlenden Werte (kursiv) ergänzt ergeben sich die hier gezeigten Montagekosten pro Meter Kunststoffmantelrohr.

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmehbereitstellung aus Holzreststoffen**

Außendurchmesser in mm	Montagekosten pro m Kunststoffmantelrohr
90	9,74 €
110	12,18 €
125	12,99 €
140	14,90 €
160	17,03 €
180	19,17 €
200	21,30 €
225	23,97 €
250	26,64 €
280	29,85 €
315	33,58 €
400	42,66 €
450	48,00 €

**Tabelle A4- 7: Montagekosten pro Meter Kunststoffmantelrohr**

Die Kosten für die Rohrleitung mit Montage pro Meter Rohr ( $K_{ges, pro m Rohr}$ ) berechnen sich aus den Kosten pro Meter Rohr ( $K_{pro m Rohr}$ ) und den Montagekosten ( $K_{Montage, pro m Rohr}$ ) wie folgt:

$$K_{ges, pro m Rohr} = K_{pro m Rohr} + K_{Montage, pro m Rohr} \quad \text{Formel 9-1}$$

Für die Investitionskosten der Rohrleitungen, Abzweiger und Reduktionen werden jeweils die Preise aus logstor verwendet. Begründet liegt dies darin, dass genau dieselben Rohre auch für die Ökobilanz genutzt werden. Außerdem sind die Kostendaten aus logstor insgesamt am vollständigsten. Trotzdem werden die Angaben aus [RDesign], [isoplus 2013] und [Steinbacher 2012] gegenüber gestellt um die Plausibilität der Preise zu überprüfen.

Neandurchmesser DN in mm	Außendurchmesser in mm	Steinbacher	logstor	isoplus	logstor mit Montage	RDesign mit Montage
25	90	27,50 €	<b>16,10 €</b>		25,90 €	26,80 €
32	110	31,90 €	<b>19,80 €</b>		32,00 €	31,20 €
40	110	33,60 €	<b>20,90 €</b>		33,10 €	31,90 €
50	125	38,60 €	<b>25,40 €</b>		38,40 €	37,20 €
65	140	47,80 €	<b>29,40 €</b>		44,30 €	43,40 €
80	160	54,50 €	<b>37,00 €</b>		54,00 €	46,70 €
100	200	84,50 €	<b>51,50 €</b>	21,00 €	72,80 €	65,00 €
125	225	96,10 €	<b>61,10 €</b>	28,90 €	85,10 €	73,30 €
150	250	112,00 €	<b>78,30 €</b>		105,00 €	89,80 €

**Tabelle A4- 8: Kosten pro Meter Kunststoffmantelrohr (Serie 1) ohne und mit Montage**

Der kursiv gesetzte Wert wird dabei anhand der Formel im Diagramm berechnet.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

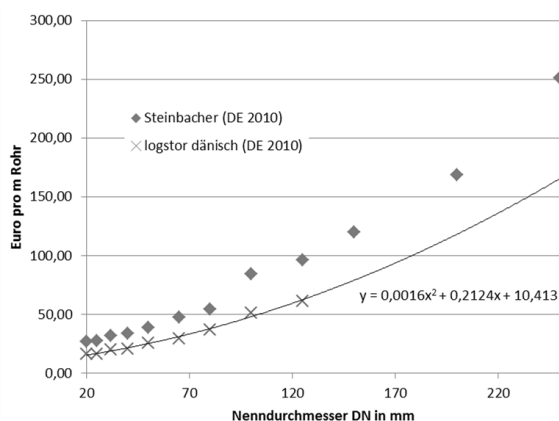


Abbildung A4- 3: Preis der Kunststoffmantelrohr (Serie 1) [logstor 2013] und [Steinbacher 2012]

Zudem werden auch Kostendaten für die besser gedämmten KMR Rohre der Serie 3 benötigt.

Neandurchmesser DN in mm	Außendurchmesser in mm	logstor	logstor mit Montage
25	125	23,40 €	36,43 €
32	140	28,80 €	43,68 €
40	140	30,40 €	45,36 €
50	160	37,00 €	54,02 €
65	180	42,70 €	61,93 €
80	200	53,80 €	75,10 €
100	250	74,90 €	101,54 €
125	280	86,90 €	116,81 €

Tabelle A4- 9: Kosten pro Meter Kunststoffmantelrohr (Serie 3) mit und ohne Montage [logstor 2013]

Bei den Kosten für die TwinPipes wird jeweils der halbe Preis angegeben, da in einem Meter TwinPipe bereits zwei Meter Rohr enthalten sind.

Neandurchmesser DN in mm	Außendurchmesser in mm	logstor	isoplus	logstor mit Montage
25	125	<b>16,90 €</b>	-	24,42 €
32	140	<b>20,10 €</b>	-	28,60 €
40	160	<b>20,70 €</b>	-	29,27 €
50	160	<b>27,70 €</b>	-	38,42 €
65	200	<b>33,10 €</b>	-	45,08 €
80	225	<b>40,30 €</b>	23,30 €	53,63 €
100	250	<b>50,80 €</b>	31,80 €	67,63 €

Tabelle A4- 10: Halber Preis pro Meter Kunststoffmantelrohr (TwinPipes) ohne und mit Montage

Der kursive Wert wird dabei anhand der Formel im Diagramm berechnet.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

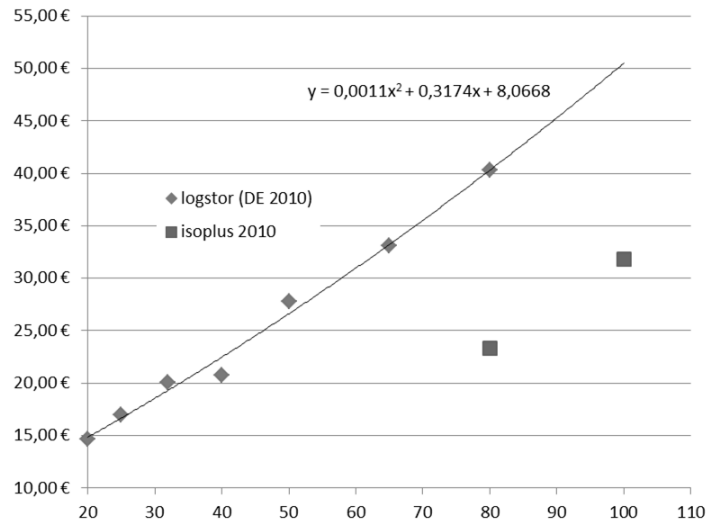


Abbildung A4- 4: Preis der Kunststoffmantelrohre TwinPipes [logstor 2013] und [isoplus 2013]

Preisdaten für die Reduktionen werden im Folgenden gezeigt.

	logstor	Steinbacher	RDesign
DN32/DN25	90,20 €	90,90 €	98,20 €
DN40/32	79,20 €	90,90 €	99,40 €
DN50/40	106,90 €	115,30 €	109,40 €
DN65/50	121,90 €	146,60 €	118,10 €
DN80/65	142,50 €	173,70 €	134,30 €
DN100/80	179,20 €	239,20 €	160,40 €
DN125/100	233,40 €	293,00 €	184,00 €
DN150/125	298,20 €	307,40 €	223,80 €

Tabelle A4- 11: Preis der Kunststoffmantelrohre Serie 1 Reduktionen (pro Stück)

Auch hier wird anhand der vorhandenen Preisdaten mit Hilfe einer Näherungsformel der fehlende Wert bestimmt.

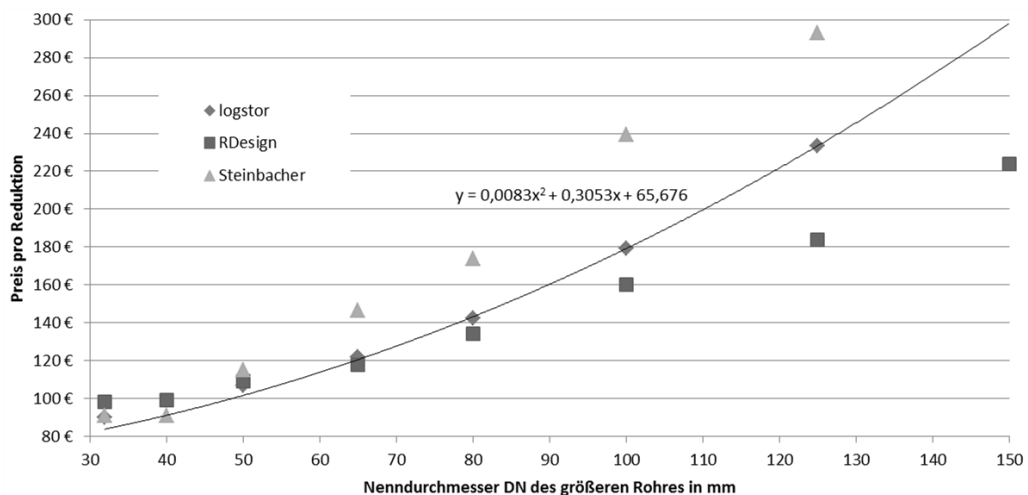


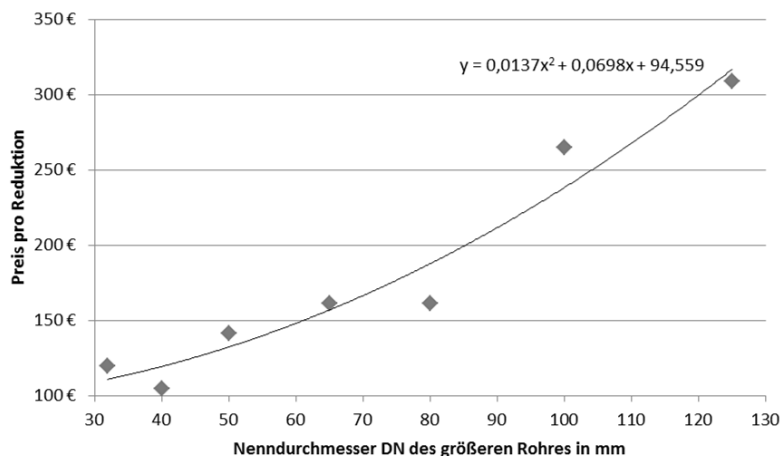
Abbildung A4- 5: Preis der Kunststoffmantelrohre (Serie 1) Reduktionen

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmehbereitstellung aus Holzreststoffen

	logstor
DN32/DN25	119,30 €
DN40/32	104,70 €
DN50/40	141,30 €
DN65/50	161,30 €
DN80/65	161,30 €
DN100/80	264,80 €

**Tabelle A4- 12: Preise der Kunststoffmantelrohre (Serie 3) pro Reduktion**

Ebenfalls wird der fehlende Preis abgeschätzt.



**Abbildung A4- 6: Preis der Kunststoffmantelrohre (Serie 3) pro Reduktion**

### TwinPipes Reduktionen

Bei den TwinPipes wird jeweils der halbe Reduktionspreis angegeben.

	logstor
DN32/DN25	87,80 €
DN40/32	86,80 €
DN50/40	119,20 €
DN65/50	146,90 €
DN80/65	182,70 €
DN100/80	241,80 €

**Tabelle A4- 13: Preise der Kunststoffmantelrohre (TwinPipes) pro Reduktion**

Auch hier muss der fehlende Preis abgeschätzt werden.

## Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen

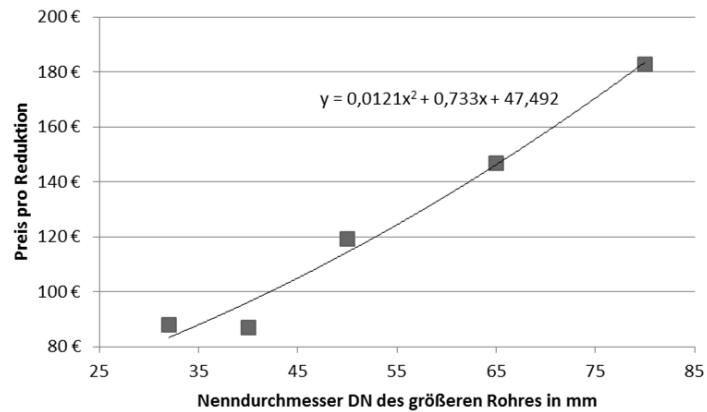


Abbildung A4- 7: Preis der Kunststoffmantelrohre (TwinPipe) pro Reduktion

	logstor	Steinbacher	RDesign
DN25/DN25	166,30 €	191,20 €	63,60 €
DN32/32	174,30 €	221,80 €	75,60 €
DN40/40	185,60 €	228,30 €	77,50 €
DN50/50	222,30 €	276,60 €	95,20 €
DN65/65	271,60 €	331,30 €	116,10 €
DN80/80	342,70 €	405,70 €	149,50 €
DN100/100	407,60 €	569,60 €	206,00 €
DN125/125	431,20 €	740,30 €	269,80 €
DN150/150	494,80 €	1.029,20 €	378,80 €

Tabelle A4- 14: Preise der Abzweiger Kunststoffmantelrohre Serie 1 (pro Stück)

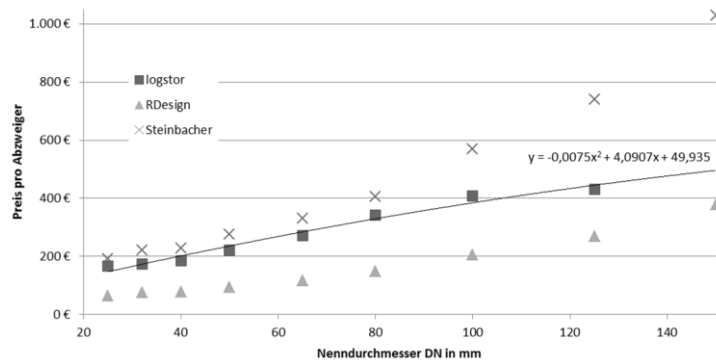


Abbildung A4- 8: Preis der Abzweiger Kunststoffmantelrohre Serie 1

Damit werden folgende Preisdaten für die Modellierung verwendet:

DN	25	32	40	50	65	80	100	125	150
25	166,30 €								
32	113,90 €	174,30 €							
40	131,90 €	136,40 €	185,60 €						
50	132,70 €	137,20 €	139,70 €	222,30 €					
65	149,70 €	155,00 €	157,90 €	165,40 €	271,60 €				
80	169,40 €	176,50 €	179,80 €	187,20 €	200,90 €	342,70 €			
100	210,70 €	215,40 €	218,60 €	229,80 €	243,90 €	264,90 €	407,60 €		
125	269,50 €	271,60 €	276,90 €	243,90 €	294,30 €	307,20 €	498,10 €	431,20 €	
150				494,80 €	494,80 €			494,80 €	494,80 €

Tabelle A4- 15: Preise der Abzweiger (Kunststoffmantelrohre Serie 1) pro Stück

**Vergleichende Ökobilanzierung der semi- zentralen  
Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen**

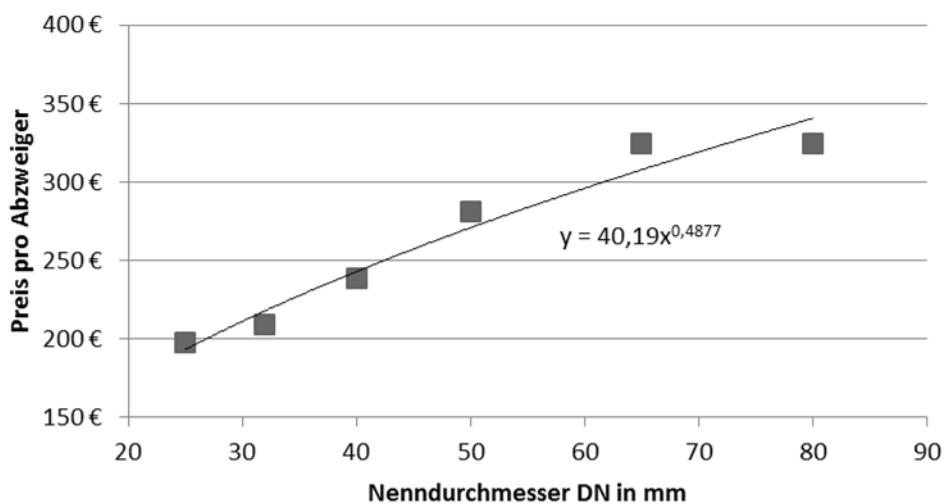
DN	25	32	40	50	65	80	100
25	212,00 €						
32	150,60 €	230,50 €					
40	174,40 €	180,40 €	245,40 €				
50	175,60 €	181,50 €	184,70 €	294,00 €			
65	197,90 €	205,00 €	233,50 €	218,60 €	359,10 €		
80	224,10 €	233,50 €	237,80 €	247,70 €	265,70 €	359,10 €	
100	278,70 €	285,00 €	289,20 €	304,00 €	322,50 €	265,70 €	453,20 €
125	356,40 €	359,10 €	366,30 €	374,60 €	389,20 €	406,30 €	658,70 €

**Tabelle A4- 16: Preise der Abzweiger (Kunststoffmantelrohre Serie 3) pro Stück**

Bei den TwinPipes wird jeweils der halbe Abzweigerpreis angegeben.

DN	25	32	40	50	65	80	100
25	197,20 €						
32	182,40 €	208,80 €					
40	200,50 €	204,00 €	238,30 €				
50	196,40 €	211,20 €	207,10 €	280,70 €			
65	212,10 €	219,50 €	260,40 €	256,10 €	324,50 €		
80	239,50 €	260,40 €	270,10 €	287,90 €	306,10 €	324,50 €	
100						379,80 €	379,80 €

**Tabelle A4- 17: Preise der Abzweiger (Kunststoffmantelrohre TwinPipes) pro Stück**



**Abbildung A4- 9: Preise der Abzweiger (Kunststoffmantelrohre TwinPipes) pro Stück**



## **Wissenschaftlicher Werdegang von Kirsten Biemann**

***2010 bis 2014***

Promotion an der Technischen Universität Darmstadt am Institut IWAR, Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft bei Frau Prof. Liselotte Schebek mit dem Titel „Vergleichende Ökobilanzierung der semi-zentralen Hauswärmebereitstellung aus Holzreststoffen“

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) am Karlsruher Institut für Technologie

***2004 bis 2010***

Maschinenbaustudium am Karlsruher Institut für Technologie mit Vertiefungsrichtung „Energie- und Umwelttechnik“