Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

BMVBS-Online-Publikation, Nr. 12/2012

Primärenergiefaktoren von biogenen Energieträgern, Abwärmquellen und Müllverbrennungsanlagen

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
André Hempel

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Horst-Peter Schettler-Köhler (Leitung)
Hans-Peter Lawrenz

Bearbeitung

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), Heidelberg
Dr. Martin Pehnt (Leitung)
Florian Herbert, Sven Gärtner, Regine Vogt, Horst Fehrenbach

eta Energieberatung GbR, Pfaffenhofen an der Ilm
Bernhard Negele, Volkmar Schäfer

ECONSULT Lambrecht Jungmann Partnerschaft, Rottenburg
Uli Jungmann, Klaus Lambrecht

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Zitierhinweise

BMVBS (Hrsg.): Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden.
BMVBS-Online-Publikation 12/2012.

Die vom Auftragnehmer vertretene Auffassung ist nicht unbedingt
mit der des Herausgebers identisch.

ISSN 1869-9324

© BMVBS Juni 2012

Ein Projekt des Forschungsprogramms „Zukunft Bau“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), betreut vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

Inhaltsverzeichnis ..... Seite

1 Kurzfassung 8
1.1 Zielsetzung 8
1.2 Vorgehensweise 8
1.3 Ergebnisse 9
1.4 Summary 14

2 Einführung 16

3 Primärenergiefaktoren in den gebäudebezogenen Regelwerken 16
3.1 Derzeitige Systematik 16
3.2 Mögliche Fehlentwicklungen 17
3.3 Fortentwicklungsbedarf 19
3.4 Zusammenfassung 20

4 Methodische Vorbemerkungen 21
4.1 Bestimmung der Default-Werte: konservativer Ansatz 21
4.2 Allokationsverfahren und Gutschriftverfahren 21
4.2.1 Allokationsverfahren 21
4.2.2 Gutschriftverfahren 23
4.2.3 Modifiziertes Gutschriftverfahren 24
4.2.4 Vergleich der Verfahren 25
4.3 Erneuerbarer Primärenergiefaktor 25
4.4 Ökologische Korrektur der Primärenergiefaktoren 26
4.5 Ausgewählte Energieketten 26
4.6 Zusammenfassung 28

5 Biogene Brennstoffketten zur direkten Verfeuerung 29
5.1 Scheitholz 29
5.2 Hackschnitzel aus Altholz 30
5.3 Hackschnitzel aus Industrieholz 31
5.4 Hackschnitzel aus Waldrestholz 32
5.5 Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) 33
5.6 Holzpellets aus Waldrestholz 35
5.7 Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagenholz (KUP) 36
5.8 Stroh 38
5.9 Biomethan (Mais) 38
5.10 Biogas (Gülle) 40
5.11 Biogas (Mais) 41
5.12 Rapsöl 42
5.13 Biodiesel (RME) 43

5.14 Palmöl 44
5.15 Zusammenfassung und Empfehlung 46

6 Nah- und Fernwärme aus biogenen Brennstoffen 49
6.1 Wärmenetz 49
6.2 Holz-Heizkraftwerke 50
6.2.1 Technologie 50
6.2.2 Versorgungsfall 50
6.2.3 Holz-Heizkraftwerk mit ORC- bzw. Gegendruckturbine 51
6.2.4 Holz-Heizkraftwerk mit Entnahme-Kondensationsturbine (2,5 MW_{el}) 53
6.3 Holz-Heizwerke 54
6.4 Biogas 56
6.4.1 Biogas-BHKW (Gülle, 100 kW_{el}) 56
6.4.2 Biogas-BHKW (Mais, 500 kW_{el}) 57
6.5 Pflanzenöl 58
6.5.1 Pflanzenöl-BHKW (Rapsöl, 5 kW_{el}) 59
6.5.2 Pflanzenöl-BHKW (Palmöl, 100 kW_{el}) 59
6.6 Nah- und Fernwärme mit Erdgas-BHKW 60
6.6.1 „Mini-BHKW“ 60
6.6.2 Erdgas-BHKW (250 kW_{el}) 61
6.7 Zusammenfassung und Empfehlung 62

7 Industrielle und gewerbliche Abwärme 64
7.1 Abwärme gewerblicher Kälteanlagen 66
7.2 Abwärme von Backöfen 67
7.3 Industrielle Abwärme - Hochtemperaturkühlwasser 68
7.4 Anmerkung zur Methodik der Bewertung von Abwärme 69
7.5 Zusammenfassung und Empfehlung 70

8 Müllverbrennungsanlagen 72
8.1 Methodische Fragen 72
8.1.1 Berücksichtigung des fossilen Anteils des Abfalls 73
8.1.2 Berücksichtigung des Abfalltransports 73
8.1.3 Berücksichtigung der Stützfeuerung und des Spitzenlastkessels 75
8.2 Primärenergiefaktoren für Nah- und Fernwärme von Müllverbrennungsanlagen am Beispiel ausgewählter Anlagen 75
8.2.1 Müllheizkraftwerke (MHKW) 76
8.2.2 Müllheizwerke (MHW) 78
8.3 Zusammenfassung und Empfehlung 79

9 Einbindung der abgeleiteten Primärenergiefaktoren in die Energieeinsparverordnung EnEV und langfristige Weiterentwicklung 81
9.1 Biomassebudget 81
9.2 Handelbare Energien 81
9.3 Wärmeenergiebedarf 82
9.4 Bewertung auf Emissionsbasis 83

10 Zusammenfassung und Empfehlungen 84

11 Literatur 87

12 Anhang 88

Abbildungsverzeichnis ..... Seite

Abbildung 3-1: Energieprozesskette nach EnEV 2009 (eigene Darstellung) 16
Abbildung 4-1: Häufigkeitsverteilung des PE-Faktors 21
Abbildung 4-2: Fernwärmesystem mit gekoppelter und ungekoppelter Wärmeerzeugung (AGFW 2010) 23
Abbildung 4-3: Fernwärmesystem mit gekoppelter und ungekoppelter Wärmeerzeugung in einem separaten Bilanzkreis nach der modifizierten Gutschriftmethode (modifizierte Abbildung aus (AGFW 2010)). 25
Abbildung 5-1: Prozesskette für den Brennstoff Scheitholz 29
Abbildung 5-2: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Altholz 30
Abbildung 5-3: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Industrieholz 31
Abbildung 5-4: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Waldrestholz 33
Abbildung 5-5: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) 34
Abbildung 5-6: Prozesskette für den Brennstoff Holzpellets aus Waldrestholz 35
Abbildung 5-7: Prozesskette für den Brennstoff Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) 37
Abbildung 5-8: Prozesskette für den Brennstoff Stroh 38
Abbildung 5-9: Prozesskette für den Brennstoff Biomethan aus Maissilage 39
Abbildung 5-10: Prozesskette für den Brennstoff Biogas aus Gülle 40
Abbildung 5-11: Prozesskette für den Brennstoff Biogas aus Mais 41
Abbildung 5-12: Prozesskette für den Brennstoff Rapsöl 43
Abbildung 5-13: Prozesskette für den Brennstoff Biodiesel (Raps) 44
Abbildung 5-14: Prozesskette für den Brennstoff Palmöl 45
Abbildung 7-1: Prinzip der Abwärmenutzung in Bäckereien (Netenergie 2010) 68
Abbildung 8-1: Bandbreite der elektrischen und thermischen Nutzungsgrade der deutschen MVAs (IFEU-MVA-Datenbank) 72
Abbildung 8-2: Methodische Fragen zur Ermittlung des Primärenergiefaktors für Nah- und Fernwärme aus Abfall (eigene Darstellung nach IFEU 2010). 73
Abbildung 8-3: Primärenergiefaktoren für Fernwärme für drei ausgewählte Müllheizkraftwerke unterschiedlicher Effizienz mit einem Anteil für den fossilen Spitzenlastkessel von 10 % nach dem Gutschriftverfahren nach AGFW FW 309-1, nach dem modifizierten Gutschriftverfahren und dem Allokationsverfahren auf Exergiebasis (eigene Darstellung nach IFEU 2010) 77
Abbildung 8-4: Primärenergiefaktoren für Fernwärme für ausgewählte Müllheizwerke unterschiedlicher Effizienz mit einem Anteil des fossilen Spitzenlastkessels von 10 % nach dem Berechnungsverfahren gemäß AGFW FW 309-1 Kapitel 4.1 (eigene Darstellung nach IFEU 2010). 79

Tabellenverzeichnis ..... Seite

Tabelle 1-1: Zusammenfassung der Primärenergiefaktoren für Brennstoffe zur direkten Verfeuerung 9
Tabelle 1-2: Zusammenfassung der Empfehlungen für die untersuchten Energieträger (MJ pro MJ Brennstoff bzw. Nutzwärme) 13
Tabelle 3-1: Anforderungen an KfW-Effizienzhäuser Stand Sept. 2010 (eigene Darstellung nach KfW). 17
Tabelle 3-2: Primärenergiefaktoren der EnEV 2009 (DIN 4701-10; DIN V 18599-1, EnEV 2009). 17
Tabelle 3-3: Erfüllung der Anforderungen bezüglich des Jahresprimärenergiebedarfs nach EnEV 2009 für verschiedene Referenzgebäude bei Nutzung verschiedener Wärmequellen 18
Tabelle 4-1: Analysierte Energieträger 27
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Primärenergiefaktoren für Brennstoffe zur direkten Verfeuerung 46
Tabelle 5-2: Empfehlungen zu Primärenergiefaktoren für biogene Brennstoffe zur direkten Verfeuerung (eigene Darstellung nach IFEU 2010) 48
Tabelle 6-1: Vergleich der Primärenergiefaktoren für das Gutschriftverfahren nach FW 309 Teil 1, das modifizierte Gutschriftverfahren und das Allokationsverfahren auf Exergiebasis (Biomasse Heizkraftwerk mit Gegendruckturbine) 53
Tabelle 6-2: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem Biomasse/Holz Heizkraftwerk mit Entnahme –Kondensationsturbine (2,5 MW_{el}) 54
Tabelle 6-3: Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem Holz-Heizwerk (1,5 MW_{th}) 56
Tabelle 6-4: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (100 kWel) mit Biogas aus Gülle 57
Tabelle 6-5: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (500 kW_{el}) mit Biogas aus Mais 58
Tabelle 6-6: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (5 kW_{el}) mit Rapsöl 59
Tabelle 6-7: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (100 kW_{el}) mit Palmöl 60
Tabelle 6-8: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (5 kW_{el}) mit Erdgas 61
Tabelle 6-9: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (250 kW_{el}) mit Erdgas 62
Tabelle 6-10: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme mit biogenen Brennstoffen 64
Tabelle 7-1: Empfehlung für Primärenergiefaktoren für Abwärme aus gewerblichen und industriellen Prozessen 71
Tabelle 8-1: Vergleich der Primärenergiefaktoren $f_{P,Br}$ für den Transport für den Energieträger Abfall unter der Annahme verschiedener Transportmittel und Transportentfernungen 74
Tabelle 8-2: Primärenergiefaktoren $f_{PE,FW}$ für die drei MHKW mit einem KWK-Anteil von 100 %, 90 % und 70 % nach den drei Berechnungsmethoden 78
Tabelle 10-1: Zusammenfassende Empfehlung der Primärenergiefaktoren für die untersuchten Energieträger 84
Tabelle 12-1: Berechnung des Primärenergiefaktors für Scheitholz 88
Tabelle 12-2: Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Altholz 89
Tabelle 12-3: Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Industrieholz 90
Tabelle 12-4: Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Waldrestholz 91

Tabelle 12-5: Berechnung des Primärenergiebedarfs für Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) 92
Tabelle 12-6: Berechnung des Primärenergiefaktors für Holzpellets aus Waldrestholz 93
Tabelle 12-7: Berechnung des Primärenergiefaktors für Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) 94
Tabelle 12-8: Berechnung des Primärenergiefaktors für Stroh 95
Tabelle 12-9: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biomethan aus Maissilage 96
Tabelle 12-10: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biogas aus Gülle 97
Tabelle 12-11: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biogas aus Maissilage 98
Tabelle 12-12: Berechnung des Primärenergiefaktors für Rapsöl 99
Tabelle 12-13: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biodiesel aus Raps 100
Tabelle 12-14: Berechnung des Primärenergiefaktors für Palmöl 101
Tabelle 12-15: Berechnung von Primärenergiefaktoren für Fernwärme für drei ausgewählte Müllheizkraftwerke unterschiedlicher Effizienz nach dem Gutschriftverfahren nach AGFW FW 309-1, nach dem modifizierten Gutschriftverfahren und dem Allokationsverfahren auf Exergiebasis (Eingabefelder sind rot hinterlegt). 102
Tabelle 12-16: Berechnung von Primärenergiefaktoren für Fernwärme für zwei ausgewählte Müllheizwerke unterschiedlicher Effizienz nach dem Berechnungsverfahren gemäß AGFW FW 309-1 Kapitel 4.1 (Eingabefelder sind rot hinterlegt). 104

1 Kurzfassung

1.1 Zielsetzung

Im Rahmen dieses Gutachtens werden Primärenergiefaktoren (PE-Faktoren) für verschiedene Energieträger ermittelt und methodische Fragen diskutiert. PE-Faktoren werden insbesondere im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) verwendet, um den Jahresprimärenergiebedarf für ein Gebäude zu ermitteln. Bei Wahl eines Brennstoffes mit einem geringen nicht erneuerbaren PE-Faktor kann der Bauherr auf diese Weise seinen nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch erheblich reduzieren und ggf., je nach Gebäudeausgestaltung, auf Maßnahmen beispielsweise im Bereich Lüftung oder Anlagentechnik verzichten.

PE-Faktoren werden in verschiedenen Normen für Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude definiert. Dazu zählen die DIN V 4701-10 und die DIN V 18599-1. Ergänzend werden im Arbeitsblatt FW 309-1 der AGFW (Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.) weitere Faktoren für Brennstoffe genannt und Rechenverfahren vorgeschlagen.

Ziel des Gutachtens ist die Validierung der vorhandenen PE-Faktoren. Dabei werden insbesondere die PE-Faktoren für feste, flüssige und gasförmige Biomasse, für Nah- und Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Heizwerken mit biogenen Brennstoffen, für gewerbliche bzw. industrielle Abwärme und für Nah- und Fernwärme aus Abfall näher betrachtet und basierend auf Ökobilanzstudien, Systemanalysen für Referenzanlagen und Anlagendatenbanken neu bestimmt.

1.2 Vorgehensweise

Kern des Gutachtens ist zum einen die ökologische Bilanzierung der biogenen Brennstoffketten. Hierfür werden basierend auf ausführlichen Ökobilanzstudien von festen, gasförmigen und flüssigen Bioenergieträger die primärenergetischen Aufwendungen der einzelnen Brennstoffe abgeleitet (Kapitel 5).

Für die Bewertung der KWK aus biogenen Brennstoffen (Kapitel 6) ist die Bewertungsmethodik für die Kuppelprodukte Strom und Wärme wesentlich. Diese wird in Kapitel 4 dargestellt. Neben der Systematik des Gutschriftverfahrens der AGFW wird ein von den Autoren ergänztes modifiziertes Gutschriftverfahren erläutert, das die Aufwendungen für den Wärmenetzbetrieb und den Spitzenkessel nicht der KWK-Anlage, sondern dem Wärmeprodukt zurechnet und damit einen Anreiz schafft, die Wärmebereitstellung möglichst effizient und mit geringen fossilen Anteilen zu erzielen. Eine weitere gängige, thermodynamisch begründete Methode ist die exergetische Allokation, die ebenfalls ausgewiesen wird.

Weiterhin werden PE-Faktoren für industrielle und gewerbliche Abwärme betrachtet (Kapitel 7). Dabei werden gewerbliche Kälteanlagen, Abwärme aus Backöfen und industrielle Abwärme aus Hochtemperaturkühlwasser untersucht. Der Bereich der Abwärmenutzung ist außerordentlich vielfältig. Diese Vielfalt kann im Rahmen dieser Studie nur beispielhaft mittels vier praxisnaher Anlagenkonfigurationen analysiert werden. Hierfür lagen konkrete Auslegungs- und Anlagendaten aus realisierten Systemen sowie generische Planungsgrundlagen vor.

Schließlich werden PE-Faktoren von Müllverbrennungsanlagen betrachtet. Dazu werden zunächst methodische Fragen diskutiert: Ist der fossile Anteil im Abfall (sog. „Feedstock-

Energie“) für den Primärenergiefaktor des Abfalls zu berücksichtigen? Welchen Einfluss haben Länge und Anrechnungsmethode des Müll-Transportes? Wie ist der Verbrauch fossiler Energieträger zur Stützfeuerung des Abfalls für den Spitzenkessel zu berücksichtigen?

Basierend auf der IFEU-Datenbank von Müllverbrennungsanlagen werden in Kapitel 8 PE-Faktoren für Nah- und Fernwärme aus Müllheizkraftwerken und Heizwerken berechnet.

Schließlich wird untersucht, wie die PE-Faktoren zukünftig in die Energieeinsparverordnung (EnEV) eingebettet werden sollen (Kapitel 9). Dabei werden unterschiedliche Konzepte zur Handhabung der PE-Faktoren erläutert und alternative Vorschläge bezüglich einer langfristigen Weiterentwicklung der EnEV gemacht.

1.3 Ergebnisse

Die Ökobilanzierung **fester Biomassebrennstoffe** führt zu Primärenergiefaktoren zwischen 0,02 für Hackschnitzel aus Altholz und 0,17 für Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) (Tabelle 1-1). Im Einzelfall bei längeren Transporten, die im derzeitigen deutschen Brennstoffmarkt noch keine Rolle spielen, können die PE-Faktoren auch darüber liegen.

Tabelle 1-1: Zusammenfassung der Primärenergiefaktoren für Brennstoffe zur direkten Verfeuerung

Primärenergiefaktoren	**f_P (MJ/MJ H_i)**		
-	erneuerbar	**nicht-erneuerbar**	gesamt
Brennstoffe zur direkten Verfeuerung			
Feste Biomasse			
Scheitholz	1,00	**0,10**	1,10
Hackschnitzel Altholz	1,00	**0,02**	1,02
Hackschnitzel Industrieholz	1,00	**0,06**	1,06
Hackschnitzel Waldrestholz	1,00	**0,07**	1,07
Hackschnitzel KUP	1,00	**0,11**	1,11
Holzpellets Waldrestholz	1,00	**0,14**	1,14
aus Kanada	*1,00*	***0,52***	*1,52*
Holzpellets KUP	1,00	**0,17**	1,17
Stroh	1,00	**0,03**	1,03
Gasförmige Biomasse			
Biomethan (Mais)	1,00	**0,36**	*1,36*
Biogas für KWK (kein Endenergieträger)			
Gülle	*1,00*	***0,15***	*1,15*
Mais	*1,00*	***0,19***	*1,19*
Flüssige Biomasse			
Rapsöl	1,00	**0,33**	1,33
Biodiesel (Raps)	1,00	**0,48**	1,48
Palmöl	1,00	**0,21**	1,21

Biomethan (aufbereitetes und in Erdgasnetz eingespeistes Biogas) liegt bei einem PE-Faktor von 0,36, **Bioöle** zwischen 0,21 und 0,48. Gerade für Palmöl ergibt sich auf Grund des hohen Flächenertrages und der geringen fossilen Aufwendungen beim Anbau und in der Verarbeitung trotz des weiten Transportweges ein geringerer PE-Faktor. Bei diesem Kraft-

stoff ist aber die Gefahr eines deutlich erhöhten Treibhausgas-Budgets auch bei Einhaltung der Nachhaltigkeitszertifizierung gegeben. Dies hat auch damit zu tun, dass sich indirekte Landnutzungsänderungen und die damit verbundenen THG-Emissionen derzeit nicht in der Rechenmethodik der Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung wiederfinden.

In der derzeitigen EnEV wird die Nutzung des PE-Faktors 0,5 für Biogas und Bioöl auf Einsatzfälle begrenzt, „wenn die flüssige oder gasförmige Biomasse im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude erzeugt wird." (EnEV 2009) Hintergrund dieser Regelung ist der problematische Vollzug/Kontrolle, da der Versorger und das bezogene Gas-/Ölprodukt kurzfristig gewechselt werden kann und es nicht durch die Art des Wärmeerzeugers sichergestellt ist, dass der entsprechende erneuerbare Energie-Anteil bezogen wird.

Neben das Kontrollproblem kommt die ökologische Wirkung, die auftreten würde, indem bei genereller Bewertung von Bio-Erdgas mit einem niedrigen PE-Faktor durch eine stark erhöhte Nachfrage nach Bio-Erdgas der bereits heute vergleichsweise hohe Flächendruck zum Anbau von nachwachsenden Rohstoffen zur Biomasse-Bereitstellung zunehmen würde. Daher ist ein Einsatz von Bio-Erdgas in KWK-Anlagen derzeit auch durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz gefördert. Die derzeitige Anforderung der EnEV sollte bestehen bleiben. Für Bioöle sollte zusätzlich gefordert werden, dass sie gemäß der entsprechenden Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung zertifiziert sind.

Bei zukünftig steigenden Anteilen könnte das eingespeiste Biogas – in Analogie zu den steigenden Anteilen erneuerbarer Energieträger im Strommix – mit dem Faktor 0,4 auf den Bundesmix angerechnet werden, nicht jedoch auf den Einzelmix eines Versorgers. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Vorgehen der EnEV bzgl. Ökostrom.

KWK: Bei den betrachteten KWK-Anlagen wird das Ergebnis maßgeblich durch das verwendete Zuordnungsverfahren der Aufwendungen zu Strom und Wärme bestimmt. Das in dieser Studie vorgeschlagene modifizierte Gutschriftsystem basiert auf dem Stromgutschrift-Verfahren der AGFW, bei dem auf das Kuppelprodukt Strom eine Gutschrift gegeben wird. Wenn der f_P-Wert dann <0 wird, wird dieser Wert auf 0 gesetzt. Abweichend von der AGFW-Methodik wird vorgeschlagen, dass der Beitrag des Spitzenkessels und des Hilfsenergiebedarfs für den Wärmetransport nicht auf 0 gesetzt werden darf. Dieses **modifizierte Gutschriftverfahren** ist **vorteilig**, indem es analog zur gängigen Ökobilanzmethodik eine kausal adäquate Zuordnung von Aufwendungen für die Wärmebereitstellung (Pumpstrom, fossiler Spitzenkessel) zum Produkt Wärme erlaubt. Es gibt außerdem einen Anreiz zur Minimierung des fossilen Spitzenkesselanteils und zur Optimierung der Effizienz des Gesamtsystems (Netzverluste, Pumpstrom). **Nachteilig** an dem Verfahren ist, dass es keinen Anreiz bietet, den Stromwirkungsgrad zu steigern. Allerdings ist dies m. E. auch dem jetzigen Gutschriftverfahren nicht der Fall, da bereits ab sehr niedrigen elektrischen Nutzungsgraden die Bilanz negativ wird und erst ab sehr hohen ungekoppelten Wärmeanteilen f_P in den Bereich positiver Werte kommt. Es wird darauf hingewiesen, dass **bei fossilen Anlagen** zwischen dem modifizierten Verfahren und dem AGFW-Gutschriftverfahren kein Unterschied besteht, da auf Grund des fossilen Brennstoffbedarfs eh keine Nullsetzung erfolgt. Mögliche Fehlanreiz-Wirkungen des modifizierten Verfahrens werden im Bericht diskutiert, aber nicht für prohibitiv erachtet.

Für den Fall einer 100%igen Deckung der Wärme aus einer biogenen KWK-Anlage ist der PE-Faktor sehr gering und nur geringfügig von den verwendeten Gutschrift/Allokationsverfahren abhängig. Im Gutschriftverfahren der FW 309 kommt kein Biomasse-Heizkraftwerk auf Grund der Gutschrift für eingespeisten Strom über 0 (KWK-Anteil

von 100 %). Bei 70 % KWK-Anteil liegen die Werte für dieses Verfahren nur geringfügig über 0.

Dabei wird der nicht unbeträchtliche Spitzenkesselanteil durch die Stromgutschrift verdeckt. Anders ist dies im modifizierten Gutschriftverfahren. Hier liegen bei 100 % KWK-Anteil alle KWK-Anlagen geringfügig über 0 und steigen auf 0,48 bei einem 30 % Anteil des fossilen Kessels. Dieser Wert setzt sich zusammen aus dem eingespeisten Wärmeanteil, den Netzverlusten und dem Pumpstrombedarf. Im exergetischen Verfahren liegen die Werte jeweils etwas höher als für das modifizierte Gutschriftverfahren.

Abwärme: Um Primärenergiefaktoren für Abwärme einer differenzierenden Betrachtung unterziehen zu können, muss zwischen verschiedenen Typen der Abwärmeauskopplung unterschieden werden:

a. Der Produktionsprozess wird durch die Wärmeauskopplung mit einem zusätzlichen Primärenergieaufwand belastet (z. B. Kältemaschinen mit höherer Kondensationstemperatur).
b. Die Effizienz des Produktionsprozesses wird durch die Abwärmenutzung nicht bzw. nicht wesentlich beeinflusst.
c. Durch die Abwärmenutzung wird Primärenergieaufwand auf der Prozessseite vermieden bzw. reduziert wie beispielsweise bei der Nutzung von Kühlwasser, das anderweitig über Kühleinrichtungen abgeführt werden müsste.

Je nach Einsatzfall ergeben sich PE-Faktoren zwischen negativen Werten (Fall c) und – für die errechneten Praxisfälle – 0,2 inklusive der Wärmeverteilung.

Die Nutzung von industrieller und gewerblicher Abwärme zur direkten Beheizung von Gebäuden oder zur Einspeisung in Wärmenetze sollte im Sinne der Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und der CO_2-Emissionen erweitert und gefördert werden. Um möglichem Missbrauch vorzubeugen, empfehlen wir, die Einhaltung der nachfolgenden Kriterien für die Verwendung von Pauschalfaktoren vorauszusetzen. Bei Nichterfüllung der Kriterien bzw. Überschreitung der Maximaltemperatur der Abwärmenutzung aus Kälteanlagen muss der Primärenergiefaktor im Einzelfall berechnet werden.

- Um zu verhindern, dass Abwärmenutzung in Kälteanlagen ohne genauere Betrachtung der Auswirkungen auf die Effizienz des Kälteprozesses betrieben wird, empfehlen wir die Verwendung der Pauschalfaktoren bei Nutzung der Kondensationswärme nur bis zu einer Nutzwärmetemperatur von 50°C zu erlauben.
- Vom Betreiber des Wärmenetzes mit (industrieller) Abwärme bzw. dem Ersteller des EnEV-Nachweises bei unmittelbarer Nutzung gewerblicher Abwärme sollte eine Bestätigung gefordert werden, nach der die Abwärmenutzung Teil eines Gesamtenergiekonzeptes darstellt und die Abwärme des Primärprozesses weder vermieden noch intern rückgewonnen werden kann. Als Mindestanforderung für die Verwendung der Pauschalfaktoren sollte die Leistungszahl aus dem Verhältnis der aus der Abwärme stammenden und genutzten Wärme zum Stromeinsatz, der zur Bereitstellung dieser Abwärme erforderlich ist, in Anlehnung an das EEWärmeG mindestens 10 betragen.

MVA: Der Transport des Mülls hat einen insgesamt geringen, aber nicht ganz vernachlässigbaren Einfluss auf den Primärenergiefaktor des Abfalls. In der Studie wurden 24 Transportszenarien mit Werten zwischen 0,0 und 0,08 MJ/MJ Abfall berechnet; letzteres allerdings unter der Annahme eines Transportes Neapel-Köln und vollständiger Anlastung des Transports auf Strom und Wärme und nicht auf die Entsorgungsdienstleistung.

Selbst wenn man einen mittleren, realistischeren Ansatz verfolgt und einen PE-Faktor von 0,025 ansetzt, macht sich diese Berücksichtigung in der Modellierung nicht (Gutschrift/mod. Gutschrift) bzw. fast nicht bemerkbar.

Zur genaueren Modellierung werden drei Müllheizkraftwerke (MHKW) mit unterschiedlicher Energieeffizienz definiert. Mit den Anlagen soll ein möglichst breites Spektrum von Anlagen abgedeckt werden, die sich insbesondere hinsichtlich des elektrischen Nutzungsgrades unterscheiden. Die Energiebilanz der Anlagen ist der IFEU-Datenbank von realen Anlagen entnommen.

Es zeigt sich, dass nach dem Gutschriftverfahren für alle MHKW negative Primärenergiefaktoren resultieren. Dabei ist der Wert umso kleiner, je größer der elektrische Nutzungsgrad der Anlage ist. Da negative Werte per Definition zu Null gesetzt werden, wäre der Primärenergiefaktor für alle drei MHKW gleich Null. Selbst bei einem relativ schlechten elektrischen Nutzungsgrad von rd. 5 % für das MHKW 3 wird der Primärenergiefaktor nicht positiv.

Das modifizierte Gutschriftverfahren zeigt für alle drei MHKW Werte von 0,05; 0,20 bzw. 0,5 für einen Spitzenkessel-Anteil von 0, 10 % bzw. 30 %. Mit dem modifizierten Gutschriftverfahren liegen die Primärenergiefaktoren entsprechend ihrem fossilen Brennstoffeinsatz für den Spitzenkessel und dem Stromverbrauch zum Betrieb des Heiznetzes in einem moderaten Wertebereich. Auf diese Weise wird ein Anreiz geschaffen zum sparsamen Verbrauch von fossilen Energieträgern und für Effizienzmaßnahmen bezüglich des Stromverbrauches des Heiznetzes. Aus Sicht der Autoren bildet das modifizierte Gutschriftverfahren den Primärenergieverbrauch fossiler Energieträger bei Betrieb eines Spitzenlastkessels im Ergebnis besser ab, zumal der Spitzenkessel kausal eindeutig der Wärmeerzeugung zugeordnet werden kann. Voraussetzung dieser Rechenweise ist, dass der Gas/Ölbedarf für Spitzenkessel und Stützfeuerung separat ausgewiesen sind. Ist dies datentechnisch nicht trennbar, empfehlen wir, dass der gesamte Gas-/Ölbedarf im Sinne eines separaten Bilanzkreises im modifizierten Gutschriftverfahren bilanziert werden muss.

Aus methodischer Sicht erfolgt durch das Allokationsverfahren auf Exergiebasis eine gute Aufteilung des Primärenergieeinsatzes auf die Kuppelprodukte Strom und Wärme des MHKW. Aufgrund der einfacheren Anwendung der modifizierten Gutschriftmethode im Vergleich zum Allokationsverfahren und der Konsistenz zur Rechenweise bei biogenen Energieträgern wird dennoch das modifizierte Gutschriftverfahren empfohlen, zumal die Ergebnisse für beide Verfahren nicht sehr wesentlich voneinander differieren.

Für die Müll**heizwerke** lässt sich feststellen, dass das derzeitige Verfahren der AGFW eine Unterscheidung hinsichtlich effizienter und weniger effizienter MHW prinzipiell befriedigend abbildet. Es ist jedoch festzustellen, dass der in Kapitel 4.3 genannte Primärenergiefaktor für Fernwärme aus Anlagen ohne KWK – bei nicht vorliegenden Bilanzdaten – von 0,13 zu gering erscheint. Dieser Wert wird selbst durch das als effizient zu bezeichnende MHW 1 mit 0,38 deutlich überschritten (siehe Abbildung 8-4). Auf Grund der großen Schwankungsbreite bei MHW wird empfohlen, dass **kein Default-Wert** verwendet werden darf.

Empfehlungen:

Wir empfehlen, auch bei der individuellen Berechnung von Wärmenetzen das **modifizierte Gutschriftverfahren** anzuwenden. Aus den obigen Analysen leiten wir folgende Tabelle von PE-Faktoren ab. Dabei wurde ein Kompromiss aus Vereinfachung und exakter Abbildung der Bilanzergebnisse gewählt. Für KWK wird empfohlen, PE-Faktoren für 70 und 100 % KWK-Anteil auszuweisen. Die Werte für andere KWK-Anteile sind aus diesen Stützstellen interpolierbar.

Tabelle 1-2: Zusammenfassung der Empfehlungen für die untersuchten Energieträger (MJ pro MJ Brennstoff bzw. Nutzwärme)

Energieträger		**Primärenergiefaktor nicht erneuerbar**
Biogene Brennstoffe zur direkten Verfeuerung	**Feste Biomasse:**	
	Holzhackschnitzel und andere feste Biomasse	0,1
	Holzpellets	0,2
	Alternative Vereinfachung: Feste Biomasse	*0,2*
	Biomethan:	
	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude oder KWK-Nutzung	0,4
	Sonst	1,1
	Bioöle:	
	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude und Biomassenachhaltigkeitszertifizierung	0,5
	sonst	1,1
	Alternative Vereinfachung: Biogas, Bioöle	
	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude und Biomassenachhaltigkeitszertifizierung	*0,5*
	sonst	*1,1*
Nah- und Fernwärme aus KWK (erneuerbarer Brennstoff, Abfall) und industrielle Abwärme[3]	100 % KWK[1] bzw. Abwärme	0,1
	70 % KWK[1] bzw. Abwärme	0,5
Nah- und Fernwärme aus Heizwerken (erneuerbarer Brennstoff[5])	100 % erneuerbar[2]	0,2
	70 % erneuerbar[2]	0,6
Gewerbliche Abwärme[3,4]		0,2
Nachrichtlich: Biogas (unaufbereitet für KWK)		0,2

[1] Bei Abweichung des KWK-Anteils ist linear zu interpolieren.

[2] Bei abweichenden EE-Anteilen ist linear zu interpolieren.

[3] Es ist durch einen Sachkundigen zu bestätigen, dass die Abwärmenutzung Teil eines energetischen Gesamtkonzepts darstellt und die prozessinterne Verwendung, Einsparung bzw. Wärmerückgewinnung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich wäre.

[4] Bei Bestätigung einer effizienten Abwärmenutzung durch Sachkundigen gemäß § 2 Abs. 3 EEWärmeG und einer Leistungszahl von mind. 10, die aus dem Verhältnis von der aus der Wärmerückgewinnung stammenden und genutzten Wärme zum Stromeinsatz für den Betrieb der Abwärmenutzung ermittelt wird sowie bei Einhaltung der Anlage IV "Abwärme" Punkt 3 EEWärmeG. PE-Faktor entspricht Faktor für Endenergie bei ortnaher Nutzung; entspricht $f_{P,ext}$ nach FW309-1/3.2.2.

Bei Abwärme aus der Kondensationswärme von Kälteanlagen nur bis max. 50 °C Nutzwärmetemperatur.

[5] Für Abfall wird aufgrund der großen Bandbreite der PE-Faktoren für Nah- und Fernwärme aus Heizwerken ohne KWK kein Default-Wert empfohlen. Die PE-Faktoren sind nach dem modifizierten Gutschriftverfahren anlagenspezifisch zu berechnen.

Sollte entschieden werden, dass das modifizierte Gutschriftverfahren nicht angewendet wird, so wird für 100 % Anteil der Wert 0,0 und für 70 % der Wert 0,2 vorgeschlagen. Dies stellt einen Kompromiss dar zwischen der angemessenen Bewertung der KWK-Wirkung nach AGFW-Verfahren und einem Anreiz, den Anteil des fossilen Spitzenkessels zu reduzieren.

Derzeit verweist die EnEV bezüglich der Primärenergiefaktoren auf die zur Berechnung des Primärenergiebedarfs herangezogenen Normenwerke DIN V 4701-10 und DIN V 18599-1. Da die in der vorliegenden Studie ermittelten Primärenergiefaktoren teilweise von den Primärenergiefaktoren der genannten Normen abweichen bzw. diese ergänzen, sollten die Primärenergiefaktoren zukünftig in der EnEV selbst festgeschrieben werden.

Die derzeitige Nebenanforderung der EnEV an den spezifischen Transmissionsverlust H_T' gewährleistet einen schonenden Einsatz regenerativer Brennstoffe nur ungenügend. Die durchaus erheblichen Energiesparpotenziale – oder umgekehrt die Energieverschwendungspotenziale – im Bereich der Lüftung, Luftdichtheit, solaren Gewinnen und effizienter Anlagentechik werden bei niedrigen Primärenergiefaktoren von der Anforderungssystematik der derzeitigen EnEV nicht erfasst. Das Projektteam favorisiert eine Nebenanforderung zukünftig basierend auf den Größen Q^*_H und Q^*_{TW} in der DIN V 4701-10 bzw. $Q_{h,outg}$, $Q_{h^*,outg}$, $Q_{c,outg}$, $Q_{c^*,outg}$ und $Q_{w,outg}$ der DIN V 18599.

1.4 Summary

In this study, primary energy factors f_P are calculated for different energy sources with an emphasis on biomass, waste and waste heat, and methodological issues are discussed. PE factors are used in particular within the framework of the Energy Saving Ordinance (Energieeinsparverordnung EnEV) to determine the annual primary energy requirement for a building. By choosing a fuel with a low non-renewable PE factor the client can reduce its non-renewable primary energy consumption considerably and may, depending on the building design, not have to take measures such as ventilation or installation engineering.

This report determines f_P (MJ primary energy per MJ energy carrier) for solid, liquid and gaseous biomass as well as district heating based on boilers and CHP units with these fuels, waste heat and heat generated in waste disposal plants. Toward this end, LCAs are carried out for reference cases.

The LCA of solid biomass lead to fP between 0.02 for wood chips from waste wood and 0.17 for wood pellets from short rotation forestry. Biomethane from upgraded biogas achieves 0.36, liquid biofuels between 0.21 and 0.48. Especially for palm oil, the primary energy factor does not mirrow the associated greenhouse gas impacts which depend heavily on land-use changes.

In the case of CHP systems, the primary energy factor is very low as long as 100 % of the heat stem from the renewable energy carrier. Depending on the credit/allocation procedure selected, for systems with peak boilers using fossil fuels the f_P gradually increases to up to 0.48 in a system with 30 % fossil share in a modified electricity credit procedure.

For waste heat, the study distinguishes between systems where the efficiency of the primary process is not affected by using the waste heat and those for which an additional energy demand occurs. Depending on the system, f_P <0 up to 0.2 are calculated. The use of industrial waste heat should generally be promoted; a default value of 0.2 ist proposed. To avoid abuse, this study defines certain quality criteria for the waste heat system.

Waste incineration plants were also analyzed with respect to their primary energy balance. Whereas the transport of waste contributes relatively low amounts to the overall balance, the energy efficiency of the plant as well as the allocation procedure is of high importance. The study proposes to separately account for the peak boiler by using the modified electricity credit procedure.

Altogether, the study proposes the f_P set out in Tabelle 1-2.

The current secondary requirement of EnEV (maximum specific transmission loss H_T') insufficiently guarantees the gentle utilisation of renewable fuels. The quite substantial energy savings potentials – or vice versa, the potential waste of energy – in the field of ventilation, air tightness, solar gain and efficient systems engineering are not adequately covered at low PE factors. The study favours a future secondary requirement based on the values of heat energy Q^*_H and Q^*_{TW} in the DIN V 4701-10, and $Q_{h,outg}$, $Q_{h\,*,outg}$, $Q_{c,outg}$, $Q_{c*,outg}$ and $Q_{w,outg}$ in the DIN V 18599, respectively.

2 Einführung

Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung hat das IFEU-Institut gemeinsam mit eta Energieberatung und Econsult am 13.8.2010 beauftragt, Primärenergiefaktoren für ausgewählte Bioenergieträger und Abwärme zu berechnen und auftretende methodische Fragestellungen zu diskutieren. Dieser Endbericht dokumentiert die angewendete Methodik, die Modellierungsergebnisse und die Empfehlungen des Projektteams.

3 Primärenergiefaktoren in den gebäudebezogenen Regelwerken

3.1 Derzeitige Systematik

In der derzeitigen Systematik der Energieeinsparverordnung EnEV 2009 ist der maximal zulässige Primärenergiebedarf eines Gebäudes linear abhängig von den angesetzten Primärenergiefaktoren. Abbildung 3-1 zeigt die Energieprozesskette von der Primärenergie bis zur Nutzenergie beim Endkunden. Zum Nutzenergiebedarf eines Gebäudes werden die Wärmeverluste der Anlagentechnik in den Prozessschritten Wärmeübergabe, Wärmeverteilung, Wärmespeicherung und Wärmeerzeugung ermittelt und hinzuaddiert. In der Summe ergibt dies den Endenergiebedarf zur Wärmeerzeugung. Parallel wird der zum Betrieb der Anlagentechnik benötigte Hilfsenergiebedarf (elektrischer Strom) ermittelt. Der Endenergiebedarf wird dann je nach Energieträger mit dem in DIN V 4701-10, DIN V 18599 und der Energieeinsparverordnung EnEV festgelegten Primärenergiefaktor multipliziert.

Die Berechnungssystematik der beiden in der EnEV zugelassenen Berechnungsverfahren nach DIN 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 und nach DIN V 18599 entsprechen sich dabei grundsätzlich. Unterschiede bestehen lediglich in Details, nicht jedoch in der Anwendung der Primärenergiefaktoren.

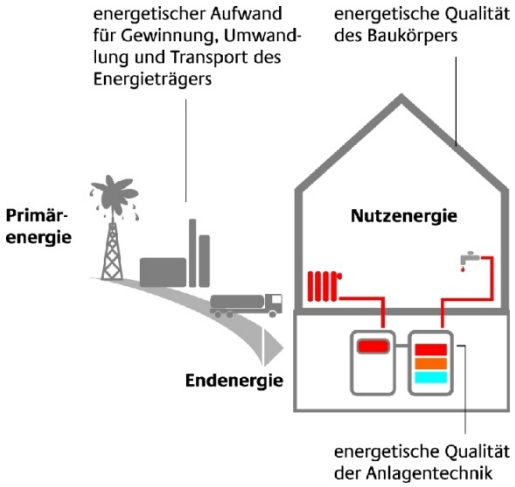

Abbildung 3-1: Energieprozesskette nach EnEV 2009 (eigene Darstellung)

Damit bei Einsatz von Energieträgern mit niedrigen Primärenergiefaktoren der Energiebedarf eines Gebäudes dennoch auf ein Maß begrenzt wird, das einen schonenden Umgang auch mit den endlichen regenerativen Ressourcen gewährleistet, wird zusätzlich zum maximal zulässigen Primärenergiebedarf eine Mindestanforderung an die energetische Qualität des

Baukörpers gestellt. Ein maximal zulässiger spezifischer Transmissionswärmeverlust H_T' darf nicht überschritten werden.

An dieser Systematik orientieren sich auch die derzeit für energieeffizientes Bauen relevanten Förderprogramme der KfW-Förderbank „Energieeffizient Bauen“ und „Energieeffizient Sanieren“ - die „KfW-Effizienzhäuser“. Der maximal zulässige Primärenergiebedarf eines Effizienzhausstandards ist prozentual zum maximal zulässigen Primärenergiebedarf nach Energieeinsparverordnung EnEV begrenzt (siehe Tabelle 3-1).

Die nach EnEV anzuwendenden Primärenergiefaktoren der DIN V 4701-10 und DIN V 18599 entsprechen sich. Die EnEV selbst definiert dazu Primärenergiefaktoren für flüssige und gasförmige Biomasse. Der Primärenergiefaktor für Strom-Mix von 2,7 nach DIN V 4701-10 und DIN V 18599 wird in der EnEV abweichend dazu mit 2,6 festgelegt (siehe Tabelle 3-2).

Tabelle 3-1: Anforderungen an KfW-Effizienzhäuser Stand Sept. 2010 (eigene Darstellung nach KfW).

KfW-Effizienzhaus						
	Sanieren					
				Bauen		
Anforderung relativ zum Referenzgebäude	**115**	**100**	**85**	**70**	**55**	**40**
Q_P''	115%	100%	85%	70%	55%	40%
H_T'	130%	115%	100%	85%	70%	55%

Tabelle 3-2: Primärenergiefaktoren der EnEV 2009 (DIN 4701-10; DIN V 18599-1, EnEV 2009).

Energieträger[a]		**Primärenergie-Faktoren**
Brennstoffe	Heizöl EL / Biomasse flüssig	1,1
	Erdgas H / Biomasse gasförmig	1,1
	Flüssiggas	1,1
	Steinkohle	1,1
	Braunkohle	1,2
	Holz	0,2
in unmittelbarem räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude erzeugte flüssige oder gasförmige Biomasse gemäß §2 Abs. 1 Nr.4 EE-WärmeG		0,5
Nah/ Fernwärme aus KWK[b]	fossiler Brennstoff	0,7
	erneuerbarer Brennstoff	0,0
Nah/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	0,1
Strom	Strom-Mix	2,6
Umweltenergie	Solarenergie, Umgebungswärme	0,0

[a] Bezugsgröße Endenergie: Heizwert H_i

[b] Angaben sind typisch für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %

3.2 Mögliche Fehlentwicklungen

Die Primärenergiefaktoren für Wärmenetze können alternativ zu den vorgegebenen Tabellenwerten von den Netzbetreibern detailliert ermittelt werden. Das dabei derzeit eingesetzte Verfahren nach DIN V 4701-10 bzw. DIN V 18599 ergänzt durch die Anwendungs- und Auslegungshilfe AGFW-Arbeitsblatt FW 309-1 ermöglicht für viele Netze

einen Primärenergiefaktor von Null oder nahe Null. Der Primärenergiefaktor wird danach als Verhältnis der im Netz eingesetzten Primärenergie für die Wärmeerzeugung und -verteilung zur gelieferten Wärme gebildet. Bei Kraft-Wärmekopplung im Netz werden je kWh produziertem Strom 3 kWh Primärenergie dem Wärmenetz gutgeschrieben, d.h. vom Primärenergieaufwand der Wärme abgezogen. Eine solche Stromgutschrift kann den Primärenergiefaktor von Wärmenetzen erheblich reduzieren - in Netzen mit regenerativen Energieträgern wie Biomasse oder Müll sogar vollständig kompensieren.

Dieses Verfahren führt bei den angeschlossenen Gebäuden – nahezu unabhängig von ihrem Energiestandard – zu einem Primärenergiebedarf ebenfalls nahe Null, was wiederum zu falschen Schlüssen bezüglich des Sanierungsbedarfs der angeschlossenen Gebäude sowie zur Förderung der falschen (ungewollten) Konzepte führen kann. Derzeit wird dies im Rahmen der EnEV und der Förderprogramme durch die Nebenanforderung an den Wärmedämmstandard des Gebäudes H_T' unterbunden. Diese Nebenanforderung stellt allerdings eine wesentliche Einschränkung in der Technologiewahl und damit der Planungsfreiheit dar. Mögliche Reduktionen des Energiebedarfs durch Lüftungswärmerückgewinnung, passive solare Gewinne durch Verglasungen oder Energieeinsparungen in der Anlagentechnik sind im spezifischen Transmissionswärmeverlust H_T' des Gebäudes nicht berücksichtigt. Gleiches gilt etwas abgeschwächt auch für die feste Biomasse mit einem sehr niedrigen Primärenergiefaktor von 0,2.

Für 6 Beispielgebäude (je ein Wohngebäude entsprechend Gebäudetypen der EnEV 2009 Anlage 1 Tabelle 2, ein bestehendes Wohngebäude und ein Nichtwohngebäude im vereinfachten Verfahren nach EnEV Anlage 2 Nr. 3) wurden jeweils nach EnEV 2009 der spezifische Transmissionswärmeverlust H_T' und der Jahres-Primärenergiebedarf q_P des Referenzgebäudes sowie der Jahres-Primärenergiebedarf q_P für verschiedene Anlagentechniken ermittelt. Die Wärmedämmungen der Gebäude entsprechen - mit Ausnahme des bestehenden Gebäudes – im Istzustand den Anforderungen der EnEV 2009 Anlage 1 Tabelle 2 für die Wohngebäude bzw. Anlage 2 Tabelle 2 für das Nichtwohngebäude. Ansonsten entsprechen die Neubauten dem jeweiligen Referenzgebäude nach EnEV 2009. Das Bestandsgebäude hat einen baujahrestypischen Dämmstandard von 1970 sowie eine alte Öl-Zentralheizung. Neben dem Istzustand wurde für die Gebäude der Jahres-Primärenergiebedarf für Fernwärme aus mind. 70 % Kraft-Wärme-Kopplung mit fossilen und regenerativen Brennstoffen sowie einer Pelletheizung berechnet.

Tabelle 3-3: Erfüllung der Anforderungen bezüglich des Jahresprimärenergiebedarfs nach EnEV 2009 für verschiedene Referenzgebäude bei Nutzung verschiedener Wärmequellen

			EnEV 2009			Istzustand		q_P Varianten		
			$H_T'_{zul}$	Referenzgeb.		H_T'	q_P	Fernw. KWK fossil	Fernw. KWK reg.	Pellet-kessel
				H_T'	Q_P''					
Nr.	**Projekt**	**PE-Faktor Wärme**			1,10		1,10	0,70	0,00	0,20
1	EFH freistehend A_N < 350 m²		0,40	0,384	85,0	0,400	87,9	59,9	9,9	41,8
2	DHH einseitig angebaut		0,45	0,421	62,0	0,450	65,4	45,2	8,2	33,1
3	MFH freistehend A_N > 350 m²		0,50	0,457	61,5	0,500	65,9	45,4	5,1	23,5
4	RMH mehrere Seiten angebaut		0,65	0,444	66,3	0,650	88,0	60,1	10,7	35,1
5	DHH Altbau einseitig angebaut		0,63	0,374	111,6	1,743	474,8	255,0	8,5	115,1
6	Bürogebäude Ein-Zonen-Modell		0,58 [1]	0,430	220,8	0,580	267,9	199,0	65,7	116,7

[1] aus U_{max} ermittelt

Anforderung nach EnEV erfüllt Anforderung nach EnEV 2009 nicht erfüllt

Während im Istzustand der Mindestdämmstandard der EnEV 2009 bei allen Beispielgebäuden nicht ausreichend ist, um bei Gebäuden, die ansonsten der Referenzausführung entsprechen, die Anforderungen der EnEV 2009 an den Jahres-Primärenergiebedarf zu erfüllen, ist – zumindest bei den Neubauten – in den Varianten mit Fernwärme aus Kraft-Wärmekopplung und Pelletheizung auch beim Mindestdämmstandard die Anforderung an den Jahres-Primärenergiebedarf erfüllt. Insbesondere bei mehrseitig angebauten Gebäuden entsprechend EnEV Anlage 1 Tab. 2 Zeile 3 liegt der Primärenergiebedarf bei Mindestdämmstandard weit über dem zulässigen Höchstwert. Bei Bestandsgebäuden gilt diese Aussage nicht generell. Hier ist gezeigt, dass die Erfüllung der Anforderungen stark vom Istzustand des jeweiligen Gebäudes abhängig ist. Bei Fernwärme aus Kraft-Wärmekopplung ist der Jahres-Primärenergiebedarf lediglich vom Strombedarf des Gebäudes abhängig, bei Nichtwohngebäuden inklusive Strombedarf für RLT Kühlung und Beleuchtung. Der Dämmstandard des Gebäudes spielt hierbei für den Jahres-Primärenergiebedarf keine Rolle mehr.

Insgesamt lässt sich zwar kein fester Zusammenhang zwischen Primärenergiefaktoren und den EnEV-Anforderungswerten herstellen, da der Primärenergiebedarf neben dem Primärenergiefaktor von vielen weiteren Faktoren abhängig ist. Jedoch lässt sich aus den betrachteten Beispielen erkennen, dass zumindest bei Neubauten bei Primärenergiefaktoren von 0,7 und kleiner die Nebenanforderung der EnEV greift, die Erfüllung der Anforderungen also rein vom Wärmedämmstandard des Gebäudes abhängig ist. Bei Bestandsgebäuden besteht die Gefahr, dass bei extrem niedrigen Primärenergiefaktoren die tatsächliche energetische Qualität des Gebäudes komplett überdeckt wird. So ist bei einem Primärenergiefaktor von 0,0 für ein Fernwärmenetz mit KWK aus regenerativen Energieträgern beim Primärenergiebedarf kein Unterschied zwischen einem Neubau und dem schlecht gedämmten Bestandsgebäude erkennbar.

3.3 Fortentwicklungsbedarf

Der Satz der derzeit verwendeten Primärenergiefaktoren deckt den heutigen Bedarf teilweise nur unzureichend ab. So fehlen z. B. Primärenergiefaktoren für Müll, gewerbliche und industrielle Abwärme sowie einige biogene Brennstoffe.

Müll wird derzeit als regenerativer Brennstoff bewertet. Im Unterschied zum Holz wird jedoch der nicht regenerative Anteil nicht berücksichtigt, da der Müll auch gesammelt und deponiert werden müsste, würde er nicht thermisch verwertet. Daher wird Müll derzeit mit einem Primärenergiefaktor von 0,0 bewertet. Dieser Faktor ist jedoch für die Anwendung in der EnEV nicht festgelegt.

Für die Nutzung gewerblicher und industrieller Abwärme fehlen Primärenergiefaktoren vollständig. Derzeit wird die Abwärmenutzung als Kraft-/Wärmekopplungsprozess nach der oben beschriebenen Stromgutschrift-Methode berücksichtigt. Dezentrale Abwärmenutzung in Gebäuden wird dabei gemäß Auslegung zur EnEV mangels besserer Verfahren als Nahwärmenetz aus Kraft-/Wärmekopplung bewertet. Hier besteht sowohl ein Bedarf an Primärenergiefaktoren für die einfache Anwendung beim dezentralen Einsatz von Abwärme, die direkt im Gebäude verwendet wird, als auch beim Einsatz in Wärmenetzen. Insbesondere bei der energetischen Bewertung kleinerer gewerblich oder gemischt genutzter Gebäude wird ein vereinfachter Ansatz zur Berücksichtigung von Abwärme aus Kühlung (Kühlgeräte, Klimatisierung), von Kompressoren (Werkstätten) und Öfen (Großküchen, Bäckereien) benötigt. Dazu fehlen derzeit allerdings nicht nur die anzusetzenden

Primärenergiefaktoren, sondern auch ein einfacher Ansatz zur Ermittlung des Abwärmeangebots. Bei größeren Objekten ist meist auch bei der energetischen Bewertung ein Fachplaner beteiligt, der in der Lage ist, das Abwärmeangebot projektspezifisch zu ermitteln. Doch auch dazu muss noch ein einheitliches Verfahren bestimmt werden.

Im Bereich der Biomasse sind derzeit lediglich Primärenergiefaktoren für in unmittelbarem räumlichem Zusammenhang mit dem Gebäude erzeugte flüssige und gasförmige Biomasse sowie Holz festgelegt. Es fehlt ein allgemeiner Bewertungsansatz für flüssige und gasförmige Biomasse. Dies ist jedoch weniger ein Problem des Primärenergiefaktors als der Tatsache, dass diese Brennstoffe nicht in speziell dafür ausgestatteten Wärmeerzeugern verfeuert werden. Dadurch kann jederzeit auf entsprechende fossile Brennstoffe umgestellt werden. Der Nachweis, dass tatsächlich die in Ansatz gebrachte Menge Biomasse verfeuert wird, gestaltet sich aufwändig und bedarf laufender Kontrolle.

3.4 Zusammenfassung

In der Energieeinsparverordnung werden der maximale Jahresprimärenergiebedarf q_P eines Gebäudes und der maximale Transmissionswärmeverlust H_T' der Gebäudehülle über die Definition von Grenzwerten für Referenzgebäude begrenzt. Dabei müssen für den Neubau die Grenzwerte für beide Faktoren eingehalten werden. Der Jahresprimärenergiebedarf ist entscheidend vom angewendeten Primärenergiefaktor f_P abhängig. Infolge der Berechnungssystematik ergeben sich beispielsweise für Fernwärme aus KWK mit erneuerbarem Hauptbrennstoff und fossilem Spitzenlastkessel sehr geringe Primärenergiefaktoren, die im Ergebnis zu einem sehr geringen Jahresprimärenergiebedarf führen. Die Einhaltung der Anforderungen der EnEV ist folglich nur vom Transmissionswärmeverlust abhängig, der sich aus dem Dämmstandard des Gebäudes ableitet. Der Transmissionswärmeverlust stellt allerdings eine wesentliche Einschränkung in der Technologiewahl und damit der Planungsfreiheit dar. Zudem deckt der Satz der derzeit verwendeten Primärenergiefaktoren den heutigen Bedarf teilweise nur unzureichend ab. So fehlen z. B. Primärenergiefaktoren für Müll, gewerbliche und industrielle Abwärme sowie einige biogene Brennstoffe.

4 Methodische Vorbemerkungen

4.1 Bestimmung der Default-Werte: konservativer Ansatz

Bei der Bestimmung der PE-Faktoren ist zu berücksichtigen, dass für viele Parameter entlang des Lebenszyklus‘ Bandbreiten denkbar sind (etwa Hilfsenergiebedarf, Transportentfernungen, etc.). Bei der Ableitung der Faktoren wird bei den Brennstoffen zur unmittelbaren Verbrennung so vorgegangen, dass Werte abgeleitet werden, die sich als typisch, aber leicht konservativ bezeichnen lassen (und damit zwischen den wahrscheinlichsten und den konservativen Werten in Abbildung 4-1 liegen), um einerseits keine Brennstoffketten „gutzurechnen“, andererseits aber auch keine Extremwerte in die Betrachtung einfließen zu lassen.

Bei den mit Nahwärmenetzen verteilten Endenergieträgern ist zu berücksichtigen, dass i. d. R. eine gutachterliche Bestimmung der Werte erfolgt und daher die Default-Werte eine geringere Signifikanz aufweisen als die Werte der Brennstoffketten zur direkten Verfeuerung.

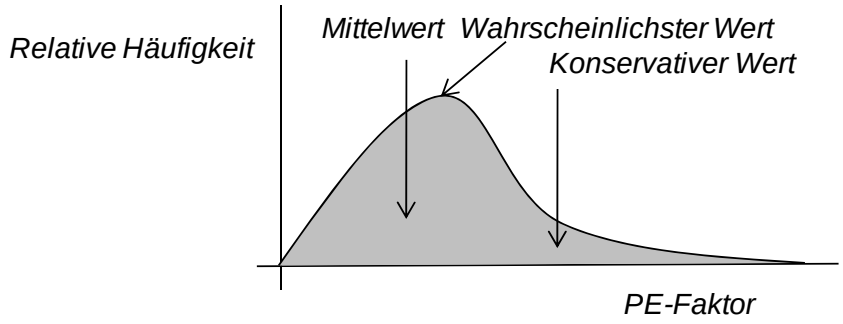

Abbildung 4-1: Häufigkeitsverteilung des PE-Faktors

4.2 Allokationsverfahren und Gutschriftverfahren

Für die Bestimmung des Primärenergiefaktors von Fernwärme aus KWK-Anlagen ist eine Zuordnung des Brennstoffeinsatzes auf die Kuppelprodukte Strom und Wärme erforderlich. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Im Folgenden werden das Allokationsverfahren und das Gutschriftverfahren erläutert sowie ein Vorschlag für ein modifiziertes Gutschriftverfahren vorgestellt.[1]

4.2.1 Allokationsverfahren

In Allokationsverfahren werden Allokationsfaktoren ε gesucht, die ohne Erteilung einer Gutschrift eine Zuordnung des Primärenergieverbrauchs auf die Kuppelprodukte Wärme und Strom ermöglichen. Für die Berechnung des Primärenergiefaktors für Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung ist der thermische Allokationsfaktor ε_{th} maßgebend.

Mit Hilfe dieses Faktors wird der Primärenergiefaktor für ein typisches Nah- bzw. Fernwärmenetz aus Kraft-Wärme-Kopplung mit (Gleichung 4-1) berechnet.

$$f_{P,FW} = \frac{\left(\varepsilon_{th} \cdot \sum_i W_{Br,KWK,i} \cdot f_{P,KWK,i}\right) + \left(W_{Br,HEL} \cdot f_{P,HEL}\right) + \left(A_{HN} \cdot f_{P,KWK-Strom}\right)}{Q_{FW,i}} \quad \text{(Gleichung 4-1)}$$

[1] Siehe hierzu auch (Pehnt 2010).

mit:

ε_{th}	Allokationsfaktor für Wärme
$W_{Br,KWK,i}$	Brennstoffwärme des Energieträgers i für KWK in MWh_{HI}
$f_{P,KWK,i}$	Primärenergiefaktor des Energieträgers i für KWK
$W_{Br,HEL}$	Brennstoffwärme des Spitzenlastkessels in MWh_{HI}
$f_{P,HEL}$	Primärenergiefaktor des Energieträgers für den Spitzenlastkessel
A_{HN}	Stromarbeit zum Betrieb des Heiznetzes in MWh
$f_{P,KWK\text{-}Strom}$	Primärenergiefaktor für den Strom aus KWK
$Q_{FW,j}$	Wärmeenergieverbrauch abzüglich Heiznetzverluste

Für die Berechnung des Primärenergieverbrauchs der Stromarbeit zum Betrieb des Heiznetzes wird davon ausgegangen, dass der Strom aus der KWK-Anlage und nicht aus dem Stromnetz entnommen wird.

Energieallokation (kalorisches Verfahren)

Beim Energie- oder kalorischen Verfahren wird elektrische Arbeit und Nutzwärme als gleichwertig angesehen. Die Aufteilung erfolgt entsprechend der produzierten Strom- bzw. Wärmemengen. Die Berechnung der Allokationsfaktoren für Strom und Wärme aus KWK erfolgt gemäß nachfolgender Gleichung:

$$\varepsilon_{\mathrm{el}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{el} + \eta_{th}} \quad \text{und} \quad \varepsilon_{\mathrm{th}} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_{th}}$$

(Gleichung 4-2)

Dieses Verfahren berücksichtigt allerdings nicht, dass Strom und Wärme eine völlig unterschiedliche ökonomische und thermodynamische Wertigkeit besitzen.

Exergieallokation

Das exergetische Allokationsverfahren berücksichtigt, dass Strom eine höhere Wertigkeit aufweist als Wärme und damit einen höheren Teil der Umweltlasten „aufgebürdet“ bekommt. Eine geeignete Kenngröße hierfür ist die Exergie. Exergie ist der Teil der Energie, der sich in einer vorgegebenen Umgebung in jede andere Energieform umwandeln lässt. Wärme hat einen niedrigeren Exergiegehalt als Strom. Strom hat eine exergetische Wertigkeit von 1, da sich die elektrische Energie vollständig in andere Energieformen umwandeln lässt. Für Wärme reduziert sich die exergetische Wertigkeit (Energiequalitätsgrad ζ) auf die Höhe des Carnot-Faktors:

$$\zeta_{th} = \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_u}{T_A}$$

(Gleichung 4-3)

wobei T_A die Temperatur des Arbeitsmediums und T_u die Temperatur der Umgebung ist. Denn dieser Anteil der Wärme ist maximal in technische Arbeit zu verwandeln. Bei Wärmenetzen, die eine Vorlauf- und eine Rücklauftemperatur haben, wird die sogenannte „thermodynamische Mitteltemperatur“ als T_A herangezogen:

$$T_A = T_m = \frac{T_{Vorlauf} - T_{Rücklauf}}{ln\left(\frac{T_{Vorlauf}}{T_{Rücklauf}}\right)}$$ (Gleichung 4-4)

Die Temperaturen sind jeweils in Kelvin einzusetzen, nicht in °Celsius. Der Exergie-Allokationsfaktor wird dann bestimmt durch den prozentualen exergetischen Anteil des Zielproduktes an allen bereitgestellten Produkten:

$$\varepsilon_{\text{el}} = \frac{\zeta_{el} \cdot \eta_{el}}{\zeta_{el} \cdot \eta_{el} + \zeta_{th} \cdot \eta_{th}} \quad \text{und} \quad \varepsilon_{\text{th}} = \frac{\zeta_{th} \cdot \eta_{th}}{\zeta_{el} \cdot \eta_{el} + \zeta_{th} \cdot \eta_{th}}$$ (Gleichung 4-5)

Diese Allokation auf Exergiebasis wird von der europäischen Kommission im Rahmen der RED-Direktive diskutiert (EU 2010).

Weitere Allokationsverfahren sind beispielsweise die **finnische Methode** und die **Allokation auf Erlösbasis** (Verhältnis der Erlöse durch Wärmebereitstellung dividiert durch Gesamterlöse) (siehe zu einer genaueren Beschreibung Pehnt 2010).

4.2.2 Gutschriftverfahren

Das Gutschriftverfahren wird in Anlehnung an das AGFW-Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 „Energetische Bewertung von Fernwärme“ erläutert (Stand Mai 2010). Für die Bewertung des Kuppelproduktes Wärme aus KWK-Anlagen wird im Arbeitsblatt FW 309 die Stromgutschriftmethode nach DIN V 4701-10 angewandt.

Das Gutschriftverfahren berücksichtigt, dass Strom aus KWK-Anlagen grundsätzlich Vorrang vor fossilem Kondensationsstrom aus konventionellen Kraftwerken hat. Daher verdrängt jede kWh KWK-Strom eine fossil erzeugte kWh Strom. Der Primärenergieaufwand für den durch den KWK-Strom verdrängten fossilen Kondensationsstrom wird von dem Primärenergieaufwand für die eingesetzten Brennstoffe abgezogen und damit gutgeschrieben.

Für eine gekoppelte und ungekoppelte Wärmeerzeugung wird der Brennstoffeinsatz für die ungekoppelte Wärmeerzeugung (Spitzenlastkessel) mit bilanziert.

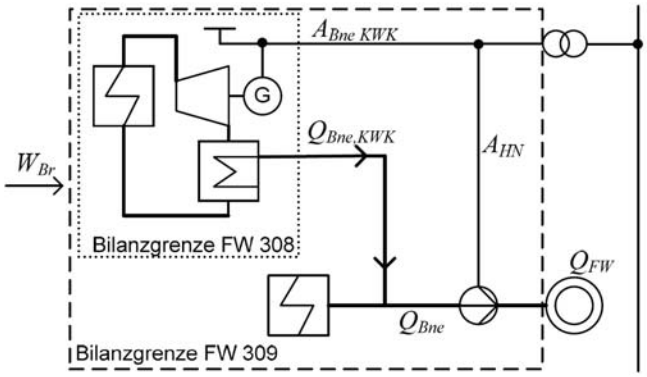

Abbildung 4-2: Fernwärmesystem mit gekoppelter und ungekoppelter Wärmeerzeugung (AGFW 2010)

Die folgende Formel zur Bestimmung des Primärenergiefaktors $f_{P,FW}$ für ein Fernwärmesystem mit KWK-Anlage ist aus dem Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 (Formel 1) entnommen:

$$f_{P,FW} = \frac{\sum_i W_{Br,i} \cdot f_{P,Br,i} + \left(A_{HN} - A_{Bne,KWK}\right) \cdot f_{P,verdr}}{\sum Q_{FW,j}}$$ (Gleichung 4-6)

mit:

$W_{Br,i}$	Brennstoffwärme des Energieträgers i (KWK und Spitzenkessel) in MWh_{HI}
$f_{P,Br,i}$	Primärenergiefaktor des Energieträgers i
A_{HN}	Stromarbeit zum Betrieb des Heiznetzes in MWh
$A_{Bne,KWK}$	KWK-Nettostromproduktion in MWh
$f_{P,verdr}$	Primärenergiefaktor für den verdrängten Strom aus dem Stromnetz (3,0)
$Q_{FW,j}$	Wärmeenergieverbrauch abzüglich Heiznetzverluste

Bei hohen Stromkennzahlen von KWK-Anlagen kommt es daher zu großen Stromgutschriften, die häufig größer sind, als die Primärenergie der eingesetzten Brennstoffe. Daraus resultieren auch bei weniger effizienten Heizkraftwerken negative Primärenergiefaktoren. Nach Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 werden negative Primärenergiefaktoren zu null gesetzt.

Nachteil des Gutschriftverfahrens ist, dass durch die Stromgutschrift kein Anreiz für einen sparsamen Umgang mit fossilen Brennstoffen, insbesondere für einen Spitzenlastkessel gegeben ist. Im Ergebnis bleibt bei hoher Stromkennzahl der Primärenergiefaktor kleiner Null (siehe auch Kapitel 8.2.1).

4.2.3 Modifiziertes Gutschriftverfahren

Im Unterschied zum Verfahren der FW 309 verfolgt dieses Verfahren eine strengere Berücksichtigung der Systemgrenzen: eine Gutschrift erfolgt nur für den Teil des in der KWK-Anlage eingesetzten Brennstoffs. Nur für diesen darf – im Fall eines negativen Wertes von f_P– eine Null vergeben werden. Der Brennstoffaufwand für den Spitzenkessel und für den Pumpstrom ist separat zu bilanzieren. Diese Vorgehensweise entspricht auch der Vorgehensweise der Ökobilanznorm ISO 14040/14044, die verlangt, dass eindeutig zuzuordnende Umwelteffekte auch eindeutig den jeweiligen Produkten zuzuordnen sind.[2] Der Spitzenkessel und der Pumpstrom dienen eindeutig der Wärmeproduktion und der Funktion des Heiznetzes und nicht der Strombereitstellung. Dies ist in (Gleichung 4-7) umgesetzt:

$$f_{P,FW} = \frac{1}{\sum Q_{FW,i}} \left[W_{Br,HEL} \cdot f_{P,HEL} + A_{HN} \cdot f_{P,bez} + \begin{cases} \left(\sum_i W_{Br,KWK,i} \cdot f_{P,KWK,i} - A_{Bne,KWK} \cdot f_{P,verdr}\right), & wenn\ (\ ) > 0 \\ 0, & wenn\ (\ ) < 0 \end{cases} \right]$$

(Gleichung 4-7)

mit:

$W_{Br,KWK,i}$	Brennstoffwärme des Energieträgers i für KWK in MWh_{HI}
$f_{P,KWK,i}$	Primärenergiefaktor des Energieträgers i für KWK
$W_{Br,HEL}$	Brennstoffwärme des Spitzenlastkessels in MWh_{HI}

[2] Zwar ist die ISO 14040/14044-Norm nicht für regulative Zwecke vorgesehen, aber ihre Herangehensweise spiegelt den Stand der Technik bei ökobilanziellen und Primärenergieanalysen wider.

$f_{P,HEL}$	Primärenergiefaktor des Energieträgers für den Spitzenlastkessel
A_{HN}	Stromarbeit zum Betrieb des Heiznetzes in MWh
$f_{P,bez}$	Primärenergiefaktor für den bezogenen Strom aus dem Stromnetz
$A_{Bne,KWK}$	KWK-Nettostromproduktion in MWh
$f_{P,verdr}$	Primärenergiefaktor für den verdrängten Strom aus dem Stromnetz
$Q_{FW,j}$	Wärmeenergieverbrauch abzüglich Heiznetzverluste

In der geschweiften Klammer erfolgt die Stromgutschrift nur auf den Primärenergieverbrauch der KWK-Brennstoffe. Ergibt sich dabei ein negativer Wert, wird er zu null gesetzt. Der Primärenergieverbrauch des Spitzenlastkessels und des Heiznetzes werden nicht durch die Stromgutschrift reduziert. Abbildung 4-3 zeigt das Fernwärmesystem nach dem modifizierten Gutschriftverfahren.

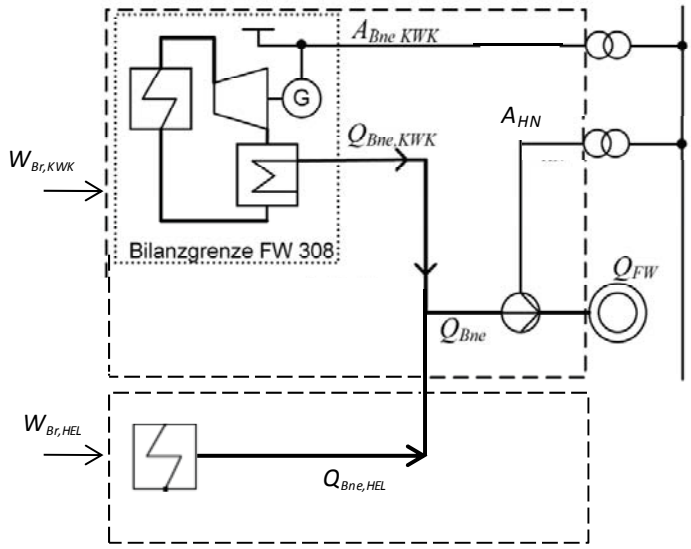

Abbildung 4-3: Fernwärmesystem mit gekoppelter und ungekoppelter Wärmeerzeugung in einem separaten Bilanzkreis nach der modifizierten Gutschriftmethode (modifizierte Abbildung aus (AGFW 2010)).

4.2.4 Vergleich der Verfahren

Die drei Verfahren werden in den Kapiteln 6 und 8 verglichen.

4.3 Erneuerbarer Primärenergiefaktor

Die Bestimmung des erneuerbaren Primärenergiegehalts ist derzeit mit wissenschaftlichen Methoden nicht möglich. Eine Abgrenzung des „Energieeintrags“ aus der Biosphäre kann nicht konsistent vorgenommen werden. Wie beispielsweise ist die Solarenergie zu bewerten, die zur Trocknung von Scheitholz oder Hackschnitzel eingesetzt wird? Wie ist der „Heizwert“ von Gülle zu bestimmen, deren Gasertrag erst durch die Aktivität von Bakterien entsteht?

Die erneuerbaren Primärenergiefaktoren werden daher konventionsgemäß mit 1,0 MJ pro MJ Endenergie des Brennstoffes festgesetzt. Mit dieser Konvention wird der bisherigen Vorgehensweise entsprochen.

4.4 Ökologische Korrektur der Primärenergiefaktoren

Mit der Wahl der Primärenergie als Indikator für eine ökologische Schutzwirkung wurden weitere Schutzgüter, insbesondere Treibhausgase, aus der Betrachtung ausgeschlossen. Es stellt sich die Frage, ob im Zuge einer Novelle der EnEV diese Systematik beibehalten werden soll.

Eine zusätzliche ökologische Lenkungswirkung wäre insbesondere in folgenden Bereichen denkbar:

Unterschiedliche Treibhausgas-Intensitäten bei fossilen Brennstoffen. Die Primärenergiefaktoren beispielsweise von Erdgas und Heizöl sind trotz deutlich unterschiedlichem CO_2-Faktor identisch. Damit entfaltet sich keine Lenkungswirkung hin zu CO_2-ärmeren fossilen Brennstoffen.

Unterschiedliche Treibhausgas-Intensitäten bei biogenen Brennstoffen. Diese Fragestellung tritt auch bei biogenen Brennstoffen auf. Beispielsweise sind die Methan-Leckagen der Biogas-Bereitstellung mitunter deutlich an den gesamten Treibhausgas-Emissionen beteiligt, obwohl sich dies nicht oder fast nicht in den Primärenergiefaktoren widerspiegelt. Dies liegt an dem hohen Global Warming Potential von Methan.

Auch bei Bioölen treten in der Vorkette, etwa bei Landnutzungsänderungen oder Rodungen, Änderungen im Treibhausgasinventar/der Speicherfähigkeit der Böden oder direkte Emissionen auf. Dies war auch der Grund, warum in der europäischen Erneuerbaren Energien-Richtlinie eine Mindest-THG-Minderung gefordert wird, damit diese Biomasse als nachhaltig gilt.

Eine Alternative zu einer Korrektur der Primärenergiefaktoren ist die Formulierung von Nebenbedingungen, wie sie auch derzeit in der EnEV-Umsetzung für die Verwendung der Biogas/Bioöl-Faktoren („räumliche Nähe“) erfolgt. Beispielsweise kann der Nachweis einer nachhaltigen Bereitstellung durch ein geeignetes Gütesiegel zur Bedingung der Anwendung der PE-Faktoren gemacht werden.

Mittelfristig wäre auch eine **Umstellung auf THG**-Emissionen anstelle von Primärenergie denkbar. THG-Emissionen als Bemessungsgröße haben den Vorteil, dass sie die Informationen zum erschöpflichen Primärenergiebedarf i. w. (Einschränkung Uranerz) beinhalten, aber zusätzlich THG-Emissionen aus anderen Prozessen (Landwirtschaft, Methanverluste, THG aus Landnutzungsänderungen etc.) sowie die o. g. unterschiedlichen Kohlenstoffintensitäten der Energieträger widerspiegeln. Diese werden mit wachsenden Anteilen biogener Energieträger an der Energieversorgung an Bedeutung zunehmen.

4.5 Ausgewählte Energieketten

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden repräsentative Energieketten festgelegt, die ein breites Spektrum einzusetzender Energieträger abdecken.

Tabelle 4-1: Analysierte Energieträger

Primärenergiefaktoren	**Einsatz**
-	-
Brennstoffe zur direkten Verfeuerung	-
Feste Biomasse	
Scheitholz	Kessel
Hackschnitzel Altholz	Kessel
Hackschnitzel Industrieholz	Kessel
Hackschnitzel Waldrestholz	Kessel
Hackschnitzel KUP	Kessel
Holzpellets Waldrestholz	Kessel
aus Kanada	*Kessel*
Holzpellets KUP	Kessel
Stroh	Kessel
Gasförmige Biomasse	
Biomethan (Mais)	Kessel
Biogas für KWK (kein Endenergieträger)	
Gülle	*BHKW*
Mais	*BHKW*
Flüssige Biomasse	
Rapsöl	Kessel
Biodiesel (Raps)	Kessel
Palmöl	Kessel
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	
Holz (Gegendruckturbine)	HKW 1,3 MW_{el}
Holz (Entnahmekondensationsturbine)	HKW 2,5 MW_{el}
Biogas (Gülle)	BHKW 100 kW_{el}
Biogas (Mais)	BHKW 500 kW_{el}
Bioöl (Rapsöl)	BHKW 5 kW_{el}
Bioöl (Palmöl)	BHKW 100 kW_{el}
Heizwerk	
Holz	HW 1,5 MW_{th}
Abfall in Müllverbrennungsanlagen	
Müll-Heizkraftwerk (MHKW)	-
Müll-Heizwerk (MHW)	-
Abwärme	
Gewerbliche Quellen	-
Industrielle Abwärme	-

4.6 Zusammenfassung

Zur Bestimmung des Primärenergiefaktors für Wärme aus KWK sind verschiedene Berechnungsmethoden denkbar. Nach den derzeitigen Regelungen der EnEV wird das Gutschriftverfahren angewendet, bei dem der Primärenergiebedarf zur Erzeugung des durch die KWK-Anlage verdrängten Netzstroms der eingesetzten Primärenergie gutgeschrieben wird. Dabei erfolgt die Stromgutschrift auf erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie, die beispielsweise in einem fossilen Spitzenlastkessel eingesetzt wird. Das modifizierte Gutschriftverfahren begrenzt die Stromgutschrift auf den in der KWK-Anlage eingesetzten Hauptbrennstoff, so dass der Primärenergieaufwand für den fossilen Spitzenlastkessel kausal der Wärmeerzeugung zugeschrieben wird. Des Weiteren ist die Anwendung des Allokationsverfahrens beispielsweise auf Exergiebasis denkbar, bei dem die in der KWK-Anlage eingesetzte Primärenergie über die Exergie auf die Kuppelprodukte Strom und Wärme aufgeteilt wird. Der fossile Spitzenlastkessel wird wie beim modifizierten Gutschriftverfahren berücksichtigt. Die genannten Berechnungsmethoden werden für KWK-Anlagen mit biogenem Hauptbrennstoff und für Müllheizkraftwerke angewendet und verglichen. Neben den Primärenergiefaktoren für Wärme aus KWK werden auch die Faktoren von biogenen Brennstoffen zur direkten Verfeuerung (fest, flüssig, gasförmig) sowie von gewerblicher und industrieller Abwärme untersucht.

5 Biogene Brennstoffketten zur direkten Verfeuerung

Für die biogenen Brennstoffe (fest, flüssig, gasförmig) zur direkten Verfeuerung werden die Primärenergiefaktoren auf Grundlage der brennstoffspezifischen Prozesskette bilanziert. Dabei werden die nicht erneuerbaren energetischen Aufwendungen für die Herstellung und den Transport des Brennstoffes berücksichtigt. Zur Übertragung der Ergebnisse auf die EnEV werden in der Empfehlung am Ende des Kapitels sogenannte Default-Werte nach einem konservativen Ansatz gewählt.

5.1 Scheitholz

In Abbildung 5-1 ist die Prozesskette für Scheitholz mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend von der Waldpflege und der Holzentnahme bis zur Verwertung des Scheitholzes in einem Heizkessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger ist das luftgetrocknete Holz beim Endkunden, bevor dieses in einem Kessel verwertet wird.

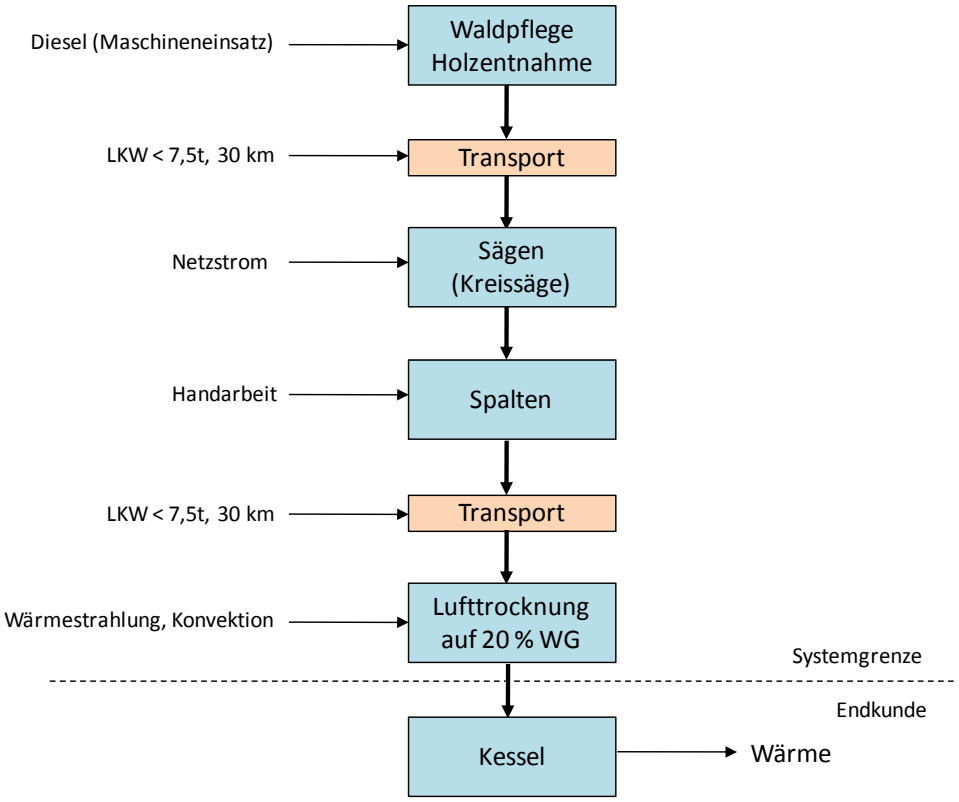

Abbildung 5-1: Prozesskette für den Brennstoff Scheitholz

Herkunft: Das Holz stammt aus der Waldwirtschaft in Deutschland. Das Derbholz wird mittels dieselbetriebenen Arbeitsmaschinen aus dem Wald entnommen und mittels LKW über 30 km (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) Entfernung zum Sägewerk transportiert.

Verarbeitung: Dort wird das Holz mit einer Kreissäge auf die gewünschte Größe gesägt und anschließend gespalten. Das Spalten des Holzes erfolgt größtenteils noch in Handarbeit.

Das Scheitholz wird per PKW über eine Entfernung von 30 km (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) zum Endkunden transportiert und dort gelagert. Das Scheitholz hat zu Beginn der Lagerung einen Wassergehalt von 40 % und ist noch nicht für die Scheitholzfeuerung geeignet. Das Holz wird auf einem regengeschützten, trockenen Untergrund in wind- und sonnenexponierter Lage gelagert. Durch die Wärmstrahlung der Sonne und die natürliche Konvektion durch den Wind wird nach einer Lagerzeit von ca. 6 Monaten ein für die Verbrennung geeigneter Wassergehalt von 20 % erreicht.

Ergebnis: In Tabelle 12-1 im Anhang sind die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Scheitholz aufgeführt. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Scheitholz}$ beträgt insgesamt 0,10. Die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil sind der Transport per PKW zum Verbraucher und der Transport aus dem Wald zum Sägewerk. Die übrigen Prozessschritte spielen eine untergeordnete Rolle.

5.2 Hackschnitzel aus Altholz

In Abbildung 5-2 ist die Prozesskette für Hackschnitzel aus Altholz mit den wesentlichen Prozessschritten vom Transport zur Hackmaschine bis zur Verwertung der Hackschnitzel in einem Heizkessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger sind die Hackschnitzel beim Endkunden, bevor diese in einem Kessel verwertet werden.

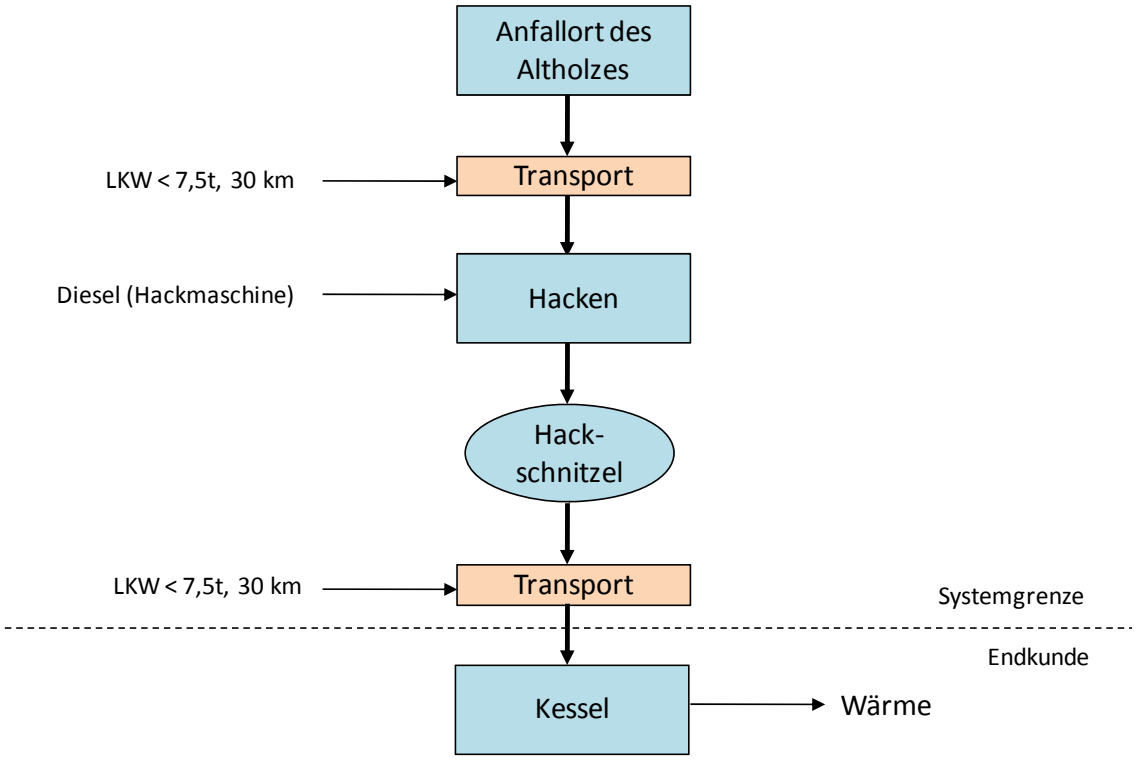

Abbildung 5-2: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Altholz

Herkunft: Unter Altholz wird Holz verstanden, dass nicht mehr als Gebrauchsgegenstand Verwendung findet und daher entsorgt wird. Das Altholz wird über einen Transportweg von 30 km (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) mit einem LKW < 7,5 t zur weiteren Verarbeitung transportiert.

Verarbeitung: Das anfallende Altholz wird mittels einer dieselbetriebenen Hackmaschine zerkleinert. Eine Trocknung des Altholzes ist aufgrund des Alters nicht erforderlich. Die Hackschnitzel aus Altholz werden anschließend per LKW < 7,5 t über einen Transportweg von 30 km (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) zum Endkunden transportiert.

Ergebnis: Tabelle 12-2 im Anhang enthält die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Altholz. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Altholz}$ beträgt insgesamt 0,02. Die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil sind das Hacken mit der Hackmaschine und der Transport zur Hackmaschine. Die übrigen Prozessschritte spielen eine untergeordnete Rolle.

5.3 Hackschnitzel aus Industrieholz

In Abbildung 5-3 ist die Prozesskette für Hackschnitzel aus Industrieholz mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend von der Hackmaschine bis zur Verwertung der Hackschnitzel in einem Heizkessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger sind die Hackschnitzel beim Endkunden, bevor diese in einem Kessel verwertet werden.

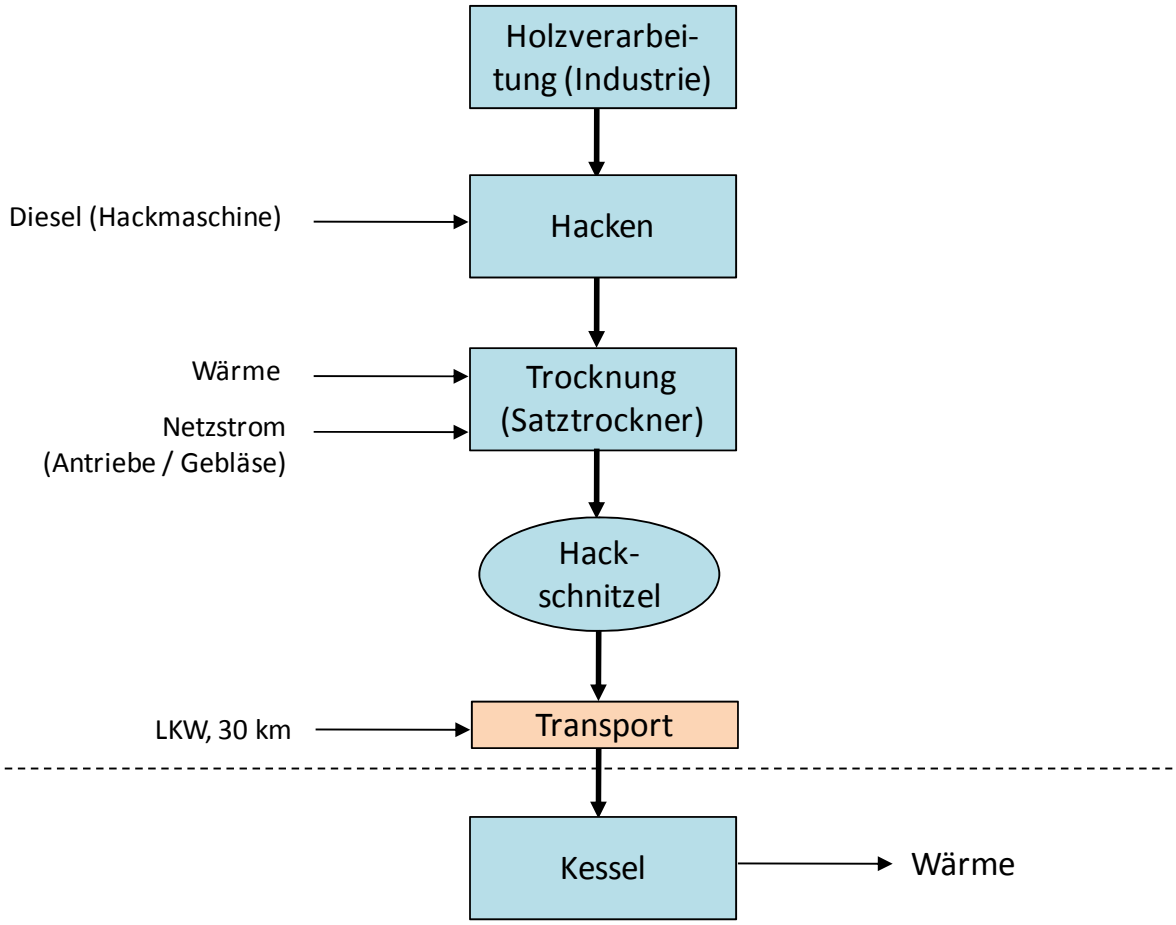

Abbildung 5-3: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Industrieholz

Herkunft: Industrieholz fällt bei der Holzverarbeitung als Abfallprodukt beim Zuschnitt von Hölzern aus Stammholz an. Das Industrieholz wird direkt am Anfallort verarbeitet.

Verarbeitung: Das Industrieholz wird mittels einer dieselbetriebenen Hackmaschine zerkleinert und anschließend in einem Satztrockner von einem Ausgangswassergehalt von 40 %

bis auf einen Endwassergehalt von 8 % getrocknet. Für den Trocknungsprozess wird Wärme benötigt. Für die Wärmebereitstellung werden gemäß Tabelle 12-3 im Anhang vier Varianten mit unterschiedlichen Verfahren zur Wärmebereitstellung betrachtet. In Variante 1 wird von einer Wärmeerzeugung durch einen Holzheizkessel mit einem Kesselnutzungsgrad von 85 % ausgegangen. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor für den Brennstoff Holz wird mit 0,1 gewählt. Bei der Variante 2 wird die Wärme durch einen Erdgaskessel mit einem Kesselnutzungsgrad von 85 % bereitgestellt. Für das Erdgas wird ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 1,1 angesetzt. Bei der Variante 3 wird die Wärme durch Abwärme aus KWK mit fossilem Energieträger breitgestellt. Für die Abwärme wird ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,7 angesetzt. Variante 4 liegt ebenfalls Abwärme aus KWK zugrunde, allerdings bei Einsatz von erneuerbaren Energieträgern mit einem Primärenergiefaktor von 0,0 gemäß des ursprünglichen Rechenverfahrens der EnEV.

Es zeigt sich, dass der Primärenergiebedarf pro MJ Endenergieträger für den Erdgaskessel am größten ist, wohingegen der Primärenergiebedarf für die Abwärme aus erneuerbarer KWK am geringsten ausfällt. Um eine möglichst anwendungsnahe Wärmeerzeugung zu berücksichtigen, wird die mit Holz betriebene Kesselanlage gemäß Variante 1 berücksichtigt. Für die Trocknung der Hackschnitzel wird neben der Wärme zusätzlich Netzstrom für den Betrieb der Gebläse benötigt. Nach der Trocknung der Hackschnitzel werden diese per LKW (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) zum Verbraucher transportiert.

Ergebnis: Tabelle 12-3 im Anhang enthält die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Industrieholz. Aus der Prozesskette resultiert ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,06. Der Prozessschritt mit dem größten Primärenergieanteil ist der Wärme- und Strombedarf für die Trocknung. Die übrigen Prozessschritte spielen eine untergeordnete Rolle.

5.4 Hackschnitzel aus Waldrestholz

In Abbildung 5-4 ist die Prozesskette für Hackschnitzel aus Waldrestholz mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend von der Waldpflege und Holzentnahme bis zur Verwertung der Hackschnitzel in einem Heizkessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger sind die Hackschnitzel beim Endkunden, bevor diese in einem Kessel verwertet werden.

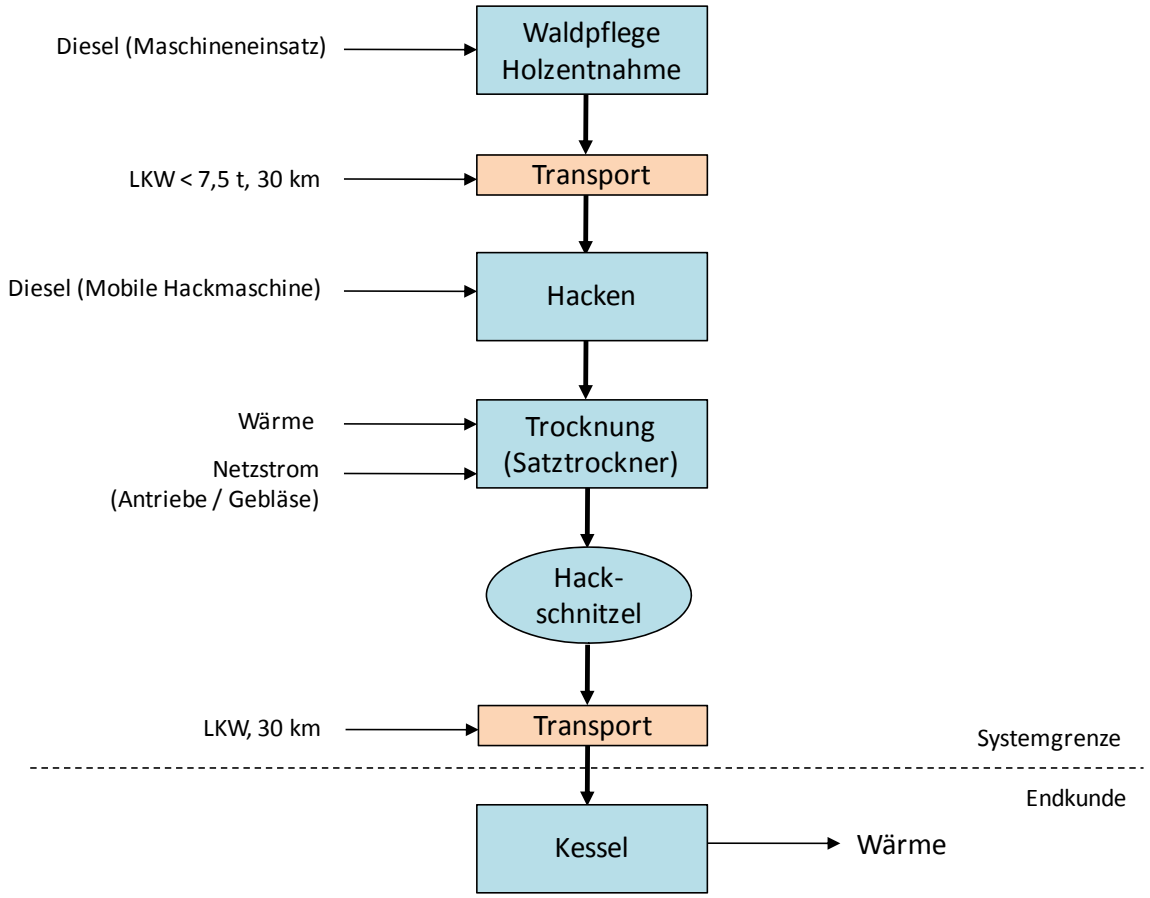

Abbildung 5-4: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Waldrestholz

Waldwirtschaft: Der Rohstoff Holz wird aus der Waldwirtschaft in Deutschland entnommen. Die Entnahme des Waldholzes erfolgt mittels Maschineneinsatz. Das entnommene Waldholz wird über einen Transportweg von 30 km (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) mit einem LKW zur weiteren Verarbeitung transportiert.

Verarbeitung: Das Waldholz wird mittels einer dieselbetriebenen Hackmaschine zerkleinert und anschließend in einem Satztrockner von einem Ausgangswassergehalt von 40 % bis auf einen Endwassergehalt von 8 % getrocknet. Für den Trocknungsprozess wird Wärme benötigt. Für die Wärmebereitstellung wird analog Kapitel 5.3 „Hackschnitzel aus Industrieholz“ die mit Holz betriebene Kesselanlage gemäß Variante 1 berücksichtigt. Für die Trocknung der Hackschnitzel wird neben der Wärme zusätzlich Netzstrom für den Betrieb der Gebläse benötigt. Nach der Trocknung der Hackschnitzel werden diese per LKW (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) zum Verbraucher transportiert.

Ergebnis: Tabelle 12-4 im Anhang enthält die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Waldrestholz. Aus der Prozesskette resultiert ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,07. Der Prozessschritt mit dem größten Primärenergieanteil ist der Wärme- und Strombedarf für die Trocknung. Die übrigen Prozessschritte spielen eine untergeordnete Rolle.

5.5 Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)

In Abbildung 5-5 ist die Prozesskette für Hackschnitzel aus KUP mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend vom Anbau bis zur Verwertung der Hackschnitzel in einem Heiz-

kessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger sind die Hackschnitzel beim Endkunden, bevor diese in einem Kessel verwertet werden.

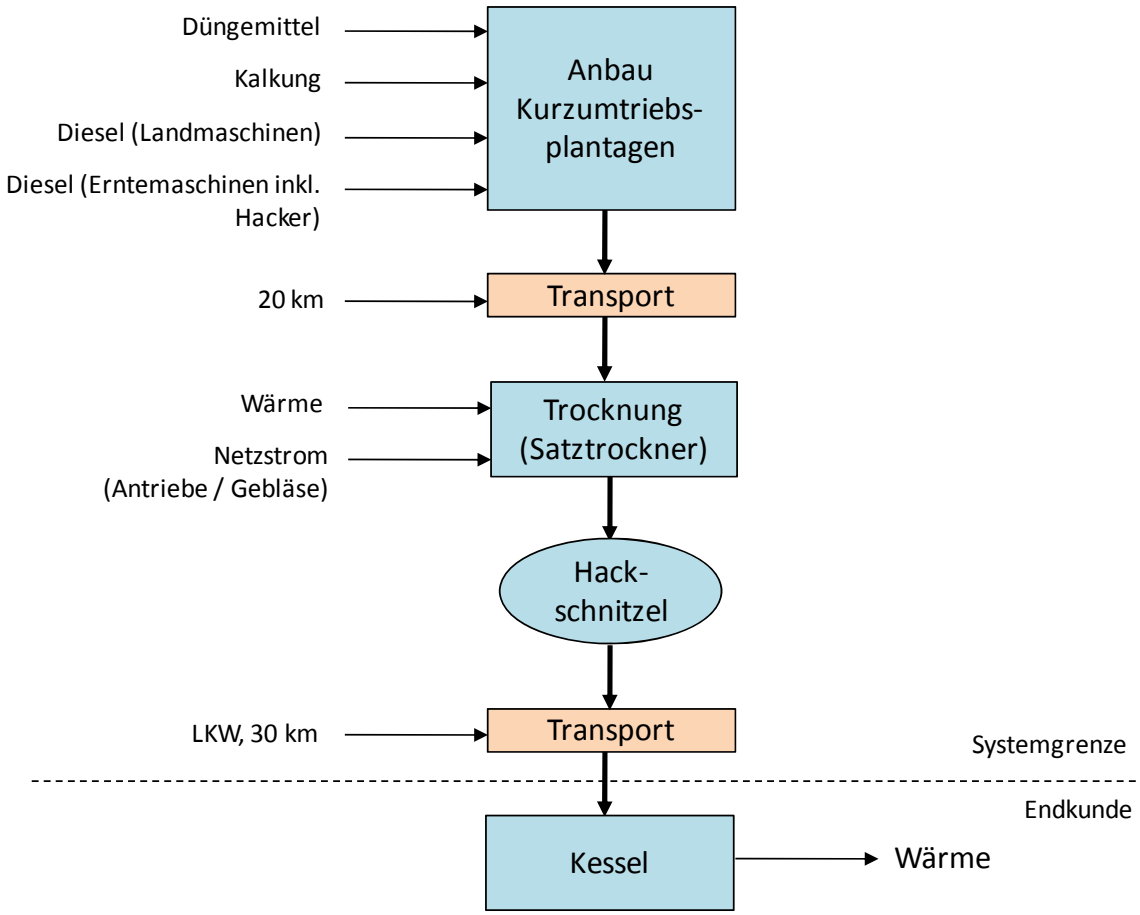

Abbildung 5-5: Prozesskette für den Brennstoff Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Anbau: Der Rohstoff Holz wird in Kurzumtriebsplantagen (KUP) in Deutschland gewonnen. Für die Bewirtschaftung werden dieselbetriebene Landmaschinen eingesetzt. Zudem kommen Düngemittel und Kalk zum Einsatz. Die Kurzumtriebe werden geerntet und direkt Vorort gehäckselt. Die noch feuchten Hackschnitzel werden mittels LKW über einen Transportweg von durchschnittlich 20 km zur weiteren Verarbeitung transportiert.

Verarbeitung: Die Hackschnitzel werden in einem Satztrockner von einem Ausgangswassergehalt von 50 % bis auf einen Endwassergehalt von 8 % getrocknet. Für den Trocknungsprozess wird Wärme benötigt. Für die Wärmebereitstellung wird analog Kapitel 5.3 „Hackschnitzel aus Industrieholz“ die mit Holz betriebene Kesselanlage gemäß Variante 1 berücksichtigt. Für die Trocknung der Hackschnitzel wird neben der Wärme zusätzlich Netzstrom für den Betrieb der Gebläse benötigt. Nach der Trocknung der Hackschnitzel werden diese per LKW (80 % Landstraße, 20 % Innerorts) zum Verbraucher transportiert.

Ergebnis: Tabelle 12-5 im Anhang enthält die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus KUP. Aus der Prozesskette resultiert ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,11. Die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil sind der Anbau und die Trocknung. Die übrigen Prozessschritte spielen eine untergeordnete Rolle.

5.6 Holzpellets aus Waldrestholz

In Abbildung 5-6 ist die Prozesskette für Holzpellets aus Waldrestholz mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend von der Waldpflege und Holzentnahme bis zur Verwertung der Holzpellets in einem Heizkessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger sind die Pellets beim Endkunden, bevor diese in einem Kessel verwertet werden.

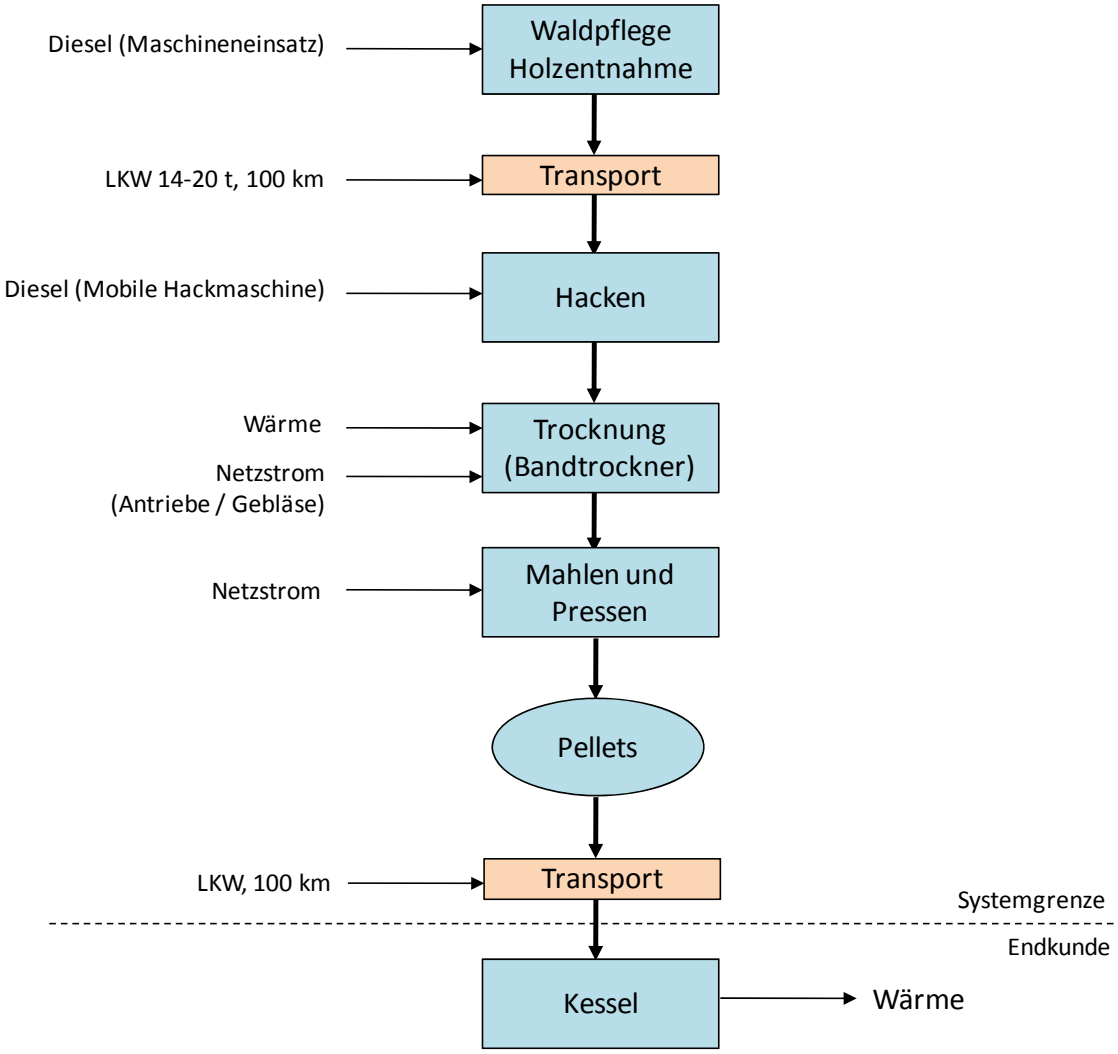

Abbildung 5-6: Prozesskette für den Brennstoff Holzpellets aus Waldrestholz

Die Pelletproduktion übersteigt den Pelletverbrauch in Deutschland. Nach einer Erhebung des Deutschen Pelletinstitutes (DEPI 2010) für das Jahr 2009 lag die Pelletproduktion rd. 500.000 Tonnen über dem Pelletverbrauch in Deutschland. Der Import von Pellets beschränkt sich in geringem Umfang auf die Grenzregionen zu Österreich, der Schweiz und Frankreich. Sollte es zukünftig zu einem starken Anstieg in der Pelletnachfrage kommen, ist zu berücksichtigen, dass sich längere Transportwege ungünstig auf den Primärenergiefaktor auswirken können. Als Variante wird daher in Tabelle 12-6 ein Transportweg von Kanada nach Deutschland berücksichtigt. Nachfolgend wird der Lebensweg des Brennstoffes Holzpellets kurz beschrieben.

Waldwirtschaft: Die Entnahme des Waldholzes erfolgt mittels Maschineneinsatz. Das entnommene Waldholz wird über einen Transportweg von 100 km (20 % BAB, 60 % Landstra-

ße, 20 % Innerorts) mit einem LKW mit einem Gesamtgewicht von 14 bis 20 t zur weiteren Verarbeitung transportiert (Variante 1 Tabelle 12-6). Alternativ erfolgt in Variante 2 ein Transport von Kanada per Frachtschiff nach Deutschland.

Verarbeitung: Das Waldholz wird mittels einer dieselbetriebenen Hackmaschine zerkleinert und anschließend in einem Bandtrockner von einem Ausgangswassergehalt von 40 % bis auf einen Endwassergehalt von 8 % getrocknet. Zur Trocknung wird Abwärme für die Erwärmung von Luft benötigt, die mittels Gebläsen über das Trockengut geblasen wird. Für die Wärmebereitstellung wird analog Kapitel 5.3 „Hackschnitzel aus Industrieholz“ die mit Holz betriebene Kesselanlage gemäß Variante 1 berücksichtigt. Für die Trocknung der Hackschnitzel wird neben der Wärme zusätzlich Netzstrom für den Betrieb der Gebläse benötigt. Das Trockengut wird gemahlen und in einer Pelletiermaschine zu Pellets gepresst. Die Pellets werden per LKW über einen Transportweg von 100 km (20 % BAB, 60 % Landstraße, 20 % Innerorts) zum Verbraucher transportiert.

Ergebnis: Tabelle 12-6 im Anhang enthält die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Holzpellets aus Waldrestholz. Aus der Prozesskette resultiert ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,14 bei Annahme eines Transports innerhalb Deutschlands (Variante 1 – Transport). Bei Annahme eines Transports des Rohmaterials von Kanada nach Deutschland ergibt sich ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,52 (Variante 2 – Transport). Dies zeigt, dass bei einem Transportweg von Kanada nach Deutschland mit einem um den Faktor 3,7 höheren Primärenergiefaktor für Holzpellets aus Waldrestholz zu rechnen ist. Abgesehen vom Transport sind die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil der Wärme- und Strombedarf für die Trocknung und das Mahlen und Pressen der Pellets. Die übrigen Prozessschritte spielen eine untergeordnete Rolle.

5.7 Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagenholz (KUP)

In Abbildung 5-7 ist die Prozesskette für Holzpellets aus KUP mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend vom Anbau bis zur Verwertung der Holzpellets in einem Heizkessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger sind die Holzpellets beim Endkunden, bevor diese in einem Kessel verwertet werden.

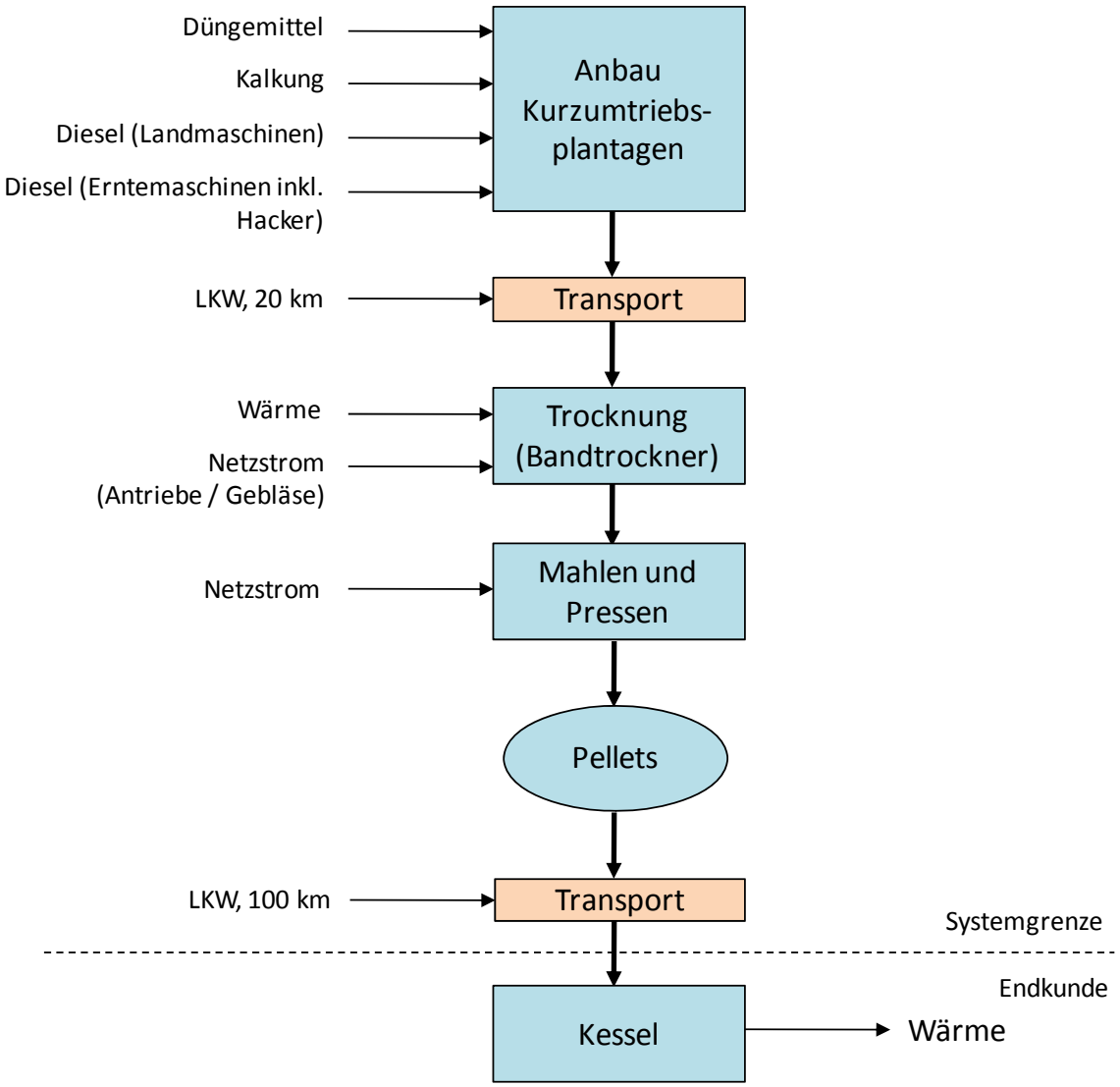

Abbildung 5-7: Prozesskette für den Brennstoff Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Anbau: Der Rohstoff Holz wird in Kurzumtriebsplantagen (KUP) in Deutschland gewonnen. Für die Bewirtschaftung werden dieselbetriebene Landmaschinen eingesetzt. Zudem kommen Düngemittel und Kalk zum Einsatz. Die Kurzumtriebe werden geerntet und direkt Vorort gehäckselt. Die noch feuchten Hackschnitzel werden mittels LKW über einen Transportweg von durchschnittlich 20 km zur weiteren Verarbeitung transportiert.

Verarbeitung: Die Hackschnitzel werden in einem Satztrockner von einem Ausgangswassergehalt von 50 % bis auf einen Endwassergehalt von 8 % getrocknet. Für den Trocknungsprozess wird Wärme benötigt. Für die Wärmebereitstellung wird analog Kapitel 5.4 „Hackschnitzel aus Waldrestholz“ die mit Holz betriebene Kesselanlage gemäß Variante 1 (PE erneuerbar = 0,023) berücksichtigt. Für die Trocknung der Hackschnitzel wird neben der Wärme zusätzlich Netzstrom für den Betrieb der Gebläse benötigt. Das Trockengut wird gemahlen und in einer Pelletiermaschine zu Pellets gepresst. Die Pellets werden per LKW über einen Transportweg von 100 km (20 % BAB, 60 % Landstraße, 20 % Innerorts) zum Verbraucher transportiert.

Ergebnis: Tabelle 12-7 im Anhang enthält die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Holzpellets aus KUP. Aus der Prozesskette resultiert ein nicht erneuerbarer

Primärenergiefaktor von 0,17. Die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil sind das Mahlen und Pressen, die Trocknung und der Anbau. Die übrigen Prozessschritte spielen eine untergeordnete Rolle.

5.8 Stroh

In Abbildung 5-8 ist die Prozesskette für Stroh mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend von der Bereitstellung bis zur Verwertung des Strohs in einem Heizkessel dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger ist das Stroh beim Endkunden, bevor es in einem Kessel verwertet wird.

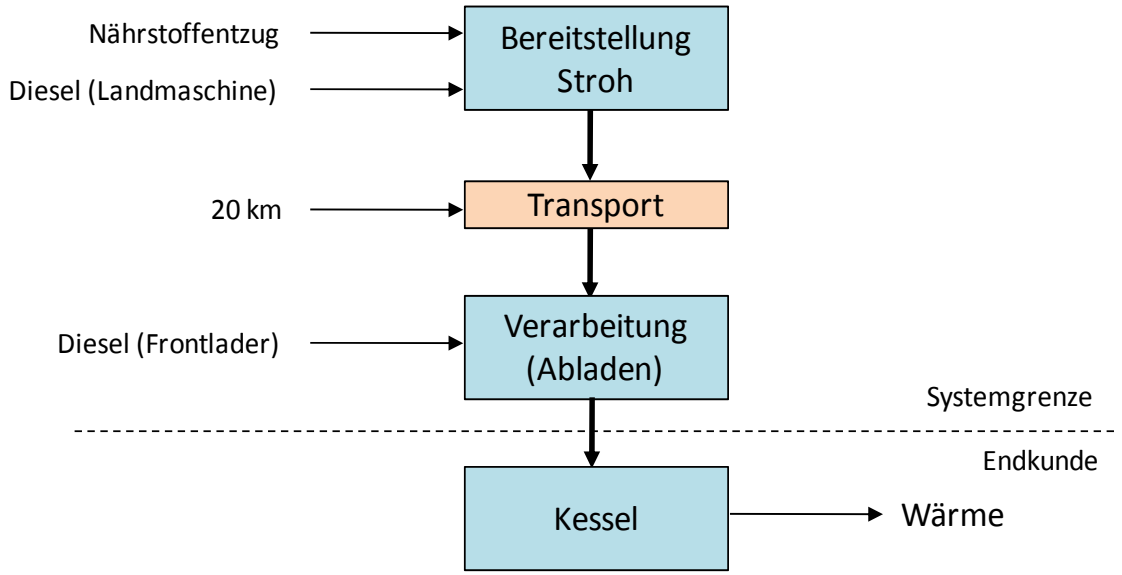

Abbildung 5-8: Prozesskette für den Brennstoff Stroh

Landwirtschaft: Dem Stroh wird der Nährstoffentzug aus dem Boden und der Dieselverbrauch der Landmaschinen zugerechnet. Das Stroh wird über einen Transportweg von 20 km Entfernung zum Endkunden transportiert.

Verarbeitung: Das Stroh wird mit einem Frontlader vom Anhänger abgeladen und gelagert.

Ergebnis: Tabelle 12-8 im Anhang enthält die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Stroh. Aus der Prozesskette resultiert ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,03.

5.9 Biomethan (Mais)

In Abbildung 5-9 ist die Prozesskette für Biomethan aus Maissilage mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend vom landwirtschaftlichen Anbau bis zur Einspeisung des aufbereiteten Biomethans in ein Mitteldruckgasnetz dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger stellt die Übergabe des Biomethans an das Mitteldruckgasnetz dar.

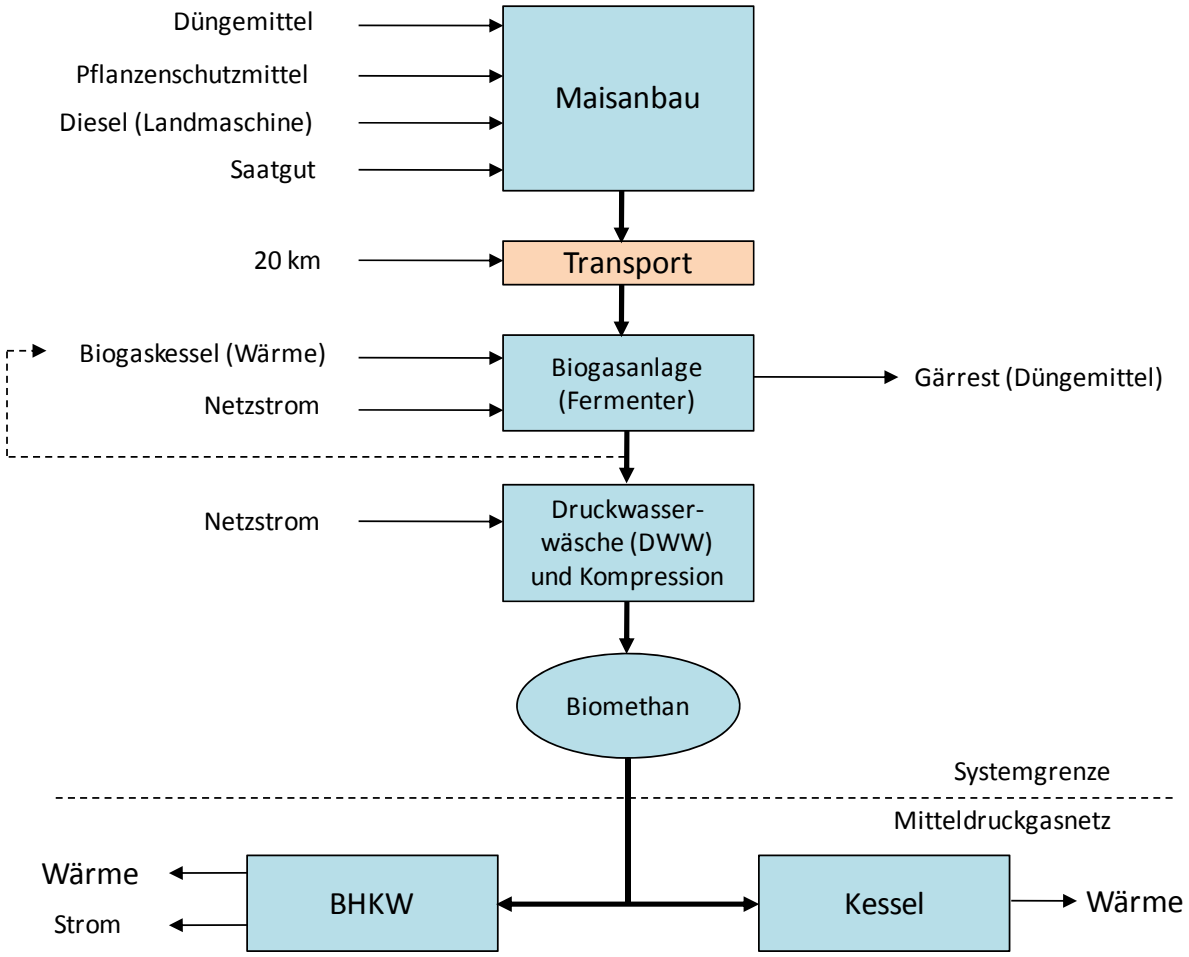

Abbildung 5-9: Prozesskette für den Brennstoff Biomethan aus Maissilage

Landwirtschaft: Für den Maisanbau werden Düngemittel, Pflanzenschutzmittel (PSM), Saatgut und dieselbetriebene Landmaschinen eingesetzt. Die geernteten oberirdischen Maispflanzen werden gehäckselt über eine durchschnittliche Entfernung von 20 km zur Biogasanlage transportiert.

Verarbeitung: Die gehäckselten Maispflanzen werden in den Fermenter einer Biogasanlage eingebracht, wo unter Zuführung von Wärme und mechanischer Energie Biogas erzeigt wird. Bezüglich der Wärmebereitstellung des Fermenters wird angenommen, dass diese über einen Biogasheizkessel erzeugt wird, der mit Biogas aus der Biogasanlage gespeist wird. Diese Betrachtungsweise ist auch im Sinne eines fiktiven Bilanzkreises anzuwenden, wenn in der Realität ein zweites BHKW am Fermenterstandort installiert ist, da diese Wärme kausal dem Anlagenbetrieb zuzuordnen ist. Der elektrische Strom für die Rührwerke im Fermenter wird aus dem Netz bezogen. Das Biogas aus dem Fermenter wird einer Gasaufbereitung zugeführt, in der über eine Druckwasserwäsche u.a. Kohlendioxid und andere unerwünschte Spurengase aus dem Biogas entfernt werden. Das aufbereitete Biomethan wird über Kompressoren verdichtet und in ein Mitteldruckgasnetz eingespeist.

Ergebnis: In Tabelle 12-9 im Anhang sind die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Biomethan aus Maissilage aufgeführt. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Biomethan}$ beträgt insgesamt 0,36. Der Gärrest aus dem Fermenter dient als Düngemittel für den landwirtschaftlichen Anbau. Dadurch werden weniger synthetische Düngemittel eingesetzt, so dass eine Düngemittelgutschrift berücksichtigt wird. Die Prozessschritte mit dem

größten Primärenergieanteil sind die Biogasanlage einschließlich der Gasaufbereitung und der Maisanbau. Von untergeordneter Bedeutung sind die Prozessschritte Transport und Infrastruktur.

5.10 Biogas (Gülle)

In Abbildung 5-10 ist die Prozesskette für Biogas aus Gülle mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend von der Bereitstellung der Gülle bis zur energetischen Verwertung in einem BHKW dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger stellt die Abgabe des Biogases an den Endkunden dar.

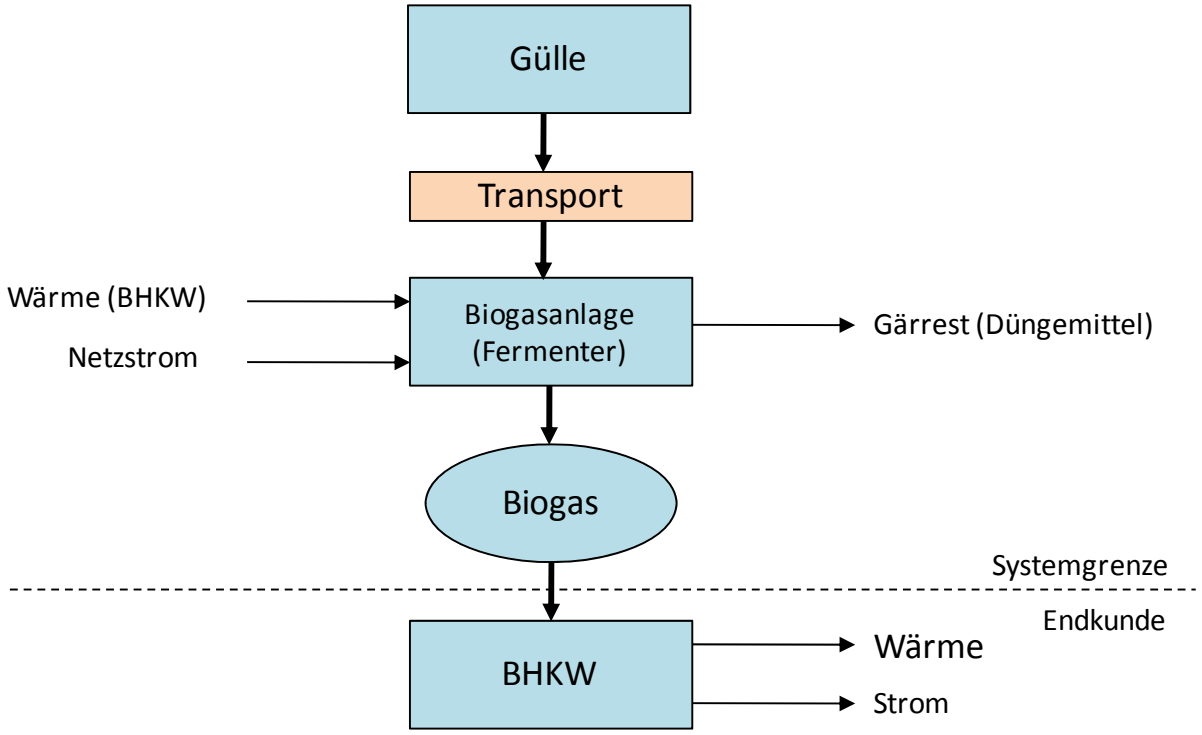

Abbildung 5-10: Prozesskette für den Brennstoff Biogas aus Gülle

Landwirtschaft: Die Gülle aus der Schweine- und Rinderzucht wird mittels Landmaschinen zur Biogasanlage transportiert.

Verarbeitung: Die Gülle wird in den Fermenter einer Biogasanlage eingebracht, wo unter Zuführung von Wärme und mechanischer Energie Biogas erzeugt wird. Die Wärme für die Biogasanlage wird über ein BHKW bereitgestellt, das mit Biogas aus der Biogasanlage betrieben wird. Der elektrische Strom für die Rührwerke im Fermenter wird aus dem Stromnetz bezogen.

Ergebnis: In Tabelle 12-10 im Anhang sind die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Biogas aus Gülle aufgeführt. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Biogas}$ beträgt insgesamt 0,15. Der Gärrest aus dem Fermenter dient als Düngemittel für den landwirtschaftlichen Anbau. Dadurch werden weniger synthetische Düngemittel eingesetzt, so dass eine Düngemittelgutschrift berücksichtigt wird. Durch den Transport zur Gülledirektausbringung wird die Düngemittelgutschrift reduziert, so dass als Differenz der in Tabelle 12-10 angegebene Wert von -0,104 berücksichtigt wird. Die Prozessschritte mit dem größten Pri-

märenergieanteil sind die Biogasanlage und die Infrastruktur. Von untergeordneter Bedeutung ist der Prozessschritt Substratbereitstellung.

5.11 Biogas (Mais)

In Abbildung 5-11 ist die Prozesskette für Biogas aus Maissilage mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend vom landwirtschaftlichen Anbau bis zur energetischen Verwertung in einem BHKW dargestellt. Die Systemgrenze für die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs pro MJ Endenergieträger stellt die Abgabe des Biogases an den Endkunden dar.

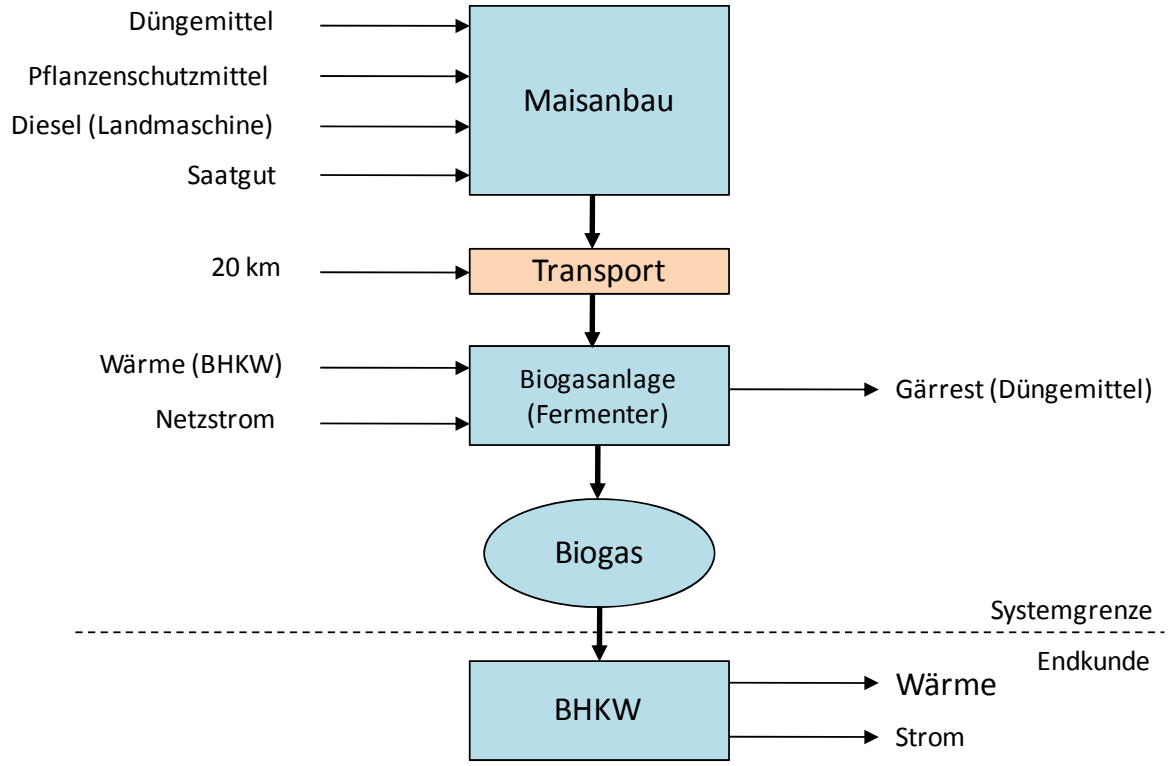

Abbildung 5-11: Prozesskette für den Brennstoff Biogas aus Mais

Landwirtschaft: Für den Maisanbau werden Düngemittel, Pflanzenschutzmittel (PSM), Saatgut und dieselbetriebene Landmaschinen eingesetzt. Die geernteten oberirdischen Maispflanzen werden gehäckselt über eine durchschnittliche Entfernung von 20 km zur Biogasanlage transportiert.

Verarbeitung: Die gehäckselten Maispflanzen werden in den Fermenter einer Biogasanlage eingebracht, wo unter Zuführung von Wärme und mechanischer Energie Biogas erzeugt wird. Die Wärme für die Biogasanlage wird über ein BHKW bereitgestellt, das mit Biogas aus der Biogasanlage betrieben wird. Der elektrische Strom für die Rührwerke im Fermenter wird aus dem Stromnetz bezogen.

Ergebnis: In Tabelle 12-11 im Anhang sind die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Biogas aus Maissilage aufgeführt. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Biogas}$ beträgt insgesamt 0,19. Der Gärrest aus dem Fermenter dient als Düngemittel für den landwirtschaftlichen Anbau. Dadurch werden weniger synthetische Düngemittel eingesetzt, so dass eine Düngemittelgutschrift berücksichtigt wird. Die Prozessschritte mit dem größten

Primärenergieanteil sind die Biogasanlage sowie der Maisanbau. Von untergeordneter Bedeutung sind die Prozessschritte Transport und Infrastruktur.

5.12 Rapsöl

In Abbildung 5-12 ist die Prozesskette für Rapsöl mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend vom landwirtschaftlichen Rapsanbau bis zur energetischen Verwertung in einem BHKW bzw. einer Kesselanlage dargestellt. Die Bilanzierung des Primärenergiebedarfs für Rapsöl erfolgt bis zur Systemgrenze bei Übergabe an den Endkunden.

Landwirtschaft: Für den Anbau des Rapses werden Düngemittel, Pflanzenschutzmittel (PSM), Saatgut und dieselbetriebene Landmaschinen eingesetzt. Die Rapsernte erfolgt im Direktdrusch. Das Rapsstroh wird in den Boden eingearbeitet. Die Rapssaat wird am Hof getrocknet, gelagert und gekühlt. Die Rapssaat wird per LKW zur weiteren Verarbeitung transportiert.

Verarbeitung: Die Rapssaat wird zu einer zentralen Ölmühle transportiert, dort gepresst, das Rapsöl extrahiert und raffiniert. Es wird von einem Rapsöl-Ertrag von 1.347 kg/(ha*a) ausgegangen. Der anfallende Rapsschrot wird als Tierfutter verwendet. Das Rapsöl wird anschließend per LKW zum Endkunden transportiert. Für die Berechnung des Primärenergiefaktors wird von einer Gutschrift des Rapsschrots nach einer Allokation auf Preisbasis ausgegangen. Das bedeutet, dass der primärenergetische Aufwand der Rapsölbereitstellung proportional zum erzielten Erlös der Produkte Öl und Schrot aufgeteilt wird. Dabei wird aufgrund der vermehrten Nachfrage nach Bioölen von einem Preisanstieg für das Bioöl um 20 % ausgegangen. Gleichzeitig wird angenommen, dass das Kuppelprodukt „Rapsschrot“ um 20 % günstiger wird. Für die Gutschrift des Rapsschrots wird ein Anteilsfaktor von 23 % auf das Rapsschrot und von 77 % auf das Rapsöl berücksichtigt.

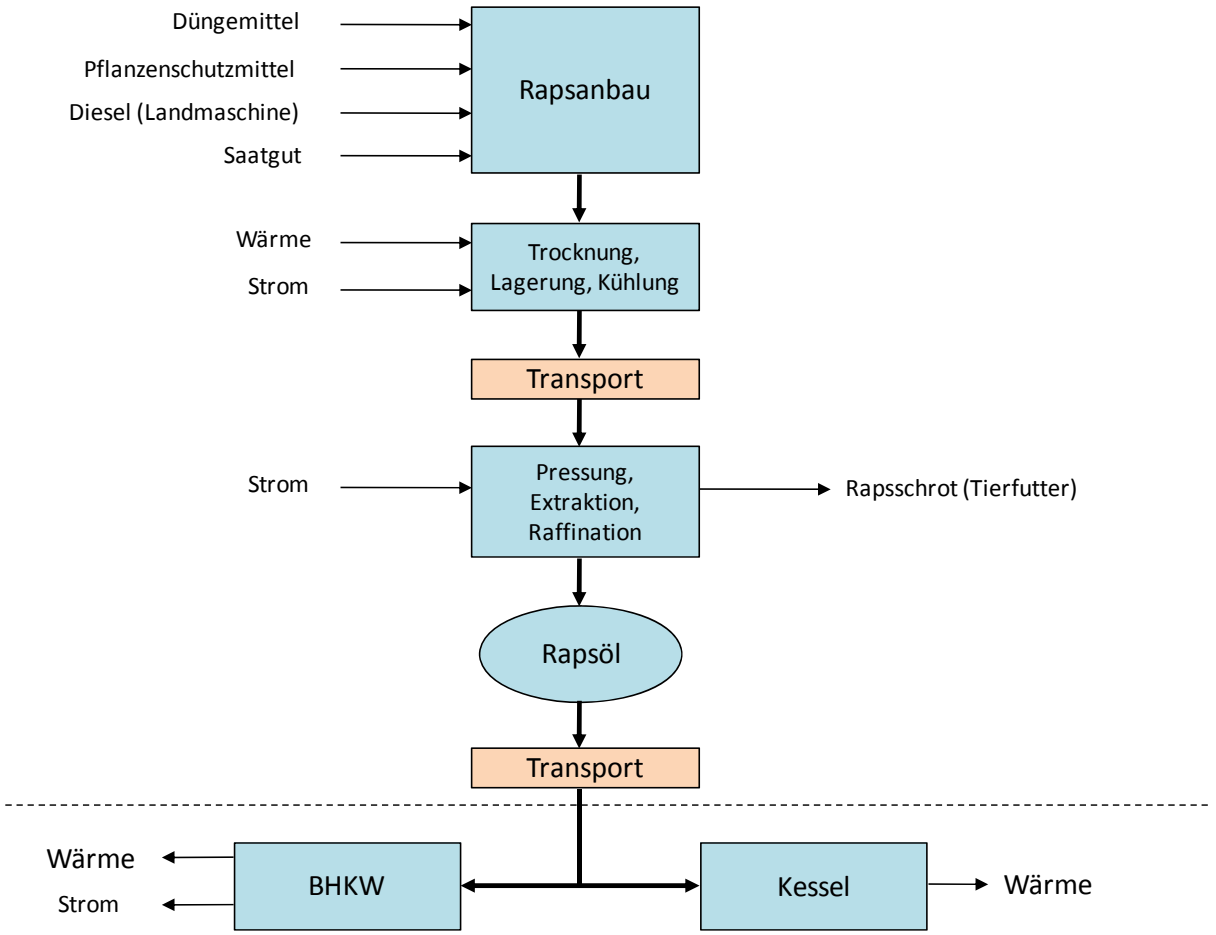

Abbildung 5-12: Prozesskette für den Brennstoff Rapsöl

Ergebnis: In Tabelle 12-12 im Anhang sind die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Rapsöl enthalten. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Rapsöl}$ beträgt insgesamt 0,33. Die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil sind der Rapsanbau sowie die Verarbeitung. Von untergeordneter Bedeutung sind die Prozessschritte Transport und Infrastruktur.

5.13 Biodiesel (RME)

In Abbildung 5-13 ist die Prozesskette für Biodiesel aus Raps mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend vom landwirtschaftlichen Anbau bis zur energetischen Verwertung in einer Kesselanlage dargestellt.

Landwirtschaft: Die Prozessschritte für die Landwirtschaft entsprechen dem Brennstoff Rapsöl in Kapitel 5.12.

Verarbeitung: Die Rapssaat wird zu einer zentralen Ölmühle transportiert, dort gepresst, das Rapsöl extrahiert und raffiniert. Der anfallende Rapsschrot wird als Tierfutter verwendet. Das Rapsöl wird zu Biodiesel (Rapsölmethylester) verestert, wobei als Nebenprodukt Glyzerin anfällt. Der Biodiesel wird anschließend per LKW zum Endkunden transportiert.

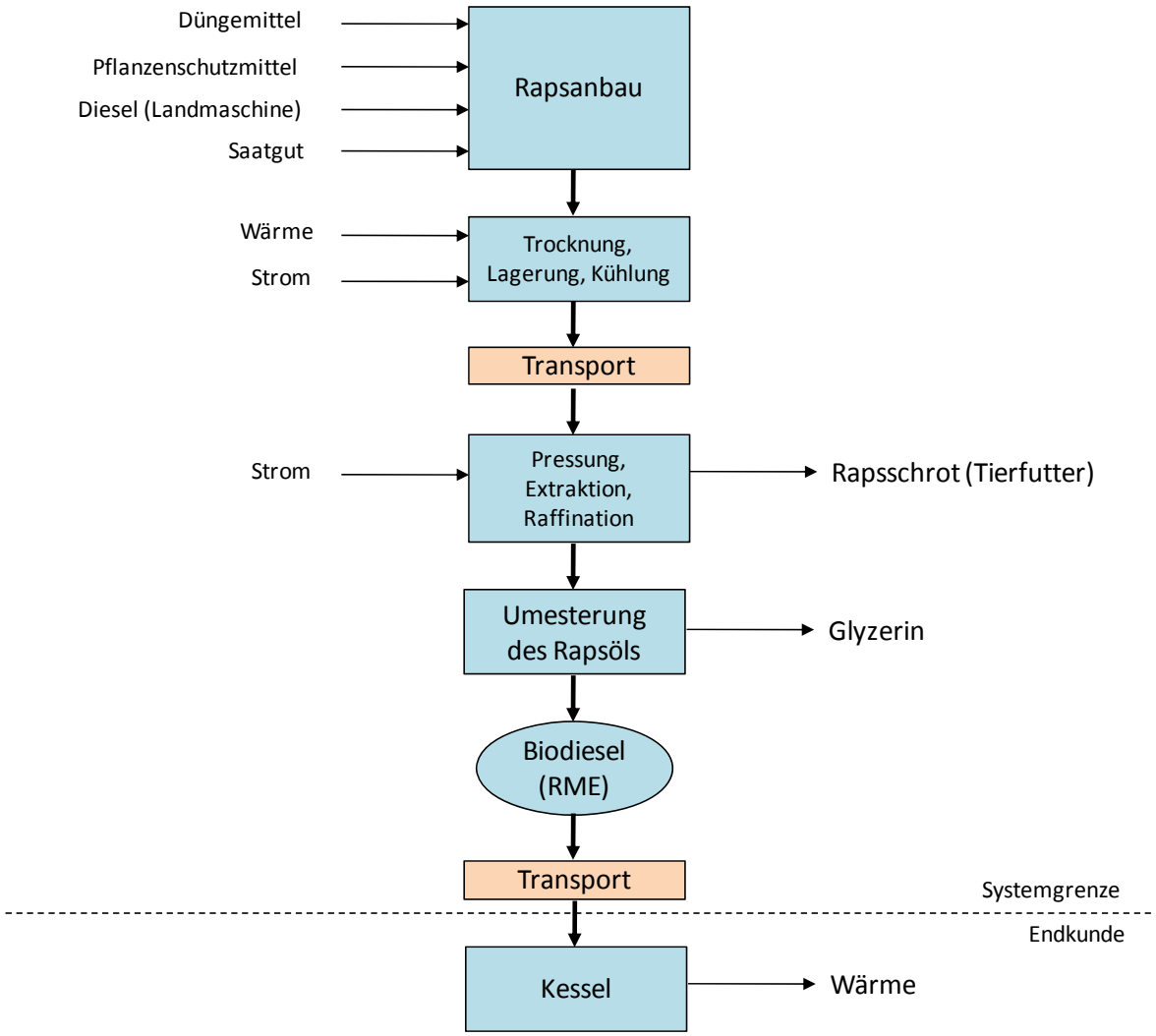

Abbildung 5-13: Prozesskette für den Brennstoff Biodiesel (Raps)

Ergebnis: In Tabelle 12-13 im Anhang sind die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Biodiesel aus Raps aufgeführt. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Biodiesel}$ beträgt insgesamt 0,48. Für das Kuppelprodukt Glyzerin wird in Analogie zum Rapsschrot eine Allokation auf Erlösbasis durchgeführt. Danach entfallen 15 % auf das Glyzerin und 85 % auf den Biodiesel. Die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil sind die Verarbeitung sowie der Rapsanbau. Von untergeordneter Bedeutung sind u.a. die Subschritte Transport und Infrastruktur.

5.14 Palmöl

In Abbildung 5-14 ist die Prozesskette für Palmöl mit den wesentlichen Prozessschritten ausgehend vom landwirtschaftlichen Anbau bis zur energetischen Verwertung in einer Kesselanlage dargestellt.

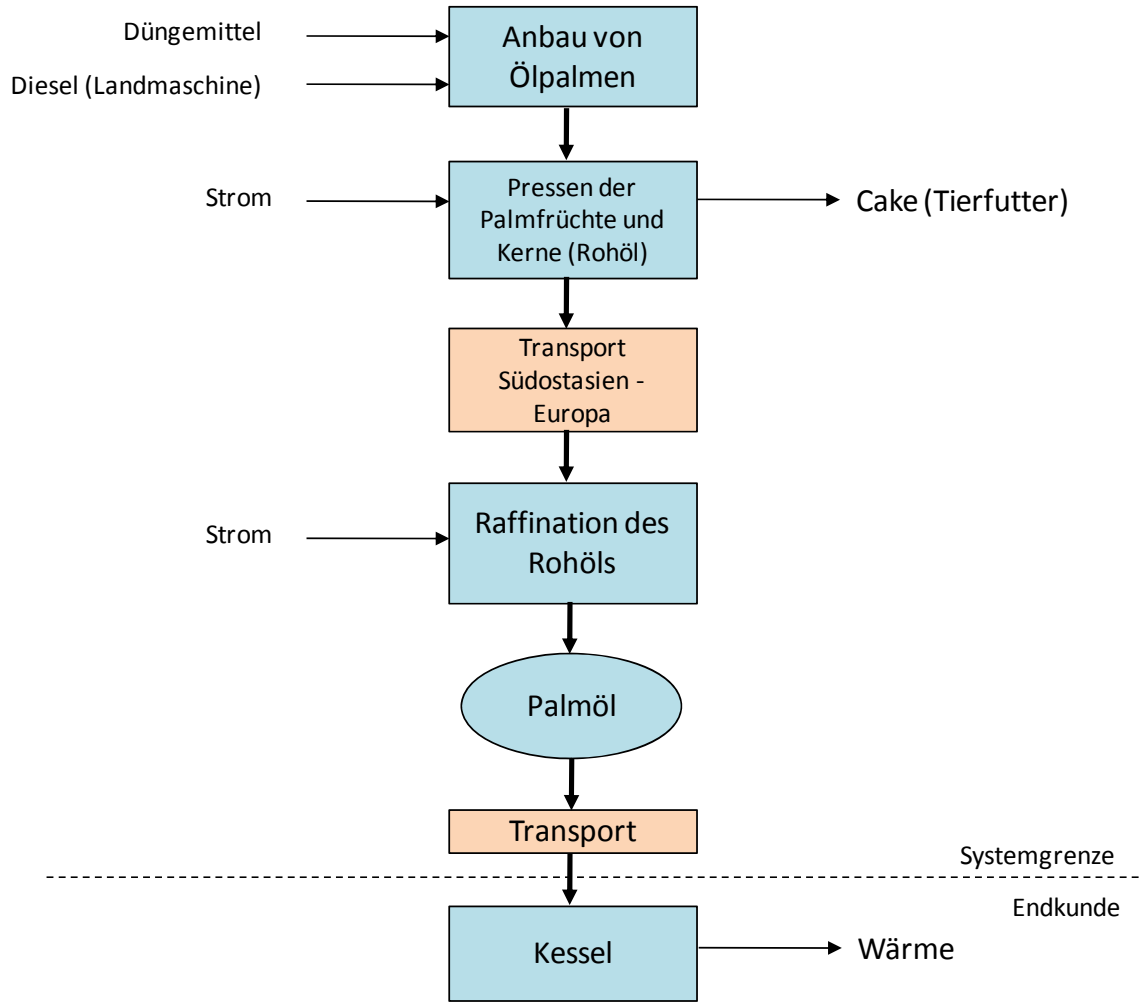

Abbildung 5-14: Prozesskette für den Brennstoff Palmöl

Landwirtschaft: Für den Anbau der Ölpalmen wird Düngemittel benötigt, wobei die Menge der Düngemittel geringer ausfällt als beim Rapsöl. Pro ha Anbaufläche wird ein Palmölertrag von 3,5 t/(ha·a) erzielt. Für den Anbau und die Ernte der Palmfrüchte werden dieselbetriebene Landmaschinen eingesetzt. Der Anbau erfolgt nach den Vorgaben der Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung. Die Palmfrüchte werden geerntet und Vorort verarbeitet.

Verarbeitung: Aus dem Fruchtfleisch und den Kernen der Palmfrüchte wird durch Pressung das Rohöl gewonnen. Der Presskuchen (Cake) wird als Tierfutter verwendet. Das Rohöl wird per Schiffstransport von Südostasien nach Europa transportiert. Die Raffination des Palmöls findet in Europa statt. Endprodukt des Raffinationsprozesses ist das Palmöl, das als Brennstoff in Kesselanlagen Verwendung findet. Das Palmkernöl dient ebenfalls als Brennstoff und wird dem Primärenergiebedarf zur Herstellung des Palmöls gutgeschrieben.

Die Verarbeitungsanlagen entsprechend dem Durchschnitt des Anlagenparks.

Ergebnis: In Tabelle 12-14 im Anhang sind die Ergebnisse zur Berechnung des Primärenergiefaktors für Palmöl aufgeführt. Der nicht erneuerbare Primärenergiefaktor $f_{P,Palmöl}$ beträgt insgesamt 0,21. Die Prozessschritte mit dem größten Primärenergieanteil sind der Anbau der Ölpalmen und der Transport von Südostasien nach Europa. Von untergeordneter Bedeutung sind die Prozessschritte Verarbeitung, der Transport zum Verbraucher und die Infrastruktur.

5.15 Zusammenfassung und Empfehlung

Die Primärenergiefaktoren für die Brennstoffe zur direkten Verfeuerung und für den Einsatz in KWK-Anlagen werden in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Primärenergiefaktoren für Brennstoffe zur direkten Verfeuerung

Primärenergiefaktoren	**f_P (MJ/MJ H_i)**		
-	erneuerbar	**nicht-erneuerbar**	gesamt
Brennstoffe zur direkten Verfeuerung			
Feste Biomasse			
Scheitholz	1,00	**0,10**	1,10
Hackschnitzel Altholz	1,00	**0,02**	1,02
Hackschnitzel Industrieholz	1,00	**0,06**	1,06
Hackschnitzel Waldrestholz	1,00	**0,07**	1,07
Hackschnitzel KUP	1,00	**0,11**	1,11
Holzpellets Waldrestholz	1,00	**0,14**	1,14
aus Kanada	*1,00*	***0,52***	*1,52*
Holzpellets KUP	1,00	**0,17**	1,17
Stroh	1,00	**0,03**	1,03
Gasförmige Biomasse			
Biomethan (Mais)	1,00	**0,36**	*1,36*
Biogas für KWK (kein Endenergieträger)			
Gülle	*1,00*	***0,15***	*1,15*
Mais	*1,00*	***0,19***	*1,19*
Flüssige Biomasse			
Rapsöl	1,00	**0,33**	1,33
Biodiesel (Raps)	1,00	**0,48**	1,48
Palmöl	1,00	**0,21**	1,21

Für die Brennstoffe der festen Biomasse zeigt sich in Tabelle 5-1, dass die Bandbreite der nicht erneuerbaren Primärenergiefaktoren zwischen 0,02 für Hackschnitzel aus Altholz und 0,17 für Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) liegt. Der Extremfall für Holzpellets aus Waldrestholz aus Kanada ist derzeit nicht praxisrelevant, da der Rohstoffverbrauch für die Holzpelletproduktion in Deutschland fast ausschließlich aus Holzressourcen aus dem Inland gedeckt wird und nur zu wenigen Prozentpunkten in den Grenzregionen zu den Nachbarländern importiert wird. Es ist jedoch grundsätzlich nicht auszuschließen, dass bei steigender Pelletnachfrage auch der Import von Rohstoffen aus ferneren Ländern nachgefragt wird.

Gemäß EnEV 2009 liegt der nicht erneuerbare Anteil des Primärenergiefaktors für Holz derzeit bei 0,2. Die untersuchten Brennstoffe der festen Biomasse liegen damit alle unter diesem Wert.

Für die gasförmige Biomasse zur direkten Verfeuerung ist nur Biomethan aus Mais relevant, da unaufbereitetes Biogas aus Gülle bzw. Mais unmittelbar in KWK-Anlagen verfeuert wer-

den. Für Biomethan aus Mais wird ein nicht erneuerbarer Primärenergiefaktor von 0,36 ermittelt. Die bilanzierte Anlage ist eine moderne Anlage nach dem Stand der Technik. Der Wert von 0,36 liegt damit etwas unter dem in der EnEV 2009 genannten nicht erneuerbaren Primärenergiefaktor von 0,5. Für die flüssige Biomasse liegt die Bandbreite der nicht erneuerbaren Primärenergiefaktoren zwischen 0,21 für Palmöl und 0,48 für Biodiesel aus Raps. Diese Werte liegen damit unter, aber (je nach Energieträger) nahe bei dem in der EnEV 2009 genannten Wert von 0,5 für Bioöl.

Gerade für Palmöl ergibt sich auf Grund des hohen Flächenertrages und der geringen fossilen Aufwendungen beim Anbau und in der Verarbeitung trotz des weiten Transportweges ein geringerer PE-Faktor. Gerade bei diesem Kraftstoff ist aber die Gefahr eines deutlich erhöhten Treibhausgas-Budgets auch bei Einhaltung der Nachhaltigkeitszertifizierung gegeben. Dies hat auch damit zu tun, dass sich indirekte Landnutzungsänderungen und die damit verbundenen THG-Emissionen derzeit nicht in der Rechenmethodik der Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung wiederfinden.

In der derzeitigen EnEV wird die Nutzung des PE-Faktors 0,5 für **Biogas und Bioöl** auf Einsatzfälle begrenzt, „wenn die flüssige oder gasförmige Biomasse im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude erzeugt wird." (EnEV 2009) Hintergrund dieser Regelung ist der problematische Vollzug/Kontrolle, da der Versorger und das bezogene Gas-/Ölprodukt kurzfristig gewechselt werden kann und es nicht durch die Art des Wärmeerzeugers sichergestellt ist, dass der entsprechende erneuerbare Energie-Anteil bezogen wird.

Neben das Kontrollproblem kommt die ökologische Wirkung, die auftreten würde, indem bei genereller Zulassung von Bio-Erdgas mit einem PE-Faktor durch eine stark erhöhte Nachfrage nach Bio-Erdgas der bereits heute vergleichsweise hohe Flächendruck zum Anbau von nachwachsenden Rohstoffen zur Biomasse-Bereitstellung zunehmen würde. Daher ist ein Einsatz von Bio-Erdgas in KWK-Anlagen derzeit auch durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz gefördert. Für Bioöle sollte zusätzlich gefordert werden, dass sie gemäß der entsprechenden Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung zertifiziert sind.

Tabelle 5-2 enthält die Zusammenfassung der Empfehlungen für die Primärenergiefaktoren biogener Brennstoffe. Die Werte werden auf Basis eines konservativen Ansatzes gewählt. Für **Holzpellets** wird ein PE-Faktor von 0,2 vorgeschlagen. Für alle **anderen festen biogenen Brennstoffe** einschließlich Hackschnitzel wird ein Wert von 0,1 empfohlen. Damit wird den tatsächlichen Werten für Holzpellets und Hackschnitzel in Tabelle 5-1 Rechnung getragen. **Je nach gewünschter Vereinfachung** könnte für beide Kategorien auch nach wie vor 0,2 verwendet werden.

Für **Biomethan**, das aus Biogas aufbereitet wird, wird ein PE-Faktor von 0,4 bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang zum Gebäude[3] oder bei Nutzung in KWK-Anlagen empfohlen. Für den Endkunden, der Biomethan über ein Gasnetz bezieht und in einer Kesselanlage verwertet, gilt dieser Wert aus o. g. Gründen nicht. Es wird vorgeschlagen, in diesen Fällen bei dem PE-Faktor von 1,1 zu bleiben.

Es stellt sich außerdem die Frage, wie mit **beigemischtem Biomethan** umzugehen ist. Hier ergibt sich eine Analogie zu der Regelung der EnEV bzgl. Ökostrom. Auch bei Einsatz von Ökostrom muss der Primärenergiefaktor 2,6 angesetzt werden. Der steigende Anteil an Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern spiegelt sich gleichwohl in einem über die Jahre hinweg sinkenden Primärenergiefaktor wider.

[3] Dieser Fall dürfte bei Biomethan keine praktische Bedeutung haben.

Analog könnte im Fall von Erdgas vorgegangen werden. Während Gas mit Bioerdgas eines Einzelversorgers nach wie vor mit dem PE-Faktor von Erdgas bewertet werden sollte (analog zu einem einzelnen Stromprodukt), kann auf Bundesebene aus den nationalen Statistiken der Anteil eingespeisten Bioerdgases ermittelt werden. In regelmäßigen Abständen kann dann der Primärenergiefaktor von Erdgas gemäß

$$f_{P,Erdgas} = a_{Biomethan} \cdot f_{P,Biomethan} + (1 - a_{Biomethan}) \cdot f_{P,Erdgas} \qquad \text{(Gleichung 5-1)}$$

berechnet werden, wobei $a_{Biomethan}$ der energetische Anteil von Biomethan im bundesweiten Gasmix ist. Für $f_{p,Biomethan}$ kann dann 0,4 eingesetzt werden. Dadurch würde mittelfristig der „Erdgas"-Faktor absinken.

Für **Bioöle** wird ein PE-Faktor von 0,5 bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang zum Gebäude und bei Erzeugung gemäß Nachhaltigkeitszertifikat nach Biomassenachhaltigkeitsverordnung empfohlen. Damit entspricht der Wert den Anforderungen der geltenden EnEV.

Tabelle 5-2: Empfehlungen zu Primärenergiefaktoren für biogene Brennstoffe zur direkten Verfeuerung (eigene Darstellung nach IFEU 2010).

Primärenergiefaktoren	**nicht erneuerbarer Anteil**	**Anmerkung / Voraussetzung**
Biogene Brennstoffe		
Feste Biomasse		
Holzpellets	**0,2**	-
Hackschnitzel und andere feste Biomasse	**0,1**	-
Gasförmige Biomasse		
Biomethan	**0,4**	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude oder KWK-Nutzung
Biogas (unaufbereitet)	**0,2**	bei KWK-Nutzung
Flüssige Biomasse		
Bioöle	**0,5**	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude und Biomassenachhaltigkeitszertifizierung

Vereinfachungsmöglichkeiten: Feste Biomasse vereinheitlichen, Biomethan und Bioöle vereinheitlichen.

6 Nah- und Fernwärme aus biogenen Brennstoffen

6.1 Wärmenetz

Die Begriffe „Fernwärme“ als auch „Nahwärme“ sind nicht eindeutig definiert und voneinander getrennt. Der Bundesgerichtshof hat in einem Rechtsstreit „Fernwärme“ wie folgt definiert: *Wird aus einer nicht im Eigentum des Gebäudeeigentümers stehenden Heizungsanlage von einem Dritten nach unternehmenswirtschaftlichen Gesichtspunkten eigenständig Wärme produziert und an andere geliefert, so handelt es sich um Fernwärme. Auf die Nähe der Anlage zu dem versorgenden Gebäude oder das Vorhandensein eines größeren Leitungsnetzes kommt es nicht an.*

In der Praxis wird als „Nahwärme“ i.d.R. die Übertragung von Wärme zwischen räumlich zusammenliegenden Objekten beschrieben, wenn sie im Vergleich zur „Fernwärme“ nur über verhältnismäßig kurze Strecken erfolgt. Der Übergang zur Fernwärme mit größeren Leitungslängen ist fließend. Im Folgenden wird daher übergreifend der Begriff „Wärmenetze“ genutzt.

Wärmenetze sind Einrichtungen zur leitungsgebundenen Versorgung mit Wärme. Über ein Wärmenetz werden mehrere Verbraucher mit Wärme aus einer oder mehreren Wärmeerzeugungsanlagen versorgt.

Ein Wärmenetz besteht aus gut wärmegedämmten Leitungen, die heißes Wasser zu den Kunden transportieren (Vorlauf) und das dort abgekühlte Wasser über eine so genannte Rücklaufleitung wieder zurück zur Wärmeerzeugungsanlage leiten (Kreislauf).

Die gemeinsame Versorgung von Verbrauchern durch Vernetzung über ein Wärmenetz hat viele Vorteile. Nachteilig sind die thermischen Leitungsverluste im Wärmenetz.

Die Wärmeverteilverluste sind abhängig vom benötigten Temperaturniveau, dem Rohrdurchmesser, der jährlichen Betriebsdauer und der zum Einsatz kommenden Wärmedämmung. Spezifisch fallen diese Verluste umso stärker ins Gewicht, je weniger Wärme über eine bestimmte Leitungslänge bereitgestellt wird, also je niedriger die Wärmebedarfsdichte ist, die die durchschnittliche jährliche Wärmeabnahme zur Länge der Wärmetrasse ins Verhältnis setzt (MWh/m_{Trasse}).

Die trassenspezifischen Netzverluste von Wärmenetzen sind also in erster Linie abhängig von der Wärmebelegungsdichte. Bei einer guten Wärmebelegungsdichte von 1,5 MWh/m_{Trasse} liegen die Netzverluste bei rund 15%. Entgegen des Richtwertes in der FW309 Abschnitt 3.3 wurde daher der Nutzungsgrad des Wärmenetzes nicht mit 90 %, sondern mit 85 % bewertet.

Der Strombedarf für Transport und Verteilung des Wassers mit Hilfe von Pumpen stellt einen wesentlichen Energieverbrauch dar. Der von den Netzpumpen verbrauchte Strom wird im Rahmen dieser Studie als „Pumpstrom“ bezeichnet. Pumpenauslegung und Pumpenbetrieb bzw. -regelung sind an den tatsächlichen Bedarf anzupassen. Stand der Technik sind drehzahlgeregelte Netzpumpen. Der jährliche Pumpenstromaufwand beträgt ca. 0,5 – 1,0% der verteilten Wärmemenge (entsprechend 5 – 10 kWh_{el}/MWh_{th}), sofern Dimensionierung und Trassenlänge des Wärmenetzes im normalen Bereich liegen.

6.2 Holz-Heizkraftwerke

6.2.1 Technologie

Zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme aus holzartiger Biomasse kommen heute vorrangig zwei Techniken bzw. Arbeitsmaschinen zum Einsatz: Der klassische Dampfturbinen-Prozess oder der Organic Rankine Cycle (ORC-Prozess).

Ende 2009 waren in Deutschland 249 Biomasse-Heizkraftwerke in Betrieb, davon 74 ORC-Anlagen. Die gesamt installierte Leistung lag bei 1.211 MW_{el}, die durchschnittliche Anlagenleistung bei 4,9 MW_{el}. 79 Anlagen hatten eine Leistung von unter 1 MW_{el}. Bei der überwiegenden Mehrheit der Anlagen wird naturbelassenes Hackgut genutzt (Lenz et al. 2010).

Grundsätzlich arbeitet ein Biomasse-Heizkraftwerk mit Dampfturbine wie folgt: In einem speziell auf den Brennstoff abgestimmten Biomassekessel wird das Holzhackgut verbrannt. Die dabei freigesetzte Wärme wird zur Dampferzeugung genutzt. In einer Dampfturbine wird ein Teil der im Dampf enthaltenen Energie in mechanische Energie und letztendlich über einen angeflanschten Generator in elektrische Energie umgewandelt. Der so in der Anlage produzierte Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist und nach dem EEG vergütet.

Bei Biomasse-ORC-Heizkraftwerken wird die von der Biomassefeuerung erzeugte Wärme über einen Thermoölkreislauf an den Verdampfer im ORC-Modul übertragen und verdampft dort ein Silikonöl. Der Silikonöl-Dampf entspannt sich in der Turbine, die den Generator direkt antreibt. Die am Kondensator anfallende Wärme steht als Nutzwärme mit 80 bis 95°C zur Verfügung. Strom- und Wärmeabgabe sind starr miteinander gekoppelt; bei sinkendem Wärmebedarf muss entweder die Stromproduktion entsprechend verringert oder die Wärme über einen Kühler „vernichtet“ werden.

Bei Dampfturbinen werden entweder Entnahme-Kondensationsturbinen oder seltener Gegendruckturbinen eingesetzt. Im Entnahme-Kondensations-Heizkraftwerk entnimmt man einen Teil des Dampfes über eine regelbare Entnahme auf dem gewünschten Temperaturniveau (z.B. 130°C); der verbleibende Dampfanteil wird bis auf das Kondensationsniveau (z.B. 45°C) abgearbeitet und somit verstromt. Bei einem schwankenden Wärmebedarf kann also wahlweise mehr Strom oder mehr Wärme produziert werden. Beim Gegendruck-Heizkraftwerk wird der Dampf nur bis auf das gewünschte Nutztemperaturniveau (z.B. 90°C) abgearbeitet und am Ende der Turbine entnommen. Strom- und Wärmeabgabe sind hier wie bei der ORC-Turbine starr gekoppelt.

Als typische Vertreter für die Berechnung der Primärenergiefaktoren wurden ein Holz-Heizkraftwerk mit Entnahme-Kondensationsturbine und einer elektrischen Nennleistung von 2,5 MW_{el} sowie ein Holz-Heizkraftwerk mit Gegendruckturbine und einer Leistung von 1,3 MW_{el} bewertet. Als Brennstoff wurde naturbelassenes Hackgut zugrundegelegt. Der ermittelte Primärenergiefaktor des Gegendruck-Heizkraftwerkes ist infolge der identischen Fahrweise mit starrer Kopplung sowie der vergleichbaren Stromkennzahl auch für ORC-Heizkraftwerke nutzbar.

6.2.2 Versorgungsfall

Zur Berechnung der Primärenergiefaktoren wurden Zahlen aus konkreten Projekten herangezogen. Gegeben war ein Jahreswärmebedarf von 30 GWh/a $Q_{FW,j}$, der über ein ca. 20 km

langes Nahwärmenetz gedeckt werden soll. Im Auslegungspunkt wird das Nahwärmenetz mit einer Vorlauftemperatur 110°C versorgt; die Rücklauftemperatur liegt dann bei 70°C. Der Pumpstrom zur Druckhaltung und Umwälzung beziffert sich auf 0,5 GWh/a A_{HN}.

Bei einem unterstellten Nutzungsgrad des Wärmenetzes von 85 % muss das Biomasse-Heizkraftwerk nun 35,3 GWh/a Q_{Bne} in das Nahwärmenetz einspeisen.

In einem Biomasse-Heizkraftwerk ist neben dem Holzkessel auch ein Kessel für Spitzenlastzeiten und den Reservefall installiert, der überwiegend mit Heizöl HEL befeuert wird. Üblicherweise deckt der Holzkessel deutlich über 90% des Jahreswärmebedarfs; im Sinne einer konservativen Betrachtung wurde als Deckungsanteil 70% angesetzt.

Darüber hinaus wurde auch ein Betrachtungsfall mit 100% Deckungsanteil berechnet und ausgewiesen. Da der Primärenergiefaktor zwischen den beiden Betrachtungsfällen (70% und 100%) linear verläuft, kann über einen Dreisatz jeder beliebige Deckungsanteil abgebildet werden.

6.2.3 Holz-Heizkraftwerk mit ORC- bzw. Gegendruckturbine

Für Nachfolgend wurden die Berechnungen des Primärenergiefaktors nach drei verschiedenen Methoden durchgeführt:

a) Strom-Gutschriftmethode nach AGFW Arbeitsblatt FW 309-1 (Kapitel 4.2.2*)*
b) Modifiziertes Gutschriftverfahren (Kapitel 4.2.3)
c) Allokation nach Exergie (Kapitel 4.2.1)

a) Strom-Gutschriftmethode nach AGFW Arbeitsblatt FW 309-1

Die installierte Leistung der beispielhaft berechneten Anlage beträgt 1,3 MW_{el}. Die KWK-Bruttostromproduktion wurde mit 6,0 GWh/a berechnet; der Stromeigenbedarf des Heizkraftwerks beträgt 1,1 GWh/a. Nach Abzug des Stromeigenbedarfs ergibt sich sich die KWK-Nettostromproduktion $A_{Bne,KWK}$ (FW 308) zu 4,9 GWh/a.

Wie bereits ausgeführt, liegt der Jahreswärmebedarf bei 35,3 GWh/a. Mit einem vorgegebenen Deckungsanteil von 70% werden 24,7 GWh/a durch Holzhackgut bereitgestellt (Wärmearbeit KWK). Die KWK-Stromkennzahl errechnet sich zu 0,2, indem man die KWK-Nettostromproduktion durch die Wärmearbeit KWK teilt.

Der Netto-Nutzungsgrad der Stromproduktion liegt bei 13%, der der Wärmeerzeugung bei 66%. Damit summiert sich der Gesamt-Netto-Nutzungsgrad der KWK-Anlage auf 79%. Der Jahresbrennstoffbedarf $W_{Br,KWK}$ ergibt sich entsprechend zu 37,4 GWh/a.

Mit einem vorgegebenen Deckungsanteil von 30% werden 10,6 GWh/a durch den ölbefeuerten Spitzenlast-/Reservekessel bereitgestellt. Bei einem angesetzten Nutzungsgrad von 90% werden hierfür 11,8 GWh/a an HEL benötigt ($W_{Br,HEL}$).

Der Primärenergiefaktor der Wärmeversorgung $f_{P,FW}$ bestimmt sich bei Ansatz des in Kapitel 5.15 ermittelten $f_{P,Holz}$ von 0,1 zu 0,12.

Ab einem unterstellten Deckungsanteil der KWK-Wärme von 77% ergibt sich unter den Rahmenbedingung des angesetzten Praxisbeispiels ein Primärenergiefaktor $f_{P,FW}$ von „0“.

b) Modifiziertes Gutschriftverfahren

Unter den Autoren der Studie wurde, wie in Kapitel 4.2.3 diskutiert, ein modifiziertes Gutschriftverfahren diskutiert. Hierbei wird die von der KWK-Anlage gelieferte Wärmemenge entsprechend des Bilanzkreises nach AGFW FW-308 separat bilanziert, jedoch entgegen der FW 309 Abschnitt 3.2.2. bei negativen Werten zu null gesetzt.

Der Primärenergiefaktor des KWK-Anteils $f_{P,ext\ KWK}$ wird zu -0,44 errechnet, jedoch zu „0“ gesetzt. Der Primärenergiefaktor des Spitzenlast-/Reservekessels $f_{P,ext\ Res}$ errechnet sich zu 1,22. Der Primärenergiefaktor $f_{P,FW}$ der Wärmeversorgung bestimmt sich nun nach (Gleichung 4-7) zu 0,48.

c) Allokation nach Exergie

Ein dritter Ansatz mit wiederum abweichendem Ergebnis ergibt sich durch eine exergetische Bewertung nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Hierbei wird zuerst der Carnot-Faktor der Fernwärme bestimmt. Bei einer Vorlauftemperatur von 110°C (363 K) und einer Rücklauftemperatur von 70°C (283 K) errechnet sich ein Carnot-Faktor η_c von 0,20. (Für ORC-Anlagen aufgrund von Einbußen bei der Stromausbeute mit 110°C eigentlich zu hohe Vorlauftemperatur, gilt in diesem Fall daher nur für den Wasser-Dampfprozess).

Mit einem vorgegebenen Deckungsanteil von 70% werden 24,7 GWh/a aus der Turbine entnommen ($Q_{Bne,KWK}$). Über den Carnot-Faktor kann nun der Exergieanteil "$E_{KWK,HN}$" berechnet werden zu 5,0 GWh/a.

Bereits oben wurde der Jahresholzbedarf ausgewiesen mit 37,4 GWh/a $W_{Br,KWK}$ entsprechend einem Primärenergiebedarf von 3,7 GWh/a bei Ansatz eines $f_{P,Holz}$ von 0,1. Für den Stromanteil ergeben sich 1,8 GWh/a. Bezogen auf die KWK-Nettostromproduktion von 4,9 GWh/a errechnet sich der Primärenergiefaktor für den Biomasse-KWK-Strom zu 0,38. Auf den Wärmeanteil entfallen 1,9 GWh/a. Bezogen auf die Wärmearbeit aus der Turbine von 24,7 GWh/a errechnet sich der Primärenergiefaktor für die Biomasse-KWK-Wärme $f_{P,FW\ (KWK)}$ zu 0,08.

Mit dem vorgegebenen Deckungsanteil von 30% am Jahreswärmebedarf benötigt der Spitzenlast-/Reservekessel 11,8 GWh/a entsprechend einem Primärenergiebedarf von 12,9 GWh/a. Mit dem exergetisch errechneten Wärmeanteil von 1,9 GWh/a summiert sich der Input auf 14,8 GWh/a. Bezogen auf die in das Wärmenetz eingespeiste Wärme von 35,3 GWh/a Q_{Bne} errechnet sich nun der Primärenergiefaktor Wärme "frei Kraftwerk" zu 0,42.

Der Pumpstrom zur Druckhaltung und Umwälzung beziffert sich auf 0,5 GWh/a A_{HN}. Unter Berücksichtigung des Primärenergiefaktors für den Strommix ergibt sich ein Primärenergiebedarf von 1,3 GWh/a.

Summiert man abschließend die Energieeinträge aus Holz (1,9 GWh/a), HEL (12,9 GWh/a) und Pumpstrom (1,3 GWh/a) und bezieht den Summenwert auf den Jahreswärmebedarf von 30 GWh/a $Q_{FW,j}$, errechnet sich der Primärenergiefaktor $f_{P,FW}$ zu 0,54.

Vergleich der Berechnungsverfahren

Die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse der drei vorgestellten Berechnungsverfahren für das Beispiel eines Biomasse-Heizkraftwerks erfolgt in Tabelle 6-1. Der Primärenergiefaktor für die Fernwärme $f_{P,FW}$ ist nach dem Gutschriftverfahren gemäß AGFW-Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 mit 0,12 am geringsten. Für das im Rahmen dieses Gutachtens vorgestellte modifizierte Gutschriftverfahren ergibt sich ein Primärenergiefaktor von 0,48. Für das Allokationsverfahren resultiert ein Primärenergiefaktor von 0,54.

Wesentlicher Vorteil des modifizierten Gutschriftverfahrens ist, dass der erzeugte KWK-Strom $A_{Bne,KWK}$ nur von der Brennstoffwärme aus KWK abgezogen wird. Ergibt sich hieraus ein negativer Wert, wird er zu null gesetzt. Die Brennstoffwärme des Spitzenlastkessels (HEL) und der Pumpstrom für den Betrieb des Heiznetzes werden separat betrachtet und können nicht wie beim Gutschriftverfahren nach FW 309 Teil 1 durch den Abzug von KWK-Strom reduziert werden.

Die Angaben zu Energiemengen in Tabelle 6-1 (sowie den folgenden Tabellen zu KWK-Varianten) entsprechen einem Deckungsanteil der KWK-Wärme $Q_{Bne,KWK}$ an der gesamten Wärmeerzeugung Q_{Bne} von 70%. Die Primärenergiefaktoren sind sowohl für 70% als auch für 100% Deckungsanteil (letzte Zeile) angegeben.

Tabelle 6-1: Vergleich der Primärenergiefaktoren für das Gutschriftverfahren nach FW 309 Teil 1, das modifizierte Gutschriftverfahren und das Allokationsverfahren auf Exergiebasis (Biomasse Heizkraftwerk mit Gegendruckturbine)

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations-verfahren**	
$Q_{FW,j}$	30,00	GWh/a	30,00	GWh/a	30,00	GWh/a
Q_{Bne}	35,29	GWh/a	35,29	GWh/a	35,29	GWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	24,71	GWh/a	24,71	GWh/a	24,71	GWh/a
$W_{Br,KWK}$	37,43	GWh/a	37,43	GWh/a	37,43	GWh/a
$Q_{bne,HEL}$	10,59	GWh/a	10,59	GWh/a	10,59	GWh/a
$W_{Br,HEL}$	11,76	GWh/a	11,76	GWh/a	11,76	GWh/a
$f_{P,KWK}$	0,10	-	0,10	-	0,10	-
$f_{P,HEL}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	0,53	GWh/a	0,53	GWh/a	0,53	GWh/a
$A_{Bne,KWK}$	4,87	GWh/a	4,87	GWh/a	4,87	GWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdr}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	-0,44		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,00		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		1,90	GWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		12,94	GWh/a
PE Pumpstrom	-	-	1,38	GWh/a	0,20	GWh/a
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	**0,12**	**-**	**0,48**	**-**	**0,54**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	**0,00**	**-**	**0,05**	**-**	**0,14**	**-**

6.2.4 Holz-Heizkraftwerk mit Entnahme-Kondensationsturbine (2,5 MW_{el})

Mit analogen Rechenschritten wie in Kapitel 6.2.3 kann auch das Kraftwerk mit Entnahme-Kondensationsturbine bewertet werden. Dieses hat eine elektrische Nennleistung von 2,5 MW_{el} ($\eta_{el,Kond,brutto}$ 25,0%;$\eta_{el,KWK,brutto}$ 15,5%, $\eta_{el,KWK,netto}$ 13%) und eine thermische Leistung von 5,3 MW_{th} ($\eta_{th,KWK}$ 57,0%).

Tabelle 6-2: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem Biomasse/Holz Heizkraftwerk mit Entnahme –Kondensationsturbine (2,5 MW_{el})

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations-verfahren**	
$Q_{FW,j}$	30,00	GWh/a	30,00	GWh/a	30,00	GWh/a
Q_{Bne}	35,29	GWh/a	35,29	GWh/a	35,29	GWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	24,71	GWh/a	24,71	GWh/a	24,71	GWh/a
$W_{Br,KWK}$	43,34	GWh/a	43,34	GWh/a	43,34	GWh/a
$Q_{bne,HEL}$	10,59	GWh/a	10,59	GWh/a	10,59	GWh/a
$W_{Br,HEL}$	11,76	GWh/a	11,76	GWh/a	11,76	GWh/a
$f_{P,KWK}$	0,10	-	0,10	-	0,10	-
$f_{P,HEL}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	0,53	GWh/a	0,53	GWh/a	0,53	GWh/a
$A_{Bne,KWK}$	5,63	GWh/a	5,63	GWh/a	5,63	GWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdr}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	-0,63		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,00		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		2,04	GWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		12,94	GWh/a
PE Pumpstrom	-	-	1,38	GWh/a	0,22	GWh/a
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	**0,07**	**-**	**0,48**	**-**	**0,55**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	**0,00**	**-**	**0,05**	**-**	**0,14**	**-**

Es zeigt sich, dass durch die Nullsetzung der biogenen KWK-Einheit die PE-Faktoren im wesentlichen vom Anteil des Spitzenkessels sowie vom Wärmenetz/Pumpstrom bestimmt werden. Lediglich beim Gutschriftverfahren macht sich bemerkbar, dass die Anlage effizienter ist als die ORC-Turbine.

6.3 Holz-Heizwerke

Ein Holz-Heizwerk dient der zentralen Erzeugung von Heizwärme für die Beheizung und Warmwasserbereitung und/oder zur Erzeugung industriell-gewerblicher Prozesswärme. Die Wärme wird in der Regel über ein Wärmenetz zu den Verbrauchern geführt. Als Übertragungsmedium dienen Wasser oder Dampf, die in entsprechenden Kesseln erwärmt werden.

Ein Holz-Heizwerk setzt sich im allgemeinen aus folgenden Teilsystemen zusammen:

- Kesselanlage zur Wärmeerzeugung (Hackgut- und Spitzenlast-/Reservekessel)
- Brennstofflager mit automatischem Brennstoffaustrag
- Rauchgasreinigung
- Netzpumpe für das Wärmenetz

Die zentrale Komponente ist der automatisch betriebene Kessel zur Verbrennung von Holzhackschnitzeln aus unbehandeltem Restholz. Als mögliche Quellen für Hackschnitzel kommen Waldrestholz, Sägewerke, Industrie, sowie die Landschaftspflege in Frage. Ebenso können auch mechanisch behandelte Althölzer wie z.B. Obstkisten und Paletten eingesetzt werden. Die Brennstoffzufuhr aus dem Hackschnitzellager (Silo, Lagerhalle, Bunker) zum Kessel erfolgt automatisch mit Hilfe von Schubböden, Schnecken oder Kratzkettenförderung.

Hackgut-Kessel werden in einem Leistungsbereich von 30 kW bis 10 MW_{th} hergestellt. Die durch die Holzverbrennung erzeugte Wärme wird im Wärmetauscher des Kessels auf das Heizungswasser übertragen. Für die Abgasbehandlung zur Emissionsminderung ist der Einsatz verschiedener Aggregate möglich: Zyklon, Elektrofilter oder Gewebefilter.

Aufgrund der spezifisch höheren Kosten im Vergleich zu fossil befeuerten Kesseln und zur Gewährleistung eines gleichmäßigeren Betriebs wird der Holzkessel so ausgelegt, dass er nur 40 bis 50 % der maximalen Wärmeleistung deckt. Auf diese Weise liefert der Holzkessel 80 bis 90 % der jährlich benötigten Wärmeenergie. Für den hohen Leistungsbedarf während des Winters und als Ausfallreserve kommt meistens ein mit Öl betriebener Spitzenlastkessel zum Einsatz.

Seit 1992 fördert das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Holz-Heizwerke. Die Zahl der geförderten Anlagen lag 2009 bei 200. Die Betreiber geförderter Anlagen sind verpflichtet, über einen Zeitraum von bis zu zwölf Jahren jährlich über den Betrieb der Heizwerke zu berichten. Die Informationen werden in einer Datenbank erfasst und ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse aus dem Betriebsdatenvergleich sind nachfolgend aufgelistet (Carmen 2009):

- Leistung ~500 – 1.500 kW
- Holzenergieanteil ∅ 91%
- Jahresnutzungsgrad ∅ 80%
- Verteilungsverluste ∅ 15% (Inbetriebnahmejahr >2002)
- Hilfsenergiebedarf ∅ 2,08% der Wärmemenge für Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung
- Volllaststunden 4.000 h/a für HW >

(CARMEN 2004) empfiehlt den Ansatz von Richtwerten für Hilfsenergie mit 1-1,5% der erzeugten Wärmemenge für die Wärmeerzeugung und 0,5-1% für die Wärmeverteilung.

Auf Grundlage der umfangreichen Datengrundlage wurde“ ein typisches“ Heizwerk zur weiteren Betrachtung definiert. Angesetzt wurde ein Holzheizwerk mit 1,5 MW_{th}; Jahresnutzungsgrad 80 %, Hilfsenergiebedarf für Verteilung und Erzeugung zusammen 2,1 %, Deckungsanteil der Wärme aus Biomasse 90 %.

Die folgende Formel zur Bestimmung des Primärenergiefaktors $f_{P,FW}$ für ein Heizwerk ohne Koppelproduktion ist aus dem Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 (Formel 3) entnommen:

$$f_{P,FW} = \frac{\sum_i W_{Br,i} \cdot f_{P,Br,i} + \left(A_{BEig} + A_{HN}\right) \cdot f_{P,bez}}{\sum Q_{FW,j}} \qquad \text{(Gleichung 6-1)}$$

Aus den Praxiswerten errechnen sich die in Tabelle 6-3 dokumentierten Primärenergiefaktoren.

Tabelle 6-3: Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem Holz-Heizwerk (1,5 MW_{th})

Rechengröße (Werte für 90% Biomasse-Anteil)	**FW 309 - Teil 1 Formel 3**	
$Q_{FW,j}$	6,00	GWh/a
$Q_{bne,Holz}$	6,35	GWh/a
$W_{Br,Holz}$	7,94	GWh/a
$Q_{bne,HEL}$	0,71	GWh/a
$W_{Br,HEL}$	0,78	GWh/a
$f_{P,Holz}$	0,10	-
$f_{P,HEL}$	1,10	-
$A_{BEig} + A_{HN}$	0,14	GWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-
$f_{P,FW}$ (90% Holz)	**0,34**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% Holz)	**0,21**	**-**

6.4 Biogas

In einer Biogasanlage werden organische Stoffe unter Sauerstoffabschluss vergoren. Bakterien bauen die leicht abbaubaren Teile der organischen Substanz ab und setzen dabei Gas frei: das so genannte Biogas. Für die energetische Nutzung ist das Methan der wichtigste Bestandteil. Der Vergärungsprozess wird Fermentation genannt.

Der Behälter, in dem die Fermentation stattfindet, ist der Hauptbestandteil einer Biogasanlage. Es gibt Biogasanlagen, die aus mehreren Fermentern bestehen. Das Gas wird in der Regel in ein Blockheizkraftwerk (BHKW) geleitet, wo daraus Strom und Wärme erzeugt wird. Häufig wird ein Gasspeicher an den oder die Fermenter angeschlossen.

Es ist sehr wichtig, dass die Temperatur während des Prozesses gleichbleibend ist, damit der sensible biologische Prozess stabil ablaufen kann und nicht „umkippt“. Da im Gegensatz zur Kompostierung (die in Anwesenheit von Sauerstoff stattfindet) bei der Vergärung unter Sauerstoffabschluss zu wenig Wärme entsteht, muss der Fermenter mit einer Heizung versehen werden. Das Temperaturniveau bestimmt maßgeblich die Geschwindigkeit des Abbauprozesses.

Ein wichtiger Faktor für den wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage sind die Einsatzstoffe, die so genannten Substrate. In einer Biogasanlage können prinzipiell alle organischen Stoffe eingesetzt werden. Von besonderer Bedeutung sind hier die landwirtschaftlichen Stoffe z.B. Gülle, Festmist, Reststoffe aus der Pflanzenproduktion und nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) wie Mais.

Nach dem Fermentationsprozess bleibt neben dem Biogas ein so genannter Gärrest zurück. Er kann – genau wie Gülle – als organischer Dünger verwendet werden.

6.4.1 Biogas-BHKW (Gülle, 100 kW_{el})

Berechnet wird eine Biogas-Anlage auf Güllebasis mit einer elektrischen Leistung von 100 kW. Der Eigenbedarf an der Wärmeerzeugung des Biogas-BHKW für die Fermenterbeheizung wird mit einem Anteil von 30% angesetzt (IFEU 2008). Der elektrische Nutzungsgrad beträgt $\eta_{el,brutto}$ 33,0 % bzw. $\eta_{el,netto}$ 31,4%. Die thermische Leistung liegt bei 155 kW (η_{th} 51,0% vor Abzug des Eigenbedarfs). Die exergetische Allokation erfolgt mit Systemtemperaturen eines Nahwärmenetzes mit 90/70°C. Es ergeben sich die Primärenergiefaktoren gemäß Tabelle 6-4.

Tabelle 6-4: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (100 kWel) mit Biogas aus Gülle

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations-verfahren**	
$Q_{FW,j}$	1,10	GWh/a	1,10	GWh/a	1,10	GWh/a
Q_{Bne}	1,30	GWh/a	1,30	GWh/a	1,30	GWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	0,91	GWh/a	0,91	GWh/a	0,91	GWh/a
$W_{Br,KWK}$	1,78	GWh/a	1,78	GWh/a	1,78	GWh/a
$Q_{bne,HEL}$	0,39	GWh/a	0,39	GWh/a	0,39	GWh/a
$W_{Br,HEL}$	0,43	GWh/a	0,43	GWh/a	0,43	GWh/a
$f_{P,KWK}$	0,15	-	0,15	-	0,15	-
$f_{P,HEL}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	0,02	GWh/a	0,02	GWh/a	0,02	GWh/a
$A_{Bne,KWK}$	0,56	GWh/a	0,56	GWh/a	0,56	GWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdr}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	-1,45		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,00		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		0,06	GWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		0,48	GWh/a
PE Pumpstrom	-	-	0,05	GWh/a	0,01	GWh/a
$f_{P,FW}$ (70 % KWK)	**0,00**	**-**	**0,48**	**-**	**0,53**	**-**
$f_{P,FW}$ (100 % KWK)	**0,00**	**-**	**0,05**	**-**	**0,13**	**-**

6.4.2 Biogas-BHKW (Mais, 500 kW_{el})

Für ein mit Mais betriebenes Biogas-BHKW wird ein Eigenbedarf mit einem Anteil von 20% (IFEU 2008) angesetzt. Es wird ein größeres BHKW bilanziert mit 500 kW elektrischer Nennleistung ($\eta_{el,brutto}$ 38,0%; $\eta_{el,netto}$ 36,1%) und 566 kW thermischer Leistung (η_{th} 43,0%; vor Abzug Eigenbedarf).

Tabelle 6-5: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (500 kW_{el}) mit Biogas aus Mais

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations verfahren**	
$Q_{FW,j}$	4,62	GWh/a	4,62	GWh/a	4,62	GWh/a
Q_{Bne}	5,43	GWh/a	5,43	GWh/a	5,43	GWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	3,80	GWh/a	3,80	GWh/a	3,80	GWh/a
$W_{Br,KWK}$	8,84	GWh/a	8,84	GWh/a	8,84	GWh/a
$Q_{bne,HEL}$	1,63	GWh/a	1,63	GWh/a	1,63	GWh/a
$W_{Br,HEL}$	1,81	GWh/a	1,81	GWh/a	1,81	GWh/a
$f_{P,KWK}$	0,19	-	0,19	-	0,19	-
$f_{P,HEL}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	0,08	GWh/a	0,08	GWh/a	0,08	GWh/a
$A_{Bne,KWK}$	3,19	GWh/a	3,19	GWh/a	3,19	GWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdr}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	-2,05		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,00		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		0,30	GWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		1,99	GWh/a
PE Pumpstrom	-	-	0,21	GWh/a	0,04	GWh/a
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	**0,00**	**-**	**0,48**	**-**	**0,54**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	**0,00**	**-**	**0,05**	**-**	**0,14**	**-**

6.5 Pflanzenöl

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) ist eine modular aufgebaute Anlage zur Erzeugung von elektrischem Strom und Wärme, die vorzugsweise am Ort des Wärmeverbrauchs betrieben wird, bzw. Nutzwärme in ein Nahwärmenetz einspeist. Sie setzt dazu das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung ein. Die Wärmeauskopplung erfolgt über Kühlwasser- und Abgaswärmetauscher wodurch eine Vorlauftemperatur von maximal 90°C bereitgestellt werden kann.

In Pflanzenöl-Blockheizkraftwerken (PÖL-BHKW) werden Diesel-Motoren eingesetzt, die für den Einsatz von Pflanzenöl umgerüstet wurden. Vor allem das Brennstoffmanagement von der Lagerung bis zur Einspritzung in den Zylinder aber auch der Brennraum selbst muss dabei genau auf die veränderten Anforderungen angepasst werden. Zur Abgasbehandlung sind Russfilter erforderlich.

Pflanzenöl wird typischerweise in kleineren Anlagen umgesetzt. Betrachtet werden ein dezentrales BHKW mit 5 kW und ein größeres BHKW mit 100 kW elektrischer Leistung. Nachdem mit der Novellierung des Erneuerbaren Energien Gesetzes 2009 neue Pflanzenöl-Blockheizkraftwerke nur noch bis zu einer elektrischen Nennleistung von 150 kW in den Genuss des Bonus für Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo-Bonus) kommen, dürften größere Neu-Anlagen künftig auf dem Wärmemarkt kaum mehr eine Rolle spielen

6.5.1 Pflanzenöl-BHKW (Rapsöl, 5 kW_{el})

Angenommen wird ein marktypisches Gerät mit 5 kW elektrischer Nennleistung ($\eta_{el,brutto}$ 30,0%; $\eta_{el,netto}$ 28,5%) und 10 kW thermische Leistung (η_{th} 60,0%). Es besteht kein Eigenbedarf an Wärme.

Tabelle 6-6: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (5 kW_{el}) mit Rapsöl

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations-verfahren**	
$Q_{FW,j}$	91,07	MWh/a	91,07	MWh/a	91,07	MWh/a
Q_{Bne}	107,14	MWh/a	107,14	MWh/a	107,14	MWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	75,00	MWh/a	75,00	MWh/a	75,00	MWh/a
$W_{Br,KWK}$	125,00	MWh/a	125,00	MWh/a	125,00	MWh/a
$Q_{bne,HEL}$	32,14	MWh/a	32,14	MWh/a	32,14	MWh/a
$W_{Br,HEL}$	35,71	MWh/a	35,71	MWh/a	35,71	MWh/a
$f_{P,KWK}$	0,33	-	0,33	-	0,33	-
$f_{P,HEL}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	1,61	MWh/a	1,61	MWh/a	1,61	MWh/a
$A_{Bne,KWK}$	35,63	MWh/a	35,63	MWh/a	35,63	MWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdr}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	-0,87		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,00		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		11,48	MWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		39,29	MWh/a
PE Pumpstrom	-	-	4,18	MWh/a	1,35	MWh/a
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	**0,00**	**-**	**0,48**	**-**	**0,60**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	**0,00**	**-**	**0,05**	**-**	**0,23**	**-**

6.5.2 Pflanzenöl-BHKW (Palmöl, 100 kW_{el})

Das größere BHKW hat eine Leistung von 100 kW_{el} ($\eta_{el,brutto}$ 40,0%; $\eta_{el,netto}$ 38,0%) und 112,5 kW_{th} (η_{th} 45,0%). Es wird ein Eigenbedarf von 10 % der produzierten Wärme zur Beheizung von Öltank und –leitungen angesetzt.

Tabelle 6-7: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (100 kW_{el}) mit Palmöl

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations-verfahren**	
Q_{FW}	0,92	GWh/a	0,92	GWh/a	0,92	GWh/a
Q_{Bne}	1,08	GWh/a	1,08	GWh/a	1,08	GWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	0,76	GWh/a	0,76	GWh/a	0,76	GWh/a
$W_{Br,KWK}$	1,69	GWh/a	1,69	GWh/a	1,69	GWh/a
$Q_{bne,HEL}$	0,33	GWh/a	0,33	GWh/a	0,33	GWh/a
$W_{Br,HEL}$	0,36	GWh/a	0,36	GWh/a	0,36	GWh/a
$f_{P,KWK}$	0,21	-	0,21	-	0,21	-
$f_{P,HEL}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	0,02	GWh/a	0,02	GWh/a	0,02	GWh/a
$A_{Bne,KWK}$	0,64	GWh/a	0,64	GWh/a	0,64	GWh/a
$f_{P,el}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdrängt}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	-2,07		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,00		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		0,06	GWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		0,40	GWh/a
PE Pumpstrom	-	-	0,04	GWh/a	0,01	GWh/a
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	**0,00**	**-**	**0,48**	**-**	**0,54**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	**0,00**	**-**	**0,05**	**-**	**0,14**	**-**

6.6 Nah- und Fernwärme mit Erdgas-BHKW

Um einen Vergleich der Ergebnisse für KWK-Anlagen mit fossilen Brennstoffen mit den unterschiedlichlichen Kuppelprodukt-Bewertungsmethoden herstellen zu können, wurden für zwei Erdgas BHKW die vorgestellten Berechnungsverfahren durchgeführt.

6.6.1 „Mini-BHKW“

Betrachtet wurde ein Senertec Dachs 5,5 kW_{el} (η_{el} 26,8%), 12,5 kW_{th} (η_{th} 61,0%), 20,5 kW Brennstoffleistung, Gesamtnutzungsgrad nach Herstellerangabe 87,8%. Für die Exergie-Allokation wurde ein Wärmenetz mit den Systemtemperaturen 80/60°C angenommen.

Die Differenz des PE-Faktors der Fernwärme tritt aufgrund der Bilanzierung mit dem Verdrängungsmixfaktor 3,0 in der AGFW- FW-309 und der Kombination aus dem Verdrängungsmixfaktor für den KWK-Anteil und dem Bezugsmixfaktor 2,6 für den Pumpstrom des Fern-/Nahwärmenetzes im modifiziertem Gutschriftverfahren auf.

Tabelle 6-8: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (5 kW_{el}) mit Erdgas

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations verfahren**	
$Q_{FW,j}$	100,00	MWh/a	100,00	MWh/a	100,00	MWh/a
Q_{Bne}	117,65	MWh/a	117,65	MWh/a	117,65	MWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	82,36	MWh/a	82,36	MWh/a	82,36	MWh/a
$W_{Br,KWK}$	135,01	MWh/a	135,01	MWh/a	135,01	MWh/a
$Q_{bne,Erdgas\ (Spitzenlast)}$	35,30	MWh/a	35,30	MWh/a	35,30	MWh/a
$W_{Br,Erdgas\ (Spitzenlast)}$	39,22	MWh/a	39,22	MWh/a	39,22	MWh/a
$f_{P,KWK}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
$f_{P,Erdgas\ (Spitzenlast)}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	1,76	MWh/a	1,76	MWh/a	1,76	MWh/a
$A_{Bne,KWK}$	34,43	MWh/a	34,43	MWh/a	34,43	MWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdr}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	0,55		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,55		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		40,69	MWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		43,14	MWh/a
PE Pumpstrom	-	-	4,59	MWh/a	5,53	MWh/a
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	**0,94**	**-**	**0,93**	**-**	**0,88**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	**0,70**	**-**	**0,69**	**-**	**0,63**	**-**

6.6.2 Erdgas-BHKW (250 kW_{el})

Für ein größeres Erdgas-BHKW (250 kW_{el} (η_{el} 36,5%), 356 kW_{th} (η_{th} 52,0%), 684 kW Brennstoffleistung, Gesamtnutzungsgrad 88,5% (brutto)), dessen technische Daten etwa dem Mittelwert der Erdgas-BHKW im Leistungsbereich zwischen 100 und 500 kW_{el} entsprechen (ASUE 2005) ergeben sich die in Tabelle 6-9 dokumentierten Primärenergiefaktoren für ein Wärmenetz mit 80/60°C.

Tabelle 6-9: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme aus einem BHKW (250 kW_{el}) mit Erdgas

Rechengröße (Werte für 70% KWK-Anteil)	**Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)**		**Modif. Gutschrift-verfahren**		**Allokations verfahren**	
$Q_{FW,j}$	3,00	GWh/a	3,00	GWh/a	3,00	GWh/a
Q_{Bne}	3,53	GWh/a	3,53	GWh/a	3,53	GWh/a
$Q_{Bne,KWK}$	2,47	GWh/a	2,47	GWh/a	2,47	GWh/a
$W_{Br,KWK}$	4,75	GWh/a	4,75	GWh/a	4,75	GWh/a
$Q_{bne,Erdgas\ (Spitzenlast)}$	1,06	GWh/a	1,06	GWh/a	1,06	GWh/a
$W_{Br,Erdgas\ (Spitzenlast)}$	1,18	GWh/a	1,18	GWh/a	1,18	GWh/a
$f_{P,KWK}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
$f_{P,Erdgas\ (Spitzenlast)}$	1,10	-	1,10	-	1,10	-
A_{HN}	0,05	GWh/a	0,05	GWh/a	0,05	GWh/a
$A_{Bne,KWK}$	1,65	GWh/a	1,65	GWh/a	1,65	GWh/a
$f_{P,bez}$	2,60	-	2,60	-	2,60	-
$f_{P,verdr}$	3,00	-	3,00	-	3,00	-
$f_{P,ext\ KWK}$	-	-	0,11		-	-
$f_{P,ext\ KWK,\ gew}$	-	-	0,11		-	-
$f_{P,ext\ Res}$	-	-	1,22		-	-
PE Br KWK, Wärme	-	-	-		999,42	GWh/a
PE Br HEL, Wärme	-	-	-		1294,12	GWh/a
PE Pumpstrom	-	-	0,14	GWh/a	135,73	GWh/a
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	**0,58**	**-**	**0,57**	**-**	**0,81**	**-**
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	**0,19**	**-**	**0,18**	**-**	**0,52**	**-**

Das Gutschriftverfahren nach FW 309-1 führt erst ab einem elektrischen Nettowirkungsgrad von 37% zu einem negativen Primärenergiefaktor für den Teilbilanzkreis der KWK-Anlage mit fossilen Brennstoffen. Somit unterscheiden sich die Faktoren der betrachteten Erdgas-BHKW im Verfahren nach FW 309-1 und dem modifizierten Gutschriftverfahren nur geringfügig. Der bisherige Faktor für fossile KWK kann weiter verwendet werden.

6.7 Zusammenfassung und Empfehlung

In der Zusammenschau der PE-Faktoren (Tabelle 6-10) zeigt sich, dass für den Fall einer 100%igen Deckung der Wärme aus der KWK-Anlage der PE-Faktor sehr gering ist und nur geringfügig zwischen den Verfahren variiert. Im Gutschriftverfahren kommt kein Biomasse-Heizkraftwerk über 0 bei einem KWK-Anteil von 100 %. Bei 70 % KWK-Anteil liegen die Werte für dieses Verfahren nur geringfügig über 0.

Dabei wird der nicht unbeträchtliche Spitzenkesselanteil durch die Stromgutschrift verdeckt. Anders ist dies im modifizierten Gutschriftverfahren. Hier liegen alle KWK-Anlagen geringfügig über 0 (100 % KWK-Anteil) und steigen auf 0,48 bei einem 30 % Anteil des fossilen Kessels. Dieser Wert setzt sich zusammen aus dem eingespeisten Wärmeanteil, den Netzverlusten und dem Pumpstrombedarf.

Die **Vorteile** des modifizierten Gutschriftsystems lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es erfolgt analog zur gängigen Ökobilanzmethodik eine kausal adäquate Zuordnung von Aufwendungen für die Wärmebereitstellung (Pumpstrom, fossiler Spitzenkessel) zum Produkt Wärme.
- Es gibt einen Anreiz zur Minimierung des fossilen Spitzenkesselanteils und zur Optimierung der Effizienz des Gesamtsystems (Netzverluste, Pumpstrom). Es ist schwer vermittelbar, dass beispielsweise ein Nahwärmenetz mit einem fossilen Spitzenkesselanteil von 30 % keinen fossilen Primärenergiebedarf aufweist, weil eine nebenstehende KWK-Einheit Primärenergie einspart.

Nachteilig an dem Verfahren ist, dass es

- keinen Anreiz bietet, den Stromwirkungsgrad zu steigern. Allerdings ist dies m. E. auch dem jetzigen Gutschriftverfahren nicht der Fall, da bereits ab sehr niedrigen elektrischen Nutzungsgraden die Bilanz negativ wird und erst ab sehr hohen ungekoppelten Wärmeanteilen fP in den Bereich positiver Werte kommt.

Es wird darauf hingewiesen, dass **bei fossilen Anlagen** zwischen dem modifizierten Verfahren und dem AGFW-Gutschriftverfahren kein Unterschied besteht, da auf Grund des fossilen Brennstoffbedarfs eh keine Nullsetzung erfolgt.

Es wird auch argumentiert, dass es zu einem Fehlanreiz kommen kann, erneuerbare Brennstoffe nur solange in KWK-Einheiten einzusetzen, bis das KWK-Teilergebnis Null erreicht. Dieses Argument teilen die Gutachter nicht. Zum einen wird die KWK-Einheit bei Vergütung nach dem EEG sowieso mit dem Ziel eines optimalen Betriebs mit erneuerbaren Brennstoffen betrieben. Für diese Anlagen erfolgt nach §16 EEG (auch im novellierten Referenten-Entwurf) eine Vergütung nur bei ausschließlichem Einsatz von erneuerbaren Brennstoffen. Ziel einer wirtschaftlichen Anlagenplanung sollte es daher sowieso sein, den fossilen Spitzenkesselanteil überwiegend durch eine Optimierung des KWK-Anteils und nicht durch einen Brennstoffersatz im fossilen Kessel zu erzielen.

Im übrigen ist es für die Primärenergie- und CO_2-Bilanz letztendlich egal, ob fossiler Brennstoff in einem Spitzenkessel durch Biomasse ersetzt wird und dafür in der KWK-Einheit fossil zugefeuert würde oder ob die Biomasse komplett in der KWK-Anlage verfeuert wird und dafür im Spitzenkessel fossil zugefeuert wird. Zudem ist es ja nicht so, dass der Anlagenbetreiber nur die Möglichkeit hätte, eine fest definierte Menge an erneuerbaren Brennstoffen einzusetzen. In der Realität könnte er sowohl die KWK-Anlage wie auch den Spitzenkessel mit erneuerbaren Brennstoffen befeuern.

Im exergetischen Verfahren liegen die Werte jeweils etwas höher als für das modifizierte Gutschriftverfahren.

Insgesamt schlagen wir basierend auf dieser Analyse folgende Vorgehensweise vor:

KWK:

- Biomasse-KWK-Anlagen sollten mit dem modifizierten Gutschriftverfahren gerechnet werden.
- In der EnEV-Tabelle sollten die Werte für Wärme mit 70 und 100 % KWK-Anteil angegeben werden. Damit kann mittels Dreisatz für alle anderen Anteile der sich ergebende PE-Faktor errechnet werden.
- Für alle Anlagen wird für 100 % Anteil der Wert 0,0 und für 70 % der Wert 0,5 vorgeschlagen.
- Sollte entschieden werden, dass das modifizierte Gutschriftverfahren nicht angewendet wird, so wird für 100 % Anteil der Wert 0,0 und für 70 % der Wert 0,2 vorgeschla-

gen. Dies stellt einen Kompromiss dar zwischen der angemessenen Bewertung der KWK-Wirkung nach AGFW-Verfahren und einem Anreiz, den Anteil des fossilen Spitzenkessels zu reduzieren.

Tabelle 6-10: Vergleich der Primärenergiefaktoren für Nah-/Fernwärme mit biogenen Brennstoffen

$f_{P,FW}$ Faktoren (Nah-, Fernwärme)	Gutschriftverf. (FW 309 - Teil 1)	Modif. Gutschrift-verfahren	Allokations-verfahren
Biomasse Heizkraftwerk (Holz) GD 1,3 MW_{el}			
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	0,12	0,48	0,54
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	0,00	0,05	0,14
Biomasse Heizkraftwerk (Holz) EK 2,5 MW_{el}			
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	0,07	0,48	0,55
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	0,00	0,05	0,14
Biomasse Heizwerk (Holz) 1,5 MW_{th}			
$f_{P,FW}$ (90% Biomasse-Wärme)	0,34	--	--
$f_{P,FW}$ (100% Biomasse-Wärme)	0,21	--	--
Biogas-BHKW (Gülle, 100 kW_{el})			
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	0,00	0,48	0,53
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	0,00	0,05	0,13
Biogas-BHKW (Mais, 500 kWel)			
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	0,00	0,48	0,54
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	0,00	0,05	0,14
Pflanzenöl-BHKW (Rapsöl, 5 kW_{el})			
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	0,00	0,48	0,60
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	0,00	0,05	0,23
Pflanzenöl-BHKW (Palmöl, 100 kWel)			
$f_{P,FW}$ (70% KWK)	0,00	0,48	0,54
$f_{P,FW}$ (100% KWK)	0,00	0,05	0,14

Heizwerke:

- Für Heizwerke wird 0,2 (100 % Biomasseanteil) bzw. 0,6 (70 % Biomasseanteil) vorgeschlagen.

Die sich ergebende Tabelle ist in Kapitel 10 dargestellt.

7 Industrielle und gewerbliche Abwärme

Bei der Abwärmenutzung wird im Gegensatz zur Wärmerückgewinnung, bei der die Abwärme an den gleichen Prozess zurückgeführt wird, die bei einem Prozess anfallende Abwärme an andere Prozesse weitergeleitet.

Abwärme wird in dem am 1. Januar 2009 in Kraft getretenen Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) als Wärme definiert, „die aus technischen Prozessen, und baulichen Anlagen stammenden Abluft- und Abwasserströmen entnommen wird." Laut § 7 Ersatzmaßnahmen des EEWärmeG gilt die Pflicht nach § 3 Abs. 1 als erfüllt, wenn der Wärmeenergiebedarf zu mindestens 50 Prozent aus Anlagen zur Nutzung von Abwärme gedeckt wird. In der Anlage zu diesem Gesetz werden unter IV. 2.b) Anforderungen an die Abwärme bzw. Wärmerückgewinnung von Raumlufttechnischen Anlagen dahingehend formuliert, dass „die Leistungszahl, die aus dem Verhältnis von der aus der Wärmerückgewinnung stammenden und genutzten Wärme zum Stromeinsatz für den Betrieb der raumlufttechnischen Anlage ermittelt wird, mindestens 10 betragen" muss.

Die Erschließung und Nutzung von Wärme aus Abwärme ist ein wichtiger Faktor bei der Reduzierung von Treibhausgasen. Dabei sollten den Planern Pauschalwerte angeboten wer-

den, die einerseits die einfache Zuordnung des individuellen Anwendungsfalles ermöglichen, andererseits aber auch eine sachgerechte Bewertung des primärenergetischen Aufwandes abbilden.

Die Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz hat in den Auslegungsfragen zur Energieeinsparverordnung – Teil 11 für Wärmenetze, die „deutlich überwiegend durch Abwärme aus industriellen Produktionsprozessen gespeist werden“ empfohlen, den Primärenergiefaktor zu verwenden, der „für Nah- und Fernwärme angegeben ist, die zu 100 % aus Kraft-Wärme-Kopplung mit fossilen Energieträgern stammt“. (Anmerkung der Verfasser: nach DIN SPEC 4701-10/A1:2009-10 Tabelle C.4.1 Index „^{b}“ gilt der Wert für „durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %.“)

Da dieser Primärenergiefaktor grundsätzlich aus der Endenergiebilanz des Fernwärme-Versorgungssystems bis zur Primärseite der Fernwärme-Hausstation berechnet wird, ist er für die Bewertung gewerblicher Abwärme z.B. aus den Kälteanlagen eines sich im Wohnhaus befindlichen Supermarktes nur bedingt geeignet. Im Default- oder Pauschalfaktor für Fernwärme aus KWK mit 0,7 (DIN V 4701-10:2003-08, geändert durch A1:2006-12, Spalte B der Tabelle C.4-1 in der geänderten Norm) sind nach dem Berechnungsverfahren der AGFW-FW 309 die Wärmenetzverluste mit mindestens 10 % sowie der Pumpstrom für das Wärmenetz in Höhe von 1,5 % der übertragenen Wärmemenge sowie die Erzeugung von 30 % mit fossil befeuerten Kesseln bereits berücksichtigt.

Die AGFW FW 309 stellt unter 4.5. fest, dass der prozessbedingte Anteil der Abwärmemenge, der „bei Nichtnutzung durch Fernwärme über Kühlvorrichtungen an die Umgebung abgeführt werden müsste“ mit dem Primärenergiefaktor „0“ zu bewerten ist und ergänzt: „Wenn der fernwärmebedingte Primärenergieaufwand nicht bekannt ist, ist die industrielle Abwärme wie eine externe Wärmelieferung mit dem Primärenergiefaktor 0,4 zu bewerten.“

Mit dem Primärenergiefaktor 0,4 hat der AGFW für Abwärme somit bereits einen Pauschalfaktor empfohlen, der mit der Empfehlung der Fachkommission im Einklang steht, jedoch den Aufwand für Netzverluste und Pumpstrom eines Wärmenetzes noch nicht beinhaltet.

Um Primärenergiefaktoren für Abwärme einer differenzierenden Betrachtung unterziehen zu können, muss zwischen verschiedenen Typen der Abwärmeauskopplung unterschieden werden:

a. Der Produktionsprozess wird durch die Wärmeauskopplung mit einem zusätzlichen Primärenergieaufwand belastet. Dieser Effekt kann beispielsweise bei Kältekreisläufen auftreten, die aufgrund der Anforderungen zur Wärmenutzung mit einer höheren Kondensationstemperatur betrieben werden (siehe Kapitel 7.1).
b. Die Effizienz des Produktionsprozesses wird durch die Abwärmenutzung nicht bzw. nicht wesentlich beeinflusst, z.B. bei der Wärmerückgewinnung aus Rauchgasen, sofern die Druckdifferenz an den Einbauten durch den vorhandenen Druck aus dem Brennraum oder durch Thermik (z.B. Kaminzug in Kapitel 7.2) überwunden werden kann.
c. Durch die Abwärmenutzung wird Primärenergieaufwand auf der Prozessseite vermieden bzw. reduziert wie beispielsweise bei der Nutzung von Kühlwasser, das anderweitig über Kühleinrichtungen angeführt werden müsste (siehe Kapitel 7.3)

7.1 Abwärme gewerblicher Kälteanlagen

„Als Alternative zur ungenutzten Wärmeabgabe an die Umgebung kann auch die vollständige Einkopplung der Kondensationswärme zur Vorerwärmung des Brauchwassers erwogen werden. Allerdings dürfte das zu erreichende Temperaturniveau je nach Höhe der Verflüssigungstemperatur nur zwischen 25 und 35°C liegen.“ (EnergieAgentur NRW 2010).

„Die Verflüssigungstemperatur von NH_3-Kälteanlagen bewegt sich unter tschechischen klimatischen Bedingungen im Bereich von 25°C im Winter bis 35°C bei Verdunstungsverflüssigern, bzw. von 42 bis 45°C bei trockenen luftgekühlten Verflüssigern im Sommer. Mit einer ausreichenden Genauigkeit kann die durchschnittliche jährliche Verflüssigungstemperatur der Kälteanlage mit 30°C angenommen werden.“ (Petrák 2004)

Die vorangestellten Zitate stellen den wesentlichen, die Effizienz bestimmenden Parameter der Abwärmenutzung aus Kälteanlagen, die Kondensationstemperatur des Kältemittels in den Vordergrund. Damit wird auch die Problematik der Vorgabe eines Primärenergiefaktors für diese Abwärme deutlich, da bei Gewerbekühlanlagen eine Umstellung von der ursprünglich in der Regel von den klimatischen Bedingungen beeinflussten Kondensationstemperatur auf eine wassergekühlte Kondensation vorgenommen werden muss. Somit wird die Effizienz des Primärprozesses, veranschaulicht durch den COP (coefficient of performance) der Kälteanlage, unmittelbar von der Mitteltemperatur der Wärmeabfuhr, also der Abwärmenutzung beeinflusst. In Abhängigkeit vom Kältemittel, dem Verdichter, der Kondensations- und auch der Verdampfungstemperatur also dem Temperaturniveau der Nutzkälte fällt ein Teil der Abwärme, zwischen ca. 10 und über 20 %, als sensible Enthitzungswärme bei höheren Temperaturen an. Mit dieser Wärme aus dem Heißgas kann das Temperaturniveau der Abwärme über die Kondensationstemperatur hinaus erhöht werden.

Zur Bewertung der Energie, die zusätzlich in den Kälteprozess eingebracht werden muss, um durch die Erhöhung der Kondensationstemperatur eine Wärmenutzung erst zu ermöglichen, dient die mit der Leistungszahl einer Wärmepumpe vergleichbare Kennzahl ε_H (Petrák 2004) als Quotient aus der genutzten Wärmemenge und der Zunahme der Antriebsenergie.

$$\varepsilon_H = \frac{\Delta Q_H}{\Delta W}$$

(Gleichung 7-1)

Die Antriebsenergie, also in der Praxis der Stromaufwand am Verdichter und die Abwärme aus der Überhitzung und Kondensation des Kältemittels können über die Carnot`sche Leistungszahl ε_{CK} und den Gütegrad η_{CK} der Kältemaschine ermittelt werden.

$$\varepsilon_{CK} = \frac{T_0}{T_0 - T_C}$$

(Gleichung 7-2)

mit T_0 = Verdampfungstemperatur [K] und T_C = Kondensationstemperatur [K]

Der Gütegrad η_{CK} der Kältemaschine gibt das Verhältnis der realen Leistungszahl zur Carnot`schen Leistungszahl an und liegt bei kleineren Gewerbekältemaschinen zur Tiefkälteerzeugung (z.B. Tiefkühlzellen von Bäckereien) unter 0,5.

$$\eta_{CK} = \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_{CK}}$$

(Gleichung 7-3)

Geht man nun von einer, zur Nutzung der Abwärme erforderlichen Anhebung der Kondensationstemperatur von 30°C im Jahresmittel auf 40°C aus, so ergibt sich bei einer Tiefkühlzelle mit einer Verdampfungstemperatur von -25°C eine Reduzierung der realen Leistungszahl (auch COP) von 2,03 auf 1,64, wobei eine Verminderung des Gütegrades von 0,45 auf 0,43 angesetzt wird. Die Veränderung des Gütegrades wird aus der Differenz der Quotienten aus der abgeführten Wärmemenge Q0,x (Nutzen, „Kälteleistung“) und der zugeführten mechanischen Leistung Px mit der jeweiligen Kondensationstemperatur berechnet.

$$\Delta\varepsilon_K = \frac{Q_{0;1}}{P_1} - \frac{Q_{0;2}}{P_2}$$

(Gleichung 7-4)

Bilanziert man diesen Mehraufwand von etwa 24% Verdichterarbeit zu Lasten der Abwärmenutzung, die damit erst ermöglicht wurde, so ergibt sich für diese Wärmemenge ein Aufwand von 7,2 kWh Strom/100 kWh Wärme bzw. gerundet 19 kWh Primärenergie/100 kWh Wärme. Mit Berücksichtigung des Pumpstroms zwischen Wärmetauscher und Pufferspeicher ergibt sich ein ***f_P* für den Abwärmeanteil von 0,20**.

Würde man nun ein Wärmenetz nach AGFW FW 309-1 mit einem 70%igen Abwärmeanteil $f_{P,Abw}$ von 0,20 bewerten, so würde sich unter Berücksichtigung von Netzverlust und Pumpstrom ein $f_{P,FW}$ von 0,61 ergeben.

Es wird vorgeschlagen, einen Pauschalwert von **0,20** für ***f_P*** anzusetzen, sofern die Nutztemperatur (Wärmetauscher-Austritt) 50°C nicht überschreitet. Soll eine Wärmeauskopplung auf einem höheren Temperaturniveau vorgesehen werden, so ist ein rechnerischer Nachweis des Primärenergieaufwandes unter Berücksichtigung des Einflusses der Wärmenutzung auf den Primärprozess der Kälteerzeugung zu führen.

7.2 Abwärme von Backöfen

Gerade in Handwerksbetrieben wie Bäckereien ist der Energieverbrauch durch Backöfen und Kühlräume besonders hoch. Sie zählen zu den energieintensivsten Handwerksbetrieben mit Energiekosten von circa 2,9 % der Produktionskosten.

Besonders in Betrieben mit einem derart hohen Energieverbrauch besteht großes Einsparpotential. Allein durch die Nutzung der Abwärme von Backöfen und Kühlanlagen könnte durch geeignete Technik die komplette Warmwasserversorgung oder die Gebäudeheizung organisiert werden.

Wie hoch die Einsparung durch Abwärmenutzung ist, hängt größtenteils von den Backöfen sowie von den Wärmetauschern ab. Eine Wärmerückgewinnung ermöglicht eine theoretische Nutzung bezogen auf die Brennerleistung zwischen 40 und 45 %. Mit wirtschaftlich sinnvollem Aufwand und einer Trennung von Abgas und Schwaden liegen die Leistung zwischen 20 und 30 %.

Um möglichst viel Wärme nutzen zu können, ist es eine wichtige Voraussetzung, die Schwaden von den Abgasen zu trennen. Speziell für den Backschwaden wurde beispielsweise von der Firma NET – Neue Energie-Technik GmbH-+ ein sogenannter Schwadenkondensator für Backöfen entwickelt.

Im Schwadenkondensator gibt der Dampf die Wärme an die Rippenrohre und damit an das in den Rohren strömende Wasser der Wärmerückgewinnungsanlage ab. Wenn der Wärmebedarf vorübergehend geringer wird und der Wärmespeicher geladen ist, strömen die Abgase ungenutzt durch einen Bypass zum Kamin.

Der Schwaden im Backofen benötigt rund 40 % der gesamten zugeführten Energie. Mit einer Kombination aus Abgaswärmetauscher und Schwadenkondensator erzielt man eine Energieeinsparung von bis zu 44 %. [Klaus Ried, Fa. NET – Neue Energietechnik GmbH]

Erfolgt keine Trennung der Abgase und der Backschwaden, kann es zum Einen zu einer Minimierung der Wärmeleistung des Wärmetauschers kommen und zum Anderen zu starken Verschmutzungen des Wärmetauschers bedingt durch verunreinigte Schwaden.

Aufgrund zeitlicher Differenz zwischen Wärmeerzeugung und Wärmenutzung sollte zur vollständigen Abwärmenutzung ein Speicher eingesetzt werden. Gerade in Bäckereien, in denen zu bestimmten Tageszeiten z. B. abends keine Abwärme durch Backöfen anfällt, kann so jederzeit Wärme aus dem Speicher abgerufen werden.

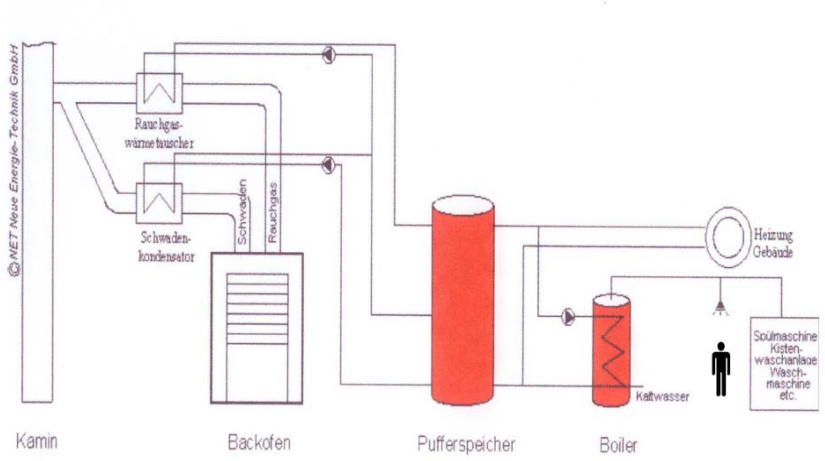

Abbildung 7-1: Prinzip der Abwärmenutzung in Bäckereien (Netenergie 2010)

Sofern bei der Abwärmenutzung aus Backöfen der Strömungswiderstand der Einbauten (Abgaswärmetauscher ca. 7-8 Pa/ 0,07-0,08 mbar; Auslegung Fa. NET, www.netenergie.de) durch den Kaminzug überwunden werden kann, fällt durch die Abwärmenutzung kein zusätzlicher Primärenergieaufwand an. Der Aufwand zur Umwälzung des Zwischenkreislaufes zwischen Wärmetauscher und Pufferspeicher liegt bei ca. 0,4% der übertragenen Wärmemenge und wird damit lediglich mit einem Primärenergiefaktor f_P von **0,1** belastet.

7.3 Industrielle Abwärme - Hochtemperaturkühlwasser

In unterschiedlichen industriellen Prozessen fällt Abwärme auf relativ hohem Temperaturniveau an und muss mit primärenergetischem Aufwand, bei offenen Kühltürmen auch mit dem Verbrauch von aufbereitetem Wasser an die Umgebung abgeführt werden.

- Chemische Industrie:
  - Kühlung von galvanischen Prozessen
  - Abführung von Reaktions- und Lösungswärme
- Laserkühlung
- Härten von Metallen (Härteöfen, Induktionshärten)
- Raffinerieprozesse

- Stahlherstellung: Bodenkühlung von Gießstraßen
- Schmelzprozesse: Mantelkühlung von Kupolöfen (Aluminium, Stahlschrott, Mineralwolle..)
- ...

Wenn Wasser für die Wärmeabfuhr in Kühltürmen nicht in ausreichender Menge oder zu akzeptablen Preisen zur Verfügung steht oder die Schwadenbildung nicht erwünscht ist, bleibt meist nur die Wärmeabfuhr in geschlossenen Wasser- oder Wasser-Glykol-Kreisläufen. Energie in Form von Strom muss als Pumpstrom bei der Umwälzung des Kreislaufwassers sowie dem Betrieb der Ventilatoren der Luft-Kühler aufgewendet werden.

Geht man von einer Wärmeabfuhr auf einem relativ hohen Temperaturniveau über 50°C, einer damit möglichen Temperaturspreizung von 20 K (Kälte-Rückkühlsysteme arbeiten meist nur mit einer Spreizung von 5K und damit einem höherem Pumpstromaufwand) und einer Dimensionierung von Wärmetauschern, Pumpen, Rohrnetz und Kühler nach dem Stand der Technik aus, so kann man den Aufwand (Stromarbeit) für den Abwärme-Pumpstrom im Bereich zwischen 0,15 % (Wasser) und 0,30 % (Wasser-Glykol) der abgeführten Wärmemenge einordnen. Der Aufwand für die Wärmeabfuhr am Trockenrückkühler liegt in der Regel zwischen 0,5 % und 1,5 % der abgeführten Wärmemenge. Durch die Abwärmenutzung wird der Primärprozess um den energetischen Aufwand des Kühlers entlastet. Demgegenüber ist der erhöhte Pumpstromaufwand, der durch den Einbau eines Wärmetauschers in den Kühlwasserkreis entsteht vernachlässigbar – über eine Bypass-Regelung könnte dieser sogar vollständig vermieden werden.

Diese Abwärmenutzung könnte damit sogar mit einer geringen Gutschrift und einem Primärenergiefaktor $f_{P.ext}$ für den Abwärmeanteil zwischen **-0,01** und **-0,04** bewertet werden.

Würde man nun ein Wärmenetz nach AGFW FW 309-1 mit einem 70%igen Abwärmeanteil $f_{P,Abw}$ von „0“ bewerten, so würde sich unter Berücksichtigung von Netzverlust und Pumpstrom ein $\mathbf{f_{P,FW}}$ von **0,46** ergeben. Bei Ansatz einer Stromgutschrift für den vermiedenen Aufwand könnte der $\mathbf{f_{P,FW}}$ auf **0,43** sinken.

7.4 Anmerkung zur Methodik der Bewertung von Abwärme

In einer Vielzahl von industriellen Produktionsprozessen fällt Abwärme bei unterschiedlichen Temperaturen an. Das beginnt mit Kühlwasser, das nur wenige Grade oberhalb der Umgebungstemperatur anfällt und über offene oder geschlossene Kühltürme und Rückkühleinrichtungen an die Umgebungsluft oder an fließende Gewässer abgeführt wird.

Abwärme von Prozessanlagen, die zunächst diffus als Strahlungswärme, Wärmeleitung und Konvektion anfällt, wird meist über Lüftungsanlagen erfasst und als Abluft bei niedrigem Temperaturniveau abgeführt.

Sowohl Wärmeauskopplung aus Abluft als auch aus Kühlwasser und anderen Abwärmequellen lässt sich, sofern es nicht bereits prozessbedingt bei hohen Temperaturen wie unter 7.3 beschrieben anfällt und die direkte Abwärmenutzung ermöglicht, üblicherweise nur mit zusätzlichem primärenergetischem Aufwand in Fernwärmenetze einspeisen. Das kann z.B. über eine Wärmepumpe, durch Eindüsung von Dampf oder Vermischung mit Heizwasser mit höherem Temperaturniveau erfolgen.

Dazu aus FW 309-1, Kapitel 4.5.:„Der fernwärmebedingte Anteil ist die Wärmemenge, die zusätzlich benötigt wird, um den prozessbedingten Anteil nach den Erfordernissen des Fernwärmesystems zu ergänzen (z. B. Erhöhung von Druck, Temperatur, Volumenstrom).“

Dieser primärenergetische Aufwand lässt sich ermitteln und kann dann für die Berechnung des Primärenergiefaktors von Nah- und Fernwärmesystemen in Anlehnung an Formel 3 der AGFW FW 309-1 für Heizwerke ohne Koppelprodukte verwendet werden.

Die Berechnungsalgorithmen nach FW 309 oder DIN V 18599 setzen jedoch voraus, dass für den Primärenergiefaktor des Brennstoffes bzw. in diesem Fall der Abwärme einheitliche und nachvollziehbare Vorgaben bestehen. Für die Abwärme, die „bei Nichtnutzung durch Fernwärme über Kühlvorrichtungen an die Umgebung abgeführt werden müsste“, schlägt die FW 309-1 in 4.5. den Primärenergiefaktor „0“ vor.

Unter den Autoren der vorliegenden Studie wurde diskutiert, wie eine primärenergetische Bewertung der Abwärme selbst erfolgen könnte und ob diese gerechtfertigt wäre. Mit der Zuteilung eines Primärenergiefaktors für Abwärme (ohne Berücksichtigung des sog. „fernwärmebedingten Anteils“) würde von der Sichtweise Abstand genommen werden, den Primärenergiebedarf zur Gänze dem industriellen Prozess zuzurechnen.

Die unter 4.2.1 beschriebene Allokation nach dem exergetischen Anteil des Zielproduktes an allen bereitgestellten Produkten setzt voraus, dass alle Produkte exergetisch bewertbar sind. Dies ist nur dann möglich, wenn die Zielprodukte in Form von Energieströmen, wie bei der Kraft-Wärme-Kopplung mit Strom und Wärme oder beispielsweise in einem Raffinerieprozess als Kraft- bzw. Brennstoff und Wärme vorliegen. Bei den meisten Produktionsprozessen wie z.B. bei Lebensmittel, Glas, Dämmstoffen oder Zement ist das jedoch nicht möglich.

Eine Möglichkeit, allgemein Abwärmenutzung mit ihrem Temperaturniveau exergetisch zu bewerten bestünde dann, wenn man übereinkommen würde, einen Produktionsprozess unabhängig vom Zielprodukt wie einen Kraft-Wärme-Kopplungsprozess zu betrachten und den Primärenergieeintrag in das Produkt – physikalisch falsch – wie Strom zu bewerten. Mit dem Primärenergieaufwand des Gesamtprozesses, dem produktspezifischen Anteil, dem Abwärmeanteil sowie den Systemtemperaturen der Nutzwärme könnte dann eine Quasi-Exergie-Allokation vorgenommen werden. Somit könnte über die exergetische Bewertung des Temperaturniveaus der Nutzwärme eine differenzierende Einstufung erfolgen.

Aufgrund der systematischen Unschärfe, die bei dieser Art der Allokation in Kauf genommen werden müsste, wurde auf eine exergetische Bewertung der industriellen Abwärme im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet.

7.5 Zusammenfassung und Empfehlung

Die Nutzung von industrieller und gewerblicher Abwärme zur direkten Beheizung von Gebäuden oder zur Einspeisung in Wärmenetze sollte im Sinne der Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und der CO_2-Emissionen erweitert und gefördert werden. Um möglichem Missbrauch vorzubeugen, empfehlen wir die Einhaltung der nachfolgenden Kriterien für die Verwendung von Pauschalfaktoren vorauszusetzen. Bei Nichterfüllung der Kriterien bzw. Überschreitung der Maximaltemperatur der Abwärmenutzung aus Kälteanlagen muss der Primärenergiefaktor im Einzelfall berechnet werden.

- Als Mindestanforderung für die Verwendung der Pauschalfaktoren sollte die Leistungszahl aus dem Verhältnis der aus der Abwärme stammenden und genutzten Wärme zum Stromeinsatz, der zur Bereitstellung dieser Abwärme erforderlich ist, in Anlehnung an das EEWärmeG mindestens 10 betragen.
- Um zu verhindern, dass Abwärmenutzung in Kälteanlagen ohne genauere Betrachtung der Auswirkungen auf die Effizienz des Kälteprozesses betrieben wird, empfeh-

len wir die Verwendung der Pauschalfaktoren bei Nutzung der Kondensationswärme nur bis zu einer Nutzwärmetemperatur von 50°C zu erlauben.

- Zudem sollte seitens des Betreibers des Wärmenetzes mit Abwärme bzw. des Erstellers des EnEV-Nachweises bei unmittelbarer Nutzung gewerblicher Abwärme eine Bestätigung gefordert werden, nach der die Abwärmenutzung Teil eines Gesamtenergiekonzeptes darstellt und die Abwärme des Primärprozesses weder vermieden noch intern rückgewonnen werden kann.

Tabelle 7-1: Empfehlung für Primärenergiefaktoren für Abwärme aus gewerblichen und industriellen Prozessen

Wärmequelle	**f_P / $f_{P,FW}$ Faktoren**	**Bemerkung**
Abwärme (gewerbliche Quellen)[a,b,c] f_P (100 % Abwärme)	0,20	PE-Faktor für Endenergie bei ortnaher Nutzung; entspricht $f_{P,ext}$ nach FW 309-1/3.2.2.
Industrieabwärme[a,b,c] $f_{P,FW}$ (70% Abwärme) $f_{P,FW}$ (100% Abwärme)	 0,50 0,20	

[a] Die Leistungszahl aus dem Verhältnis der aus der Abwärme stammenden und genutzten Wärme zum Stromeinsatz der zur Bereitstellung dieser Abwärme erforderlich ist, muss mindestens 10 betragen.

[b] Für Abwärme aus der Kondensationswärme von Kälteanlagen nur bis maximal 50°C Nutzwärmetemperatur.

[c] Es ist zu bestätigen, dass die Abwärmenutzung Teil eines energetischen Gesamtkonzepts darstellt und die prozessinterne Verwendung, Einsparung bzw. Wärmerückgewinnung nicht oder nur mit unverhältnismaßig hohem Aufwand (siehe a) möglich wäre.

8 Müllverbrennungsanlagen

Die Müllverbrennungsanlagen in Deutschland sind hinsichtlich ihrer Betriebsweise, der Abfallherkunft und der Energiebilanz außerordentlich divers. Wie in Abbildung 8-1 zu sehen ist, ergeben sich bezüglich der Nutzungsgrade für die Strom- und Wärmeauskopplung außerordentlich große Unterschiede.

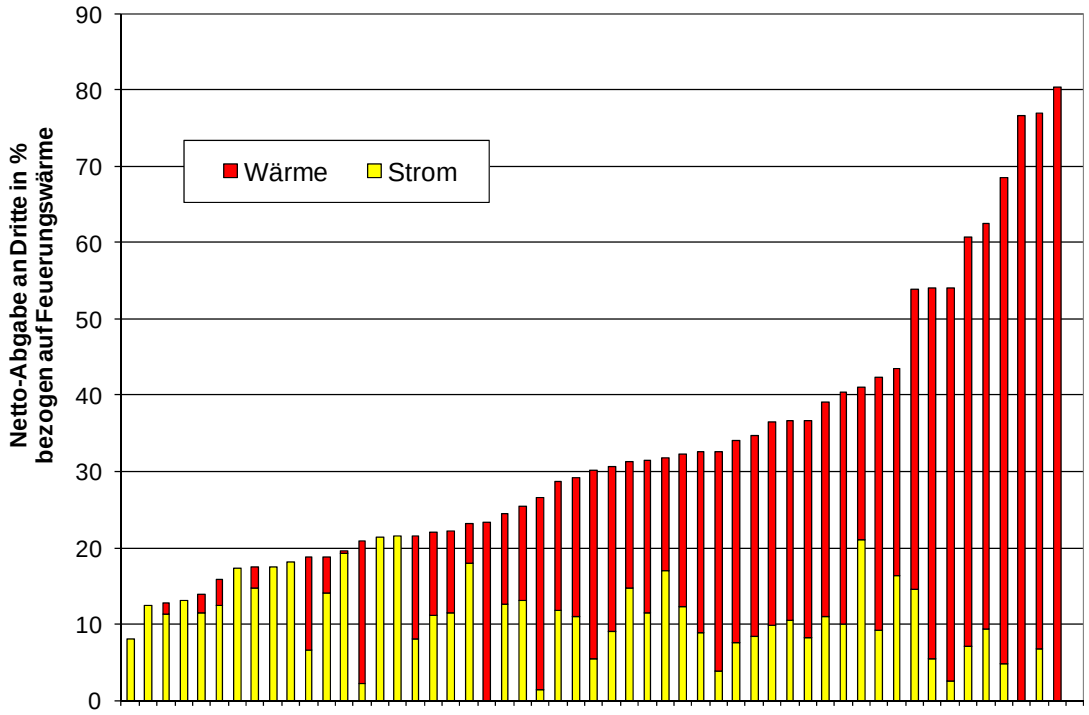

Abbildung 8-1: Bandbreite der elektrischen und thermischen Nutzungsgrade der deutschen MVAs (IFEU-MVA-Datenbank)

In diesem Kapitel werden Primärenergiefaktoren für den Brennstoff Abfall und für Fernwärme aus Müllverbrennungsanlagen untersucht. In Kapitel 8.1 werden methodische Fragen zum Brennstoff Abfall sowie zur Berücksichtigung von Stützfeuerung und Spitzenlastkessel zur Berechnung des Primärenergiefaktors der Fernwärme diskutiert. Anhand von Modell-Müllverbrennungsanlagen sollen die Auswirkungen der unterschiedlichen Berechnungsmethoden verdeutlicht werden. Hierfür werden insgesamt drei Müllheizkraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung und zwei Müllheizwerke unterschiedlicher Energieeffizienz exemplarisch untersucht und die sich ergebenden Primärenergiefaktoren in Kapitel 8.2 vorgestellt. In Kapitel 8.3 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

8.1 Methodische Fragen

Bei der Bilanzierung von MVA ergeben sich verschiedene methodische Fragen (Abbildung 8-2). Zunächst ist zu klären, ob der fossile Anteil im Abfall (sog. „Feedstock-Energie“) für den Primärenergiefaktor des Abfalls zu berücksichtigen ist (Kapitel 8.1.1). Des Weiteren wird diskutiert, wie der Transportweg (Punkt 2) für den Abfall vom Ort der Entstehung bis zur Müllverbrennungsanlage zu berücksichtigen ist. Dabei werden verschiedene Transportvarianten für die Modell-Müllverbrennungsanlagen untersucht (Kapitel 8.1.2). In Kapitel 8.1.3 wird er-

läutert, wie der Verbrauch fossiler Energieträger zur Stützfeuerung des Abfalls (Punkt 3) und des Spitzenkessels (Punkt 4) in die Berechnung des Primärenergiefaktors für die Fernwärme eingeht.

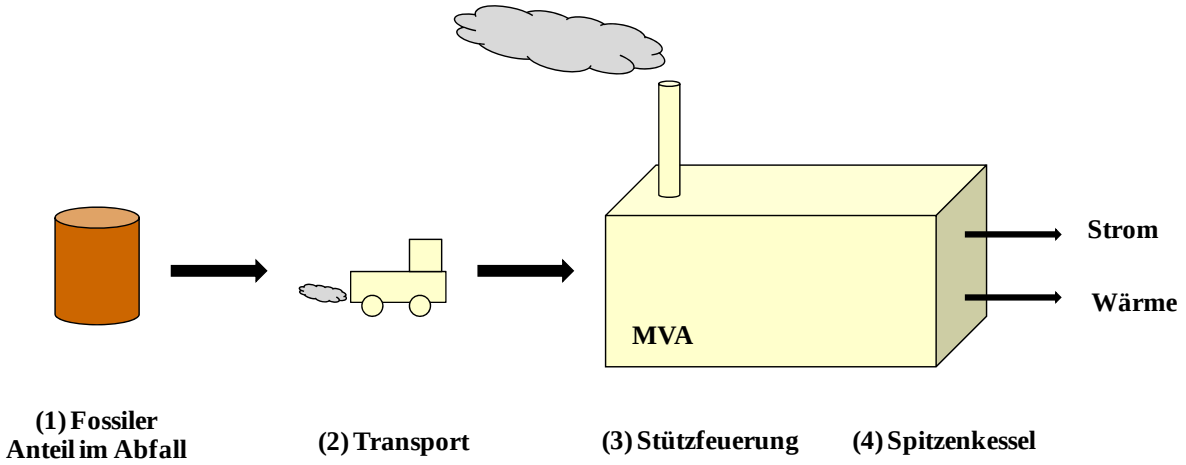

Abbildung 8-2: Methodische Fragen zur Ermittlung des Primärenergiefaktors für Nah- und Fernwärme aus Abfall (eigene Darstellung nach IFEU 2010).

8.1.1 Berücksichtigung des fossilen Anteils des Abfalls

Im AGFW-Arbeitsblatt FW 309-1 (Stand Mai 2010) wird der Primärenergiefaktor für den Energieträger Abfall grundsätzlich zu Null gesetzt. Damit wird Abfall gleichgestellt mit Umweltenergie wie Solarenergie oder Umgebungswärme. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass es zur Abfallentsorgung in Müllverbrennungsanlagen keine Alternativen gibt, da die Deponierung von Siedlungsabfall aufgrund der gesetzlichen Regelungen in Deutschland seit 2005 nicht mehr zulässig ist. Es stellt sich jedoch die Frage, ob der fossile Anteil im Abfall anders zu bewerten ist als beispielsweise der biogene Anteil.

Die bei der Verbrennung nutzbare fossile Primärenergie des Abfalls ist jedoch im Rahmen von Lebenszyklusanalysen definitionsgemäß bereits den Abfallprodukten zugerechnet. Bei der Ökobilanz einer Plastiktüte beispielsweise wird der Energiegehalt des eingesetzten Rohöls der Plastiktüte angelastet. Um Doppelzählungen zu vermeiden, sollte der fossile Anteil der Primärenergie des Abfalls daher nicht der Fernwärme zugeordnet werden. Daher bleibt der fossile Anteil im Abfall für den Primärenergiefaktor des Abfalls unberücksichtigt.[4]

8.1.2 Berücksichtigung des Abfalltransports

Wird der Primärenergiefaktor für den Energieträger Abfall zu Null gesetzt, bleibt der Primärenergieaufwand für den Transportweg unberücksichtigt. Es wird kritisiert, dass dabei nicht hinreichend betrachtet wird, ob der Abfall in unmittelbarer Umgebung der Müllverbrennungsanlage anfällt und nur wenige Kilometer transportiert werden muss oder ob der Abfall über weite Strecken per LKW oder Zug zur Müllverbrennungsanlage gefahren wird.

In Tabelle 8-1 wird daher die Sensitivität des Transportes bezüglich Transportmittel und Transportentfernungen betrachtet. Dabei ist entscheidend, welchen Anteil der Energieaufwendungen für den Transport der Müllentsorgung zugeordnet werden und welcher Anteil

[4] Dies gilt im Übrigen nicht für die (in dieser Studie nicht betrachteten) CO_2-Emissionen, da diese bei Deponierung i. w. nicht freigesetzt worden wären. Daher wird in Ökobilanzen in der Regel der fossile CO_2-Anteil aus der Müllverbrennung dem Verbrennungsprozess und nicht dem Produkt angelastet.

dem Brennstoff Abfall. Der Berechnung liegen Verbrauchsdaten für den Transport gemäß des vom IFEU entwickelten Tools EcoTransIT (www.ecotransit.org) zugrunde.

Für die Subvarianten T1a bis T1c wird von einem innerstädtischen LKW-Transport von 50 km Länge ausgegangen. Für die Subvariante T1a wird davon ausgegangen, dass 100 % der Transportenergie der Abfallentsorgung zugeordnet werden und 0 % dem Brennstoff Abfall. Für die Subvariante T1c wird die Transportenergie zu 100 % dem Brennstoff Abfall und zu 0 % der Abfallentsorgung zugerechnet. In den Subvarianten T2a bis T2c erfolgt die gleiche Betrachtung für einen Ferntransport per LKW mit einer Transportentfernung von 500 km. In den Subvarianten T3a bis T3c wird von einem Ferntransport per Zug mit einer Transportentfernung von 500 km ausgegangen. In den Subvarianten T4a bis T4c wird ein Ferntransport per LKW mit einer Transportentfernung von 1.600 km angesetzt. Dies entspricht der Strecke Neapel – Köln.

Die Ergebnisse in Tabelle 8-1 zeigen, dass die höchsten Primärenergiefaktoren für den Transport aus den Subvarianten mit dem Index „c“ resultieren. In diesem Fall werden 100 % der aufgewendeten Transportenergie dem Brennstoff Abfall zugerechnet. Vergleicht man die einzelnen Transportentfernungen für die Subvarianten mit dem Index „c“ ergibt sich für den innerstädtischen Transport ein Primärenergiefaktor von 0,026, für den Ferntransport per LKW von 500 km ein Wert von 0,053, für den Ferntransport per Zug von 500 km ein Wert von 0,013 sowie für den Ferntransport per LKW von 1.600 km ein Wert von 0,17.

Tabelle 8-1: Vergleich der Primärenergiefaktoren $f_{P,Br}$ für den Transport für den Energieträger Abfall unter der Annahme verschiedener Transportmittel und Transportentfernungen

Variante	**Transport-mittel**	**Transport**		**Allokation Abfall und Brennstoff**		**$f_{P,Br}$**
-	-	km	Art	Abfall	Brennstoff	-
-	-	-	-	in %	in %	MJ/MJ
T1a	LKW	50	innerorts	100	0	0,000
T1b				50	50	0,013
T1c				0	100	0,026
T2a	LKW	500	Fern-transport	100	0	0,000
T2b				***50***	***50***	***0,027***
T2c				0	100	0,053
T3a	Zug	500	Fern-transport	100	0	0,000
T3b				50	50	0,006
T3c				0	100	0,013
T4a	LKW	1600	Fern-transport	100	0	0,000
T4b				50	50	0,085
T4c				0	100	0,170

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Transport einen geringen, aber nicht ganz vernachlässigbaren Einfluss auf den Primärenergiefaktor des Abfalls hat. Unter Berücksichtigung eines konservativen Ansatzes und eines nach Möglichkeit wirklichkeitsnahen Wertes für die Berechnung der Primärenergiefaktoren in Kapitel 8.2 wird die Subvariante T2b gewählt. Dabei werden 50 % der Transportenergie (500 km per LKW) der Abfallentsorgung und 50 % dem Brennstoff Abfall zugerechnet. Es ergibt sich ein Primärenergiefaktor für den Brennstoff

Abfall von 0,027. Für die Berechnung der Primärenergiefaktoren für Nah- und Fernwärme aus Abfall in Kapitel 8.2 wird ein Wert von 0,03 gewählt.

Allerdings wird in Kapitel 8.2 gezeigt, dass je nach angewendeter Berechnungsmethode der Antransport des Abfalls durch die Stromgutschrift ohnehin „überdeckt“ wird.

8.1.3 Berücksichtigung der Stützfeuerung und des Spitzenlastkessels

Gemäß AGFW-Arbeitsblatt FW 309-1 wird der Primärenergiefaktor für das Fernwärmenetz einer Müllverbrennungsanlage nach Formel 1 für KWK-Anlagen und nach Formel 3 für Heizwerke berechnet. Liegen keine Bilanzdaten der Müllverbrennungsanlage vor, so kann nach Kapitel 4.3 des Arbeitsblattes vereinfacht der Primärenergiefaktor für die ausgekoppelte Wärme für KWK-Anlagen zu 0,0 und für Heizwerke zu 0,13 angenommen werden. Diese Werte bilden den durchschnittlichen Primärenergieaufwand unter Berücksichtigung aller Hilfsenergien ab, die zum Betrieb der Müllverbrennungsanlage benötigt werden.

Gemäß AGFW wird die Stützfeuerung mit fossilen Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas der Brennstoffwärme des Abfalls zugerechnet, da ohne diese fossilen Brennstoffe ein ordnungsgemäßer Betrieb des Verbrennungsprozesses nicht gewährleistet wäre. Der zusätzliche Verbrauch von fossilen Brennstoffen in einem Spitzenlastkessel zur Sicherstellung der benötigten Betriebstemperatur des Heiznetzes wird ebenfalls in den Zähler der Formel 1 bzw. der Formel 3 eingerechnet.

Durch das Gutschriftverfahren gemäß Formel 1 des Arbeitsblattes wird die Primärenergie resultierend aus der eingespeisten Strommenge multipliziert mit dem Primärenergiefaktor des verdrängten Stroms von dem Primärenergiebedarf für die Stützfeuerung und den Spitzenlastkessel abgezogen. Dadurch wird der Primärenergiebedarf im Zähler der Formel 1 reduziert und bei hoher Stromkennzahl grundsätzlich negativ. Theoretisch würde sich damit ein negativer Primärenergiefaktor für die Fernwärme ergeben. In diesem Fall wird jedoch der negative Primärenergiefaktor zu Null gesetzt.

Gemäß diesem Gutschriftfahren ist mit Blick auf den resultierenden Primärenergiefaktor kein Anreiz für den sparsamen Umgang mit fossilen Energieträgern im Spitzenlastkessel gegeben, da der Primärenergiebedarf durch die Stromgutschrift reduziert wird. Trotz des Einsatzes dieser fossilen Primärenergie bleibt der Primärenergiefaktor in der Regel negativ und wird damit zu Null gesetzt.

Die Anwendung des **modifizierten Gutschriftverfahrens** gemäß Kapitel 4.2.3 wäre aus Sicht der Autoren eine aus energetischer und ökologischer Sicht objektivere Bilanzierung des Brennstoffs Abfall und der fossilen Energieträger. Hierbei würde die **Stützfeuerung** weiterhin dem Abfall zugeordnet, weil diese für den ordnungsgemäßen Betrieb einer Müllverbrennungsanlage erforderlich ist. Die Brennstoffwärme für den **Spitzenlastkessel** sowie der Pumpstrom für das Heiznetz werden hingegen nicht dem Abfall, sondern der Wärme zugeordnet. Auf diese Weise unterbleibt eine Vermischung des Primärenergiebedarfs für den KWK-Brennstoff und den Spitzenlastkessel. Eine Stromgutschrift auf den fossilen Primärenergieeinsatz des Spitzenlastkessels erfolgt nicht.

8.2 Primärenergiefaktoren für Nah- und Fernwärme von Müllverbrennungsanlagen am Beispiel ausgewählter Anlagen

Unter Berücksichtigung der in den vorangegangenen Kapiteln getroffenen Annahmen zum Brennstoff Abfall und der Handhabung von Stützfeuerung und Spitzenlastkessel bei Müll-

verbrennungsanlagen werden nachfolgend anhand von Modell-Heizkraftwerken und Heizwerken die Primärenergiefaktoren für die Fernwärme mit den drei in Kapitel 4.2 vorgestellten Methoden berechnet.

8.2.1 Müllheizkraftwerke (MHKW)

Hierzu werden drei Müllheizkraftwerke (MHKW) mit unterschiedlicher Energieeffizienz definiert. Die einzelnen Berechnungsschritte können Tabelle 12-15 entnommen werden. Mit den Anlagen soll ein möglichst breites Spektrum von Anlagen abgedeckt werden, die sich insbesondere hinsichtlich des elektrischen Nutzungsgrades unterscheiden. Die Energiebilanz der Anlagen ist der IFEU-Datenbank von realen Anlagen entnommen (Fehrenbach et al. 2007). Dadurch sollen die Unterschiede für die Berechnungsmethoden hinsichtlich der Stromgutschrift gemäß Gutschriftverfahren deutlich werden. Der Primärenergiefaktor für die Fernwärme wird nach dem Gutschriftverfahren des AGFW-Arbeitsblattes FW 309 Teil 1 gemäß Kapitel 4.2.2, nach dem modifizierten Gutschriftverfahren gemäß Kapitel 4.2.3 und nach dem Allokationsverfahren auf Exergiebasis gemäß Kapitel 4.2.1 berechnet.

Das MHKW 1 hat bezogen auf die Kraft-Wärme-Kopplung eine elektrische Leistung von 5,7 MW bei einer thermischen Leistung von 6,1 MW. Der elektrische Nutzungsgrad beträgt 12,7 % bei einem thermischen Nutzungsgrad von 13,7 %. Der Gesamtnutzungsgrad liegt damit bei 26,4 %. Bezogen auf die drei MHKW hat das MHKW 1 den höchsten elektrischen Nutzungsgrad und steht damit hinsichtlich des Kuppelproduktes Strom für einen effizienten Typ eines Müllheizkraftwerkes. Das MHKW 2 hat bezogen auf die Kraft-Wärme-Kopplung eine elektrische Leistung von 4,7 MW und eine thermische Leistung von 16,1 MW. Der elektrische Nutzungsgrad von 8,1 % steht einem thermischen Nutzungsgrad von 28,1 % gegenüber. Damit ergibt sich ein Gesamtnutzungsgrad von 36,2 %. Das MHKW 2 steht damit hinsichtlich des Kuppelproduktes Strom für ein Müllheizkraftwerk mittlerer Energieeffizienz. Das MHKW 3 ist ein ineffizientes Heizkraftwerk und hat bezogen auf die Kraft-Wärme-Kopplung eine elektrische Leistung von 1,5 MW und eine thermische Leistung von 6,6 MW. Der elektrische Nutzungsgrad beträgt lediglich 5,2 % und der thermische Nutzungsgrad 23,3 %. Der Gesamtnutzungsgrad beträgt damit 28,5 %.

Die Brennstoffwärme zur Stützfeuerung $W_{Br,KWK,2}$ geht wie die Brennstoffwärme des Abfalls $W_{Br,KWK,1}$ in die Berechnungsformeln ein. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Brennstoffwärme zur Stützfeuerung für den ordnungsgemäßen Betrieb des Heizkraftwerks erforderlich ist. Lediglich für den Anteil eines Spitzenkessel waren keine Praxisdaten verfügbar. Es wird daher von einer fossilen Brennstoffwärme $W_{Br,HEL}$ von 10 % bezogen auf die gesamte Wärmeerzeugung Q_{Bne} ausgegangen. Gemäß FW 309 Teil 1 Kap. 3.3 wird der Stromverbrauch des Heiznetzes A_{HN} mit 1,5 % bezogen auf die gesamte Wärmeerzeugung Q_{Bne} gewählt. Der Wärmeenergieverlust des Heiznetzes wird analog Kapitel 6.2.2 mit 15 % angenommen. Für die Berechnung wird ein Primärenergiefaktor für den Brennstoff Abfall von 0,03 gemäß Kapitel 8.1.2 berücksichtigt. Abbildung 8-3 enthält die Ergebnisse für die Primärenergiefaktoren aus Fernwärme. Es zeigt sich, dass nach dem Gutschriftverfahren für alle MHKW negative Primärenergiefaktoren resultieren. Dabei ist der Wert umso kleiner, je größer der elektrische Nutzungsgrad der Anlage ist. Da negative Werte per Definition zu Null gesetzt werden, wäre der Primärenergiefaktor für alle drei MHKW gleich Null. Selbst bei einem relativ schlechten elektrischen Nutzungsgrad von rd. 5 % für das MHKW 3 wird der Primärenergiefaktor nicht positiv.

Das modifizierte Gutschriftverfahren zeigt für alle drei MHKW Werte von 0,20 für einen Spitzenkessel-Anteil von 10 %. Mit dem modifizierten Gutschriftverfahren liegen die Primärener-

giefaktoren entsprechend ihrem fossilen Brennstoffeinsatz für den Spitzenkessel und dem Stromverbrauch zum Betrieb des Heiznetzes in einem moderaten Wertebereich. Auf diese Weise wird ein Anreiz geschaffen zum sparsamen Verbrauch von fossilen Energieträgern und für Effizienzmaßnahmen bezüglich des Stromverbrauches des Heiznetzes.

Aus Sicht der Autoren erfolgt mit dem derzeitigen Gutschriftverfahren eine Übervorteilung der Fernwärmenutzung, ohne den tatsächlichen Primärenergieverbrauch korrekt abzubilden. Mit dem modifizierten Gutschriftverfahren liegt ein Verfahren vor, mit dem eine angemessene Berechnung der Primärenergiefaktoren möglich ist.

Das Allokationsverfahren auf Exergiebasis ergibt Werte zwischen 0,22 und 0,33. Für die MHKW 1 und 2 ergeben sich vergleichbare Primärenergiefaktoren wie beim modifizierten Gutschriftverfahren. Für das MHKW 3 liegt der Wert deutlich über dem modifizierten Gutschriftverfahren. Dies liegt am höheren Exergieallokationsfaktor für die Wärme infolge des schlechten elektrischen Wirkungsgrades des MHKW.

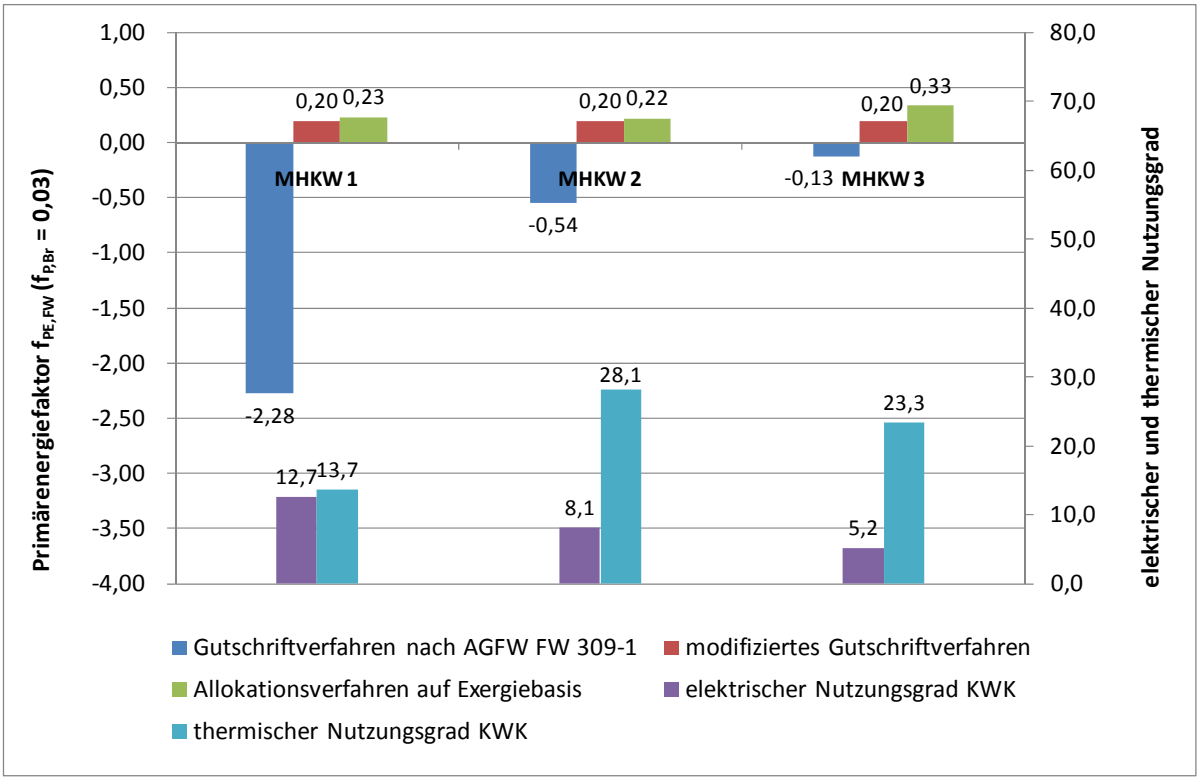

Abbildung 8-3: Primärenergiefaktoren für Fernwärme für drei ausgewählte Müllheizkraftwerke unterschiedlicher Effizienz mit einem Anteil für den fossilen Spitzenlastkessel von 10 % nach dem Gutschriftverfahren nach AGFW FW 309-1, nach dem modifizierten Gutschriftverfahren und dem Allokationsverfahren auf Exergiebasis (eigene Darstellung nach IFEU 2010).

In Tabelle 8-2 sind die Primärenergiefaktoren für die Fernwärme für die oben betrachteten MHKW mit einem KWK-Anteil von 100 %, 90 % und 70 % für die drei Berechnungsverfahren zusammengefasst. Nach dem modifizierten Gutschriftverfahren resultiert für ein MHKW mit einem KWK-Anteil von 100 % ein Primärenergiefaktor von rd. 0,1. Für einen KWK-Anteil von 90 % resultiert ein Wert von 0,2. Bei einem KWK-Anteil von 70 % resultiert ein Wert von 0,5. Bei abweichendem KWK- bzw. fossilen Spitzenkesselanteil können die Werte linear interpoliert werden.

Tabelle 8-2: Primärenergiefaktoren $f_{PE,FW}$ für die drei MHKW mit einem KWK-Anteil von 100 %, 90 % und 70 % nach den drei Berechnungsmethoden

-	Gutschriftverfahren			Modifiziertes Gutschrift-verfahren			Allokation auf Exergiebasis		
KWK-Anteil in %	100	90	70	100	90	70	100	90	70
MHKW 1	-2,70	-2,28	-1,42	0,05	0,20	0,50	0,09	0,23	0,52
MHKW 2	-0,78	-0,54	-0,07	0,05	0,20	0,50	0,08	0,22	0,51
MHKW 3	-0,32	-0,13	0,25	0,05	0,20	0,50	0,20	0,33	0,60

Für die Berechnungsmethoden wurde zudem geprüft, wie sich der PE-Faktor für die Fernwärme bei Veränderung des PE-Faktors für den Brennstoff Abfall ändert. Die Ergebnisse werden nachfolgend für das MHKW 3 für einen KWK-Anteil von 90 % vorgestellt. Für das Gutschriftverfahren ergibt sich ab einem $f_{P,Abf}$ von rd. 0,06 ein positiver Wert für $f_{P,FW}$. Beim modifizierten Gutschriftverfahren erhöht sich $f_{PE,FW}$ erst ab einem $f_{P,Abf}$ von 0,11. Zwischen einem $f_{P,Br}$ von 0,0 bis 0,11 bleibt der Primärenergiefaktor für die Fernwärme konstant. Beim Allokationsverfahren auf Exergiebasis wirkt sich jede Veränderung von $f_{PE,Br}$ im Primärenergiefaktor für die Fernwärme aus.

8.2.2 Müllheizwerke (MHW)

Auch für zwei Müllheizwerke (MHW) mit unterschiedlicher Energieeffizienz werden beispielhaft die Primärenergiefaktoren für die Fernwärme berechnet. Die einzelnen Berechnungsschritte können Tabelle 12-16 entnommen werden. Mit den beiden MHW soll sowohl ein Heizwerk mit einem guten thermischen Nutzungsgrad (MHW 1) als auch ein Heizwerk mit einem relativ schlechten thermischen Nutzungsgrad (MHW 2) betrachtet werden.

Bei MHW muss nicht zwischen den Gutschriftverfahren unterschieden werden, da es keinen Strom als Kuppelprodukt gibt. Der Primärenergiefaktor für die Fernwärme wird nach der Formel 3 gemäß AGFW-Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 Kapitel 4.1 berechnet.

Das MHW 1 hat einen guten thermischen Wirkungsgrad von 79,8 % bei einer thermischen Leistung von 89,3 MW. Das MHW 2 hat einen relativ schlechten thermischen Wirkungsgrad von 21,6 % bei einer thermischen Leistung von 9,3 MW. Die Annahmen für den Stromverbrauch des Heiznetzes A_{HN} und den Wärmeverlust des Heiznetzes entsprechen den Annahmen für die MHKW.

In Abbildung 8-4 werden die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Demnach ergibt sich für das Heizwerk MHW 1 mit einem hohen thermischen Nutzungsgrad ein Primärenergiefaktor für die Fernwärme von 0,39. Für das MHW 2 mit einem wesentlich schlechteren Nutzungsgrad ergibt sich ein Primärenergiefaktor von 1,41. Dieser Wert ist zum einen so hoch wegen des hohen Gas/Öleinsatzes als auch wegen des hohen Strombedarfs dieses MHW. Es wird deutlich, wie stark der Primärenergiefaktor von der Effizienz des betrachteten MHW abhängt.

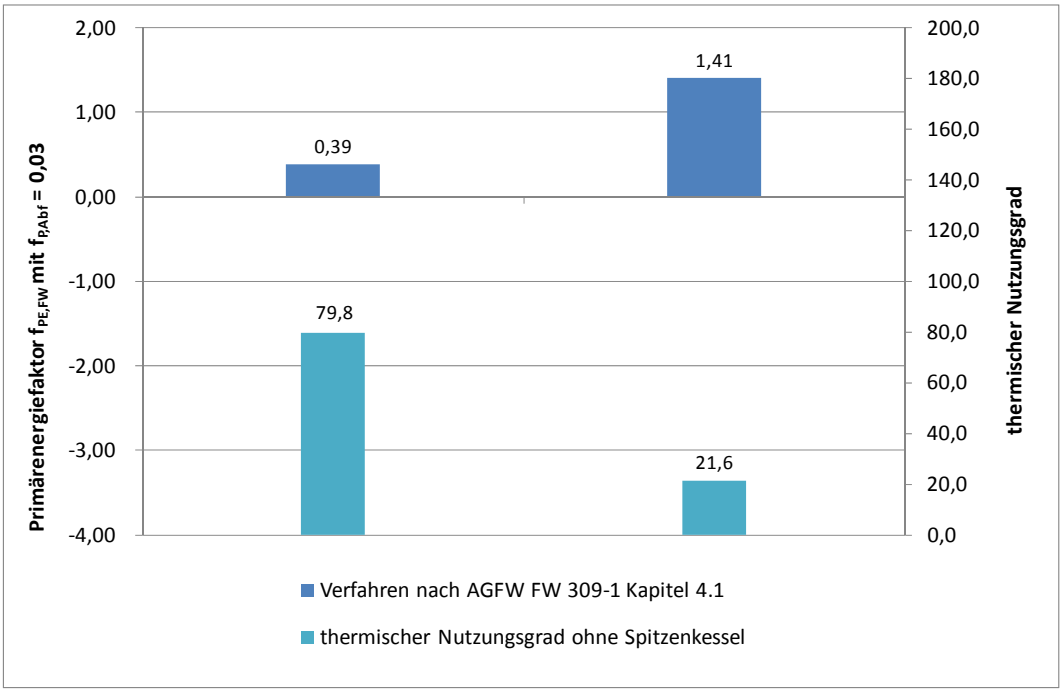

Abbildung 8-4: Primärenergiefaktoren für Fernwärme für ausgewählte Müllheizwerke unterschiedlicher Effizienz mit einem Anteil des fossilen Spitzenlastkessels von 10 % nach dem Berechnungsverfahren gemäß AGFW FW 309-1 Kapitel 4.1 (eigene Darstellung nach IFEU 2010).

8.3 Zusammenfassung und Empfehlung

Zusammenfassend lässt sich für Fernwärme aus Müllheizkraftwerken feststellen, dass das derzeit angewandte Gutschriftverfahren gemäß Arbeitsblatt FW 309 Teil 1 Formel 1 die Fernwärme bezüglich des Primärenergiefaktors grundsätzlich begünstigt. Das ist auch dann der Fall, wenn es sich bei dem MHKW um ein eher ineffizientes Kraftwerk mit einem geringen elektrischen Nutzungsgrad handelt (siehe Abbildung 8-3). Für den Betreiber eines MHKW gibt es daher keinen Anreiz den Anteil des Spitzenkessels entsprechend zu reduzieren. Aus Sicht der Autoren bildet das **modifizierte Gutschriftverfahren** den Primärenergieverbrauch fossiler Energieträger bei Betrieb eines Spitzenlastkessels im Ergebnis besser ab, zumal der Spitzenkessel kausal eindeutig der Wärmeerzeugung zugeordnet werden kann.

Voraussetzung dieser Rechenweise ist, dass der Gas/Ölbedarf für Spitzenkessel und Stützfeuerung separat ausgewiesen sind. Ist dies datentechnisch nicht trennbar, empfehlen wir, dass der gesamte Gas-/Ölbedarf im Sinne eines separaten Bilanzkreises im modifizierten Gutschriftverfahren bilanziert werden muss.

Mit dem modifizierten Gutschriftverfahren wird ein Anreiz zum sparsamen Verbrauch von fossilen Energieträgern und für Effizienzmaßnahmen bezüglich des Stromverbrauches des Heiznetzes geschaffen. Nichtsdestotrotz wird sowohl durch das Gutschriftverfahren als auch durch das modifizierte Gutschriftverfahren kein Anreiz zur Erhöhung des elektrischen Nutzungsgrades gegeben.

Grundsätzlich wäre hier ein zusätzlicher Anreiz über einen Schwellenwert möglich, ab dessen Überschreitung besondere Vorteile für den Betrieb des Fernwärmenetzes resultieren. Denkbar wäre zum Beispiel eine Bewertung der Gesamteffizienz des MHKW in Anlehnung an Anhang 2 der europäischen Richtlinie 2008/98/EG. Ab einer Gesamteffizienz von beispielsweise 65 % dürfen MHKW das derzeitige Gutschriftverfahren verwenden und so bei

entsprechenden Randbedingungen den Primärenergiebedarf der Fernwärme zu Null setzen. Weniger effiziente MHKW müssen nach dem modifizierten Gutschriftverfahren bewertet werden. Da der Wert des PE-Faktors insgesamt sehr niedrig ist, würde eine solche Vorgehensweise die EnEV-Werte unangemessen verkomplizieren.

Aus methodischer Sicht erfolgt durch das Allokationsverfahren auf Exergiebasis eine gute Aufteilung des Primärenergieeinsatzes auf die Kuppelprodukte Strom und Wärme des MHKW. Aufgrund der einfacheren Anwendung der modifizierten Gutschriftmethode im Vergleich zum Allokationsverfahren und der Konsistenz zur Rechenweise bei biogenen Energieträgern wird dennoch das modifizierte Gutschriftverfahren empfohlen, zumal die Ergebnisse für beide Verfahren nicht sehr wesentlich voneinander differieren.

Für die Müllheizwerke lässt sich feststellen, dass das derzeitige Verfahren der AGFW eine Unterscheidung hinsichtlich effizienter und weniger effizienter MHW prinzipiell befriedigend abbildet. Es ist jedoch festzustellen, dass der in Kapitel 4.3 genannte Primärenergiefaktor für Fernwärme aus Anlagen ohne KWK – bei nicht vorliegenden Bilanzdaten – von 0,13 zu gering erscheint. Dieser Wert wird selbst durch das als effizient zu bezeichnende MHW 1 mit 0,39 deutlich überschritten (siehe Abbildung 8-4). Auf Grund der großen Schwankungsbreite bei MHW wird empfohlen, dass **kein Default-Wert** verwendet werden darf.

9 Einbindung der abgeleiteten Primärenergiefaktoren in die Energieeinsparverordnung EnEV und langfristige Weiterentwicklung

Eine sinnvolle Empfehlung zur Festlegung von Primärenergiefaktoren ist nur im Zusammenspiel mit der Anforderungssystematik der EnEV möglich. Die derzeitige Energieeinsparverordnung EnEV 2009 gewährleistet einen schonenden Einsatz regenerativer Brennstoffe über eine einseitige Anforderung an die Wärmedämmqualität des Gebäudes. Andere Maßnahmen zur Begrenzung des Energiebedarfs wie z.B. Lüftungswärmerückgewinnung oder Solarthermie können dazu derzeit nicht gleichwertig berücksichtigt werden. Zur Verbesserung dieser Situation stehen verschiedene Lösungsansätze der Diskussion.

9.1 Biomassebudget

Durch Rückgriff auf den „nicht-erneuerbaren“ Anteil des PE-Faktors wird suggeriert, als ob erneuerbare, insbesondere biogene Brennstoffe „ökologisch nahezu umsonst“ wären. Dieser Ansatz wurde kritisiert, da damit ein Anreiz geschaffen wird, Biomasse zur Erfüllung der EnEV-Pflichten einzusetzen, obwohl sie nicht unbegrenzt zur Verfügung steht und ggf. anderweitig volkswirtschaftlich optimaler eingesetzt wäre (entweder, weil sie in anderen Bereichen mehr THG reduziert, z. B. in KWK, oder weil sie in anderen Bereichen schlechter ersetzbar ist, z. B. Biokraftstoffe für Schwerlast- und Flugverkehr).

Vorgeschlagen wurden beispielsweise Biomasse-Budgets: bis zur Ausschöpfung dieses Budgets, d.h. eines Zielwertes in Kilowattstunden Endenergie pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr, würde der erneuerbare Primärenergie-Anteil der Biomasse wie bisher nur mit dem nicht-erneuerbaren Anteil auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes angerechnet. Für jede Kilowattstunde, um die das Budget überschritten wird, wird dann aber der gesamte Primärenergieinhalt (erneuerbar und nicht erneuerbar) angesetzt. Das Budget wurde beispielsweise durch eine einfache Nebenrechnung durch Division des nachhaltig bereitstellbaren Biomasse-Potenzials in Deutschland durch die Wohnfläche auf rd. 35 kWh/m^{2}a abgeschätzt (Diefenbach 2002).

Die ohnehin komplexe Energiebilanz eines Gebäudes würde dadurch aber noch schwieriger durchschaubar, Plausibilitätsüberlegungen würden deutlich erschwert. Für eine wünschenswerte Energieberatung in der breiten Masse sehen die Autoren dieser Studie daher diesen Ansatz als problematisch an.

9.2 Handelbare Energien

Der Ansatz der handelbaren Energien sieht vor, sowohl regenerative als auch nicht regenerative handelbare Energieträger mit dem Primärenergiefaktor für den gesamten Energieinhalt zu bewerten (Oschatz 2009). Nicht handelbare Energieträger wie Solarstrahlung und Umweltwärme, die unbegrenzt zur Verfügung stehen, würden im Primärenergiebedarf weiterhin unberücksichtigt bleiben.

Durch eine solche Gleichbehandlung würde ein Anreiz zum sparsamen Umgang mit allen handelbaren Energieträgern geschaffen. Die Nebenanforderung der Energieeinsparverordnung an die Wärmedämmqualität des Gebäudes könnte entfallen. Den

Eigentümern und Planern würde die freie Technologiewahl zur Erfüllung der Anforderungen aus der EnEV ermöglicht. Durch diese Gleichbehandlung würde der Einsatz regenerativer Energien allerdings zu einem höheren Primärenergiebedarf als bei Einsatz nicht regenerativer Energien führen. Dies würde den eigentlich wünschenswerten freiwilligen Einsatz regenerativer Energieträger u. U. hemmen. Daher müsste bei der Festlegung der Primärenergiefaktoren der erneuerbare Primärenergieanteil so gewichtet werden, dass ein Anreiz zum Einsatz der erneuerbaren Energien bestehen bleibt. Alternativ könnte statt dieser Gewichtung ein gesetzlich vorgeschriebener Mindestanteil regenerativer Energie ähnlich dem Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz EEWärmeG verordnet werden.

Eine solche völlig neue Anforderungssystematik würde nach Ansicht der Autoren die Akteure am Markt unnötig belasten. Obwohl eine Nebenanforderung an die Wärmedämmqualität von Gebäuden zukünftig entfallen könnte, sind die notwendigen „willkürlichen“ Nebenanforderungen an Mindestanteile von regenerativen Brennstoffen oder Anrechnungsfaktoren für erneuerbare Anteile handelbarer Energieträger nicht geeignet, die derzeitige Systematik zu vereinfachen.

9.3 Wärmeenergiebedarf

Der dritte Ansatz sieht vor, neben der Primärenergie-Forderung zukünftig statt des baulichen Wärmeschutzes von Gebäuden den Wärmeenergiebedarf entsprechend des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes EEWärmeG in einer Nebenanforderung zum maximal zulässigen Primärenergiebedarf eines Gebäudes zu begrenzen. Dies entspricht den Größen Q^*_H und Q^*_{TW} in der DIN 4701-10 bzw. $Q_{h,outg}$, $Q_{h^*,outg}$, $Q_{c,outg}$, $Q_{c^*,outg}$ und $Q_{w,outg}$ der DIN 18599. Der Wärmeenergiebedarf würde ein deutlich größeres Spektrum von Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden berücksichtigen als die bisherige Anforderung an die Wärmedämmqualität. Auch Lüftungswärmerückgewinnung, passive solare Gewinne durch Verglasungen oder Energiesparmaßnahmen in der Heizungsregelung, Wärme- und Warmwasserverteilung sowie -speicherung würden berücksichtigt. Der Primärenergiebedarf könnte dann einfach in relativer Abhängigkeit zum Wärmeenergiebedarf eines Referenzgebäudes festgelegt werden. Im Referenzgebäude der Energieeinsparverordnung müsste keine Technik zur Wärmeerzeugung mehr definiert werden. Über das Verhältnis des maximal zulässigen Primärenergiebedarfs zum maximal zulässigen Wärmeenergiebedarf kann ein gewünschter Anteil regenerativer Energien verordnet werden, ohne bestimmte Technologien zu bevorzugen oder zu verordnen. Der Wärmenergiebedarf muss zum Nachweis des Anteils erneuerbarer Energien nach dem EEWärmeG ohnehin ermittelt werden und stellt somit für die Akteure am Markt keine neue Herausforderung dar. Der Ansatz der Primärenergiefaktoren für den nicht erneuerbaren Anteil könnte beibehalten werden und würde damit die Kontinuität der Anforderungen aus der EnEV unterstützen.

Nachteilig ist hierbei vor allem, dass die nicht handelbaren regenerativen Energien (Umweltwärme, Solarstrahlung) im Wärmeenergiebedarf des Gebäudes keine Berücksichtigung finden und damit für die Nebenanforderung nicht anrechenbar wären. Zudem findet der Hilfsenergiebedarf der Anlagentechnik keinen Niederschlag im Wärmeenergiebedarf eines Gebäudes. Bei linearer Abhängigkeit des Primärenergiebedarfs vom Wärmeenergiebedarf würden somit Einsparungen bei der Hilfsenergie sich wie eine Einsparung von Primärenergie durch erneuerbare Brennstoffe auswirken.

Dennoch wird der Wärmeenergiebedarf als zukünftige Nebenanforderung zum maximal zulässigen Primärenergiebedarf eines Gebäudes von den Autoren insgesamt favorisiert.

9.4 Bewertung auf Emissionsbasis

Abgesehen von der Bewertung der erneuerbaren und fossilen Energieträger mit Primärenergiefaktoren wäre auch die Bewertung auf Emissionsbasis denkbar. Hierfür könnte der nicht erneuerbare Anteil für den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO_2) pro MJ Endenergieträger ausgewiesen werden. Damit würde zum Beispiel Heizöl bzw. Kohle schlechter gestellt als Erdgas. Zudem würden im Gegensatz zum primärenergetischen Ansatz Emissionen aus Abfall berücksichtigt, die bei der Verbrennung freigesetzt werden. Mit diesem Ansatz würden Energieträger mit einem niedrigen CO_2-Ausstoß begünstigt und solche mit einem höheren CO_2-Ausstoß benachteiligt. Vor dem Hintergrund des hohen Einsparpotenzials von CO_2-Emissionen im Wärmebereich würde dieser Ansatz die Klimaschutzziele Deutschlands wirksam unterstützen.

10 Zusammenfassung und Empfehlungen

Aus den obigen Analysen werden sowohl konkrete Primärenergiefaktoren für eine zukünftige Überarbeitung der EnEV (Tabelle 10-1) wie auch eine Überarbeitung der Verfahrensschritte und Berechnungsmethoden vorgeschlagen.

Tabelle 10-1: Zusammenfassende Empfehlung der Primärenergiefaktoren für die untersuchten Energieträger

Energieträger		**Primärenergiefaktor nicht erneuerbar**
Biogene Brennstoffe zur direkten Verfeuerung	**Feste Biomasse:**	
	Holzhackschnitzel und andere feste Biomasse	0,1
	Holzpellets	0,2
	Alternative Vereinfachung: Feste Biomasse	*0,2*
	Biomethan:	
	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude oder KWK-Nutzung	0,4
	Sonst	1,1
	Bioöle:	
	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude und Biomassenachhaltigkeitszertifizierung	0,5
	sonst	1,1
	Alternative Vereinfachung: Biogas, Bioöle	
	bei Nutzung in unmittelbar räumlichen Zusammenhang mit dem Gebäude und Biomassenachhaltigkeitszertifizierung	*0,5*
	sonst	*1,1*
Nah- und Fernwärme aus KWK (erneuerbarer Brennstoff, Abfall) und industrielle Abwärme[3]	100 % KWK[1] bzw. Abwärme	0,1
	70 % KWK[1] bzw. Abwärme	0,5
Nah- und Fernwärme aus Heizwerken (erneuerbarer Brennstoff[5])	100 % erneuerbar[2]	0,2
	70 % erneuerbar[2]	0,6
Gewerbliche Abwärme[3,4]		0,2
Nachrichtlich: Biogas (unaufbereitet für KWK)		0,2

[1] Bei abweichendem KWK-Anteils ist linear zu interpolieren.

[2] Bei abweichenden EE-Anteilen ist linear zu interpolieren.

[3] Bei Abwärmenutzung ist durch einen Sachkundigen zu bestätigen, dass die Abwärmenutzung Teil eines energetischen Gesamtkonzepts darstellt und die prozessinterne Verwendung, Einsparung bzw. Wärmerückgewinnung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich wäre.

[4] Bei Bestätigung einer effizienten Abwärmenutzung durch Sachkundigen gemäß § 2 Abs. 3 EEWärmeG und einer Leistungszahl von mind. 10, die aus dem Verhältnis von der aus der Wärmerückgewinnung stammenden und genutzten Wärme zum Stromeinsatz für den Betrieb der Abwärmenutzung ermittelt wird sowie bei Einhaltung der Anlage IV "Abwärme" Punkt 3 EEWärmeG. PE-Faktor entspricht Faktor für Endenergie bei ortnaher Nutzung; entspricht $f_{P,ext}$ nach FW309-1/3.2.2.

Bei Abwärme aus der Kondensationswärme von Kälteanlagen nur bis max. 50 °C Nutzwärmetemperatur.

[5] Für Abfall wird aufgrund der großen Bandbreite der PE-Faktoren für Nah- und Fernwärme aus Heizwerken ohne KWK und der geringen Relevanz in Deutschland (zwei Anlagen) kein Default-Wert empfohlen. Die PE-Faktoren sind nach dem modifizierten Gutschriftverfahren anlagenspezifisch zu berechnen.

Weitere Empfehlungen

Biomasse

(1) Es wird empfohlen, bei Biomethan und Bioölen die Anforderungen einer Bereitstellung in „räumlicher Nähe“ beizubehalten, um die Vollzugs- und Kontrolldefizite angemessen zu berücksichtigen.
(2) Bei Bioölen ist eine Zertifizierung durch die Biomasse-Nachhaltigkeitsverordnung als Bedingung für die Anwendung des Faktors 0,5 zu machen.
(3) Wenn eine größere Vereinfachung gewünscht wird können Biomethan und Bioöle zu 0,5 zusammengefasst werden.
(4) Bei zukünftig steigenden Anteilen könnte das eingespeiste Biogas – in Analogie zu den steigenden Anteilen erneuerbarer Energieträger im Strommix – mit dem Faktor 0,4 auf den Bundesmix angerechnet werden, nicht jedoch auf den Einzelmix eines Versorgers. Dies ist in Übereinstimmung mit dem Vorgehen der EnEV bzgl. Ökostrom.

KWK

(5) Bei KWK wird die Anwendung des modifizierten Gutschriftverfahrens empfohlen, das den fossilen Spitzenkessel und den Pumpstrom separat bilanziert. Es wird ein Anreiz geschaffen, Effizienzmaßnahmen im Netz (Reduktion der Wärmeverluste, Pumpstrom) zu ergreifen und den fossilen Brennstoffbedarf zu reduzieren.
(6) Als Wert für die Netzverluste wird abweichend von der FW 309 15 % vorgeschlagen.
(7) Außerdem wird empfohlen, PE-Faktoren für 70 und 100 % KWK-Anteil auszuweisen.

Abwärme

(8) Die Nutzung von industrieller und gewerblicher Abwärme zur direkten Beheizung von Gebäuden oder zur Einspeisung in Wärmenetze sollte im Sinne der Reduzierung des Primärenergieverbrauchs und der CO_2-Emissionen erweitert und gefördert werden.
(9) Um möglichem Missbrauch vorzubeugen, empfehlen wir die Einhaltung der nachfolgenden Kriterien für die Verwendung von Pauschalfaktoren vorauszusetzen. Bei Nichterfüllung der Kriterien bzw. Überschreitung der Maximaltemperatur der Abwärmenutzung aus Kälteanlagen muss der Primärenergiefaktor im Einzelfall berechnet werden.
(10) Als Mindestanforderung für die Verwendung der Pauschalfaktoren sollte die Leistungszahl aus dem Verhältnis der aus der Abwärme stammenden und genutzten Wärme zum

Stromeinsatz, der zur Bereitstellung dieser Abwärme erforderlich ist, in Anlehnung an das EEWärmeG mindestens 10 betragen.

(11) Um zu verhindern, dass Abwärmenutzung in Kälteanlagen ohne genauere Betrachtung der Auswirkungen auf die Effizienz des Kälteprozesses betrieben wird, empfehlen wir die Verwendung der Pauschalfaktoren bei Nutzung der Kondensationswärme nur bis zu einer Nutzwärmetemperatur von 50°C zu erlauben.

(12) Zudem sollte seitens des Betreibers des Wärmenetzes mit Abwärme bzw. der Erstellers des EnEV-Nachweises bei unmittelbarer Nutzung gewerblicher Abwärme eine Bestätigung gefordert werden, nach der die Abwärmenutzung Teil eines Gesamtenergiekonzeptes darstellt und die Abwärme des Primärprozesses weder vermieden noch intern rückgewonnen werden kann.

MVA

(13) Wir empfehlen auch bei MVA die Anwendung des modifizierten Gutschriftverfahrens, das den Anteil des Spitzenkessels und des Pumpstroms separat bilanziert und damit einen adäquateren Anreiz zur Ressourcenschonung und eine bessere kausale Zuordnung des wärmebedingten Mehraufwands schafft.

(14) Die in der FW 309 Kap. 4.3 erlaubten Pauschalverfahren insbesondere für die thermische Abfallbehandlungsanlage ohne KWK mit Primärenergiefaktor 0,13 sind als zu niedrig anzusehen.

(15) Auf Grund der großen Bandbreite der Ergebnisse gerade bei Heizwerken ohne KWK empfehlen wir, auf einen Default-Wert zu verzichten.

Weiterentwicklung der EnEV

(16) Derzeit verweist die EnEV bezüglich der Primärenergiefaktoren auf die zur Berechnung des Primärenergiebedarfs herangezogenen Normenwerke DIN V 4701-10 und DIN V 18599-1. Da die in der vorliegenden Studie ermittelten Primärenergiefaktoren teilweise von den Primärenergiefaktoren der genannten Normen abweichen bzw. diese ergänzen, sollten die Primärenergiefaktoren zukünftig in der EnEV selbst festgeschrieben werden.

(17) Das von den Autoren dieser Studie favorisierte modifizierte Gutschriftverfahren zur Berechnung der Primärenergiefaktoren bei KWK entspricht nicht dem Gutschriftverfahren der DIN V 18599-9 und der AGFW Arbeitsblatt FW 309-1. Um unterschiedliche Bewertungssystematiken bei der detaillierten Berechnung von KWK-Anlagen und bei den vorgeschlagenen default-Werten für die Primärenergiefaktoren zu vermeiden, sollte zukünftig eine einheitliches Verfahren in der EnEV zur Bewertung von KWK und Wärmenetzen festgeschrieben werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwischen dem modifizierten Verfahren und dem AGFW-Verfahren m. E. kein Unterschied bei fossilen Anlagen besteht.

(18) Die derzeitige Nebenanforderung der EnEV an den spezifischen Transmissionsverlust H_T' gewährleistet einen schonenden Einsatz regenerativer Brennstoffe nur ungenügend. Die durchaus erheblichen Energiesparpotentiale – oder umgekehrt die Energieverschwendungspotentiale – im Bereich der Lüftung, Luftdichtheit, solaren Gewinnen und effizienter Anlagentechik werden bei niedrigen Primärenergiefaktoren von der Anforderungssystematik der derzeitigen EnEV nicht erfasst. Mögliche Ansätze zur diesbezüglichen Weiterentwicklung der EnEV sind in Kap. 9 diskutiert. Das Projektteam favorisiert eine Nebenanforderung zukünftig basierend auf den Größen Q^*_H und Q^*_{TW} in der DIN V 4701-10 bzw. $Q_{h,outg}$, $Q_{h*,outg}$, $Q_{c,outg}$, $Q_{c*,outg}$ und $Q_{w,outg}$ der DIN V 18599.

11 Literatur

ASUE und ETA (2005) BHKW-Kenndaten 2005,ASUE, Kaiserslautern; Auswertung Herstellerangaben 2009/2010

Carmen (2004) Schriftenreihe Qualitätsmanagement Holzheizwerke. CARMEN e.V. Straubing

Carmen (2009) S. Hiendlmeier, Betriebsdatenvergleich geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke, CARMEN e.V., Straubing

DIN V 4701-10; DIN V 18599-1, EnEV 2009

DLR, IFEU, WI (2004) Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesumweltministeriums. Download www.ifeu.de

FNR (2007) Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und Dr. Hartmann (Hrsg.). Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. 2. vollständig überarbeitete Auflage, März 2007.

IFEU (1999) Naturraumbeanspruchung waldbaulicher Aktivitäten als Wirkungskategorie für Ökobilanzen. Teilbericht im Rahmen des Forschungsvorhabens ökologische Bilanzierung Graphischer Papiere. F+E-Vorhaben 10350120 im Auftrag des Umweltbundesamtes, März 1999

IFEU (2006) Ökobilanzen zu BTL: Eine ökologische Einschätzung. Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Nähere Informationen unter www.ifeu.de

IFEU (2010): Aktualisierte IFEU-Ökobilanzdatenbanken, basierend auf IFEU 2006, DLR et al. 2004, PG Biogas (2008), WI/IFEU (2007).

Netenergie 2010 http://www.netenergie.de/veroeffentlichungen/aber_wie_de.pdf

PG Biogas (2008) Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland, Materialband E. Gefördert vom Bundesumweltministerium. IE Leipzig, Prof. Dr. S. Klinski, Öko-Institut, TU Berlin. Download www.ifeu.de

Ökoinstitut (2010) GEMIS Datenbank Version 4.6, 2010.

Petrák M. (2004) Abwärmenutzung einer Kälteanlage zur Warmwasserbereitung - Erhöhung der Verflüssigungstemperatur. KI Luft- und Kältetechnik 2/2004).

Umberto Datenbank Version 5.5, ifu Hamburg, www.umberto.de;

Vogt R., Fehrenbach H. (2010) Vergleichende ökologische Bewertung der technischen Trocknung von Hackschnitzeln. Im Auftrag des Arbeitskreis Hackschnitzel. Oktober 2010.EnergieAgentur NRW 2010

Wuppertal Institut, IFEU (2007) Sozial-ökologische Bewertung der stationären energetischen Nutzung von importierten Biokraftstoffen am Beispiel von Palmöl. Studie im Auftrag des Bundesumweltministeriums. Wuppertal, Heidelberg

12 Anhang

Tabelle 12-1: Berechnung des Primärenergiefaktors für Scheitholz

Scheitholz					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Scheitholz (Wassergehalt bei Lieferung 40%; nach Lagerung 20%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Waldholz Deutschland					
Kurzbeschreibung: Herstellung Scheitholz; Hi = 14,2 MJ/kg					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Waldpflege und Holzentnahme		0,001	MJ/MJ	Durchschnitt Deutschland	1
Transport		0,010	MJ/MJ	Annahme: 30 km <7,5 t LKW 80% Landstraße, 20% Innerorts	2
Sägen	Kreissäge	0,000	MJ/MJ	Stromverbrauch im Mittel 0,0008 kWh/kg Scheitholz (auch Ketten- oder Bandsäge möglich, dazu aber keine Verbrauchsangaben)	3
Spalten		0,000	MJ/MJ	zu Großteil noch in Handarbeit	3
Transport zum Verbraucher		0,081	MJ/MJ	Annahme: 30 km; durchschnittl. Otto-PKW Deutschland; 80% landstraße, 20% innerorts	
Lufttrocknung		0,000	MJ/MJ	kein Energieaufwand; Trocknung auf WG < 20%	3
Infrastruktur		0,003	MJ/MJ	Annahme: 25 % von Hackschnitzel aus Waldholz	
Summe	**f_P Scheitholz =**	**0,095**			
Beschreibung: Herstellung von Scheitholz aus Derbholz mit einem Ausgangswassergehalt von 40%; Trocknung per sachgerechter Lagerung (regengeschützt, trockener Untergrund, windexponiert, Sonnenseite) erreicht nach etwa 6 Monaten den für die Scheitholzfeuerung geforderten WG unter 20%					
Quellen: 1 IFEU (1999); 2 Umberto (Version 5.5); 3 FNR (2007)					

Tabelle 12-2: Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Altholz

Hackschnitzel aus Altholz					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Holzhackschnitzel (Wassergehalt: 8% bzw. Feuchte: 8,7%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Altholz Deutschland					
Kurzbeschreibung: Herstellung Holzhackschnitzeln aus Altholz; Hi = 16,7 MJ/kg					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Transport		0,010	MJ/MJ	Annahme: 30 km <7,5 t LKW 80% Landstraße, 20% Innerorts	1
Hacken	Hackmaschine	0,005	MJ/MJ	Dieselbedarf Hacker 1,2 l/t	1,2
Transport zum Verbraucher		0,002	MJ/MJ	Annahme: 30 km; durchschnittl. LKW Deutschland; 80% Landstraße, 20% Innerorts	1
Infrastruktur		0,006	MJ/MJ	Annahme: 50 % von Hackschnitzel aus Waldholz	
Summe	**f_P Altholz =**	**0,022**			
Quellen: 1 Umberto (Version 5.5); 2 Vogt, Fehrenbach (2010)					

Tabelle 12-3: Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Industrieholz

Technisch getrocknete Hackschnitzel aus Industrieholz					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Holzhackschnitzel (Wassergehalt: 8% bzw. Feuchte: 8,7%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Holzindustrie Deutschland					
Kurzbeschreibung: Herstellung techn. getrockn. Holzhackschnitzeln; Hi = 16,7 MJ/kg					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Hacken	Hackmaschine	0,005	MJ/MJ	Dieselbedarf Hacker 1,2 l/t	1,2
Trocknung	Wärmenutzung			0,9 kWh/kg Brennstoff	2
	V1 - Holz Kessel	0,023	MJ/MJ	maßgebend, Annahme: PE-Faktor Holz 0,1	
	V2 - Erdgas H Kessel	*0,251*	*MJ/MJ*		
	V3 - Abwärme aus KWK (fossil)	*0,136*	*MJ/MJ*		
	V4 - Abwärme aus KWK (erneuerbar)	*0,000*	*MJ/MJ*		
	Strom Gebläse	0,022	MJ/MJ	0,04 kWh/kg Brennstoff; Annahme Strommix D 2008	2
Transport zum Verbraucher		0,002	MJ/MJ	Annahme: 30 km; durchschnittl. LKW Deutschland; 80% Landstraße, 20% Innerorts	1
Infrastruktur		0,008	MJ/MJ	Annahme: 75 % von Hackschnitzel aus Waldholz	
Summe	**f_P Hackschnitzel =**	**0,061**			
Beschreibung: Herstellung von technisch getrockneten Holzhackschnitzeln aus Industrieholz mit einem Ausgangswassergehalt von 40%; Trocknung per Satztrockner					
Quellen: 1 Umberto (Version 5.5); 2 Vogt, Fehrenbach (2010)					

Tabelle 12-4: Berechnung des Primärenergiefaktors für Hackschnitzel aus Waldrestholz

Technisch getrocknete Hackschnitzel aus Waldrestholz					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Holzhackschnitzel (Wassergehalt: 8% bzw. Feuchte: 8,7%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Waldrestholz Deutschland					
Kurzbeschreibung: Herstellung techn. getrockn. Holzhackschnitzeln; Hi = 16,7 MJ/kg					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Waldpflege und Holzentnahme		0,001	MJ/MJ	Durchschnitt Deutschland	1
Transport		0,010	MJ/MJ	Annahme: 30 km <7,5 t LKW 80% Landstraße, 20% Innerorts	2
Hacken	mobile Hackmaschine	0,005	MJ/MJ	Dieselbedarf Hacker 1,2 l/t	2,3
Trocknung	Wärmenutzung			0,9 kWh/kg Brennstoff	3
	V1 - Holz Kessel	0,023	MJ/MJ	maßgebend, Annahme: PE-Faktor Holz 0,1	
	V2 - Erdgas H Kessel	*0,251*	*MJ/MJ*		
	V3 - Abwärme aus KWK (fossil)	*0,136*	*MJ/MJ*		
	V4 - Abwärme aus KWK (erneuerbar)	*0,000*	*MJ/MJ*		
	Strom Gebläse	0,022	MJ/MJ	0,04 kWh/kg Brennstoff; Annahme Strommix D 2008	3
Transport zum Verbraucher		0,002	MJ/MJ	Annahme: 30 km; durchschnittl. LKW Deutschland; 80% Landstraße, 20% Innerorts	2
Infrastruktur		0,011	MJ/MJ		4
Summe	**f_P Hackschnitzel =**	**0,074**			
Beschreibung: Herstellung von technisch getrockneten Holzhackschnitzeln aus Derbholz mit einem Ausgangswassergehalt von 40%; Trocknung per Satztrockner					
Quellen: 1 IFEU (1999); 2 Umberto (Version 5.5); 3 Vogt, Fehrenbach (2010); 4 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-5: Berechnung des Primärenergiebedarfs für Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Technisch getrocknete Hackschnitzel aus KUP					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Holzhackschnitzel (Wassergehalt: 8% bzw. Feuchte: 8,7%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: KUP Deutschland					
Kurzbeschreibung: Herstellung techn. getrockn. Holzhackschnitzeln; Hi = 16,7 MJ/kg					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Anbau	Düngemitteleinsatz, Kalkung	0,028	MJ/MJ		1
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,017	MJ/MJ		1
	Sonstiges	0,000	MJ/MJ		1
Transport		0,006	MJ/MJ	20 km Durchschnittsentfernung	1
Hacken		0,000	MJ/MJ		1
	Bereitstellung von KUP-Hackschnitzeln			50% Wassergehalt; Hi = 8,0 MJ/kg FM (18,5 MJ/kg TM)	
Trocknung	Wärmenutzung			0,9 kWh/kg Brennstoff	3
	V1 - Holz Kessel	0,024	MJ/MJ	maßgebend, Annahme: PE-Faktor Holz 0,1	
	V2 - Erdgas H Kessel	*0,259*	*MJ/MJ*		
	V3 - Abwärme aus KWK (fossil)	*0,140*	*MJ/MJ*		
	V4 - Abwärme aus KWK (erneuerbar)	*0,000*	*MJ/MJ*		
	Strom Gebläse	0,023	MJ/MJ	0,04 kWh/kg Brennstoff; Annahme Strommix D 2008	3
Transport zum Verbraucher		0,003	MJ/MJ	Annahme: 30 km; durchschnittl. LKW Deutschland; 80% Landstraße, 20% Innerorts	2
Infrastruktur		0,011	MJ/MJ		4
Summe	**f_P Hackschnitzel =**	**0,112**			
Beschreibung: Herstellung von technisch getrockneten Holzhackschnitzeln aus KUP mit einem Ausgangswassergehalt von 50%; Trocknung per Satztrockner					
Quellen: 1 IFEU (2010); 2 Umberto (Version 5.5); 3 Vogt, Fehrenbach (2010); 4 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-6: Berechnung des Primärenergiefaktors für Holzpellets aus Waldrestholz

Technisch getrocknete Holzpellets aus Waldrestholz					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Holzpellet (Wassergehalt: 8% bzw. Feuchte: 8,7%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Waldrestholz Deutschland					
Kurzbeschreibung: Herstellung Holzpellets; Hi = 16,7 MJ/kg					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Waldpflege und Holzentnahme		0,001	MJ/MJ	Durchschnitt Deutschland	1
T1 - Transport		0,021	MJ/MJ	Annahme: 100 km; 14-20 t LKW 20% BAB, 60% Landstraße, 20% Innerorts	2
T2 -Transport		*0,396*	*MJ/MJ*	*Annahme: Transport des Rohmaterials per Frachtschiff aus Kanada*	
Hacken	mobile Hackmaschine	0,005	*MJ/MJ*	Dieselbedarf Hacker 1,2 l/t	2,3
Trocknung	Wärmenutzung			0,9 kWh/kg Brennstoff	3
	V1 - Holz Kessel	0,023	MJ/MJ	maßgebend, Annahme: PE-Faktor Holz 0,1	
	V2 - Erdgas H Kessel	*0,251*	*MJ/MJ*		
	V3 - Abwärme aus KWK (fossil)	*0,136*	*MJ/MJ*		
	V4 - Abwärme aus KWK (erneuerbar)	*0,000*	*MJ/MJ*		
	Strom Antrieb + Gebläse	0,014	MJ/MJ	0,025 kWh/kg Brennstoff; Annahme Strommix D 2008	3
Mahlen und Pressen	Strom	0,058	MJ/MJ	(0,03+0,075) kWh/kg Brennstoff; Annahme Strommix D 2008	3
Transport zum Verbraucher		0,009	MJ/MJ	Annahme: 100 km; durchschnittl. Lkw Deutschland; 20% BAB, 60% Landstraße, 20% Innerorts	2
Infrastruktur		0,013	MJ/MJ		4
Summe	**f_P Holzpellets,T1 =** ***f_P Holzpellets,T2 =***	**0,144** ***0,519***		**Rohmaterial aus Deutschland** **Rohmaterial aus Kanada**	
Beschreibung: Herstellung von Holzpellets aus Derbholz mit einem Ausgangswassergehalt von 40%; Trocknung per Bandtrockner					
Quellen: 1 (IFEU 1999); 2 Umberto (Version 5.5); 3 Vogt, Fehrenbach (2010); 4 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-7: Berechnung des Primärenergiefaktors für Holzpellets aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Technisch getrocknete Holzpellets aus KUP					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Holzpellet (Wassergehalt: 8% bzw. Feuchte: 8,7%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: KUP Deutschland					
Kurzbeschreibung: Herstellung Holzpellets; Hi = 16,7 MJ/kg					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Anbau	Düngemitteleinsatz, Kalkung	0,028	MJ/MJ		4
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,017	MJ/MJ		4
	Sonstiges	0,000	MJ/MJ		4
Transport		0,006	MJ/MJ	20 km Durchschnittsentfernung	4
Hacken		0,000	MJ/MJ		4
	Bereitstellung von KUP-Hackschnitzeln			50% Wassergehalt; Hi = 8,0 MJ/kg FM (18,5 MJ/kg TM)	
Trocknung	Wärmenutzung			0,9 kWh/kg Brennstoff	3
	V1 - Holz Kessel	0,024	MJ/MJ	maßgebend, Annahme: PE-Faktor Holz 0,1	
	V2 - Erdgas H Kessel	*0,259*	*MJ/MJ*		
	V3 - Abwärme aus KWK (fossil)	*0,140*	*MJ/MJ*		
	V4 - Abwärme aus KWK (erneuerbar	*0,000*	*MJ/MJ*		
	Strom Antrieb + Gebläse	0,014	MJ/MJ	0,025 kWh/kg Brennstoff; Annahme Strommix D 2008	3
Mahlen und Pressen	Strom	0,060	MJ/MJ	(0,03+0,075) kWh/kg Brennstoff; Annahme Strommix D 2008	3
Transport zum Verbraucher		0,009	MJ/MJ	Annahme: 100 km; durchschnittl. Lkw Deutschland; 20% BAB, 60% Landstraße, 20% Innerorts	2
Infrastruktur		0,013	MJ/MJ		1
Summe	**f_P Holzpellets =**	**0,172**			
Beschreibung: Herstellung von Holzpellets aus KUP mit einem Ausgangswassergehalt von 50%; Trocknung per Bandtrockner					
Quellen: 1 Ökoinstitut (2010); 2 Umberto (Version 5.5); 3 Vogt, Fehrenbach (2010); 4 IFEU (2010)					

Tabelle 12-8: Berechnung des Primärenergiefaktors für Stroh

Stroh					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Stroh (Wassergehalt: 15%) frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Umkreis von ca. 30 km der Feuerungsanlage					
Kurzbeschreibung: Bereitstellung von Stroh					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Bereitstellung	Nährstoffentzug	0,016	MJ/MJ		1
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,005	MJ/MJ		1
Transport		0,003	MJ/MJ	20 km Durchschnittsentfernung	1
Verarbeitung	Abladen	0,000	MJ/MJ	(Dieselverbrauch Frontlader)	1
Infrastruktur		0,006	MJ/MJ	Annahme: 50 % von Hackschnitzel aus Waldrestholz	
Summe	**f_P Stroh =**	**0,030**			
Quellen: 1 IFEU (2010)					

Tabelle 12-9: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biomethan aus Maissilage

Biomethan (Mais)					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Biomethan frei Endkunde, aus Biogas-Anlage entsprechend 500 kW_{el} mit Aufbereitung und Einspeisung					
Rohstoffherkunft: Maissilage; Umkreis von ca. 30 km der Biogasanlage					
Kurzbeschreibung: Erzeugung von Biomethan aus Maissilage und Einspeisung in MD-Gasnetz					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Maisanbau	Düngemitteleinsatz	0,090	MJ/MJ		1
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,030	MJ/MJ		1
	Sonstiges	0,010	MJ/MJ		1
Transport		0,010	MJ/MJ	20 km Durchschnittsentfernung	1
Biogasanlage		0,280	MJ/MJ	umfasst Strom- und Wärmebedarf für Fermenter, Aufbereitung und Kompression, typ. Wert für eine Anlage mit DWW,Einspeisung in MD-Gasnetz	1
Gutschrift Düngemittel		-0,070	MJ/MJ		1
Infrastruktur		0,010			2
Summe	**f_P Biomethan =**	**0,360**			
Quellen: 1 IFEU (2010); 2 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-10: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biogas aus Gülle

Biogas Gülle					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Biogas im Biogas-BHKW 100 kW					
Rohstoffherkunft: Rindergülle					
Kurzbeschreibung: Erzeugung von Biogas aus Gülle					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Gülle	Substrat-Bereitstellung	0,012	MJ/MJ		1
Biogasanlage		0,222	MJ/MJ	Transport Gärrest, Landmaschinen	1
Differenz Düngewirkung und Transport zu Gülledirektausbringung		-0,104	MJ/MJ		1
Infrastruktur		0,023	MJ/MJ		2
Summe	**f_P Biogas Gülle =**	**0,153**			
Quellen: 1 IFEU (2010); 2 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-11: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biogas aus Maissilage

Biogas Mais					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Biogas im Biogas-BHKW 500 kW					
Rohstoffherkunft: Maissilage, Umkreis von ca. 30 km der Biogasanlage					
Kurzbeschreibung: Erzeugung von Biogas aus Maissilage					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Maisanbau	Düngemitteleinsatz	0,082	MJ/MJ		1
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,029	MJ/MJ		1
	Sonstiges	0,006	MJ/MJ		1
Transport		0,007	MJ/MJ	20 km Durchschnittsentfernung	1
Biogasanlage		0,119	MJ/MJ		1
Gutschrift Düngemittel		-0,060	MJ/MJ		1
Infrastruktur		0,006	MJ/MJ		2
Summe	**f_P Biogas Mais =**	**0,190**			
Quellen: 1 IFEU (2010); 2 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-12: Berechnung des Primärenergiefaktors für Rapsöl

Rapsöl					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Rapsöl frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Landwirtschaft					
Kurzbeschreibung: Herstellung Rapsöl durch Raffination aus Raps					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Rapsanbau	Düngemitteleinsatz	0,160	MJ/MJ	Rapsertrag 3,5 t/(ha·a)	1
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,040	MJ/MJ		1
	Sonstiges	0,010	MJ/MJ		1
	Trocknung, Lagerung, Kühlung	0,030	MJ/MJ		1
Transport	Anlieferung Rapssaat	0,010	MJ/MJ		1
Verarbeitung	Pressung und Extraktion	0,060	MJ/MJ	Rapsschrot-Ertrag 2048 kg/(ha·a)	1
	Raffination	0,010	MJ/MJ		1
Transport	Rapsöl	0,010	MJ/MJ	Rapsöl-Ertrag 1347 kg/(ha·a)	1
Infrastruktur		0,002	MJ/MJ		2
Summe	**f_P Rapsöl =**	**0,332**			
Quellen: 1 IFEU (2010); 2 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-13: Berechnung des Primärenergiefaktors für Biodiesel aus Raps

Biodiesel (Raps)					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Biodiesel frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Raps Landwirtschaft					
Kurzbeschreibung: Herstellung Biodiesel durch Veresterung von Rapsöl in Biodiesel					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Rapsanbau	Düngemitteleinsatz	0,150	MJ/MJ	Rapsertrag 3,5 t/(ha·a)	1
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,040	MJ/MJ		1
	Sonstiges	0,010	MJ/MJ		1
	Trocknung, Lagerung, Kühlung	0,020	MJ/MJ		1
Transport	Anlieferung Rapssaat	0,010	MJ/MJ		1
Verarbeitung	Pressung und Extraktion	0,050	MJ/MJ	Rapsschrot-Ertrag 2048 kg/(ha·a)	1
	Raffination	0,010	MJ/MJ		1
	Umesterung	0,180	MJ/MJ	Glyzerin-Ertrag 125 kg/(ha·a)	1
Transport	RME	0,010	MJ/MJ	RME-Ertrag 1334 kg/(ha·a)	1
Infrastruktur		0,003	MJ/MJ		2
Summe	**f_P Biodiesel =**	**0,483**			
Quellen: 1 IFEU (2010); 2 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-14: Berechnung des Primärenergiefaktors für Palmöl

Palmöl					
Funktionelle Einheit: 1 MJ Hi Palmöl frei Endkunde					
Rohstoffherkunft: Palmöl aus Südostasien, Anbau gemäß Vorgaben Biomasse-NachhaltigkeitsVO					
Kurzbeschreibung: Herstellung Palmkernöl aus Kernels von Plantagen in Südostasien					
Prozessschritt	**Subschritte**	**PE nicht-erneuerbar**		**Erläuterung**	**Quelle**
Anbau	Düngemitteleinsatz	0,059	MJ/MJ	Palmölertrag 3,5 t/ha/a	1
	Dieselverbrauch Landmaschinen	0,064	MJ/MJ		1
	Sonstiges	0,028	MJ/MJ		1
Verarbeitung	Transport und Verarbeitung der Kernels	0,009	MJ/MJ		
Transport		0,052	MJ/MJ	Transport Südostasien - Europa	1
Verarbeitung	Raffinierung	0,013	MJ/MJ	findet in Europa statt	1
Transport		0,005	MJ/MJ	Transport zum Verbraucher	1
Gutschrift Nebenprodukte	Cake aus Kernels	-0,024	MJ/MJ	Cake als Tierfutter, Palmkernöl als Brennstoff	1
Infrastruktur		0,003	MJ/MJ		2
Summe	**f_P Palmöl =**	**0,209**			
Quellen: 1 IFEU (2010); 2 Ökoinstitut (2010)					

Tabelle 12-15: Berechnung von Primärenergiefaktoren für Fernwärme für drei ausgewählte Müllheizkraftwerke unterschiedlicher Effizienz nach dem Gutschriftverfahren nach AGFW FW 309-1, nach dem modifizierten Gutschriftverfahren und dem Allokationsverfahren auf Exergiebasis (Eingabefelder sind rot hinterlegt).

Abschnitt 1: Eingabe und Bilanzierung			**Müllheizkraftwerke**		
Parameter	**Einheit**	**Formelzeichen**	**MHKW 1**	**MHKW 2**	**MHKW 3**
Abfallmenge	Mg/a	m_{Abf}	112.288	139.775	76.000
Heizwert Abfall	GJ/Mg	$H_{i,Abf}$	-	10,9	9,6
Brennstoffwärme KWK (Abfall)	MWh/a	$W_{Br,KWK,1}$	327.508	423.208	202.667
Fossiler Energieträger (Stützfeuer)	-	-	HEL/Gas	HEL	Gas
Menge fossiler Energieträger (Stützfeuer)	Mg/a	m_{fossil}	-	502	-
Heizwert fossiler Energieträger (Stützfeuer)	GJ/Mg	$H_{i,fossil}$	-	43	-
Brennstoffwärme KWK fossil (Stützfeuer)	MWh/a	$W_{Br,KWK,2}$	9.414	5.996	10.755
Fossiler Energieträger (Spitzenk.)	-	-	Gas	Gas	Gas
Brennstoffwärme fossil (Spitzenk.) für 90 % KWK	MWh/a	$W_{Br,foss}$	6.000	15.800	6.500
Stromerzeugung KWK	MWh/a	$A_{Bne,KWK}$	42.652	34.956	11.200
mittlere elektrische Leistung KWK	MW	P_{el}	5,7	4,7	1,5
Stromverbrauch Heiznetz (1,5 % von Q_{Bne})	MWh/a	A_{HN}	767	2.013	830
Eigenverbrauch MVA	MWh/a	A_{MVA}	134	12.876	612
el. Nutzungsgrad KWK (netto)	%	η_{el}	12,7	8,1	5,2
Wärmeerzeugung KWK	MWh/a	$Q_{Bne,KWK}$	46.000	120.800	49.800
mittlere Wärmeleistung KWK	MW	$Q_{Bne,KWK}$	6,1	16,1	6,6
Anteil Spitzenkessel $Q_{Bne,foss}$ bezogen auf Q_{Bne}	-	-	0,10	0,10	0,10
Wärmeerzeugung gesamt	MWh/a	Q_{Bne}	51.100	134.230	55.325
th. Nutzungsgrad KWK (brutto)	%	η_{th}	13,7	28,1	23,3
Wärmeenergieverbrauch (15 % - Heiznetz-Verluste)	MWh/a	Q_{FW}	43.435	114.096	47.026
Deckungsanteil KWK	%	-	0,90	0,90	0,90
Carnot-Faktor (tm = 80 °C)	-	η_{Carnot}	0,17	0,17	0,17
Energiequalitätsgrad Strom	-	ζ_{el}	1,00	1,00	1,00
Energiequalitätsgrad Wärme	-	ζ_{th}	0,17	0,17	0,17
Exergieallokationsfaktor	-	ε_{el}	0,85	0,63	0,57

Abschnitt 1: Eingabe und Bilanzierung			**Müllheizkraftwerke**											
Parameter	**Einheit**	**Formel-zeichen**	**MHKW 1**				**MHKW 2**				**MHKW 3**			
Strom														
Exergieallokationsfaktor Wärme	-	ε_{th}	0,15				0,37				0,43			
PE KWK (Abfall)	MWh/a	$PE_{KWK,1}$	9.825				12.696				6.080			
PE KWK fossil (Stützfeuer)	MWh/a	$PE_{KWK,2}$	10.355				6.596				11.831			
Wärmanteil PE KWK	MWh/a	$PE_{th,KWK}$	3.126				7.139				7.710			
Stromanteil PE KWK	MWh/a	$PE_{el,KWK}$	17.054				12.153				10.201			
PE fossil (Spitzenk.)	MWh/a	PE_{foss}	6.600				17.380				7.150			
Wärmanteil PE fossil (Spitzenk.)	MWh/a	$PE_{th,foss}$	6.600				17.380				7.150			
PE Pumpstrom (Strombezug aus Netz)	MWh/a	$PE_{HN,bez}$	1.993				5.235				2.158			
PE Pumpstrom (Strombezug aus KWK)	MWh/a	$PE_{HN,KWK}$	306				700				756			
Abschnitt 2: PE-Faktoren und Ergebnisse			**Methode[1]**				**Methode[1]**				**Methode[1]**			
Parameter	**Einheit**	**Formel-zeichen**	**GS**	**m. GS**	**Allo-kat.**	**Kap 4.3**	**GS**	**m. GS**	**Allo-kat.**	**Kap 4.3**	**GS**	**m. GS**	**Allo-kat.**	**Kap 4.3**
PE-Faktor Abfall, **Fern-transport 500 km**	-	$f_{P,KWK}$	0,03	0,03	0,03	-	0,03	0,03	0,03	-	0,03	0,03	0,03	-
PE-Faktor el. Strom	-	$f_{P,bez}$	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
PE-Faktor des verdrängten Stroms	-	$f_{P,verdr}$	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
PE-Faktor fossil HEL/Erdgas	-	$f_{P,foss}$	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
PE-Faktor KWK Strom	-	$f_{P,KWK-Strom}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,9	0,9	0,9	0,9
PE-Faktor KWK	-	$f_{P,ext,KWK}$	-	-2,5	-	-	-	-0,8	-	-	-	-0,33	-	-
PE-Faktor KWK, gew.	-	$f_{P,ext,KWK,gew}$	-	0,0	-	-	-	0,0	-	-	-	0,00	-	-
Primärenergiefaktor Fernwärme, 90 % KWK	**-**	$\mathbf{f_{P,FW}}$	**-2,28**	**0,20**	**0,23**	**0,00**	**-0,54**	**0,20**	**0,22**	**0,00**	**-0,13**	**0,20**	**0,33**	**0,00**

[1] GS = Gutschriftverfahren, m.GS = modifiziertes Gutschriftverfahren, Allokat. = Allokationsverfahren auf Exergiebasis

Tabelle 12-16: Berechnung von Primärenergiefaktoren für Fernwärme für zwei ausgewählte Müllheizwerke unterschiedlicher Effizienz nach dem Berechnungsverfahren gemäß AGFW FW 309-1 Kapitel 4.1 (Eingabefelder sind rot hinterlegt).

Abschnitt 1: Eingabe und Bilanzierung			**Müllheizwerke**	
Parameter	**Einheit**	**Formel-zeichen**	**MHW 1**	**MHW 2**
Abfallmenge	Mg/a	m_{Abf}	323.400	120.000
Heizwert Abfall	GJ/Mg	$H_{i,Abf}$	9,2	9,0
Brennstoffwärme (Abfall)	MWh/a	$W_{Br,KWK,1}$	826.467	300.000
Fossiler Energieträger (Stützfeuer)	-	-	HEL	HEL/Gas
Menge fossiler Energieträger (Stützfeuer)	Mg/a	m_{fossil}	1.137	-
Heizwert fossiler Energieträger (Stützfeuer)	GJ/Mg	$H_{i,fossil}$	43	-
Brennstoffwärme fossil (Stützfeuer)	MWh/a	$W_{Br,KWK,2}$	13.581	24.500
Fossiler Energieträger (Spitzenk.)	-	-	Gas	Gas
Brennstoffwärme fossil (Spitzenk. 10 %)	MWh/a	$W_{Br,foss}$	88.000	9.200
Stromverbrauch Heiznetz (1,5 % von Q_{Bne})	MWh/a	A_{HN}	11.172	1.167
Eigenverbrauch MVA	MWh/a	A_{MVA}	30.634	17.000
Wärmeerzeugung	MWh/a	$Q_{Bne,KWK}$	670.000	70.000
mittlere Wärmeleistung	MW	$Q_{Bne,KWK}$	89,3	9,3
Anteil Spitzenkessel $Q_{Bne,foss}$ bezogen auf Q_{Bne}	-	-	0,100	0,100
Wärmeerzeugung gesamt	MWh/a	Q_{Bne}	744.800	77.820
th. Nutzungsgrad (brutto)	%	η_{th}	79,8	21,6
Wärmeenergieverbrauch (15 % - Heiznetz-Verluste)	MWh/a	Q_{FW}	633.080	66.147
Abschnitt 2: PE-Faktoren und Ergebnisse			**Methode**	**Methode**
Parameter	**Einheit**	**Formel-zeichen**	**gem. AGFW Kap. 4.1**	**gem. AGFW Kap. 4.1**
PE-Faktor Abfall, **Ferntransport 500 km**	-	$f_{P,KWK}$	0,030	0,030
PE-Faktor el. Strom	-	$f_{P,bez}$	2,6	2,6
PE-Faktor des verdrängten Stroms	-	$f_{P,verdr}$	3,0	3,0
PE-Faktor fossil HEL/Erdgas	-	$f_{P,foss}$	1,1	1,1
Primärenergiefaktor Fernwärme, 10 % Spitzenkessel	**-**	**$f_{P,FW}$**	**0,39**	**1,41**