



DBFZ Report Nr. 2

Methodische Vorgehensweise zur Standort- identifikation und Planung der Biomassebereit- stellung für Konversionsanlagen am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen

Michael Seiffert

**Methodische Vorgehensweise zur Standortidentifikation
und Planung der Biomassebereitstellung für Konversionsanlagen
am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Michael Seiffert

aus

Neumühle/Elster

2010

Gutachter

Prof. Dr. Ing. Martin Kaltschmitt

Prof. Dr. Ing. Heike Flämig

Tag der mündlichen Prüfung

19.11.2010

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielstellung.....	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Biomassebereitstellung	6
2.1 Grundlagen der Logistik.....	6
2.2 Abgrenzung der Biomassebereitstellung.....	6
2.2.1 Definition der Bereitstellungsprozesse.....	6
2.2.2 Definition der Bereitstellungsobjekte.....	8
2.3 Aufbau und Struktur der Biomassebereitstellung	8
2.3.1 Ernte und Verfügbarmachung	9
2.3.2 Lagerung.....	11
2.3.3 Aufbereitung.....	13
2.3.4 Umschlag.....	15
2.3.5 Transport	16
3 Grundlagen der Standortidentifikation und Planung der Biomassebereitstellung	19
3.1 Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen.....	19
3.1.1 Aufgaben der Standortidentifikation.....	19
3.1.2 Bewertungsverfahren	20
3.2 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung.....	21
3.2.1 Aufgaben der Planung von Bereitstellungssystemen.....	22
3.2.2 Modelle zur Planung logistischer Systeme	22
3.3 Optimierung der Biomassebereitstellung	23
3.3.1 Aufgaben der Optimierung von Bereitstellungssystemen.....	24
3.3.2 Optimierungsverfahren.....	24
3.4 Stand des Wissens	25
3.4.1 Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen.....	25
3.4.2 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung.....	26
3.4.3 Optimierung der Biomassebereitstellung	27
4 Methodische Vorgehensweise	28
4.1 Methodischer Gesamtansatz.....	28
4.2 Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen.....	29
4.2.1 Konversionsanlagenspezifische Analyse der Standortfaktoren	30
4.2.2 Aufbau des Standortanforderungsprofils	31
4.2.3 Regionale Einordnung.....	32
4.2.4 Lokale Einordnung	34
4.3 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung.....	34
4.3.1 Identifikation und Auswahl von Bereitstellungskonzepten	36

4.3.2	Festlegung der Randbedingungen Raum, Zeit und Technik	36
4.3.3	Dimensionierung der Bereitstellungskonzepte.....	37
4.3.4	Bewertung und Ableitung logistisch effizienter Bereitstellungskonzepte	40
4.4	Optimierung der Biomassebereitstellung	42
4.4.1	Festlegung der Zielkriterien	43
4.4.2	Festlegung der Nebenbedingungen	44
4.4.3	Bestimmung der Bewertungskenngrößen	47
4.4.4	Bestimmung der Zielmarken	47
4.4.5	Ableitung optimaler Bereitstellungskonzepte	48
5	Fallbeispiele	50
5.1	Referenzanlagen	50
5.1.1	Konversionsanlagen	50
5.1.2	Brennstoffanforderungen	51
5.2	Standortidentifikation für Bio-SNG-Anlagen	52
5.2.1	Datengrundlage	53
5.2.2	Durchführung der Standortidentifikation	55
5.2.3	Ergebnisse	58
5.2.4	Fazit.....	62
5.3	Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung.....	63
5.3.1	Datengrundlage	63
5.3.2	Durchführung der Planung des Materialflusses	71
5.3.3	Ergebnisse	77
5.3.4	Fazit.....	81
5.4	Optimierung der Biomassebereitstellung	82
5.4.1	Datengrundlage	82
5.4.2	Durchführung der Optimierung.....	84
5.4.3	Ergebnisse	86
5.4.4	Fazit.....	92
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	94
	Literatur- und Referenzverzeichnis	99
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	108
	Anhang	116
A.1	Begriffsdefinitionen.....	116
A.2	Bio-SNG Produktion.....	118
A.3	Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen	119
A.4	Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung.....	127
A.5	Optimierung der Biomassebereitstellung	147

Symbolverzeichnis

Variable	Einheit	Bedeutung
$x_{AB,iab}, x_{AB,jab}$	t_{atro}/a	Menge an Biomasse, die durch Aufbereitungsvariante ab am Ort i oder j aufbereitet wird
$x_{E,ie}, x_{E,je}$	t_{atro}/a	Menge an Biomasse, die durch Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e am Ort i oder j geerntet bzw. verfügbar gemacht wird
$x_{L,il}, x_{L,jl}$	t_{atro}/a	Menge an Biomasse, die im Lager der Lagervariante l am Ort i oder j eingelagert wird
$x_{T,ijt}$	t_{atro}/a	Menge an Biomasse, die von i nach j durch die Transportvariante t transportiert wird
$x_{T,ijte}$	t_{atro}/a	Menge an Biomasse, die von i nach j bei Beladung mit der Erntevariante e durch Transportvariante t transportiert wird
$x_{U,iu}, x_{U,ju}$	t_{atro}/a	Menge an Biomasse, die durch Umschlagsvariante u am Ort i oder j umgeschlagen wird
$y_{AB,iab}, y_{AB,jab}$	-	Anzahl an Aufbereitungsmaschinen der Aufbereitungsvariante ab , die am Ort i oder j eingesetzt werden
$y_{E,ie}, y_{E,je}$	-	Anzahl an Ernte- bzw. Verfügbarmachungsmaschinen der Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e , die am Ort i oder j eingesetzt werden
$y_{L,il}, y_{L,jl}$	-	Anzahl an Lagern der Lagervariante l am Ort i oder j
$y_{T,ijt}$	-	Anzahl an Fahrzeugen der Transportvariante t , die zwischen i und j eingesetzt werden
$y_{T,ijte}$	-	Anzahl an Fahrzeugen der Transportvariante t , die zwischen i und j bei der Ernte mit Erntevariante e eingesetzt werden
$y_{U,iu}, y_{U,ju}$	-	Anzahl an Umschlagsmaschinen der Umschlagsvariante u am Ort i oder j
Konstante	Einheit	Bedeutung
a	km	Seitenlänge eines Quadrates
$a_{A,i}, a_{A,j}$	km	Seitenlänge der Einzugsfläche des Lagers am Ort i

		oder j
a_{Ages}	km	Seitenlänge der zur Versorgung der Anlage notwendigen quadratischen Gesamtfläche
A_{ges}	km ²	Gesamtfläche des zur Versorgung der Anlage notwendigen Einzugsgebietes
A_{US}	km ²	Gesamtfläche des Einzugsgebietes an einem Umschlagsstandort
c_{ABges}	€/t _{atro}	Gesamtkosten der Aufbereitung
$c_{AB,iab}, c_{AB,jab}$	€/t _{atro}	variable Aufbereitungskosten bei Einsatz der Aufbereitungsvariante ab am Ort i oder j
c_{Eges}	€/t _{atro}	Gesamtkosten der Ernte- bzw. Verfügbarmachung
$c_{E,ie}, c_{E,je}$	€/t _{atro}	variable Erntekosten bei Einsatz der Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e am Ort i oder j
c_{Lges}	€/t _{atro}	Gesamtkosten der Lagerung
$c_{L,il}, c_{L,jl}$	€/t _{atro}	variable Lagerkosten der Lagervariante l am Ort i oder j
c_{Tges}	€/t _{atro}	Gesamtkosten des Transportes
$c_{T,ijte}$	€/t _{atro}	variable Transportkosten der Transportvariante t von Ort i nach j bei Beladung durch die Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e
c_{Uges}	€/t _{atro}	Gesamtkosten des Umschlags
$c_{U,iu}, c_{U,ju}$	€/t _{atro}	variable Umschlagskosten bei Einsatz der Umschlagsvariante u am Ort i oder j
$h_{AB,hiab}, h_{AB,hjab}$	kg/h	Menge an Emission h bei Einsatz der Aufbereitungsvariante ab am Ort i oder j
$h_{E,hie}, h_{E,hje}$	kg/h	Menge an Emission h bei Einsatz der Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e am Ort i oder j
$h_{L,hil}, h_{L,hjl}$	kg/t _{atro}	Menge an Emission h bei Einsatz der Lagervariante l am Ort i oder j
$h_{T,hijte}$	kg/t _{atro}	Menge an Emission h der Transportvariante t beim Transport von Ort i nach j bei Beladung mit der Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e

$h_{U,hiu}, h_{U,hju}$	kg/t _{atro}	Menge an Emission h bei Einsatz der Umschlagsvariante u am Ort i oder j
$k_{i,j}$	-	Anzahl von Last- bzw. Leerfahrten zwischen Ort i und j
$m_{ABges,iab}, m_{ABges,jab}$	t _{atro} /a	maximale jährliche Aufbereitungsmenge der Aufbereitungsvariante ab am Ort i oder j
$m_{Eges,ie}, m_{Eges,je}$	t _{atro} /a	maximale jährliche Ernte- bzw. Verfügbarmachungsmenge der Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e am Ort i oder j
$m_{F,i}, m_{F,j}$	t _{atro} /a	jährliche Menge an Biomasse, die am Ort i oder j zur Verfügung steht
m_{KVA}	t _{atro} /a	Brennstoffbedarf einer Konversionsanlage an Holzhackschnitzeln auf Basis absolut trocken
$m_{L,i}, m_{L,j}$	t _{atro}	Menge der Biomasse, die am Ort i oder j gelagert wird
$m_{Lges,il}, m_{Lges,jl}$	t _{atro} /a	maximale jährliche Lagermenge der Lagervariante l am Ort i oder j
m_T	t _{atro}	Kapazität einer Transportvariante t
$m_{Tges,ijte}$	t _{atro} /a	maximale jährliche Gesamttransportmenge vom Ort i zum Ort j durch die Transportvariante t bei Beladung mit der Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e
$m_{Tges,ijtu}$	t _{atro} /a	Maximale jährliche Transportmenge vom Ort i zum Ort j durch die Transportvariante t bei Beladung mit der Umschlagsvariante u
$m_{Uges,iu}, m_{Uges,ju}$	t _{atro} /a	Maximale jährliche Umschlagsmenge der Umschlagsvariante u am Ort i oder j
$n_{AB_{AnL}}$	-	Anzahl der Aufbereitungstechnologien am Ort des Biomasseanfalls nach der Lagerung
$n_{AB_{AvL}}$	-	Anzahl der Aufbereitungstechnologien am Ort des Biomasseanfalls vor der Lagerung
$n_{AB_{KVA}}$	-	Anzahl der Aufbereitungstechnologien an der Konversionsanlage
$n_{E_{BA}}$	-	Anzahl der Ernte- bzw. Verfügbarmachungstechnologien am Ort des Biomasseanfalls
n_L	-	Anzahl der Lager
$n_{L_{BA}}$	-	Anzahl der Lager am Ort des Biomasseanfalls

$n_{T_{BA}}$	-	Anzahl der Transportmittel vom Ort des Biomasseanfalls beispielsweise an ein Lager
$n_{T_{KVA}}$	-	Anzahl der Transportmittel an eine Konversionsanlage
$n_{U_{AB_{BA},L_{BA}}}$	-	Anzahl der Umschlagstechnologien am Ort des Biomasseanfalls für den Umschlag in eine Aufbereitungsanlage bzw. in ein Lager
$n_{U_{KVA}}$	-	Anzahl der Umschlagstechnologien für den Umschlag an der Konversionsanlage
n_{U_T}	-	Anzahl der Umschlagstechnologien für den Umschlag in ein bzw. zwischen Transportmitteln
$n_{U_{ZL}}$	-	Anzahl der Umschlagsmittel für Zwischenlager
$o_{AB,iab}, o_{AB,jab}$	t_{atro}/a	Obergrenze der Variablen $x_{AB,iab}, x_{AB,jab}$
$o_{E,ie}, o_{E,je}$	t_{atro}/a	Obergrenze der Variablen $x_{E,ie}, x_{E,je}$
$o_{L,il}, o_{L,jl}$	t_{atro}/a	Obergrenze der Variablen $x_{L,il}, x_{L,jl}$
$o_{T,ijt}$	t_{atro}/a	Obergrenze der Variablen $x_{T,ijt}$
$o_{T,ijte}$	t_{atro}/a	Obergrenze der Variablen $x_{T,ijte}$
$o_{U,iu}, o_{U,ju}$	t_{atro}/a	Obergrenze der Variablen $x_{U,iu}, x_{U,ju}$
p_A	$t_{atro}/\text{km}^2 \text{ a}$	Flächenspezifisches Biomassepotenzial
Q_{AB}	t_{atro}/h	Durchsatzleistung einer Aufbereitungsvariante
$Q_{AB_{BA}}$	t_{atro}/h	Durchsatzleistung einer Aufbereitungsvariante am Ort des Biomasseanfalls
$Q_{E_{BA}}$	t_{atro}/h	Durchsatzleistung einer Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante am Ort des Biomasseanfalls
$Q_{T_{BA}}$	t_{atro}/h	Durchsatzleistung einer Transportvariante vom Ort des Biomasseanfalls beispielsweise an ein Lager
Q_U	t_{atro}/h	Durchsatzleistung einer Umschlagsvariante
$s_{T,ij}$	km	Transportdistanz zwischen den Orten i und j
t_{AL}	h/a	Jährliche Anlieferungszeit des Brennstoffs an die Konversionsanlage
t_{BS}	h/a	Betriebsstunden einer Bereitstellungstechnologie pro Jahr
t_{DZGes}	h	Gesamtdurchlaufzeit

t_{DZPE}	h	Durchlaufzeit eines Prozesselements
t_E	h/a	Jährliche Ernte- bzw. Verfügbarmachungszeit
$t_{Ges, TM}$	h	Gesamtbereitstellungszeit der jährlichen Brennstoffmenge durch ein Transportmittel
t_{Last}	h	Zeit für die Lastfahrt
t_{Leer}	h	Zeit für die Leerfahrt
$t_{\dot{U} \max}$	h	Maximale Übergabe-/Umschlagszeit
$t_{\text{Übergabe}}$	h	Zeit für die Übergabe
$u_{AB, iab}, u_{AB, jab}$	t_{atro}/a	Untergrenze der Variablen $x_{AB, iab}, x_{AB, jab}$
$u_{E, ie}, u_{E, je}$	t_{atro}/a	Untergrenze der Variablen $x_{E, ie}, x_{E, je}$
$u_{L, il}, u_{L, jl}$	t_{atro}/a	Untergrenze der Variablen $x_{L, il}, x_{L, jl}$
$u_{T, ijt}$	t_{atro}/a	Untergrenze der Variablen $x_{T, ijt}$
$u_{T, ijte}$	t_{atro}/a	Untergrenze der Variablen $x_{T, ijte}$
$u_{U, iu}, u_{U, ju}$	t_{atro}/a	Untergrenze der Variablen $x_{U, iu}, x_{U, ju}$
v_{Fzg}	km/h	Durchschnittliche Geschwindigkeit des Fahrzeugs
$z_{E, e}$	%	Ernteverluste bei der Ernte bzw. Verfügbarmachung mit Ernte- bzw. Verfügbarmachungsvariante e
z_{ges}	%	Mehrbedarf an Biomasse aufgrund der Verluste über die gesamte Bereitstellungskette
$z_{L, il}, z_{L, jl}$	%	Trockenmasseverlust bei der Lagerung mit der Lagervariante l am Ort i oder j
$z_{U, iu}, z_{U, ju}$	%	Trockenmasseverlust beim Umschlag mit Umschlagvariante u am Ort i oder j
η_{Ges}	h	Gesamtverfügbarkeit der Bereitstellungselemente
η_{PE}	h	Verfügbarkeit eines Prozesselementes
η_{PE1}	h	Verfügbarkeit des Prozesselementes 1
η_1	h	Verfügbarkeit des Arbeitsmittels 1 innerhalb eines Prozesselementes
ρ_{Ges}	%	Gesamtauslastung der Bereitstellungskette
λ_{PE}	%	Durchsatz eines Prozesselementes

γ_{PE} % Grenzdurchsatz eines Prozesselementes

Indexmenge**Bedeutung**

A	Anzahl der Quellen
AB_O	Anzahl der Aufbereitungsorte
AB_V	Anzahl der Aufbereitungsvarianten
B	Anzahl der Senken
E_V	Anzahl der Erntevarianten
H_V	Anzahl der Emissionsvarianten
L_O	Anzahl der Lagerorte
L_V	Anzahl der Lagervarianten
T_V	Anzahl der Transportvarianten
T_{LF}	Menge der landwirtschaftlichen Transportfahrzeuge
U_{EL}	Anzahl der Umschlagsvarianten für den Prozess Einlagern
U_O	Anzahl der Umschlagsorte
U_{RU}	Anzahl der Umschlagsvarianten für den Umschlag zwischen Transportmitteln
U_V	Menge der Umschlagsvarianten

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Innerhalb der politischen Zielsetzungen der Europäischen Union sowie Deutschlands stellt die Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien eine zentrale Maßnahme zum Klimaschutz dar. Zusätzlich verstärken sich die Anstrengungen zur Erhöhung der Energieversorgungssicherheit, wobei eine viel versprechende Option zur Lösung dieser Herausforderungen die Verwendung regenerativer Energien darstellt. Unter den erneuerbaren Energieträgern ist Biomasse als besonders günstig zu beurteilen, da sie sowohl für die Bereitstellung von Wärme, Strom als auch Kraftstoff verwendet werden kann. Die Nachfrage nach Biomasse führt schon heute in ausgewählten Sektoren zu Konkurrenzen (z. B. um Anbauflächen). Zukünftig wird von einer verstärkten Nachfrage nach Biomasse aus den Bereichen Nahrungs- und Futtermittel als auch der stofflichen und energetischen Nutzung ausgegangen [1]. Vor dem Hintergrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse kommt einer effizienten Ausgestaltung der Energiebereitstellung auf Basis von Biomasse eine hohe Bedeutung zu.

Für die energetische Nutzung biogener Festbrennstoffe, d. h. holz- bzw. halmgutartige Biomasse, kommen die Verfahren der Verbrennung, Vergasung und Pyrolyse in Frage. Die Verbrennung bietet die Möglichkeit der Bereitstellung von Strom und Wärme, wohingegen mit den Verfahren der Vergasung und Pyrolyse zusätzlich Kraftstoffe erzeugt werden können [2], [3], [4]. Prinzipiell kann die Umwandlung von Biomasse mit den o. g. Verfahren in Nutz- bzw. Endenergie in unterschiedlichen Leistungsbereichen erfolgen. Die Dimensionierung einer Konversionsanlage ist dabei u. a. abhängig von der Nachfragecharakteristik. Während in Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern für die Wärmeversorgung Anlagen im kW-Bereich zum Einsatz kommen, zeichnen sich Konversionsanlagen zur Kraftstoffproduktion durch Leistungen im zwei- und dreistelligen MW-Bereich aus. Unter Berücksichtigung positiver Skaleneffekte (Economies of scale) ist die Biomassevergasung in diesem Leistungsbereich technisch machbar, wohingegen eine auf die Brennstoffanforderungen angepasste effiziente regionale Biomassebereitstellung für derartige Anlagengrößen gegenwärtig eine besondere Herausforderung darstellt [4], [5].

Des Weiteren weisen verfügbare energetische Nutzungspfade von Biomasse im höheren Leistungsbereich (d. h. MW-Bereich) einen heterogenen Entwicklungsstand auf und zeichnen sich durch unterschiedliche Gesamteffizienzen aus. Gegenwärtig erscheint die thermo-chemische Vergasung biogener Festbrennstoffe und die anschließende Verwendung des Gases zur Polygeneration, d. h. zur gleichzeitigen Produktion von Wärme und Strom sowie zur Erzeugung von Kraftstoffen (z. B. Biomethan (Bio-Synthetic Natural Gas - Bio-SNG)) insbesondere aufgrund der hohen Umwandlungseffizienz als sehr aussichtsreich. Vorteilhaft zu bewerten ist daneben die Umwandlung mit Hilfe von Produktionssystemen ab einem Leistungsbereich von 10 bis 100 MW_{BWL}. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die verfügbare Verteilungs- und Nutzungsinfrastruktur (wie die des Gasnetzes) für die Distribution von Biomethan zu verwenden. Zusätzlich liegen auf der Nutzungsseite von Erdgas bzw. Biomethan bereits Erfah-

rungen in der energetischen (d. h. mobil und stationär) sowie stofflichen Anwendung vor [6], [7], [8].

Für die Bereitstellung von biogenen Festbrennstoffen an Polygenerations-Anlagen stellen die Fraktionen Waldrestholz (WRH) und Kurzumtriebsholz (KUP) aussichtsreiche Rohstoffe dar, da diese sowohl den gegenwärtigen brennstofftechnischen Anforderungen entsprechen sowie aussichtsreiche technische Biomassepotenziale aufweisen [9], [10], [11]. Unter Waldrestholz wird der Teil des eingeschlagenen Holzes verstanden, der keiner stofflichen Nutzung zugeführt wird und im Bestand verbleibt [3], [9], [12]. Kurzumtriebsholz wird auf landwirtschaftlichen Flächen in Plantagen mit schnell wachsenden Baumarten (z. B. Weide, Pappel) angebaut [13].

Die Polygeneration über den thermo-chemischen Umwandlungsweg ist momentan durch vielfältige Forschungsfragen beispielsweise im Bereich der Konversion gekennzeichnet [14], [15]. Die für die Versorgung derartiger Konversionsanlagen notwendige Biomassebereitstellung weist ebenso eine Vielzahl von anspruchsvollen Fragestellungen auf. Da die saisonale Verfügbarkeit von Biomasse häufig nicht mit dem Zeitpunkt der Brennstoffnutzung übereinstimmt, besteht die Notwendigkeit der Lagerung von Biomasse. Neben der Einbindung von Lagerkonzepten in die Planung der Biomassebereitstellung, sind zusätzlich die durch die Konversionsanlage definierten Brennstoffeigenschaften (z. B. Wassergehalt, Größenverteilung) zu berücksichtigen. Darüber hinaus haben u. a. die benötigte Brennstoffmenge und das damit verbundene Einzugsgebiet maßgeblichen Einfluss auf die Ausgestaltung von Bereitstellungssystemen für Biomasse an Konversionsanlagen [16], [17].

Die Logistik holzartiger biogener Festbrennstoffe an Anlagen zur Produktion von Wärme, Strom bzw. Kraftstoffen erfolgt gegenwärtig überwiegend mit etablierten Verfahren, die für die Versorgung der holzver- und bearbeitenden Industrie zum Einsatz kommen. Die Ausrichtung des Materialflusses erfolgt hierbei vorrangig an technischen und ökonomischen Zielkriterien, wie beispielsweise hohen Auslastungsgraden und niedrigen Bereitstellungskosten [12], [18], [19], wobei deren Dimensionen überwiegend bekannt sind.

Unklarheit herrscht dagegen vielfach bei der Auswahl geeigneter Konversionsanlagenstandorte und der Ausgestaltung der Biomassebereitstellung unter gleichzeitiger Berücksichtigung ressourcen-, anlagenseitiger und infrastruktureller Gegebenheiten. Jedoch besteht wegen der limitierten Verfügbarkeit von Biomasse die Notwendigkeit der effizienten Nutzung in der gesamten Bereitstellungskette von Energie. Neben dem Einsatz verbesserter Konversionstechnologien, wie z. B. der Polygeneration, bedarf es darüber hinaus der optimalen Einbindung der erzeugten Energieträger in die Nachfragestruktur eines Standortes sowie einer effizienten Rohstoffbereitstellung. In diesem Zusammenhang ist die ganzheitliche Betrachtung der Aspekte logistische Leistung, Ökonomie und Ökologie notwendig um Aussagen über logistisch effiziente sowie ökonomisch und ökologisch aussichtsreiche Bereitstellungskonzepte von Biomasse geben zu können [20].

Die Notwendigkeit der Bestimmung von Konversionsanlagenstandorten, der Planung des Materialflusses sowie der Optimierung der Biomassebereitstellung liegt in der langfristigen Erfüllung der aufkommens- und nachfrageseitigen Anforderungen begründet. In diesem Zusammenhang ist die Identifikation von Standorten für Polygeneration-Anlagen erforderlich, um sowohl Aussagen über die Voraussetzungen am Konversionsanlagenstandort als auch die Bedingungen der Brennstoffbereitstellung (z. B. Biomasseaufkommen einer Region, Transportentfernungen) treffen zu können. Die Planung des Materialflusses von Brennstoffbereitstellungskonzepten ist notwendig, um die logistische Effizienz transparent einschätzen zu können. Um sowohl eine kostenminimale als auch mit geringen Umweltauswirkungen verbundene Bereitstellung von Biomasse zu gewährleisten, bedarf es der Optimierung der Biomassebereitstellung nach ökonomischen und ökologischen Zielkriterien.

1.2 Zielstellung

Vor dem dargestellten Hintergrund ist es das übergeordnete Ziel in dieser Arbeit, eine methodische Vorgehensweise für die (i) Identifikation von Standorten für Polygeneration-Anlagen, die (ii) anschließende Planung des Materialflusses einer regionalen Biomassebereitstellung für Waldrest- und Kurzumtriebsholz nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien sowie die (iii) ökonomisch-ökologische Optimierung der Biomassebereitstellung zu entwickeln.

Aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach Biomasse bietet die Organisation der Brennstoffversorgung (vom Ort des Biomasseanfalls bis an die Konversionsanlage) durch den Anlagenbetreiber die Möglichkeit, volatile Schwankungen am Markt für Biomasse teilweise zu kompensieren. In diesem Zusammenhang kommt der Planung der Biomassebereitstellung besondere Bedeutung zu. Durch die Optimierung der Biomassebereitstellung können Alternativen im Hinblick auf eine ökonomisch und ökologisch viel versprechende Ausgestaltung der Brennstoffversorgung abgeleitet werden. Aus den jeweiligen Zielstellungen ergeben sich folgende Schlüsselfragen, auf die in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen wird:

- Wie ist eine zielorientierte Vorgehensweise zur Identifikation von Standorten für Polygeneration-Anlagen aufzubauen, die sowohl biomasseaufkommensseitige Voraussetzungen als auch Anforderungen der Nachfrageseite berücksichtigt?
- Wie ist die Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung zu gestalten, so dass eine Messung der logistischen Effizienz (d. h. der Logistikleistung und -kosten) der betrachteten Brennstoffbereitstellungskonzepte möglich ist?
- Wie ist die Biomassebereitstellung zu optimieren, damit eine gleichzeitige Beurteilung der Bereitstellungskonzepte für Biomasse anhand ökonomischer und ökologischer Zielkriterien erfolgen kann?

Die einzelnen Fragestellungen sind in Abhängigkeit ihrer zeitlichen Einordnung zu betrachten. Mit der Standortidentifikation ist die Basis für die nachfolgende Planung des Materialflusses und die Optimierung der Biomassebereitstellung gegeben.

1.3 Aufbau der Arbeit

Da die Biomassebereitstellung durch unterschiedliche Rahmenbedingungen in Bezug auf Raum und Zeit gekennzeichnet ist, bedarf es einer umfassenden Analyse der Kriterien Rohstoff und Infrastruktur in der Systemplanung. Durch die Analyse ausgewählter ressourcen- und infrastrukturbezogener Parameter sowohl am Ort des Biomasseanfalls, entlang der Bereitstellungskette von Biomasse als auch am Ort der Brennstoffnachfrage können optimale Konversionsanlagenstandorte identifiziert werden. Darauf aufbauend werden die aus logistischer Sicht effizienten Bereitstellungskonzepte mit Hilfe der Planung des Materialflusses ermittelt. Innerhalb der Optimierung der Brennstoffbereitstellung werden anhand ökonomischer und ökologischer Zielkriterien optimale Bereitstellungskonzepte für definierte Brennstoffe, festgelegte Konversionsanlagengrößen und -standorte abgeleitet. Die Grundlage für die Beantwortung der Schlüsselfragen in dieser Arbeit bilden die nachfolgenden Kapitel (Abb. 1-1).

In Kapitel 2 werden zunächst Grundlagen der Logistik erläutert und anschließend die Abgrenzung der Biomassebereitstellung vorgenommen. Darauf aufbauend werden die Struktur und der Aufbau der Biomassebereitstellung beschrieben. Für die jeweiligen Bereitstellungsprozesse werden ausgewählte Technologien zur Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz vorgestellt.

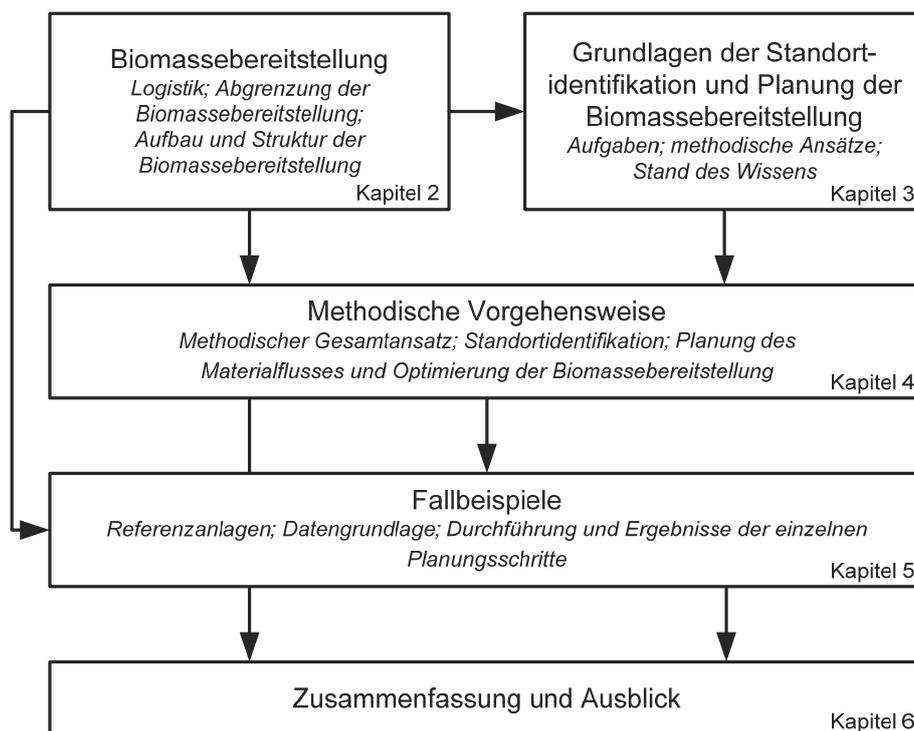


Abb. 1-1: Kapitel der Arbeit und deren Interdependenzen

Innerhalb des Kapitels 3 werden Grundlagen zur Standortplanung für Biomassekonversionsanlagen und der notwendigen Planung der Bereitstellung von Biomasse beschrieben. Darauf aufbauend wird der Stand des Wissens zur Standortidentifikation und Planung im Rahmen der Biomassebereitstellung dargestellt.

Kapitel 4 beinhaltet die erarbeitete methodische Vorgehensweise zur Identifikation von Konversionsanlagenstandorten sowie zur Planung der Brennstoffbereitstellung. Der hier entwickelte methodische Ansatz stellt die Basis für die Durchführung anhand eines Fallbeispiels dar.

In Kapitel 5 wird die entwickelte methodische Vorgehensweise anhand von Fallstudien angewendet. Dazu werden exemplarisch für die Produktion von Bio-SNG in Kapitel 5.1 Referenzanlagen definiert. Die dafür relevanten Brennstoffe und deren qualitative und quantitative Anforderungen werden in Kapitel 5.1.2 näher beschrieben. Die Identifikation vorteilhafter Anlagenstandorte für betrachtete Konversionsanlagen erfolgt in Kapitel 5.2. Im Anschluss daran werden bestehende Bereitstellungsketten für holzartige Brennstoffe an Bio-SNG-Anlagen analysiert und logistisch effiziente Konzepte abgeleitet (vgl. Kapitel 5.3). Basierend auf den vorangegangenen Ergebnissen werden im Rahmen des Kapitels 5.4 vorteilhafte Varianten der Brennstoffbereitstellung nach ökonomischen und ökologischen Zielkriterien optimiert. Als Ergebnis werden die optimalen Bereitstellungsketten für biogene Festbrennstoffe an Bio-SNG-Anlagen vorgestellt.

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammenfassend in Kapitel 6 diskutiert und in Verbindung mit den eingangs gestellten Schlüsselfragen eingeordnet. Darüber hinaus erfolgt anhand der Ergebnisse die Ableitung von Empfehlungen zur Ausgestaltung von Bereitstellungsketten für biogene Festbrennstoffe an zuvor ermittelte Standorte von Bio-SNG-Anlagen.

2 Biomassebereitstellung

2.1 Grundlagen der Logistik

Der Begriff Logistik umfasst Vorgänge zur Planung, Gestaltung, Abwicklung und Kontrolle von Objekt- und dazugehörigen Informationsflüssen, die sich sowohl zwischen einem Empfänger und einem Lieferanten als auch zwischen einem Lieferanten und einem Empfänger herausbilden. Der Objekt- bzw. Materialfluss ist dabei an einen Informationsaustausch gebunden, welcher dem Materialtransfer vorgelagert, begleitend sowie nachgelagert sein kann. Erst der gemeinsame Informations- und Objektaustausch stellt ein logistisches System dar [21], [22]. Die Logistik von Gütern lässt sich vereinfachend anhand von Logistikketten darstellen. Diese können als ein Netzwerk von Transport-, Lagerungs-, Umschlags- und Produktionsprozessen verstanden werden.

Grundsätzlich lassen sich sechs Ziele der Logistik definieren. Dabei gilt, dass die (i) richtige Menge (ii) des richtigen Objektes am (iii) richtigen Ort (iv) zum richtigen Zeitpunkt (v) mit der richtigen Qualität (vi) und zu den richtigen Kosten bereitzustellen ist [23], [24]. Die Bereitstellung von biogenen Festbrennstoffen kann als eine Teilaufgabe der Beschaffungslogistik verstanden werden und stellt das Bindeglied zwischen Lieferanten und verarbeitenden Unternehmen dar [25]. Die Beschaffungslogistik verfolgt das Ziel die Faktoren Zeit, Qualität und Kosten der bereitzustellenden Waren zu optimieren.

2.2 Abgrenzung der Biomassebereitstellung

Zur Abbildung der relevanten materialflusstechnischen Prozesse bei der Bereitstellung von Biomasse, erfolgt die Abgrenzung der Biomassebereitstellung hinsichtlich zweier Aspekte. Dazu werden nachfolgend die zugehörigen Bereitstellungsprozesse definiert und die bereitzustellenden Objekte festgelegt.

2.2.1 Definition der Bereitstellungsprozesse

Die Bereitstellung von Biomasse wird im Folgenden in die Prozesse der Ernte/Verfügbarmachung, Aufbereitung, Lagerung, Umschlag und Transport untergliedert (Abb. 2-1). Dabei stellt die Abfolge dieser einzelnen Prozesse innerhalb einer Bereitstellungskette die Verbindung zwischen der Biomasseaufkommenseite und der Nutzungsseite des Brennstoffs dar. Die zugehörigen Begriffe werden im Rahmen dieser Arbeit wie folgt definiert.

Ernte/Verfügbarmachung: Mit dem Prozess der Ernte/Verfügbarmachung wird die Gewinnung bzw. Bereitstellung der Biomasse für die nachfolgenden logistischen Prozesse angestrebt [26].

Aufbereitung: Die Aufbereitung kann als ein Behandlungsprozess verstanden werden, der u. a. zur Anpassung der Brennstoffmerkmale an die konversionsanlagentechnischen Brennstoffanforderungen dient. In Abhängigkeit der zu behandelnden Biomassesortimente und den

angestrebten Brennstoffqualitäten kann der Aufbereitungsprozess aus mehreren Teilschritten aufgebaut werden [27], [28].

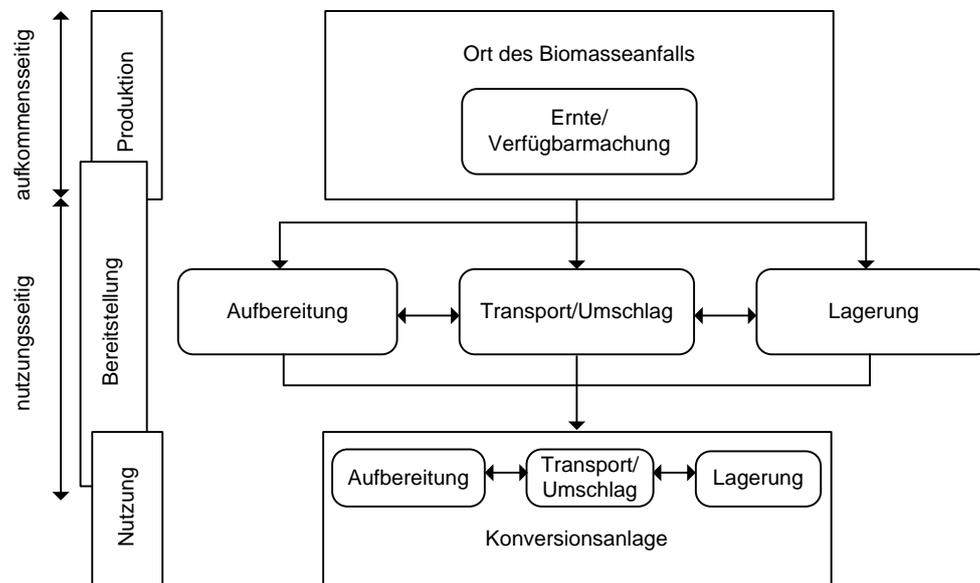


Abb. 2-1: Einbindung der Bereitstellung in die Bereiche Biomasseproduktion und Brennstoffnutzung [29]

Lagerung: Der Prozess der Lagerung verfolgt die zeitlich definierte Aufbewahrung mit dem Ziel, die saisonalen Schwankungen zwischen Brennstoffnachfrage und Biomasseangebot zu entkoppeln unter gleichzeitigem Erhalt der geforderten Biomassequalität. Zusätzlich sind Sicherheits-, Anpassungs-, Umformungs- und Steuerungsaufgaben von Bedeutung [3], [30], [31].

Umschlag: Der Prozess des Umschlages umfasst Förder- und Lagervorgänge beim Übergang der Biomasse bzw. des Brennstoffs auf ein Transportmittel, beim Abgang von einem Transportmittel sowie beim Wechsel zwischen Transportmitteln [32].

Transport: Der Transport dient der Überwindung von Entfernungen. Dabei werden Güter von der Quelle bzw. Eingangsstation zur Senke bzw. Ausgangsstation transportiert [33], [34].

Tabelle 2-1 gibt zusammenfassend einen Überblick zu den jeweiligen Zielstellungen der Bereitstellungsprozesse sowie zu den maßgeblichen Veränderungen im Prozessablauf in Bezug auf die Kriterien Ort, Zeit und Biomasse.

Tabelle 2-1: Charakteristika der Bereitstellungsprozesse (in Anlehnung an [26])

Prozess	Zielstellung: bereitstellen durch	Verlauf: gekennzeichnet durch	Änderung von		
			Ort	Zeit	Biomasse
Ernte/ Verfügbarmachung	Gewinnen	Ortsveränderung	X	x	x
Aufbereitung	Bearbeiten	Ruhe Ortsveränderung	X	x	X
Umschlag	Überwechseln	Ortsveränderung	X	x	x
Lager	Aufbewahren	Ortsveränderung	X	X	x
Transport	Fortbewegen	Ruhe Ortsveränderung	X	x	x

X Primär bezweckte Änderung; x Sekundär bezweckte Änderung

2.2.2 Definition der Bereitstellungsobjekte

Die im Rahmen der Brennstoffversorgung bereitzustellenden Objekte sind Rohstoffe mit z. T. vordefinierter Form. Ausgehend von einer Brennstofflogistik, bei der ausschließlich mechanische Aufbereitungsschritte der Biomasse notwendig sind, erfolgt eine Unterteilung der Bereitstellungsobjekte in Stück- und Schüttgut. Dadurch ist eine eindeutige und nachvollziehbare Zuordnung der relevanten Technologien innerhalb der Bereitstellungskette möglich.

Zur Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz stehen Verfahren zur Verfügung, die in Produktlinien eingeteilt werden können. Abhängig davon, ob eine nachfolgende Aufarbeitung an der Quelle bzw. Senke stattfindet, können Stück- (z. B. Ganzbaum, Bündel) bzw. Schüttgutlinien (z. B. Hackschnitzel) unterschieden werden (Tabelle 2-2) [35], [36].

Tabelle 2-2: Einordnung von Stück- und Schüttgut auf Basis von Waldrest- und Kurzumtriebsholz

Biomassefraktion	Stückgut	Schüttgut
WRH	Ganzbaum, Rundholz, Bündel ^a	Hackschnitzel ^c
KUP	Ganzbaum, Bündel ^b	Hackschnitzel ^c

^a Basis Schlagabraum (u. a. Holz, das nach Durchforstung im Bestand verbleibt); ^b Basis Bäume aus Umtrieben mit kurzen Rotationszeiten; ^c Basis Sortimente, die für Stückgut zur Verfügung stehen

2.3 Aufbau und Struktur der Biomassebereitstellung

Die Ausprägung der Biomassebereitstellung ist u. a. von den durch die Konversionstechnologie definierten Brennstoffanforderungen, den biomasseaufkommenseitigen Voraussetzungen sowie den infrastrukturellen Bedingungen abhängig. Gekennzeichnet ist die Bereitstellung durch Prozesse, die den Informations- und Materialfluss vom Ort des Biomasseanfalls (Quelle) bis zur Konversionsanlage (Senke) begleiten. Der Materialfluss beinhaltet sämtliche Vorgänge, die für eine Lageveränderung und/oder stoffliche Modifikationen des Brennstoffs von

Relevanz sind. Der Informationsfluss bildet die Voraussetzung zur Steuerung sämtlicher Logistikprozesse [23], [29], [37], [38].

Die Prozesskette des Materialflusses kann als eine zeitlich geordnete Sequenz von Teilprozessen verstanden werden, welche einen definierten Input zu einem festgelegten Output transformiert. Diese Prozesskette setzt sich aus einzelnen Prozesskettenelementen zusammen und ist in allgemein gültiger Form für die Biomassebereitstellung in Abb. 2-2 dargestellt [39]. Die einzelnen Prozesskettenelemente beschreiben jeweils ein in sich geschlossenes logistisches System, welches in Abhängigkeit der Betrachtungsebene durch Prozessketten höherer Detaillierung beschrieben werden kann [23].

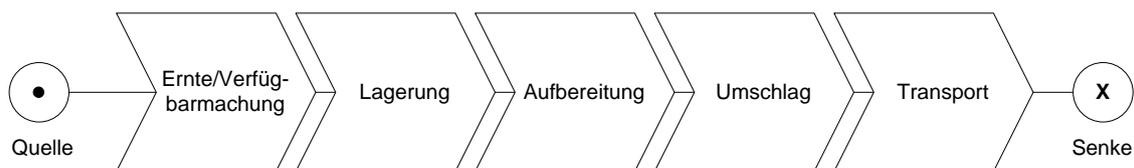


Abb. 2-2: Allgemeine Struktur einer Logistikkette zur Biomassebereitstellung

2.3.1 Ernte und Verfügbarmachung

Die Verfahren zur Ernte und Verfügbarmachung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz können nach dem Grad der Mechanisierung in motormanuell, teilmechanisiert und vollmechanisiert unterteilt werden. Um eine einheitliche Klassifizierung der Bereitstellungsprozesse zu gewährleisten, erfolgt nachfolgend eine Einordnung nach dem Bereitstellungsobjekt in Stück- und Schüttgut.

Forstwirtschaftliche Verfahren der Holzernte und Verfügbarmachung beinhalten die Prozesse der Fällung und des Transportes im Bestand (d. h. abfuhrbereites Holz an der Waldstrasse). Zwischen den einzelnen Technologien bestehen u. a. Unterschiede zwischen dem maximalen Fälldurchmesser, der Durchsatzleistung sowie der technischen Verfügbarkeit [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46].

Holzernteverfahren für Kurzumtriebsholz können nach der Erntetechnologie mit Bezug auf die Kontinuität des Massenstromes in gebrochene Verfahren, bei welchem voneinander getrennte Prozesse der Fällung und der eventuellen Aufbereitung zur Anwendung kommen, und ungebrochene Verfahren unterteilt werden. Letztere sind durch die Kombination der Prozesse Ernte und Aufbereitung gekennzeichnet [47].

2.3.1.1 Waldrestholz – Stückgut

Motormanuelle Verfahren: Kennzeichnend für die motormanuelle Ernte von Holz ist der Einsatz von Motorsägen, welcher sich vorteilhaft durch eine einfache Handhabung und geringe Schäden an Bestand und Boden auszeichnet. Nachteilig sind die verhältnismäßig geringen Durchsatzleistungen [35], [46].

Teilmechanisierte Verfahren: Innerhalb der teilmechanisierten Ernte erfolgen die Fällung motormanuell und der Transport im Bestand unter Verwendung von Rückemaschinen. Hierbei kommen Rückeschlepper sowie Seilkrane zur Anwendung, die eine Erhöhung der Durchsatzleistung gegenüber motormanuellen Verfahren ermöglichen [36], [48].

Vollmechanisierte Verfahren: Bei der vollmechanisierten Ernte bzw. Verfügbarmachung von stückgutartigem Waldrestholz können Prozessoren, Harvester sowie Rückeschlepper zum Einsatz kommen. Vollmechanisierte Verfahren verfügen über die höchsten Durchsatzleistungen, wobei der Einsatz entsprechender Technologie hohe organisatorische Aufwendungen (z. B. Vorbereitung der Bestände) verlangt. Mit Anbau-, Aufbau- bzw. Kranprozessoren kann das bereits gefällte Holz entastet, eingeschnitten und abgemessen werden. Demgegenüber können mit einem Harvester alle bei der Holzernte und Verfügbarmachung anfallenden Teilschritte durchgeführt werden. In Abhängigkeit der Arbeitsweise wird zwischen der Ein- und Zweigriff-Harvester- (Kompaktharvester) Technologie unterschieden. Eingriff-Harvester besitzen an einem Kranausleger montiert ein Aggregat zur Fällung und Aufarbeitung von Holz. Dagegen sind Zweigriff-Harvester mit einem kranseitigen Fällaggregat sowie einem am Trägerfahrzeug aufgebauten Prozessoraggregat ausgestattet. Während Kompaktharvester vorrangig als Radfahrzeuge genutzt werden, kommen bei Eingriff-Harvestern auch kettenbasierte Versionen zum Einsatz. Neben Harvestertechnologien zur Ernte und Rohholzaufbereitung stehen ebenso Konzepte zur Verfügung, die nachgelagerte Verfahrensschritte integrieren. Grundsätzlich basieren diese Entwicklungen auf dem Eingriff-Harvester-Prinzip, wobei die Bauformen Harvester-Bündler-Aggregat und Harwarder (Trägerfahrzeug ausgestattet mit Rungenkorb) am Markt angeboten werden [35], [36], [49].

Von der Rückegasse aus kann der Transport des vorkonzentrierten und aufbereiteten Holzes an die Waldstraße mit unterschiedlichen Rückeschleppern erfolgen. Seil- und Zangenschlepper in Knickgelenkbauweise erlauben den Transport von groß dimensioniertem Holz (insbesondere unter schwierigen Geländebedingungen). Forwarder sind Schlepper mit einem auf dem Trägersystem aufgesattelten Rungenkorb. Der Einsatzbereich liegt im Transport von vorkonditioniertem Holz (z. B. Kurzholz, Bündel). Für den effizienten Transport von Langholz im Bestand sind vor allem Klemmbankschlepper geeignet. Sie stellen einen modifizierten Forwarder dar. Hier wird der Rungenkorb durch eine Klemmbank ersetzt [35], [46], [48].

2.3.1.2 Kurzumtriebsholz – Stückgut

Motormanuelle Verfahren: Die Ernte von Kurzumtriebsholz kann motormanuell unter Verwendung von Motorsägen oder von Freischneidegeräten erfolgen. Insbesondere für die kleinflächige Ernte und Verfügbarmachung ist dieses Verfahren konzipiert [50].

Teilmechanisierte Verfahren: Im Anschluss an die motormanuelle Ernte kann das Holz unter Einsatz von Rückeschleppern vorkonzentriert werden. Der Feldtransport erfolgt mit konventionellen landwirtschaftlichen Gliederzügen, bestehend aus einem Standardtraktor und einem Anhänger mit Rungenaufbau [47], [51].

Vollmechanisierte Verfahren: Im Rahmen der vollmechanisierten Ernte und Verfügbarmachung von Kurzumtriebsholz stehen neben der Ganzbaumernte mit dem Harvester vielfältige jedoch zum Teil wenig erprobte Technologien zur integrierten Konditionierung in Bündel zur Verfügung. Dabei wird zwischen Mäh- und Fällbündler-Technologie unterschieden. Die Mähbündler-Technologie kommt bei der Ernte von Kurzumtriebsholz mit geringeren Stammdurchmessern zum Einsatz und eignet sich besonders für das kontinuierliche reihenbezogene Ernten. Parallel dazu werden die gefällten Bäume gesammelt und zu Bündeln zusammengefasst. Dagegen ist die Ernte mit in der Forstwirtschaft erprobter Fällbündler-Technologie eher für Bestände von Kurzumtriebsplantagen mit längeren Umtriebszeiten geeignet (größer als 5 Jahre).

2.3.1.3 Waldrestholz – Schüttgut

Vollmechanisierte Verfahren: Die Ernte bzw. Verfügbarmachung von gehacktem Waldrestholz erfolgt mit Hackschnitzelharvestern. Die Technologie stellt eine Kombination aus dem Harvester als Trägerfahrzeug (Eingriff-Harvester-Prinzip) sowie einem Aufbauhacker dar und integriert mit dem Ernteprozess die anschließende Aufbereitung zu Hackschnitzeln in einer Maschine [35], [36], [49].

2.3.1.4 Kurzumtriebsholz – Schüttgut

Vollmechanisierte Verfahren: Die Ernte von Kurzumtriebsholz und gleichzeitige Aufbereitung zu Hackschnitzeln kann mit Hilfe von Anbauhackern bzw. selbst fahrenden Mähhackern durchgeführt werden. Prinzipiell sind diese Verfahren für kurze Umtriebszeiten geeignet, wobei zwischen den Technologien Unterschiede in Bezug auf den maximalen Schnittdurchmesser bestehen. Während mit selbst fahrenden Gehölz-Mähhackern, basierend auf der Technologie von Feldhäckslern bzw. modifizierten Zuckerrohrerntern, geringere Schnittdurchmesser geerntet werden können, eignen sich Anbau-Mähhacker für größere Schnittdurchmesser [47], [50], [51]. Das konditionierte Erntegut kann separat durch parallel fahrende landwirtschaftliche Gliederzüge sowie durch einen Feldhäcksler mit integriertem Ladebunker abtransportiert werden. Für die mechanische Ernte/Verfügbarmachung von Kurzumtriebsholz weisen Feldhäcksler die höchsten Durchsatzleistungen auf. Dabei ist eine Begrenzung des Schnittdurchmessers von maximal 7 cm gegeben.

2.3.2 Lagerung

Vielfältige Möglichkeiten sind gegeben, das geerntete Holz unter Berücksichtigung der definierten Brennstoffanforderungen zu lagern. Die zur Verfügung stehenden Lagerarten bzw. -mittel können u. a. nach der in Tabelle 2-3 vorgestellten Systematik eingeordnet werden. Daraus wird ersichtlich, dass jedes Lager mehreren Lagerarten gleichzeitig zugeordnet werden kann. Ein Lager für Waldrestholz kann demnach sowohl ein Freilager, ein Umschlaglager als auch ein Zentrallager sein. Nachfolgend werden ausgewählte Konzepte der Lagerung erläutert, wobei eine Differenzierung nach der Gutklasse in Stück- und Schüttgutlagerung sowie eine Beschreibung der Lagertechniken nach der Bauform erfolgt.

Tabelle 2-3: Systematik von Lagerarten für biogene Brennstoffe [23], [31]

Kriterien	Lagerart
Technische / organisatorische Notwendigkeit	Reserve- bzw. Ausgleichslager
Gutklassen	Stückgut- bzw. Schüttgutlager
Bauform	Freilager, überdachtes bzw. geschlossenes Lager
Grad der Zusammenfassung	Zentrallager bzw. dezentrales Lager
Material	Waldrest- bzw. Kurzumtriebsholzlager
Bearbeitungsgrad	Rohstoff- bzw. Brennstofflager
Stellung im logistischen Prozess	Umschlags- bzw. Produktionslager, werksnahes Lager

2.3.2.1 Stückgut

Stückgüter können im Freien und in Gebäuden u. a. am Boden, in Regalen sowie auf Fördermitteln gelagert werden. Während die Bodenlagerung durch statische und die Lagerung auf Fördermitteln durch dynamische Lagerungsarten gekennzeichnet ist, verfügt die Regallagerung über beide Formen.

Im Rahmen der Bereitstellung stückgutartiger Brennstoffe frei Konversionsanlage kommen hauptsächlich Formen der nicht überdachten Bodenlagerung in Frage, da die Biomasse vorrangig dezentral (u. a. am Ort des Biomasseanfalls) ohne bauliche Einrichtungen gelagert wird (z. B. Lagerung von Ganzbäumen an der Waldstraße). Innerhalb der Bodenlagerung kann zwischen der Block- und Reihenlagerung von Ganzbäumen, Rundholz und Schlagabraum unterschieden werden. Für diese Lagerungsformen werden Beschickungs- und Entleerungsvorgänge des Lagers mit Unstetigförderern organisiert [31], [34], [52]. Dagegen werden an Standorten mit Freilagern auch Stetigförderer eingesetzt.

Blocklagerung: Die Ganzbaum-, Rundholz und Schlagabraumlagerung kann lose bzw. gebündelt als Kreuzstapel und ungestapelt in Blöcken organisiert werden. Somit wird eine Kompaktlagerung erreicht.

Reihenlagerung: Durch die Lagerung von Ganzbaum, Rundholz bzw. Schlagabraum in Reihen ist es möglich, die vorhandenen Räume zwischen den Zeilen als Bedienwege und Brandschutzgassen zu nutzen. Grundsätzlich ist die Reihenlagerung der o. g. Sortimente lose sowie gebündelt als Sattelstapel und ungestapelt möglich.

2.3.2.2 Schüttgut

Schüttgüter können im Freien und in Gebäuden am Boden, in standortfesten Behältern als auch transportablen Behältnissen gelagert werden. Letzteres ist nach den Lagerungsverfahren für Stückgut zu gestalten und wird hier nicht weiter betrachtet. Für die Bodenlagerung kommen überwiegend Halden in Frage. Die Behälterlagerung bezieht die Bunker- und Silolagerung ein, wobei unterschiedliche Bauformen in Abhängigkeit von dem Schüttgut und den örtlichen Gegebenheiten zur Verfügung stehen.

Bodenlagerung: Die Lagerung am Boden kann unter Verwendung von Abdeckungs- und Belüftungstechnologien erfolgen, mit dem Ziel die Beeinträchtigungen der Brennstoffeigenschaften zu minimieren. Durch die Nutzung baulicher Begrenzungen kann die Stapelhöhe vergrößert werden. Für die Ein- und Auslagerung können Stetig- (z. B. Gurtförderer) und Unstetigförderer (z. B. Krane) eingesetzt werden.

Bunker- und Silolagerung: Während Silos überwiegend für die Lagerung von trockenem, feinkörnigem oder pulverförmigem Schüttgut eingesetzt werden, sind Bunker vor allem zur Lagerung von grobkörnigem bzw. großstückigem Schüttgut geeignet. Silos sind sowohl in stationärer als auch in mobiler Bauweise verfügbar, wohingegen Bunker als stationäre Lager bereitgestellt werden. Die Beschickung von Silo- und Bunkereinrichtungen kann über Stetig- (z. B. Saugförderanlagen) und Unstetigförderer (z. B. Kran) sowie direkt vom Transportfahrzeug erfolgen (z. B. durch Kippen des Fahrzeuges bzw. der Ladefläche). Die Entleerung von Silo- und Bunkerlagern erfolgt vorrangig über die Schwerkraftselbstentladung [26], [30], [31], [53].

2.3.3 Aufbereitung

Die Aufbereitung holzartiger Biomassesortimente in vordefinierte biogene Festbrennstoffe kann mit etablierten Technologien aus dem Bereich der Rohstoffaufbereitung durchgeführt werden. Die Auswahl der Aufbereitungstechnologie hängt maßgeblich von der zu behandelnden Biomasse und der definierten Brennstoffqualität ab. Innerhalb der Bereitstellung holzartiger Brennstoffe können mechanische als auch thermische Aufbereitungsprozesse, wie Zerkleinerung, Sortierung, Bündelung und Trocknung zur Anwendung kommen [4].

Zerkleinerung: Der Prozess der Zerkleinerung verfolgt in Abhängigkeit der Gutausprägung unterschiedliche Zielsetzungen. Für die Bereitstellung von schüttgutfähigen biogenen Festbrennstoffen steht das Ziel der Korngrößenverkleinerung und der Vergrößerung der spezifischen Oberfläche im Vordergrund. Dagegen zielt die Zerkleinerung zu Stückgut überwiegend auf einheitliche Längenmaße zur Optimierung des Transportes sowie nachfolgender Aufbereitungsschritte ab [28].

Sortierung: Mit der Sortierung können Feststoffgemische mit Hilfe partikel- sowie materialspezifischer Verfahren voneinander räumlich getrennt werden. Für die Sortierung von Holzhackschnitzeln sind insbesondere partikelspezifische Trennverfahren von Bedeutung, die nach geometrischen Abmessungen sortieren [27].

Bündelung: Die Bündelung dient der Überführung aufbereiteter Biomassesortimente in eine vordefinierte Form, um Prozesse des Transportes, Umschlags und der Lagerung zu optimieren. Durch die Volumenreduktion während der Verdichtung wird die Energiedichte in Bezug auf das Volumen erhöht [54].

Trocknung: Der Prozess der Trocknung verfolgt das Ziel, die Gutfeuchtigkeit durch Verdampfen der Feuchte zu reduzieren. Zusätzlich können durch das Trocknen unerwünschte qualitative Veränderungen vermieden werden und gewünschte Beeinflussungen (z. B. Heiz-

wertoptimierung) stattfinden. Es existieren zahlreiche technische Verfahren der Trocknung, die durch hohe spezifische Energieverbräuche vor allem für das Verdampfen der Feuchte (bis zu 75 % der Trocknung) gekennzeichnet sind. Natürliche Trocknungsverfahren bieten sowohl aus energetischen Gründen als auch aus verfahrenstechnischer Sicht sehr gute Lösungsansätze und werden nachfolgend ausschließlich weiter betrachtet [55], [56].

2.3.3.1 Stückgut

Zerkleinerung: Die Aufbereitung von Holzsortimenten zu Stückgut erfolgt u. a. durch die Einbeziehung der sägenden Zerkleinerung. Hierzu stehen stationäre, mobile und tragbare Ausführungen von Einzelmaschinen oder Bestandteilen von Mehroperationsmaschinen zur Verfügung. Von Bedeutung sind insbesondere unter praktischen Gesichtspunkten Ketten- und Kreissägemaschinen [57], [58].

Bündelung: Die Bündelung ist ein Verfahren, dass durch die mechanische Verdichtung von beispielsweise Schlagabraum und anschließende Fixierung (z. B. Bindegarn) die Bereitstellung eines gut handhabbaren Bündels mit hoher Energiedichte ermöglicht. Die dafür bestehende Bündeltechnologie ist auf Trägerfahrzeugen wie Lastkraftwagen (LKW) oder Forwarder montiert und kann mobil am Ort des Biomasseanfalls eingesetzt werden [59].

Trocknung: Die natürliche Trocknung von Stückgut kann während der Lagerung erfolgen. Unter Berücksichtigung der lokalen Bedingungen können nicht aufgearbeitete Ganzbäume, Rundhölzer und Holzbündel direkt im Bestand oder an logistisch günstigen Standorten in Block- sowie Reihenlagern getrocknet werden. Schlagabraum wird lose in Haufen gelagert und getrocknet [52]. Grundsätzlich weisen Verfahren der Ganzbaumtrocknung und der losen Schlagabraumtrocknung günstige Wassergehalte bei verhältnismäßig kurzen Trocknungszeiten auf.

2.3.3.2 Schüttgut

Zerkleinerung: Die Bereitstellung von Hackschnitzeln bedarf des Prozesses der Zerkleinerung, wobei das Zerteilen unter Einwirkung mechanischer Kräfte erfolgt. Typische Zerkleinerungsaggregate für die Herstellung von Holzhackschnitzeln sind Hacker. Diese sind sowohl in Anbauweise (z. B. Zapfwellenantrieb bzw. eigener Antrieb), in Aufbauweise (z. B. LKW-Hacker) sowie in stationärer Bauweise einsetzbar [37], [46].

Trocknung: Hackschnitzel können in Haldenform am Boden getrocknet werden. Hierfür stehen Belüftungsverfahren zur Verfügung, die u. a. durch bio-chemische Abbauprozesse freigesetzte Wärme zur Abführung des Wasserdampfes nutzen. Weiterhin können Hackschnitzel nach dem Verfahren der Freilufttrocknung in Halden mit Abdeckungssystemen gelagert werden. Die Bodentrocknung von Hackschnitzeln in flach aufgeschütteter Form wird hier aufgrund des hohen Manipulationsaufwandes und des großen Platzbedarfes vernachlässigt [52]. Insbesondere die Trocknung von Hackschnitzeln in Halden mit Belüftungskanälen und Abdeckfolie ist durch verhältnismäßig kurze Trocknungszeiten sowie positive qualitative Merkmalsausprägungen in Bezug auf Trockenmasseverlust und Endwassergehalt gekennzeichnet.

Sortierung: Für die größenbestimmte Trennung von Hackschnitzelmengen mit einer heterogenen Korngrößenverteilung sowie für die Abtrennung von Fremdstoffen, wie Mineralien, werden vorrangig Siebtechnologien angewendet. Dabei wird das Feststoffgemisch unterschiedlicher Größenklassen in vordefinierte Partikelgrößen getrennt und Mineralienfraktionen abgesiebt. Um eine festgelegte Stückigkeit und Reinheit der Hackschnitzel zu garantieren, können Technologien wie Plan-, Stern- und Trommelsiebe verwendet werden [27], [60]. Während Plansiebe über eine breitere Auswahl an Absiebfraktionen verfügen, sind Sternsiebe durch die höchsten Durchsätze gekennzeichnet.

2.3.4 Umschlag

Im Gegensatz zum Transport findet beim Umschlag eine Fortbewegung oder Ortsveränderung in einem räumlich begrenzten Gebiet statt. Demzufolge bezieht sich der Umschlag in einem System auf relativ kurze Entfernungen. Zwischen den zur Verfügung stehenden Umschlagsmitteln wird nach Stetig- und Unstetigförderern für Schütt- und Stückgut unterschieden. Dabei zeichnen sich Stetigförderer u. a. durch einen kontinuierlichen Transportgutstrom, Antriebe für einen Dauerbetrieb und den Betrieb ohne Bedienpersonal aus. Unstetigförderer sind für den diskontinuierlichen Transport von der Auf- zur Abgabestelle konzipiert. Aufgrund des Wechsels zwischen Last- und Leerfahrten sowie Stillstandszeiten sind die Antriebe auf Kurzzeitbetrieb ausgerichtet. Die Bedienung von Unstetigförderern ist meistens manueller Art [34], [53].

2.3.4.1 Stückgut

Stetigförderer: Der Umschlag von biogenen Festbrennstoffen in Stückgutform mit stetigen Fördermitteln kann beispielsweise mit Rollenförderern erfolgen, die angetrieben oder nicht angetrieben sind.

Unstetigförderer: Für den schienenfreien horizontalen und vertikalen Umschlag können insbesondere Flurförderfahrzeuge wie Stapler, Bagger oder Radlader in unterschiedlichen Größenklassen zum Einsatz kommen. Die Bewegung von schweren Transportgütern hat sich bewährt mit schienengebundenen bzw. -freien Kranen wie Fahrzeug-, Portal- oder Auslegerkranen [31], [53].

Vor allem schienenfreie Flurfahrzeuge kommen beim Umschlag von Holz in Stückgutform sowie Wechselbehältern zum Einsatz, wobei deutliche Unterschiede in Bezug auf den Durchsatz vorliegen. Stationäre flurfreie Anlagen verfügen durchschnittlich über höhere Hubleistungen und können in Abhängigkeit der Greiferausstattung alle Stückgutformen bedienen.

2.3.4.2 Schüttgut

Stetigförderer: Speziell für den Transport in waagerechter, schräger oder senkrechter Richtung von schüttgutfähigen Brennstoffen, wie beispielsweise Holzhackschnitzeln, kommen eine Vielzahl von stetigen Fördermitteln in Frage. Unterscheiden lassen sich die Technologien in Bezug auf die Arbeitsprinzipien, wonach Becherwerke für den senkrechten Transport (z. B.

Kettenbecherwerk), Trogkettenförderer für den waagerechten und leicht geneigten Transport (z. B. Kratzförderer), Schneckenförderer (z. B. Schneckenrohrförderer) und pneumatische Transportmittel (z. B. Saugförderanlagen) für den senkrechten, waagerechten und leicht geneigten Transport vorgesehen sind.

Unstetigförderer: Für den Umschlag von schütffähigen biogenen Festbrennstoffen stehen grundsätzlich die gleichen unstetigen Fördermittel wie für Stückgut zur Verfügung, wobei ein Austausch der Greifertechnologie notwendig ist. Zusätzlich können Schüttgüter mit Hilfe von Kippanlagen (z. B. Stirn-, Seitenkipper) sowie durch Schwerkraft-Selbstentladetechnologien (z. B. Bahnwagen mit Schwerkraftentladung) umgeschlagen werden [31], [53].

2.3.5 Transport

Die geografisch dezentrale Quellenstruktur von Biomasse und die zentrale Nachfragestruktur für biogene Festbrennstoffe verlangt die Durchführung des Transportes über teilweise weite Entfernungen. Unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Gesichtspunkte sollte auf Basis der gegebenen Verkehrsinfrastruktur eine Auswahl der optimalen Transportmittel erfolgen. Nachfolgend wird zwischen dem Transport auf Straßen, Schienen und Binnenwasserstraßen und dessen Kombination differenziert [23].

Der Transport der Biomasse kann direkt mit einem Verkehrsmittel vom Ort des Biomasseanfalls bzw. einem Lager an die Konversionsanlage erfolgen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass der Transport unter Einbeziehung verschiedener Verkehrsmittel (z. B. LKW, Bahn, Binnenschiff) durchgeführt wird (d. h. kombinierter Verkehr). Insbesondere die Bereitstellung der dezentral anfallenden Biomasse an Umschlagsstandorte (z. B. Verladebahnhöfe, Binnenhäfen) wird über den Lastkraftwagen-Transport organisiert. Demnach unterteilt sich die gesamte Bereitstellungskette in mindestens zwei Teilketten (sofern der Konversionsanlagenstandort über eine schienen- bzw. wasserseitige Erschließung verfügt). In Abhängigkeit der gegebenen Infrastruktur am Standort der Konversionsanlage können auch drei Teiltransportketten notwendig werden. Diese Teilketten werden als Vor-, Haupt- und Nachlauf bezeichnet [23]. Mit dem Vorlauf wird der Transport des Gutes zu einem Umschlagspunkt beschrieben. Der nachfolgende Transport auf der Schiene bzw. der Binnenwasserstraße wird als Hauptlauf benannt. Der straßengebundene Transport eines Gutes von einem Hauptlaufumschlagspunkt an eine Konversionsanlage wird als Nachlauf verstanden.

Straße: Innerhalb des Straßenverkehrs stehen für den Transport von Gütern vielfältige Fahrzeuge zur Verfügung, wobei der Lastkraftwagen das wichtigste Verkehrsmittel darstellt. In Abhängigkeit des zulässigen Gesamtgewichtes können Straßenkraftfahrzeuge in die Kategorien Transporter (bis 2,8 t), leichte Lastkraftwagen (bis 7,5 t) und schwere Lastkraftwagen (bis 40,0 t) eingeteilt werden [61].

Schiene: Der Transport von Massengütern auf der Schiene kann mit Güterzügen erfolgen, deren maximale Zuglast in Deutschland bei 2000,0 t und maximale Achslast bei 22,5 t liegt. Der Einsatz von Wagen mit einer Achslast von 25,0 t befindet sich in der Erprobungsphase.

In Abhängigkeit der zu transportierenden Mengen wird der Schienengüterverkehr als Einzelwagen- oder Ganzzugverkehr vorgenommen [61], [62].

Binnenwasserstraße: Der Gütertransport mit dem Binnenschiff kann mit Motorgüterschiffen (Schiffe mit eigenem Laderaum) als auch mit Schubverbänden organisiert werden. Schubverbände können als eine starre Verbindung aus Leichtern (antriebslose Schiffe mit Laderaum) und Schubbooten bzw. Motorgüterschiffen verstanden werden. Die maximalen Tragfähigkeiten liegen bei Motorgüterschiffen zwischen 900 und 3000 t und für Schubverbände in Abhängigkeit des Verbandaufbaus und des zu befahrenden Binnengewässers zwischen 7000 t (Verband mit vier Leichtern - Donau) und 11000 t (Verband mit vier Leichtern - Rhein) [63].

2.3.5.1 Stückgut

Straßenfahrzeuge: Für den Straßentransport von Stückgut, wie Rundholz oder Bündel, eignen sich Kraftfahrzeuge der Bauart Glieder- und Sattelzug. Die entsprechenden Lastkraftwagen können mit festen Spezialaufbauten (z. B. Rungensystem) sowie mit Ausführungen für austauschbare Ladehilfsmittel (z. B. Wechselbehälter) ausgestattet sein [23], [31].

Schienenfahrzeuge: Der lose Transport von Rundholz bzw. Bündeln via Bahn kann mit offenen Güterwagen sowie Drehgestellflachwagen organisiert werden. Während offene Güterwagen überwiegend mit festen Kastenaufbauten ausgestattet sind, werden Drehgestellflachwagen mit bzw. ohne Seiten- und Stirnwände eingesetzt. Unter Berücksichtigung des kombinierten Verkehrs können Trag-, Taschen- und Gelenkwagen für den Transport von Wechselbehältern sowie Containern eingesetzt werden [62], [64].

Binnenschiffe: Für den Transport von Holz werden Trockengüterschiffe und Schubverbände mit Leichtern verwendet. Der Laderaum der Schiffe kann in offener und schließbarer Bauweise vorliegen. Wechselbehälter werden aufgrund der Nichtstapelfähigkeit mit Binnenschiffen selten transportiert. Eine Ausnahme stellen die obersten Lagen innerhalb von Containertransporten dar [23], [63].

2.3.5.2 Schüttgut

Straßenfahrzeuge: Der Straßentransport von Schüttgütern greift auf die gleichen Kraftfahrzeugbauarten wie im Stückguttransport zurück. Feste Sonderaufbauten sind Kipper, Schubboden- und Kastenmuldenauflieger. Im Bereich der austauschbaren Ladehilfsmittel sind Container von übergeordneter Bedeutung [23], [31].

Schienenfahrzeuge: Der Schüttguttransport via Bahn kann neben offenen Wagen mit Kastenaufbau und Güterwagen für den kombinierten Verkehr zusätzlich mit speziellen Schüttgutwagen erfolgen. Diese Güterwagen sind in offener und gedeckter Bauart im Einsatz und entladen einerseits über seitliche Kippsysteme bzw. über dosierbare sowie schlagartige Schwerkraftentladungssysteme, die mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch gesteuert werden [62], [64].

Binnenschiffe: Grundsätzlich können für den Transport von Schüttgütern die gleichen Binnenschiffstypen eingesetzt werden wie für den Stückguttransport (vgl. Binnenschiffe für den Stückguttransport).

Während für den Transport von Holz sowohl auf Straße als auch Schiene vielfältige Transporttechnologien zur Verfügung stehen, ist der Binnenschifftransport durch deutlich weniger einsetzbare Optionen gekennzeichnet. Im Straßentransport dominieren Sattelzüge mit Schubboden- bzw. Rungensystem, welche gleichzeitig durch die höchsten Nutzlasten gekennzeichnet sind. Innerhalb des Transportes von Holz mit der Bahn weisen offene Kastenwagen sowie Tragwagen die höchsten Lastgrenzen auf. Containerschiffe besitzen die höchsten Traglasten unter den Binnenschiffen, sind jedoch begrenzt einsetzbar auf eine geringe Anzahl von Binnengewässern, so dass Trockenschiffe und Schubverbände an dieser Stelle trotz geringerem Ladevolumen favorisiert werden [63].

3 Grundlagen der Standortidentifikation und Planung der Biomassebereitstellung

Zu Beginn dieses Kapitels werden die Aufgaben der Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen und der Planung der zugehörigen Biomassebereitstellung erläutert. Ergänzend dazu werden methodische Ansätze vorgestellt, die zur (i) Standortidentifikation, (ii) Planung des Materialflusses sowie (iii) Optimierung der Biomassebereitstellung in Betracht gezogen werden können. Abschließend wird der gegenwärtige Stand des Wissens innerhalb der Standortidentifikation und Planung der Rohstoffbereitstellung für Biomassekonversionsanlagen beschrieben.

3.1 Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen

Im Rahmen der Planung des Neubaus von Biomassekonversionsanlagen gehört die Standortidentifikation aufgrund der anspruchsvollen logistischen Fragestellungen, sowohl in Bezug auf die Brennstoffbereitstellung als auch die Ver- und Entsorgung mit Betriebsmitteln sowie die Distribution von Energie, zu den wichtigsten Aufgaben, da diese Entscheidung langfristig bindend ist [65].

Die Standortwahl bzw. -identifikation ist ein Bereich der Standortplanung, welche in die Teilgebiete (i) volkswirtschaftliche, (ii) betriebliche und (iii) innerbetriebliche Standortplanung unterteilt werden kann [66]. Innerhalb der volkswirtschaftlichen Standortplanung wird versucht, u. a. die Ansiedelung von Unternehmen oder die Entwicklung von Wirtschaftssektoren zu erklären. Die betriebliche Standortplanung behandelt vorrangig Fragen der Standortwahl für ausgewählte Betriebe. Im Gegensatz dazu versucht die innerbetriebliche Standortplanung die physische Anordnung von „Betriebsmitteln“ zu bestimmen [66], [67]. In diesem Kontext ist die Betrachtung der Standortidentifikation innerhalb der betrieblichen Standortplanung Gegenstand dieser Arbeit.

Wesentliche Begriffe zur Standortidentifikation sind in Kapitel A.1 erklärt.

3.1.1 Aufgaben der Standortidentifikation

Die Standortidentifikation ist eine interdisziplinäre und prozessartige Aufgabe, die aus einer Menge an potenziellen Standorten einen bzw. mehrere Standorte so auswählt, dass eine weitestgehende Übereinstimmung zwischen den Standortanforderungen und den Standortfaktoren gewährleistet ist. Hierfür werden Anforderungen an einen Standort aus dem vorliegenden Standortproblem abgeleitet [66], [68], [69]. Innerhalb der Identifikation von Standorten für Biomassekonversionsanlagen sind unterschiedliche Anforderungen von Bedeutung. Diese können entsprechend Abb. 3-1 in Biomassebereitstellung, Betriebsmittel sowie Nutz- und Endenergieverteilung eingeteilt werden.

Demnach ist es die Aufgabe der Standortidentifikation, neben der Festlegung der zur umfassenden Charakterisierung eines Standortes notwendigen Beschreibungsgrößen, die Erfüllung der festgelegten Anforderungen durch die Standortfaktoren zu beurteilen. Für diesen Schritt stehen grundsätzlich unterschiedliche Bewertungsansätze zur Verfügung.

Die Festlegung der Standortanforderung auf eine industrielle Wärmesenke verfolgt das Ziel einer vereinfachten Vorgehensweise, da somit genehmigungsrechtliche Fragestellungen aufgrund der Einordnung in Industriegebiete innerhalb der Standortidentifikation vernachlässigt bzw. in untergeordneter Form berücksichtigt werden können.

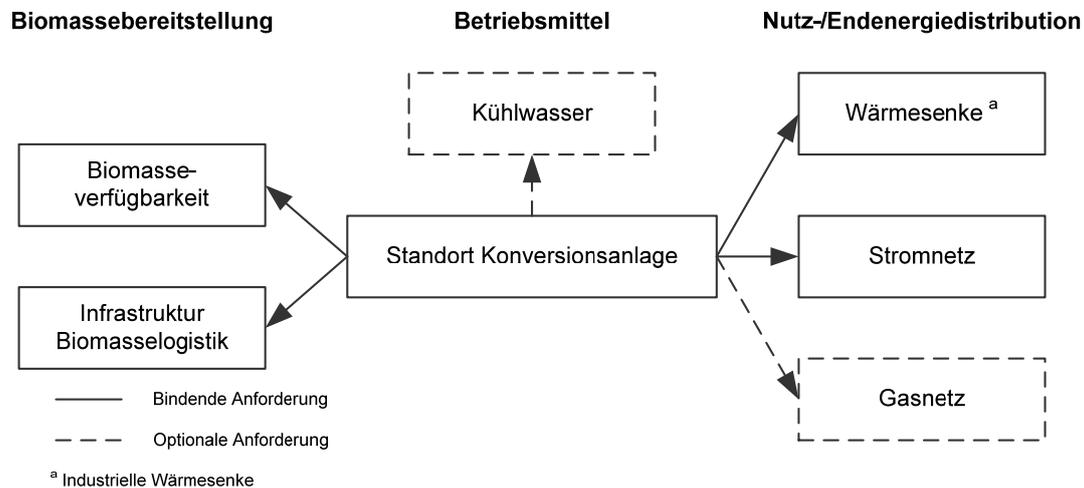


Abb. 3-1: Anforderungen eines Konversionsanlagenstandortes an die Bereiche der Biomassebereitstellung, der Versorgung mit Betriebsmitteln sowie der Distribution von Nutz- und Endenergie

3.1.2 Bewertungsverfahren

Für die Bestimmung eines optimalen Konversionsanlagenstandortes ist ein Bewertungsverfahren von Vorteil, das neben der Einbeziehung quantitativer Aspekte auch qualitativer Kriterien berücksichtigt, da somit u. a. wichtige Markt- als auch Produktionsfaktoren in die Beurteilung integriert werden können [70], [71]. Die Literatur weist eine Vielzahl methodischer Instrumentarien im Rahmen der Standortplanung auf [72]. Neben der ältesten Standorttheorie von von Thünen haben sich zahlreiche Theorien der Standortbestimmung entwickelt u. a. geografisch, gesamtwirtschaftlich sowie betriebswirtschaftlich bzw. empirisch-realistisch orientierte Methodiken [73]. Gegenwärtig werden insbesondere die nachfolgenden methodischen Ansätze zur Beurteilung alternativer Standorte diskutiert, wobei sich diese Verfahren in Bezug auf Komplexität und Aussagekraft voneinander unterscheiden [68].

3.1.2.1 Singuläre Verfahren

Singuläre Verfahren berücksichtigen innerhalb der Standortbewertung einzelne Kriterien. Entsprechende Verfahren werden insbesondere dann für die Bewertung eingesetzt, wenn der Einfluss einer Kenngröße gegenüber den restlichen Standortkriterien von sehr hoher Bedeutung ist [70].

3.1.2.2 Kosten-Nutzen-Analyse

Die Kosten-Nutzen-Analyse stellt für eine kleine Anzahl von Standortalternativen eine Bewertungsoption dar (insbesondere für Kapitalgeber in der Feinplanungsphase). Dabei wird u. a. eine Einordnung der Standorte nach der Eigenkapitalrentabilität vorgenommen. Hierbei werden beispielsweise Kriterien wie Personal-, Transport- und Energiekosten berücksichtigt. Bei dem Vergleich alternativer Standorte ist derjenige optimal, der die höchste Eigenkapitalrentabilität aufweist. Eine Herausforderung innerhalb dieses Verfahrens stellt die Einbeziehung nichtmonetärer Kriterien in die Beurteilung dar, welche z. B. durch eine subjektive Bewertung mit Preisen erfolgen kann [70].

3.1.2.3 Transportkostenoptimierung

Bewertungsverfahren der Transportkostenoptimierung finden bei der Standortbewertung Anwendung, wenn ausschließlich der außerbetriebliche Transport berücksichtigt wird. In die Bewertung werden Kenngrößen wie die Transportentfernung, -zeiten und -mittelwechsel einbezogen. Demnach stellen in diesem Verfahren ausschließlich die Transportkosten ein Bewertungskriterium dar, ohne Berücksichtigung weiterer Standortkriterien. Um die Aussagefähigkeit dieses Verfahrens zu erhöhen, werden weitere Kostenpositionen (z. B. Umschlagskosten) in die Beurteilung einbezogen [65].

3.1.2.4 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse stellt eine Methode dar, bei welcher qualitative Aspekte quantifiziert und damit vergleichbar gemacht werden. Das Bewertungskonzept beruht auf der Definition von Gewichtungsfaktoren als Maß des Erfüllungsgrades eines Teilnutzwertes gegenüber dem Gesamtnutzwert eines festgelegten Standortes. In diesem Zusammenhang besteht die Möglichkeit Wirkungen, die anhand kardinaler, ordinaler bzw. nominaler Skalen erhoben wurden, in eine einheitlich messbare Größenordnung zu überführen. Der Nutzwert stellt das Bewertungsmaß für eine Standortalternative dar [70], [72], [74].

3.2 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung

Durch den dezentralen Anfall von Biomasse bilden sich z. T. komplexe Bereitstellungsstrukturen heraus, die eine Vielzahl von kapazitiven Engpässen entlang der Gesamtbereitstellungskette mit sich bringen können. Die damit notwendige Planung und Auslegung der Biomassebereitstellung sollte deshalb ganzheitlich verfolgt werden [75], [76].

Bei der Planung der Biomassebereitstellung für einen Konversionsanlagenneubau stehen die Auswahl geeigneter Technologien für die Brennstoffbereitstellung und deren Dimensionierung im Vordergrund. Darüber hinaus werden in diesem Planungsschritt die einzelnen Systemvarianten mit Hilfe geeigneter Verfahren u. a. anhand technischer sowie ökonomischer Kriterien bewertet (vgl. Kapitel 4.3).

Wesentliche Begriffe zur Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung sind in Kapitel A.1 erklärt.

3.2.1 Aufgaben der Planung von Bereitstellungssystemen

Die übergeordnete Aufgabe der Planung von Materialflüssen respektive Bereitstellungssystemen ist die Realisierung eines effizienten logistischen Systems [25], [75]. Im Rahmen der Biomassebereitstellung beinhaltet das neben einer hohen Logistikleistung insbesondere niedrige Logistikkosten. Die Aufgaben in Bezug auf die Logistikleistung können in Form eines Zielsystems definiert werden, wobei die Maximierung der Logistikleistung das übergeordnete Ziel darstellt. Dem untergeordnet sind die Teilziele einer niedrigen Durchlaufzeit sowie hoher Verfügbarkeiten und Auslastungsgrade. Das Ziel im Bereich der Logistikkosten ist es, dass die integrierten Prozessschritte durch geringe Bereitstellungskosten gekennzeichnet sind. In Abb. 3-2 ist ein zugehöriges Zielsystem dargestellt.

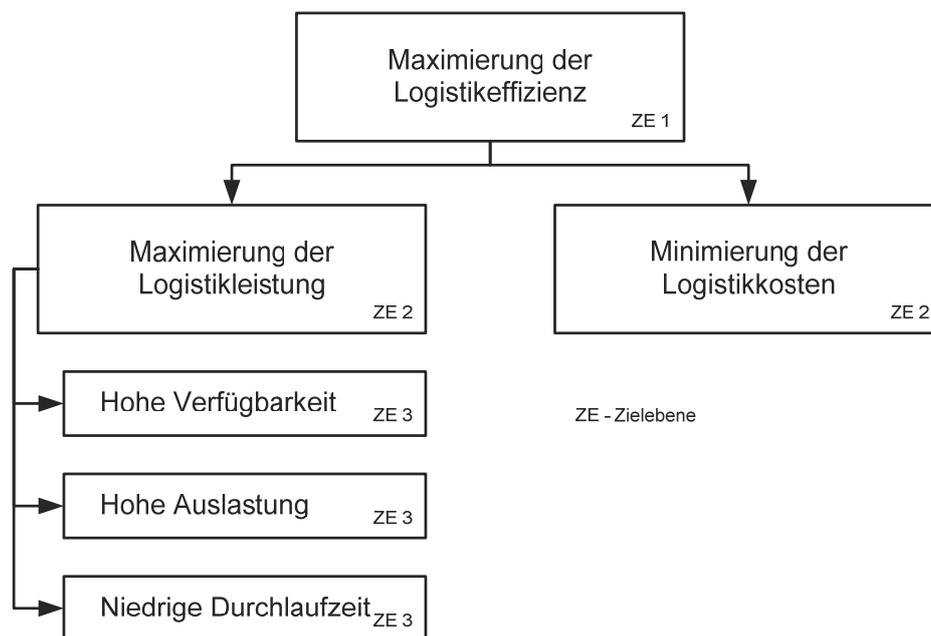


Abb. 3-2: Zielsystem innerhalb der Bereitstellung (in Anlehnung an [25], [77])

Komplexe Bereitstellungskonzepte können mit Hilfe logistischer Kennzahlen bewertet werden. Durch die Einbeziehung von Kennzahlen sind Aussagen zur Beurteilung der logistischen Effizienz möglich [25], [78]. Eine Quantifizierung der Ziele innerhalb der Bereitstellung von biogenen Brennstoffen wird mit Hilfe von Kennzahlen durchgeführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein entsprechendes Kennzahlensystem auf den zu betrachtenden logistischen Bereich individuell abgestimmt werden muss [23], [25].

3.2.2 Modelle zur Planung logistischer Systeme

Für die Planung logistischer Systeme stehen methodische Ansätze zur Verfügung, die sich u. a. in Bezug auf den Einsatzzweck, die Art der Information und die Art der Abstraktion unterscheiden. Dementsprechend können in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Planungsaufgabe bzw. Entscheidungssituation verschiedenartige Modelle für die Entscheidungsunterstützung verwendet werden. Nachfolgend werden ausgewählte Modelle für die Planung differenziert nach dem angestrebten Einsatzzweck eines Modells beschrieben [23], [79], [80].

3.2.2.1 Beschreibungsmodelle

Mit Beschreibungsmodellen lassen sich empirisch beobachtbare Beziehungen bzw. die Verknüpfung einzelner oder aber mehrerer Tatbestände in Systemen abbilden. Eine explizite Erklärung der kausalen Zusammenhänge kann mit entsprechenden Modellen nicht gegeben werden. Generell liefern Beschreibungsmodelle rein deskriptive Modellaussagen. In Bezug auf die zeitliche Dimension ist es möglich, dass diese Modelle nicht nur vergangenheits- sondern auch zukunftsorientiert ausgerichtet sind [80], [81].

3.2.2.2 Erklärungsmodelle

Zur Erklärung des Systemverhaltens dient die Analyse von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen. Erklärungsmodelle können als eine Verknüpfung von mehreren Sachverhalten verstanden werden, die erklärende und zu erklärende Größen verbinden. Dabei erklärt die unabhängige Variable (Instrumentvariable, gesuchte Größe) ursächlich die abhängige Variable (Erwartungsvariable, gegebene Größe). In der Regel werden Einschränkungen in einer entsprechenden Verknüpfung über Nebenbedingungen definiert. Mit Erklärungsmodellen ist die Darstellung kausaler Zusammenhänge möglich [23], [80].

3.2.2.3 Prognosemodelle

Sind unabhängige Variablen als potenzielle Handlungsalternativen zu verstehen, können Wirkungen auf die abhängigen Variablen des Modells prognostiziert werden. Dabei können die erklärenden Variablen sowohl Vergangenheits- als auch Zukunftscharakter aufweisen, während die zu erklärende Variable zukunftsorientiert ist. Somit dienen Prognosemodelle der Datenvorhersage sowie der Beurteilung von Konsequenzen einzelner Handlungsoptionen. Die Prognose von Sachverhalten verlangt ausreichende Informationen in Bezug auf den Sachverhalt beeinflussende Kriterien und deren Zusammenspiel [23], [80], [81].

3.2.2.4 Entscheidungsmodelle

Entscheidungsmodelle zeichnen sich neben den erklärenden Ursache-Wirkungs-Beziehungen durch die Einbeziehung von Zielfunktionen zur Bewertung von Handlungsoptionen sowie zur Auswahl der günstigsten Alternative aus. Daneben können Entscheidungsmodelle als eine Zusammenfassung von Prognose- und Beschreibungsmodellen gesehen werden. Letztere können sowohl vergangenheits- als auch zukunftsorientiert sein. Aufgabe von Entscheidungsmodellen ist es u. a. Handlungsmöglichkeiten abzuleiten, die Vorgehensweisen zur Zielerreichung abbilden [23], [80], [81].

3.3 Optimierung der Biomassebereitstellung

Die Optimierung in der Logistik kann in Bezug auf unterschiedliche Zielsetzungen erfolgen, wobei insbesondere in den letzten Jahren erneut die ökologische Dimension innerhalb eines nachhaltigen Logistikmanagements diskutiert wurde (bereits Ende der 80er und Anfang der

90er Jahre wurde die ökologische Dimension innerhalb der Logistik besonders hervorgehoben) [82], [83], [84].

Die Optimierung kann als eine Methode zur Unterstützung der Entscheidungsfindung verstanden werden [85]. In der Mathematik umfasst der Begriff der Optimierung die Ermittlung eines Maximums oder Minimums einer entsprechenden Funktion innerhalb eines vordefinierten Bereichs. Dabei kann ein angestrebter Zustand durch unterschiedliche Zielsetzungen beschrieben werden, die untereinander in Konkurrenz stehen. Demnach kann eine Lösung, die für einen Sachverhalt die optimale Allokation darstellt, für einen anderen nicht optimal sein. In ihrer einfachsten Form enthalten Optimierungsmodelle mindestens eine Alternativenmenge und eine diese bewertende Zielfunktion [86], [87], [88]. Wird die rechnergestützte Lösung eines Problems angestrebt, besteht die Notwendigkeit der mathematischen Formulierung eines Lösungsansatzes. Das zu lösende Problem (sog. Realproblem) muss in ein mathematisches Problem (sog. Formalproblem) projiziert werden [87].

Wesentliche Begriffe zur Optimierung der Biomassebereitstellung sind in Kapitel A.1 erklärt.

3.3.1 Aufgaben der Optimierung von Bereitstellungssystemen

Die Optimierung im Allgemeinen sowie von logistischen Systemen im Speziellen hat zur Aufgabe, aus einer Menge von realisierbaren Alternativen die im Sinne einer Zielvorstellung optimale, nahezu optimale bzw. zulässige Lösung eines betrachteten Problems unter Anwendung spezieller Verfahren und Modelle zu identifizieren [89], [90], [91], [92], [93].

Die Optimierung der Biomassebereitstellung zielt gegenwärtig verstärkt auf die Minimierung der Bereitstellungskosten frei Anlage ab. Für die Bereitstellung von Energie aus Biomasse bedarf es jedoch auch einer stärkeren Berücksichtigung der Umweltauswirkungen. Die Minimierung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), entlang der Gesamtbereitstellungskette von Energie und somit auch im Rahmen der Biomassebereitstellung, ist dabei von zunehmender Bedeutung (insbesondere im Rahmen der politischen Diskussion). Innerhalb der Optimierung der Biomassebereitstellung sind somit ökonomische und ökologische Zielkriterien zu verfolgen (vgl. hierzu auch Kapitel 4.4).

3.3.2 Optimierungsverfahren

Nachfolgend werden ausgewählte quantitative Optimierungsmodelle vorgestellt, die für eine Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Optimierung der Biomassebereitstellung in Frage kommen.

3.3.2.1 Deterministische einkriterielle Optimierungsmodelle

Beim Einsatz deterministischer Optimierungsmodelle werden die Daten und Wirkungszusammenhänge als bekannt vorausgesetzt, so dass eine Ermittlung der Lösung numerisch möglich ist. Deterministische Optimierungsmodelle können in (i) lineare, (ii) ganzzahlig lineare und (iii) nicht-lineare Optimierungsmodelle unterteilt werden [23], [86], [87], [94].

In der linearen Optimierung werden mathematische Modelle bestehend aus linearen Gleichungen und Ungleichungen angewendet, die zur Minimierung bzw. Maximierung von linearen Zielfunktionen unter Einbeziehung linearer Nebenfunktionen dienen [87], [94].

Für die Ermittlung der bestmöglichen Lösungen innerhalb (gemischt-)ganzzahliger Optimierungen werden Modelle verwendet, in denen alle oder zumindest einige Variablen Ganzzahligkeitsbedingungen erfüllen müssen [86], [87].

Modelle, die in der nicht-linearen Optimierung zum Einsatz kommen, sind durch nicht-lineare Zielfunktionen bzw. Nebenbedingungen gekennzeichnet. Dabei können entsprechende Modelle Variablen beinhalten, die reeller, ganzzahliger und/oder binärer Natur sind [23], [94].

3.3.2.2 Multikriterielle Optimierungsmodelle

Im Rahmen der Entscheidungsfindung bei mehrfacher Zielsetzung kann zwischen zwei Formen der Problemstellung differenziert werden. Der Auswahl gegebener Alternativen aus einer endlichen Menge stehen Planungsprobleme mit einer Vielzahl an Entscheidungsvariablen mit bestimmten Restriktionen gegenüber. Während für die Betrachtung der Alternativenauswahl analytische Verfahren zur Verfügung stehen, kommen für die Betrachtung von Planungsproblemen mit mehreren Entscheidungsvariablen überwiegend deterministisch multikriterielle Optimierungsmodelle zur Anwendung [95].

Die Ermittlung der Lösung solcher Probleme kann durch (i) die lexikographische Ordnung von Zielen, (ii) Zieldominanz sowie (iii) Zielgewichtung erfolgen. Insbesondere bei konkurrierenden Zielsetzungen, die nicht einheitlich skaliert werden können, besteht mit der lexikographischen Herangehensweise eine Option zur Lösung durch die Ermittlung des Pareto-Optimums [83], [86], [96].

3.3.2.3 Stochastische Optimierungsmodelle

Kennzeichnend für stochastische Optimierungsmodelle ist, dass anstelle deterministischer Werte die zugrunde liegenden Modellparameter nicht vollständig bekannt und sicher sind. Da aufgrund der Datenbestimmung über Zufallsvariablen keine eindeutige Optimalität und Zulässigkeit einer Lösung garantiert werden kann, ist die Erstellung eines lösbaren Optimierungsmodells nicht ohne weiteres möglich. Analog zu deterministischen Optimierungsmodellen ist eine Unterteilung stochastischer Modelle in (i) lineare, (ii) ganzzahlig lineare und (iii) nicht-lineare Optimierungsmodelle möglich [23].

3.4 Stand des Wissens

3.4.1 Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen

Ansätze zur Identifikation von Standorten für Biomassekonversionsanlagen beziehen vorrangig den Aspekt des Biomasseaufkommens und der Minimierung der Gesamtbereitstellungskosten für Biomasse in die Betrachtung ein [97]. In diesen Zusammenhang ist das notwendige Einzugsgebiet von Interesse, welches die Grundlage für die Ermittlung von Transportentfer-

nungen darstellt [29]. Darüber hinaus werden infrastrukturelle Aspekte der Biomasselogistik (z. B. Vorhandensein von Verladebahnhöfen) berücksichtigt [98]. Für die Standortidentifikation von Biomassekonversionsanlagen wird vorrangig ein rein ökonomischer Ansatz gewählt, wonach die kostenminimale Herstellung des gewünschten Endenergieträgers die Zielfunktion darstellt [99].

Zur Standortidentifikation für Biomethaneinspeiseanlagen (basierend auf der bio-chemischen Wandlung) gibt es Arbeiten, die innerhalb der Standortplanung die notwendige Distributionsinfrastruktur für Biomethan berücksichtigen (vgl. [100]). Anhand der Standortkriterien Gasnetz- und Biomasseverfügbarkeit werden auf Basis eines geografischen Informationssystems potenzielle Standorte für Biomethaneinspeiseanlagen ermittelt [100].

Zusätzlich sind methodische Ansätze zur Bestimmung von optimalen Standorten für Biomassekonversionsanlagen in der Entwicklung, die eine Optimierung nach ökonomischen und ökologischen Zielkriterien verfolgen. Die ökonomische Optimierung hat das Ziel minimaler Gesamtkosten, wohingegen die Minimierung der Umweltauswirkungen unterschiedlicher Wirkungskategorien bei der ökologischen Optimierung das Ziel ist. Die Parameter beider Zielfunktionen beziehen sich auf Transportprozesse (Rohstoffbereitstellung und Reststoffdistribution) und den Betrieb der Konversionsanlage [101].

In vielen der vorhandenen Ansätze fehlen jedoch in Bezug auf die Realisierung der Biomassebereitstellung an den Anlagenstandort Aussagen zur Flächenstruktur (z. B. Betriebsgrößenstruktur land- bzw. forstwirtschaftlicher Unternehmen), welche maßgeblichen Einfluss auf die Organisation der Bereitstellungskette haben. Weiterhin werden Aspekte der Nachfrageseite (z. B. Wärmesenke) oft nicht in die Standortidentifikation mit einbezogen, obwohl eine Einbindung sämtlicher erzeugter Energieträger in eine adäquate Nachfragestruktur am potenziellen Anlagenstandort von Bedeutung ist. Letzteres hat direkten Einfluss auf das ökologische als auch ökonomische Gesamtergebnis und trägt somit zur Minimierung der Produktionskosten von der angestrebten Nutz- bzw. Endenergie bei.

3.4.2 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung

Die Ausgestaltung der Biomassebereitstellung orientiert sich gegenwärtig primär an bereits bestehenden Logistikkonzepten, mit denen Anlagen der stofflichen Biomassenutzung respektive Be- und Verarbeitung versorgt werden [102]. Dabei handelt es sich vorwiegend um Logistikkonzepte, deren Ausgestaltung durch den Rohstoffbedarf eines Nachfragers (z. B. Holzbedarf einer Papierfabrik), den durchschnittlichen Flächenbedarf für die Rohstoffbereitstellung und damit durch die mittleren Transportentfernungen bestimmt wird [103].

Daneben werden für die Brennstoffbereitstellung u. a. räumliche Verteilungen von dezentralen Anlagen zur Konditionierung bzw. Vorbehandlung von Biomasse (z. B. zur Slurry-Produktion) für die Ermittlung der Transportentfernungen zu der zentralen Konversionsanlage verwendet. Dabei werden empirisch ermittelte Distanzen den rechnerisch bestimmten Transportentfernungen gegenübergestellt [98].

Innerhalb der Betrachtung von Bereitstellungstechnologien für Biomasse wird vielfach eine technische Verfügbarkeit zugrunde gelegt, die auf eine Praxistauglichkeit abzielt [104]. Jedoch ist die Berücksichtigung von Entwicklungsstadien (z. B. Prototyp; Serienprodukt) entsprechender Technologien notwendig, um objektive Aussagen (z. B. innerhalb der Dimensionierung der Bereitstellungskette) geben zu können.

Die Einbeziehung von zeitlichen Kriterien in die Logistikplanung erfolgt übergeordnet in Bezug auf die Ernte- bzw. Verfügbarmachung der Biomasse. Hierzu werden Konzepte der Lagerhaltung entwickelt, die eine ganzjährige Bereitstellung von Biomasse ermöglichen [102].

Dagegen sind in der Literatur keine Ansätze zur Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung zu finden, die sowohl technische, räumliche als auch zeitliche Rahmenbedingungen entlang der Bereitstellungskette von Biomasse berücksichtigen. Dabei ist eine integrierte Betrachtung der Planung des Materialflusses notwendig. Diese sollte sowohl die Voraussetzungen am Ort des Biomasseanfalls, die Bandbreite der Alternativen zur Biomassebereitstellung sowie die Anforderungen am Konversionsanlagenstandort einbeziehen. Darüber hinaus sollten zur Sicherstellung einer effizienten Ausgestaltung der Bereitstellung von Biomasse die Zielkriterien Logistikleistung und -kosten verfolgt werden.

3.4.3 Optimierung der Biomassebereitstellung

Die Optimierung der Biomassebereitstellung an großtechnischen Konversionsanlagen (z. B. Biomasseheizkraftwerke) verfolgt vordergründig die Minimierung der Bereitstellungskosten von Biomasse [98], [103]. Zur Reduktion der Bereitstellungskosten werden u. a. Aspekte wie Leerfahrtenanteil, Gestaltung von Touren bzw. Standzeiten von Transportfahrzeugen optimiert [105].

Insbesondere im Rahmen der Bereitstellung von lokal verfügbaren Biomassen findet die ökologische Dimension in der Optimierung bzw. bei Systemen der Entscheidungsfindung eine Berücksichtigung. Hierbei ist insbesondere die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs mit dem Ziel der Minimierung der THG-Emissionen von Interesse [106].

Die ökonomische und ökologische Dimension der Bereitstellung von Biomassen wird verstärkt in der Literatur beschrieben. Dabei werden vorrangig aus einer Menge an bestehenden bzw. etablierten Logistikkonzepten singular die ökonomischen und ökologischen Zielgrößen bestimmt [107]. Dagegen ist die gleichzeitige Betrachtung entsprechender Zielsetzungen (unter Voraussetzung der gleichen Stellung bzw. Hierarchie der Zielwerte) im Rahmen der Optimierung der Biomassebereitstellung an Konversionsanlagen bisher noch nicht erfolgt.

Daher ist es notwendig, eine Vorgehensweise zur Bestimmung ökonomisch-ökologisch optimaler (z. B. Minimierung der Bereitstellungskosten und THG-Emissionen) und standortangepasster Bereitstellungskonzepte zu entwickeln. Damit können transparent Aussagen zu einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Bereitstellung von Biomasse gemacht werden.

4 Methodische Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird einleitend der methodische Gesamtansatz zur Bestimmung logistisch effizienter und ökonomisch-ökologisch optimierter Biomassebereitstellungskonzepte an zuvor ermittelten Konversionsanlagenstandorten vorgestellt. Nachfolgend werden dazu die Methodiken der Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen, der Planung des Materialflusses sowie der Optimierung der Biomassebereitstellung beschrieben.

4.1 Methodischer Gesamtansatz

Für die Bestimmung einer Vorgehensweise zur Ableitung logistisch effizienter und ökonomisch-ökologisch optimierter Bereitstellungskonzepte für Biomasse an zuvor ausgewählten Konversionsanlagenstandorten ist eine strukturierte Herangehensweise erforderlich, um den Anspruch einer transparenten Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Dies beinhaltet im Rahmen dieser Arbeit die in Abb. 4-1 dargestellte Struktur. Dabei untergliedert sich die nachfolgende Planung in die Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen, die Planung des Materialflusses und die anschließende Optimierung der Biomassebereitstellung.

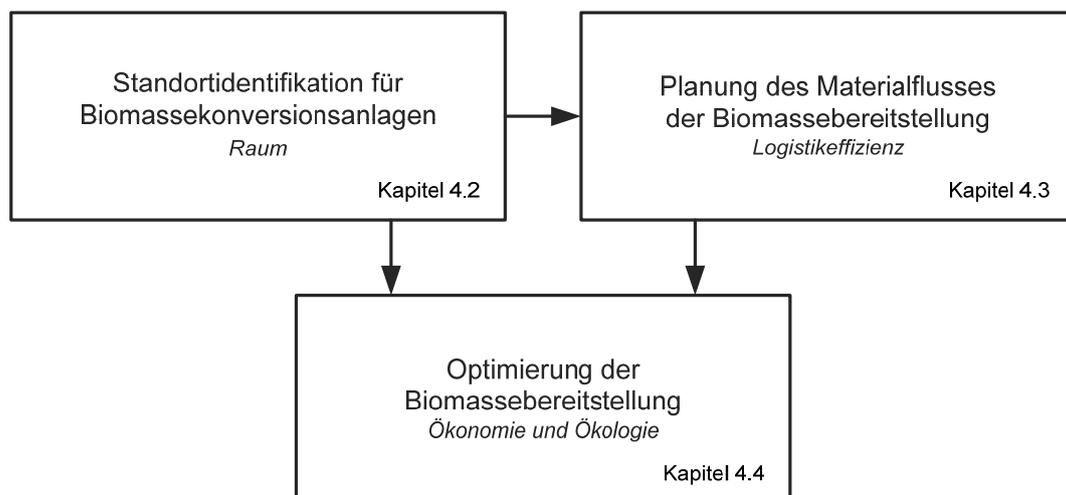


Abb. 4-1: Methodischer Gesamtansatz

Um einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb zu ermöglichen, sind u. a. ein ausreichendes Biomasseangebot, eine adäquate Infrastruktur zur Brennstoffbereitstellung sowie zur Distribution von Nutz- und Endenergie als auch die entsprechende Energienachfrage eine Grundvoraussetzung. Die Analyse potenzieller Anlagenstandorte erfolgt mit Hilfe der Standortidentifikation, wobei die erforderliche Methodik hierfür in Kapitel 4.2 genau beschrieben wird.

Darauf aufbauend werden für die identifizierten Standorte von Biomassekonversionsanlagen aussichtsreiche Bereitstellungskonzepte ermittelt, die sowohl eine praktische Umsetzbarkeit erlauben als auch die notwendigen Anforderungen der logistischen Effizienz erfüllen. Für die Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung wird die zugehörige systematische Vorgehensweise in Kapitel 4.3 erläutert.

Im Anschluss daran werden ökonomisch-ökologisch optimierte Bereitstellungskonzepte bestimmt. In diesem Planungsschritt der Biomassebereitstellung wird die stärkere Ausnutzung der in den vorgelagerten Planungshorizonten abgeleiteten Leistungspotenziale angestrebt [108]. Die zugehörige methodische Vorgehensweise der Optimierung der Biomassebereitstellung wird in Kapitel 4.4 detailliert vorgestellt.

4.2 Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen

Bei der Beurteilung von Standortalternativen sollten sowohl qualitative als auch quantitative Kenngrößen einbezogen werden (vgl. 3.1.2). Des Weiteren ist es von Bedeutung, die relevanten Kenngrößen bzw. Teilziele in Abhängigkeit der Betrachtungsebene (z. B. national, regional, lokal) bewerten zu können. Deshalb ist eine systematische Vorgehensweise erforderlich, die sowohl eine Strukturierung als auch Hierarchisierung des Entscheidungsproblems ermöglicht [70], [109]. Deswegen wird für die nachfolgende Bewertungsmethodik zur Identifikation von Standorten für Biomassekonversionsanlagen die Nutzwertanalyse angewendet.

In Abb. 4-2 sind die Schritte der methodischen Vorgehensweise im Rahmen der Standortidentifikation vorgestellt.

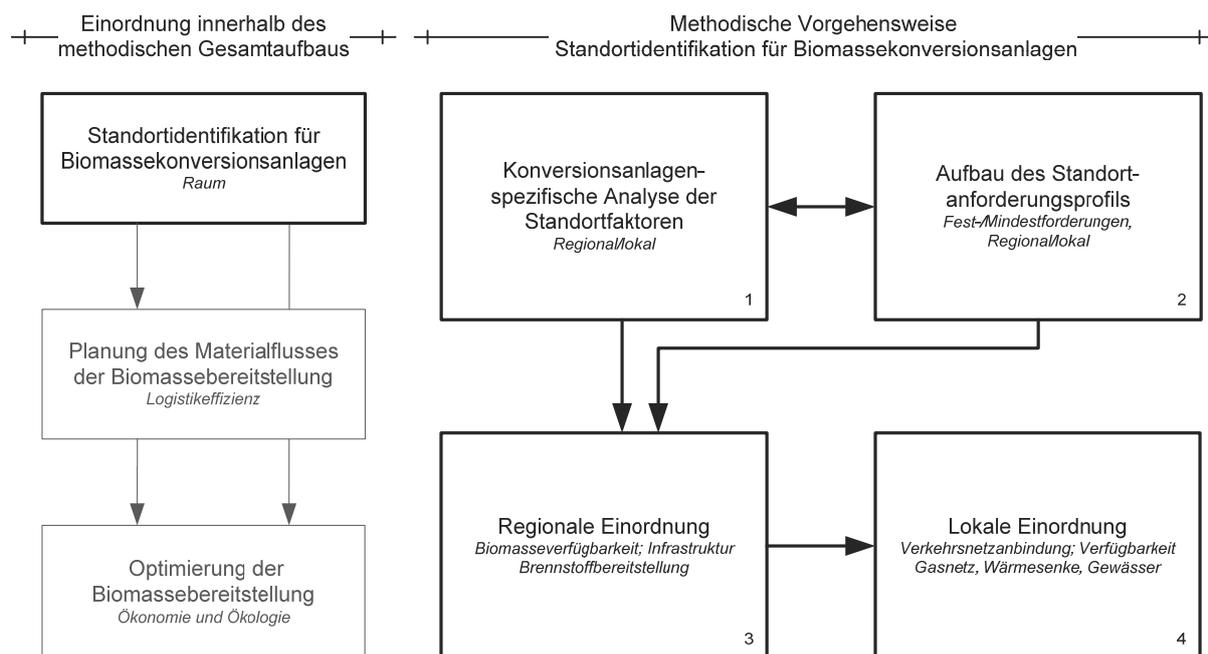


Abb. 4-2: Vorgehensweise bei der Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen

Zur Identifikation von Konversionsanlagenstandorten werden zunächst (1) die Standortfaktoren auf regionaler (d. h. auf Landkreisebene) und lokaler Ebene (d. h. auf Ebene von Städten und Gemeinden) in Abhängigkeit der betrachteten Biomassesortimente und Konversionsanlagentechnologie ermittelt. Darauf aufbauend wird (2) ein Standortanforderungsprofil erstellt, unter Berücksichtigung der innerhalb der Standortfaktoren gewählten Zielgrößen. Mit Hilfe der Nutzwertanalyse werden (3) aussichtsreiche Regionen anhand der in (2) festgelegten Standortkriterien bzw. -anforderungen abgeleitet. Die lokale Einordnung und damit die Er-

mittlung (4) der optimalen Konversionsanlagenstandorte beruht auf einer qualitativen Beurteilung von Standortalternativen in Bezug auf die Verfügbarkeit infrastruktureller Voraussetzungen. Nachfolgend werden detailliert die einzelnen Schritte beschrieben.

4.2.1 Konversionsanlagenspezifische Analyse der Standortfaktoren

Aufgrund der Brennstoffbereitstellung an Konversionsanlagen und der Distribution von Nutz- und Endenergie (z. B. Wärme über ein Wärmenetz, Biomethan über das Erdgasnetz) ist eine Ausrichtung der Standortfaktoren an den Kriterien Rohstoff und Infrastruktur sinnvoll.

Auf regionaler Ebene sind innerhalb der Zielgröße Rohstoff u. a. die Kriterien Biomasseverfügbarkeit und durchschnittliche Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion für die Beurteilung bedeutend und werden demnach ausgewählt [97], [110]. Die Verfügbarkeit von Biomasse in einer Region wird mit Hilfe des flächenspezifischen technischen Biomassepotenzials und dem möglichen Nutzungsgrad abgebildet. Das flächenspezifische Biomassepotenzial ergibt sich aus dem Verhältnis des technischen Biomassepotenzials eines Landkreises und dessen Gesamtfläche. Die Betriebsgrößenstruktur von land- und forstwirtschaftlichen Unternehmen und insbesondere die mittlere Schlag- bzw. Parzellengröße haben direkten Einfluss auf die Ausgestaltung der Biomassebereitstellung. Für hohe Flächen- und Durchsatzleistungen sind vorrangig während der Ernte und Verfügbarmachung groß strukturierte land- und forstwirtschaftliche Unternehmen vorteilhaft [111]. Die durchschnittliche Betriebsgrößenstruktur leitet sich aus der land- bzw. forstwirtschaftlichen Nutzfläche und der Anzahl land- bzw. forstwirtschaftlicher Unternehmen in einer betrachteten Region ab.

Die regionalen Standortfaktoren in Bezug auf die Zielgröße Infrastruktur beziehen sich auf die Verfügbarkeit der Verkehrsträger Schiene und Binnenwasserstraße in den betrachteten Landkreisen.

Lokale Standortfaktoren werden ausschließlich aus dem Bereich Infrastruktur ausgewählt, wobei der Anbindung an die Verkehrsträger zur Brennstoffbereitstellung sowie an das Distributionsnetz der zu verteilenden Nutz- bzw. Endenergieträger von Bedeutung ist. Dabei werden für eine mögliche Etablierung von Konversionsanlagen hier ausschließlich Industriegebiete als potenzielle Standorte in Betracht gezogen. Somit kann von einer grundsätzlichen Anbindung an das Straßennetz ausgegangen werden. Die Anbindung an das Schienen- und das Binnenwasserstraßennetz stellt in diesem Zusammenhang die lokalen Faktoren der Rohstoffversorgungsseite dar. In Bezug auf die Distribution der Nutz- bzw. Endenergie ergeben sich als Standortfaktoren auf lokaler Ebene die Verfügbarkeit einer industriellen Wärmesenke, eines Strom- sowie eines Erdgasnetzes. Des Weiteren stellt in Abhängigkeit der betrachteten Konversionsanlagentechnologie auf lokaler Ebene die Wasserversorgung (u. a. für die Bereitstellung von Kühlwasser) einen bedeutenden Standortfaktor im Rahmen der Standortidentifikation dar.

4.2.2 Aufbau des Standortanforderungsprofils

Unabhängig von der Konversionsanlagengröße und -technologie sollen potenzielle Regionen für einen Anlagenstandort über ausreichend hohe flächenspezifische Biomassepotenziale sowie hohe Betriebsgrößenstrukturen der Primärproduktion verfügen. Soll die Bereitstellung von Biomasse an die Konversionsanlage ohne Nachlauf erfolgen, sind für die Gewährleistung einer effizienten Logistik, insbesondere eines effizienten Umschlags von dem Hauptlauftransportmittel an der Konversionsanlage infrastrukturelle Voraussetzungen notwendig.

Die lokalen Anforderungen an die Infrastruktur beziehen sich einerseits auf die Brennstoffbereitstellung (z. B. Verladebahnhof, Hafen) und andererseits auf die Verteilung der Nutz- bzw. Endenergieträger. Folgende Kriterien sind in Abhängigkeit von dem betrachteten Umwandlungspfad und der Anlagengröße bedeutend: (i) Verfügbarkeit einer industriellen Wärmesenke, (ii) Zugang an das Stromnetz sowie (iii) Zugang an das Erdgasnetz. Darüber hinaus kann die Kühlwasserversorgung als eine lokale Anforderung an einen Standort festgelegt werden.

In Tabelle 4-1 ist ein exemplarisches Anforderungsprofil für Standorte zur Etablierung von Biomassekonversionsanlagen gegeben. Die Anforderungen an einen Anlagenstandort werden in einem Standortanforderungsprofil untergliedert nach der Betrachtungsebene (regional, lokal) sowie dem Status der Forderung (Fest-, Mindestforderung) und den gegebenen Standortfaktoren vergleichend gegenübergestellt. Dabei sind Festforderungen als eine notwendige Bedingung (bzw. K.-o.-Kriterium) zu verstehen. Eine Mindestforderung stellt einen bestimmten Grenz- bzw. Schwellenwert dar, welcher in Abhängigkeit des betrachteten Sachverhaltes nicht unter- bzw. überschritten werden darf.

Tabelle 4-1: Beispielhaftes Standortanforderungsprofil (in Anlehnung an [70])

KVA	Festforderungen		Mindestforderungen	
	30	200	30	200
Regionale Standortfaktoren	Hohes flächenspezifisches Biomassepotenzial		-	
	Hohe Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion		-	
	Verfügbarkeit Schienennetz		-	
	Verfügbarkeit Binnenwasserstraßennetz		-	
Lokale Standortfaktoren	Netzanbindung Schiene		Verladebahnhof	
	Netzanbindung Binnenwasserstraße		Hafen	
	Wärmenetzanbindung		UG bis OG MW _{th}	UG bis OG MW _{th}
	Erdgasnetzzugang		< OG bar	< OG bar

KVA – Konversionsanlagengröße in MW_{BWL}; OG – Obergrenze; UG – Untergrenze

4.2.3 Regionale Einordnung

Aufbauend auf das regionale Anforderungsprofil werden die Regionen nach ihrer Vorteilhaftigkeit in Bezug auf die Zielgrößen Rohstoff und Infrastruktur beurteilt. Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Bedeutung einzelner Standortfaktoren müssen diese zunächst in Abhängigkeit des Leistungsbereiches der Konversionsanlage gewichtet werden. Eine entsprechende Gewichtung der Standortfaktoren erfolgt im Rahmen der Nutzwertanalyse (vgl. [74]) mit Hilfe des Rangfolgeverfahrens spezifisch auf den Anwender bezogen.

Grundsätzlich muss zwischen den Zielgrößen mit Bezug auf die Konversionsanlagengröße eine differenzierte Betrachtung bzw. Gewichtung durchgeführt werden. Während für Biomassekonversionsanlagen mit straßengebundenen Brennstoffbereitstellungskonzepten der Aspekt der Rohstoffverfügbarkeit in der Region von hoher Bedeutung ist, dominieren für Konversionsanlagen, deren Biomassebereitstellung aus Vor- und Hauptlauf besteht (z. B. Vorlauf LKW; Hauptlauf Bahn), die infrastrukturellen Voraussetzungen am Anlagenstandort (vgl. Tabelle A 3-2 und Tabelle A 3-3). Demnach werden Hierarchien für die Standortkriterien in Abhängigkeit der Brennstoffbereitstellungsstruktur festgelegt:

- Konversionsanlagen mit straßengebundenen Brennstoffbereitstellungskonzepten:
 1. Flächenspezifisches Biomassepotenzial
 2. Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion
 3. Verfügbarkeit des Verkehrsnetzes
- Konversionsanlagen mit Brennstoffbereitstellungskonzepten bestehend aus Vor- und Hauptlauf:
 1. Verfügbarkeit des Verkehrsnetzes
 2. Flächenspezifisches Biomassepotenzial
 3. Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion

Die betrachteten Biomassefraktionen, für welche das flächenspezifische Biomassepotenzial erhoben wird, besitzen untereinander eine gleiche Wichtigkeit. Ebenso wird die Größenstruktur land- und forstwirtschaftlicher Betriebe sowie die Verkehrsnetzverfügbarkeit von Schiene und Binnenwasserstraße untereinander als gleich wichtig betrachtet. In Tabelle 4-2 ist exemplarisch eine Gewichtungstabelle zur Bestimmung von Gewichtungsfaktoren dargestellt.

Tabelle 4-2: Gewichtungstabelle nach dem Rangfolgeverfahren zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren [66]

Nr.	Krit. _i	Krit. _{i+1}	Krit. _{i+2}	Anzahl der „+“	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Krit. _i		+	+	2	6	0,50
Krit. _{i+1}	-		+	1	4	0,33
Krit. _{i+2}	-	-		0	2	0,17
Anzahl der „-“	2	1	0			

Krit. Kriterium; „+“ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1} , Wert: 3; „0“ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1} , Wert: 2; „-“ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1} , Wert: 1

Die Kriterien werden in Abhängigkeit ihrer Hierarchiestufe (vgl. Abb. 4-3) auf Basis von standortspezifischen Vorgaben gewichtet, wobei jeweils eine Einordnung der Kriterien untereinander in wichtiger, gleich wichtig bzw. weniger wichtig erfolgt. Unter Berücksichtigung der Wertzuordnung ergibt sich aus der Einordnung je Kriterium eine spezifische Punktzahl. Darauf basierend kann die Bestimmung des Gewichtungsfaktors eines Kriteriums als Quotient aus der spezifischen Punktzahl eines Kriteriums und der Gesamtpunktzahl aller Kriterien gebildet werden. Die Summe der Gewichtungsfaktoren muss grundsätzlich 1 ergeben. Durch die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren wird sichergestellt, dass bei einer nicht ausreichenden Erfüllung wichtiger Standortfaktoren ein Ausgleich über die Erfüllung untergeordneter Standortfaktoren nicht möglich ist, und somit nur aussichtsreiche Standorte in der nachfolgenden Bewertung ausgewählt werden [68].

Nach der Gewichtung der Standortkriterien erfolgt die Ableitung der vorteilhaftesten Regionen unter Einbeziehung der Nutzwertanalyse. Dabei wird die Methode zugrunde gelegt, dass die Wichtigkeit von einem Standortkriterium durch zwei verschiedene Gewichtungsfaktoren ausgedrückt wird. Unter dem Gruppengewicht (sog. Knotengewicht) wird die Wichtigkeit eines Standortkriteriums in Bezug auf das übergeordnete Kriterium verstanden. Seine Bestimmung erfolgt über das zuvor beschriebene Rangfolgeverfahren. Das Kriteriengewicht (sog. Stufengewicht) beschreibt die absolute Wichtigkeit eines Standortkriteriums innerhalb der betrachteten Hierarchiestufe und wird aus dem Produkt des Gruppengewichtes sowie dem nächst höherem Kriteriengewicht gebildet (vgl. Abb. 4-3) [68], [74].

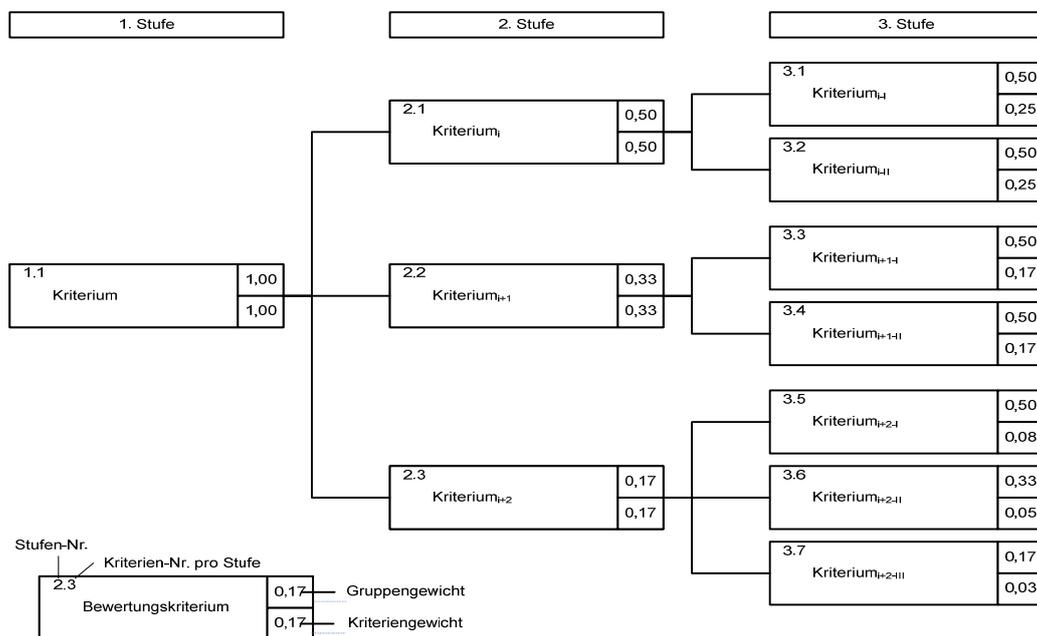


Abb. 4-3: Beispielhafte Hierarchiestruktur zur Einordnung von Kriterien und Bestimmung des Kriteriengewichtes nach der Nutzwertanalyse [68], [74]

Aufbauend auf der Gewichtung der Standortkriterien erfolgt eine Wertezuordnung durch die Vergabe von Punkten in Abhängigkeit des Erfüllungsgrades eines geforderten Kriteriums. Der Wertebereich der jeweiligen Kriterien kann beispielsweise in Quintile (Fünftelwert; Aus-

wahl anderer Verteilungen möglich (z. B. Viertelwert)) unterteilt werden. Die Grenzen des Wertebereiches sind durch den zugehörigen Minimal- und Maximalwert vorgegeben. Dabei entsprechen der Wert „1“ der schlechtesten Ausprägung eines Kriteriums und der Wert „5“ der besten Merkmalsausprägung. Im Anschluss daran werden die Wertausprägungen der jeweiligen Kriterien mit den zugehörigen Kriteriengewichten multipliziert. Die sich daraus ergebende Wertigkeit legt die Rangfolge der betrachteten Regionen in Bezug auf ihre Vorteilhaftigkeit für einen Konversionsanlagenstandort fest.

4.2.4 Lokale Einordnung

Die Ableitung potenzieller Standorte für Biomassekonversionsanlagen, erfolgt unter Berücksichtigung des Leistungsbereichs einer spezifischen Konversionsanlagentechnologie und den infrastrukturbezogenen Anforderungen. Zur Ermittlung von geeigneten lokalen Standortalternativen wird eingangs die Erfüllung festgelegter Forderungen in Bezug auf die zugehörigen lokalen Standortkriterien qualitativ beurteilt. Darauf aufbauend werden die qualitativen Ergebnisse der Beurteilung in Abhängigkeit ihrer Ausprägung in quantitative überführt. Durch die Summenbildung kann aus den quantitativen Ergebnissen je Standort die Rangfolge der betrachteten lokalen Standortalternativen ermittelt werden.

Tabelle 4-3: Exemplarische Beurteilung von lokalen Standortalternativen [68]

Standortkriterium	Art der Anforderung	Standortalternativen									
		A		B		C		D		E	
		ql.	qn.	ql.	qn.	ql.	qn.	ql.	qn.	ql.	qn.
I	Fest	+	2	+	2	+	2	+	2	-	0
II	Mindest	+	2	-	0	-	0	/	1	/	1
Summe Punkte		4		2		2		3		1	

ql. – qualitativ; qn. – quantitativ, „+“ - Anforderung erfüllt (zwei Punkte); „/“ – Anforderung teilweise erfüllt (ein Punkt); „-“ – Anforderung nicht erfüllt (null Punkte)

4.3 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung

Um Biomassebereitstellungskonzepte unter Berücksichtigung regionaler und lokaler Voraussetzungen (z. B. unterschiedliche infrastrukturelle Bedingungen, variierende Brennstoffe) auf ihre logistische Effizienz zu beurteilen, werden Bereitstellungsprozesse modelliert. Dazu wird ein gedachtes logistisches System mit Hilfe eines Modells abgebildet, womit u. a. der Untersuchungssachverhalt nachvollziehbar dargestellt werden kann.

Zur Analyse der Ursache-Wirkungs-Beziehungen eignen sich Erklärungsmodelle (vgl. Kapitel 3.2.2.2) und werden dementsprechend in die Untersuchung einbezogen. Damit ist es möglich, logistische Systeme formal darzustellen sowie kausale, zeitliche und räumliche Zusammenhänge abzubilden. Darüber hinaus ermöglichen Erklärungsmodelle die Bereitstellung von Informationen für die nachfolgende Bestimmung der logistischen Effizienz (z. B. Dimensio-

nierung des Materialflusses erlaubt Aussagen zur Leistungs- und Kostenstruktur der Brennstoffbereitstellung anhand von definierten logistischen Kennzahlen).

Um die in der Zielformulierung beschriebenen Aufgaben zu erfüllen, wird die nachfolgende Vorgehensweise definiert, die direkte Aussagen über die logistische Effizienz der betrachteten Bereitstellungskonzepte innerhalb der angenommenen Randbedingungen erlaubt (Abb. 4-4).

Zunächst werden logistische Konzepte identifiziert und ausgewählt, die unter Berücksichtigung der Nachfrage der Konversionsanlage nach dem bereitzustellenden Brennstoff in Frage kommen (1). Darauf aufbauend werden in Abhängigkeit der regionsspezifischen Voraussetzungen und der Konversionsanlagentechnologie sowie -größe die Randbedingungen in Bezug auf räumliche, zeitliche und technische Kriterien festgelegt (2). Anhand der definierten Rahmenbedingungen wird das Einzugsgebiet für Biomasse sowie die mittlere Transportdistanz von der Quelle bis zur Senke berechnet, wobei dieser Schritt eine Voraussetzung für die anschließende Dimensionierung der Bereitstellungskette darstellt. Erst durch die Ermittlung der Anzahl von Arbeitsmitteln (d. h. die in den Bereitstellungsprozessen notwendigen Technologien) innerhalb eines Bereitstellungskonzeptes (3) ist die Berechnung der ausgewählten Kennzahlen und damit die Darstellung des logistischen Systems möglich (4). Auf Basis der ermittelten Logistikkennzahlen werden die Rangfolge der betrachteten Bereitstellungskonzepte und damit logistisch effiziente Bereitstellungsketten abgeleitet. Nachfolgend werden die Schritte zur Beurteilung der logistischen Effizienz von Bereitstellungsketten vorgestellt.

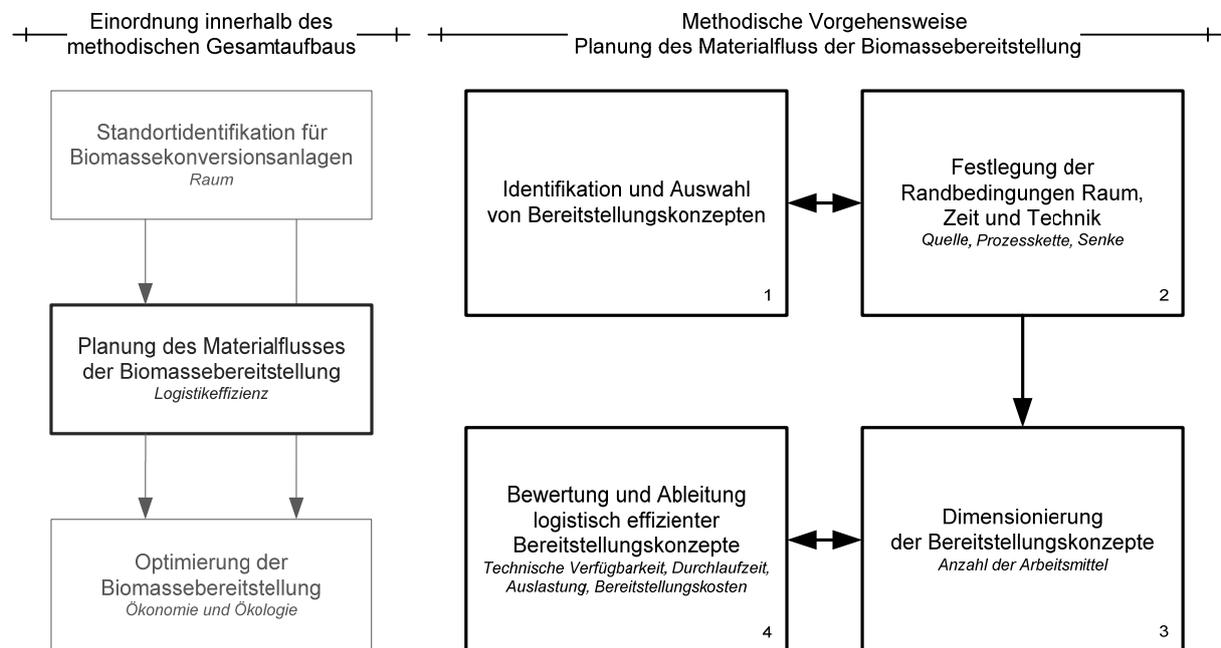


Abb. 4-4: Vorgehensweise bei der Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung

4.3.1 Identifikation und Auswahl von Bereitstellungskonzepten

Zur Versorgung von Konversionsanlagen mit Biomasse steht eine Vielzahl von Bereitstellungskonzepten zur Verfügung. Um relevante Bereitstellungsketten auswählen zu können, die in eine nachfolgende Betrachtung einbezogen werden, ist die Identifikation bzw. Einordnung von Konzepten zur Brennstoffbereitstellung notwendig. Dafür sind die nachfolgenden aufkommens- und nutzungsseitigen Kriterien von Bedeutung:

- Ursprung der Biomasse (z. B. Land- / Forstwirtschaft) und saisonale Verfügbarkeit
- Brennstoffbedarf der Konversionsanlage und saisonale Nachfrageschwankungen
- Brennstoffqualität (z. B. Wassergehalt)
- Infrastrukturelle Voraussetzungen entlang der gesamten Bereitstellungskette

In Abhängigkeit der genannten Kriterien werden mögliche Bereitstellungskonzepte ausgewählt.

4.3.2 Festlegung der Randbedingungen Raum, Zeit und Technik

Die Festlegung der zeitlichen, räumlichen und technischen Randbedingungen orientiert sich an der Bereitstellungsstruktur bzw. den Randbedingungen des untersuchten Beispiels. Dabei werden die relevanten Bedingungen an der Quelle, entlang der Bereitstellungskette und an der Senke definiert. In Tabelle 4-4 ist eine Übersicht zu den Randbedingungen gegeben, die als Grundlage für das abzubildende Modell festzulegen sind.

Tabelle 4-4: Festzulegende Randbedingungen entlang der Bereitstellungskette von Biomasse

Bedingung	Quelle	Bereitstellungskette	Senke
Zeit	Zeitraum der Ernte bzw. Verfügarmachung; wöchentliche und tägliche Ernte- bzw. Verfügarmachungszeit	Umschlagszeit	Anlieferungszeitraum; wöchentliche und tägliche Anlieferungszeit; Zeitraum Vorratslager
Raum	Distanzen für Umschlag an Lagerstandorten	Distanzen für Umschlag an Lager- bzw. Umschlagsstandorten	Distanzen für Umschlag an Lager- bzw. Umschlagsstandorten; Infrastrukturelle Voraussetzungen (z. B. Gleisanbindung); Anzahl Verkehrsanbindungen
Technik	Flächenspezifisches Biomassepotenzial; Lagergröße; Bereitstellungsverluste ^a	Durchsatzleistung bzw. -geschwindigkeit der Arbeitsmittel; Ladekapazität der Transportmittel; Ausfallzeiten; Bereitstellungsverluste ^a	Jährlicher Brennstoffbedarf; Lagergröße; Bereitstellungsverluste ^a

^a Berücksichtigung der spezifischen Verluste die sich in den jeweiligen Bereichen ergeben (z. B. Ernte - Ernteverluste durch unvollständige Übergabe des Erntegutes von einem Feldhäcksler in ein parallel fahrendes Transportfahrzeug).

4.3.3 Dimensionierung der Bereitstellungskonzepte

Das Biomasseeinzugsgebiet (A_{ges}), das zur Versorgung einer Konversionsanlage mit Biomasse benötigt wird, errechnet sich aus dem flächenspezifischen Biomassepotenzial (p_a) und dem jährlichen Brennstoffbedarf (m_{KVA}) einer Konversionsanlage (Gleichung (4-1)).

$$A_{ges} = \frac{m_{KVA}}{p_a} \quad (4-1)$$

Die Ermittlung der mittleren Transportdistanz beispielsweise von einem Brennstofflager an die Konversionsanlage wird unter der Annahme durchgeführt, dass das Biomasseeinzugsgebiet eine quadratische Struktur besitzt und die Konversionsanlage sich in der Mitte der Einzugsfläche befindet. Dabei wird nach dem in Abb. 4-5 dargestellten Ansatz grundsätzlich die maximale Transportdistanz zugrunde gelegt. Die gleiche Vorgehensweise wird für die Berechnung der Transportdistanz vom Ort des Biomasseanfalls an ein Lager verwendet. Im Gegensatz zu dem räumlichen Ansatz, wonach kreisförmige Einzugsgebiete zugrunde gelegt werden, erlaubt der gewählte Ansatz eine variable Einbeziehung von Einzugsflächen und eine flexible Anpassung an regionale Gegebenheiten. Darüber hinaus werden die Transportdistanzen ausschließlich in Bezug auf das Einzugsgebiet bestimmt, wonach die Bestimmung unter Verwendung von Umwegfaktoren vermieden werden kann [29]. Bei dem gewählten Ansatz wird tendenziell die tatsächliche Transportdistanz überhöht und liegt gegenüber der optimalen Transportdistanz um den Faktor $\sqrt{2}$ höher.

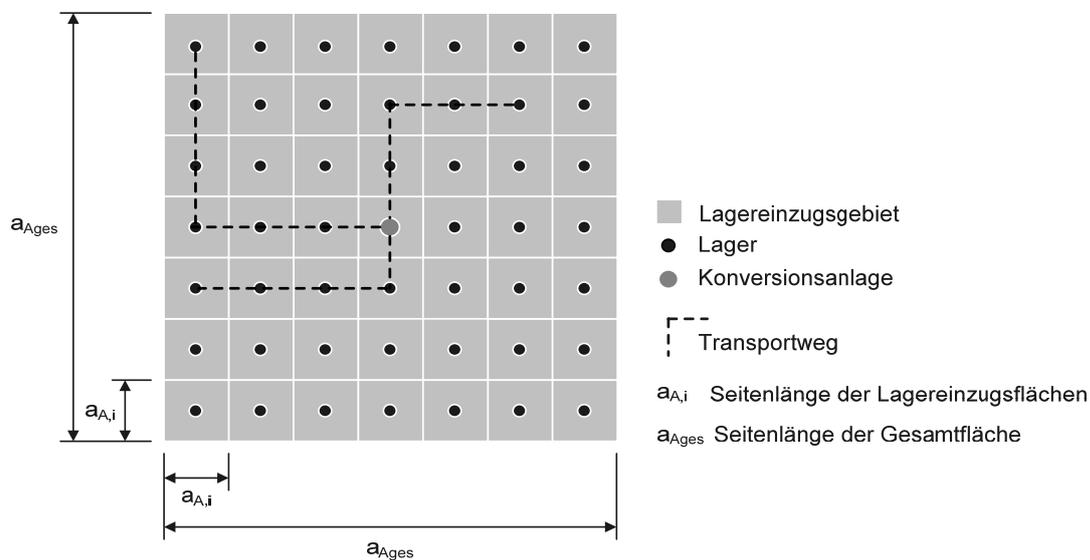


Abb. 4-5: Vereinfachter Ansatz zum Aufbau der räumlichen Struktur

Am Beispiel der Biomassebereitstellung über den Verkehrsträger Straße kann die mittlere Transportdistanz ($s_{T,ij}$) zwischen einem Lagerstandort und der Konversionsanlage nach Gleichung (4-2) aus der halben Seitenlänge des Biomasseeinzugsgebietes (a_{Ages}) berechnet werden.

$$s_{T,ij} = \frac{1}{2} a_{Ages} \quad (4-2)$$

Dabei kann die Seitenlänge des Einzugsgebietes aus dem Brennstoffbedarf der Konversionsanlage, dem Biomassebedarf aufgrund entstehender Verluste (z_{ges}) innerhalb der Bereitstellungskette und dem flächenspezifischen Biomassepotenzial ermittelt werden (Gleichung (4-3)).

$$a_{Ages} = \sqrt{\frac{m_{KVA} \left(1 + \frac{z_{ges}}{100\%}\right)}{p_A}} \quad (4-3)$$

Da für die Bereitstellung biogener Festbrennstoffe von der Quelle bis an die Senke bislang keine einheitliche systematische Darstellung des Ablaufschemas gegeben ist, zeigt Abb. 4-6 einen möglichen Klassifizierungsansatz.

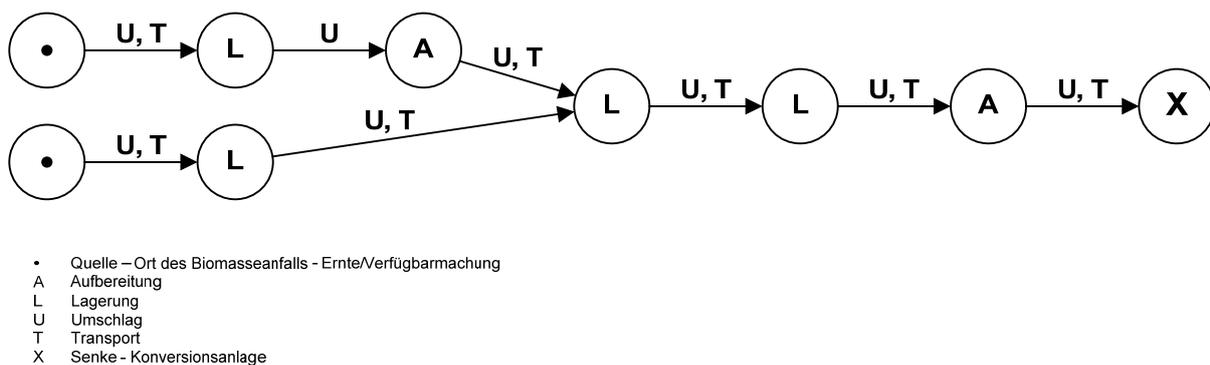


Abb. 4-6: Mögliche Ablaufstruktur für die Bereitstellung biogener Festbrennstoffe wie beispielsweise Kurzumtriebs- und Waldrestholz

Die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Unsicherheiten (z. B. variierende Ausfallzeiten zwischen Technologien) innerhalb der Systemplanung der Biomassebereitstellung verlangt u. a. die Dimensionierung der möglichen Bereitstellungskonzepte, um sowohl eine effiziente Ausgestaltung als auch die erforderliche Erbringung logistischer Leistungsparameter zu gewährleisten. Deshalb werden nachfolgend die Berechnungsansätze für die Ermittlung der Arbeitsmittellanzahl in einer Bereitstellungskette dargestellt, wobei dies in Anlehnung an die Ablaufstruktur (Abb. 4-6) und unter Berücksichtigung von kapazitätsbezogenen Bandbreiten entsprechender Arbeitsmittel erfolgt.

Die Bestimmung der Anzahl an Arbeitsmitteln für die Ernte und separate Aufbereitung am Ort des Biomasseanfalls ($n_{E_{BA}, AB_{BAVL}}$) ergibt sich aus dem jährlichen Brennstoffbedarf, dem Erntezeitraum (t_E) sowie dem mittleren Durchsatz der Ernte- bzw. Aufbereitungsvariante respektive -technologie ($Q_{E_{BA}, AB_{BA}}$) (Gleichung (4-4)).

$$n_{E_{BA}, AB_{BAVL}} = \frac{m_{KVA}}{t_E Q_{E_{BA}, AB_{BA}}} \quad (4-4)$$

Die Anzahl der Arbeitsmittel, die für den Umschlag in ein Lager bzw. in eine Aufbereitungstechnologie am Ort des Biomasseanfalls ($n_{U_{AB_{BA}, L_{BA}}}$) benötigt werden, lässt sich mit der Gleichung (4-5) aus dem Quotienten der Brennstoffmenge eines Lagers (m_{Li}), der Erntezeit und dem Durchsatz der Umschlagsvariante (Q_U) berechnen.

$$n_{U_{AB_{BA}, L_{BA}}} = \frac{m_{Li}}{t_E Q_U} \quad (4-5)$$

Aus dem Quotienten des Brennstoffbedarfes, der Durchsatzleistung des Transportmittels von der Quelle an das Lager ($Q_{T_{BA}}$) und der Ernte- bzw. Verfügbarmachungszeit ergibt sich die Anzahl der Transportmittel vom Ort des Biomasseanfalls zu einem Lager bzw. einer Aufbereitungsanlage ($n_{T_{BA}}$) (Gleichung (4-6)).

$$n_{T_{BA}} = \frac{m_{KVA}}{t_E Q_{T_{BA}}} \quad (4-6)$$

Die Lageranzahl am Ort des Biomasseanfalls ($n_{L_{BA}}$) wird aus dem Quotienten von jährlichem Brennstoffbedarf einer Konversionsanlage und der Brennstoffmenge eines Lagers (m_{Li}) bestimmt (Gleichung (4-7)). Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die notwendigen Flächen für Lager am Ort des Biomasseanfalls verfügbar sind.

$$n_{L_{BA}} = \frac{m_{KVA}}{m_{Li}} \quad (4-7)$$

Für die Berechnung der Anzahl an Arbeitsmitteln, welche für die Aufbereitung nach einer Lagerung des Brennstoffes am Ort des Biomasseanfalls ($n_{AB_{BAAnL}}$) in Frage kommen, sind nach Gleichung (4-8) der Brennstoffbedarf, die Durchsatzleistung der Aufbereitungsanlage ($Q_{AB_{BAAnL}}$) und die Anlieferungszeit an die Konversionsanlage (t_{AL}) von Bedeutung.

$$n_{AB_{BAAnL}} = \frac{m_{KVA}}{Q_{AB_{BAAnL}} t_{AL}} \quad (4-8)$$

Die Anzahl der Transportmedien zur Bereitstellung der Biomasse von einem Lager an eine Konversionsanlage ($n_{T_{KVA}}$) errechnet sich nach Gleichung (4-9) aus der Gesamtbereitstellungszeit eines entsprechenden Transportmittels ($t_{Ges, TM}$ - Ermittlung der Gesamtbereitstellungszeit, vgl. Gleichung (A 4-1) bis Gleichung (A 4-4)) und der gesamten Anlieferungszeit an eine Konversionsanlage. Der direkte Transport der Biomasse (z. B. grüne Hackschnitzel) vom Ort des Biomasseanfalls an die Konversionsanlage ohne eine zwischenzeitliche Lage-

nung wird hier nicht betrachtet. Eine Lagerung wird vorausgesetzt, um u. a. die brennstofftechnischen Anforderungen zu erfüllen (z. B. Wassergehalt).

$$n_{T_{KVA}} = \frac{t_{Ges, TM}}{t_{AL}} \quad (4-9)$$

Mit Gleichung (4-10) kann die Anzahl an Arbeitsmitteln für den Umschlag in bzw. von Transportmitteln (n_{U_T}) bestimmt werden. Hierfür sind Informationen über die Anzahl an Transportmitteln und deren Kapazitäten (m_T), der Durchsatzleistung des Arbeitsmittels für den Umschlag sowie der maximalen Umschlagszeit ($t_{U_{max}}$) von Bedeutung.

$$n_{U_T} = \frac{m_T n_{T_{KVA}}}{Q_U t_{U_{max}}} \quad (4-10)$$

Sobald der finale Transport des Brennstoffes an die Konversionsanlage unterteilt in Vor- und Hauptlauf erfolgt, ist die Etablierung eines Zwischenlagers (ein Lager am Ort des Umschlags (z. B. Verladebahnhof) – beispielsweise von dem Transportmittel des Vorlaufs (z. B. LKW) auf ein Transportmittel des Hauptlaufs (z. B. Bahn)) notwendig. Die Anzahl dieser Lager orientiert sich an der Zahl vorhandener Umschlagsstandorte (vgl. Kapitel A.3).

Die Dimensionierung des Umschlages in ein Zwischenlager ($n_{U_{ZL}}$) ist abhängig von dem jährlichen Brennstoffbedarf, der Anlieferungszeit und der Durchsatzleistung des Umschlagsmittels. Die Arbeitsmittelanzahl für den Umschlag ergibt sich aus Gleichung (4-11).

$$n_{U_{ZL}} = \frac{m_{KVA}}{t_{AL} Q_U} \quad (4-11)$$

Die Zahl der Umschlags- bzw. Aufbereitungsmittel die am Konversionsanlagenstandort ($n_{U_{KVA, AB_{KVA}}}$) notwendig sind, wird aus dem Quotienten von jährlichen Brennstoffbedarf sowie der Durchsatzleistung entsprechender Technologien und der Anlieferungszeit an die Konversionsanlage bestimmt (Gleichung (4-12)).

$$n_{U_{KVA, AB_{KVA}}} = \frac{m_{KVA}}{t_{AL} Q_{U, AB}} \quad (4-12)$$

Als Ergebnis der Dimensionierung ist die Anzahl der notwendigen Arbeitsmittel je Prozesselement für die betrachteten Bereitstellungskonzepte gegeben.

4.3.4 Bewertung und Ableitung logistisch effizienter Bereitstellungskonzepte

Die Ermittlung effizienter Bereitstellungskonzepte gliedert sich in die zwei wesentlichen Schritte (i) Berechnung der Logistikkennzahlen und (ii) Festlegung der Rangfolge.

4.3.4.1 Berechnung der Logistikkennzahlen

Die Bestimmung der Logistikkennzahlen Verfügbarkeit (η_{Ges}), Durchlaufzeit (t_{DZGes}), Auslastung (ρ_{Ges}) und Bereitstellungskosten (c_{Ges}) wird nachfolgend beschrieben.

Verfügbarkeit

Unter Berücksichtigung der parallelen Anordnung der Arbeitsmittel innerhalb eines Prozesses sowie gleich hoher Ausfall- und Belegungszeiten kann die Verfügbarkeit eines Prozesselementes (η_{PE}) in der Bereitstellungskette entsprechend der Gleichung (4-13) bestimmt werden [112], [113].

$$\eta_{PE} = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n) \quad (4-13)$$

Zusätzlich wird angenommen, dass die einzelnen aufeinander folgenden Prozesse in der Bereitstellung von Biomasse in Reihe angeordnet sind. Demnach ergibt sich die Gesamtverfügbarkeit der Bereitstellungskette aus dem Produkt der Verfügbarkeiten der integrierten Prozesselemente nach Gleichung (4-14) [112], [113].

$$\eta_{Ges} = \eta_{PE1} \eta_{PE2} \dots \eta_{PEn} \quad (4-14)$$

Durchlaufzeit

Die Gesamtdurchlaufzeit der betrachteten Brennstoffe wird aus der Summe der Einzeldurchlaufzeiten ($DZPE$) innerhalb der relevanten Prozesselemente berechnet (Gleichung (4-15)) [23].

$$t_{DZGes} = \sum_{PE=1} t_{DZPE} \quad (4-15)$$

Auslastung

Die Gesamtauslastung der Bereitstellungskette setzt sich aus der Einzelauslastung der integrierten Arbeitsmittel zusammen und kann aus dem Verhältnis der Summe der Durchsätze (λ_{PE}) zu den Grenzdurchsätzen (γ_{PE}) der betrachteten Prozesselemente ermittelt werden (Gleichung (4-16)) [23].

$$\rho_{Ges} = \frac{\sum_{PE=1} \lambda_{PE}}{\sum_{PE=1} \gamma_{PE}} \quad (4-16)$$

Bereitstellungskosten

Neben den Kennzahlen der Logistikleistung ist die Kostenkennzahl der Brennstoffbereitstellung von Bedeutung. Diese beinhaltet die Bereitstellungskosten der Prozesse Ern-

te/Verfügbarmachung (c_{Eges}), Lagerung (c_{Lges}), Aufbereitung (c_{ABges}), Umschlag (c_{Uges}) sowie Transport (c_{Tges}) und setzt sich damit aus der Summe der Einzelkosten der einzelnen Teilprozesse zusammen (Gleichung (4-17)).

$$c_{Ges} = c_{Eges} + c_{Lges} + c_{ABges} + c_{Uges} + c_{Tges} \quad (4-17)$$

4.3.4.2 Bestimmung der Rangfolge

Da die einzelnen Kennzahlen in Abhängigkeit des Betrachters unterschiedliche Wichtigkeit in der Analyse besitzen, erfolgt eine Gewichtung der Logistikkennzahlen nach dem Rangfolgeverfahren (vgl. Kapitel 4.2.3). Hierfür werden die zuvor bestimmten Kennzahlen anwenderspezifisch gewichtet und anschließend mit Hilfe einer Wertezuordnung die Rangfolge der betrachteten Bereitstellungskonzepte abgeleitet. Die resultierende Rangfolge gibt Auskunft über die Einordnung der betrachteten Bereitstellungskonzepte in Bezug auf ihre logistische Effizienz.

4.4 Optimierung der Biomassebereitstellung

Die Optimierung der Biomassebereitstellung ist in dieser Arbeit auf ökonomische und ökologische Zielkriterien ausgerichtet und basiert deshalb auf einer multikriteriellen Optimierung. In Abb. 4-7 ist ein Überblick zur methodischen Vorgehensweise der Optimierung der Biomassebereitstellung gegeben.

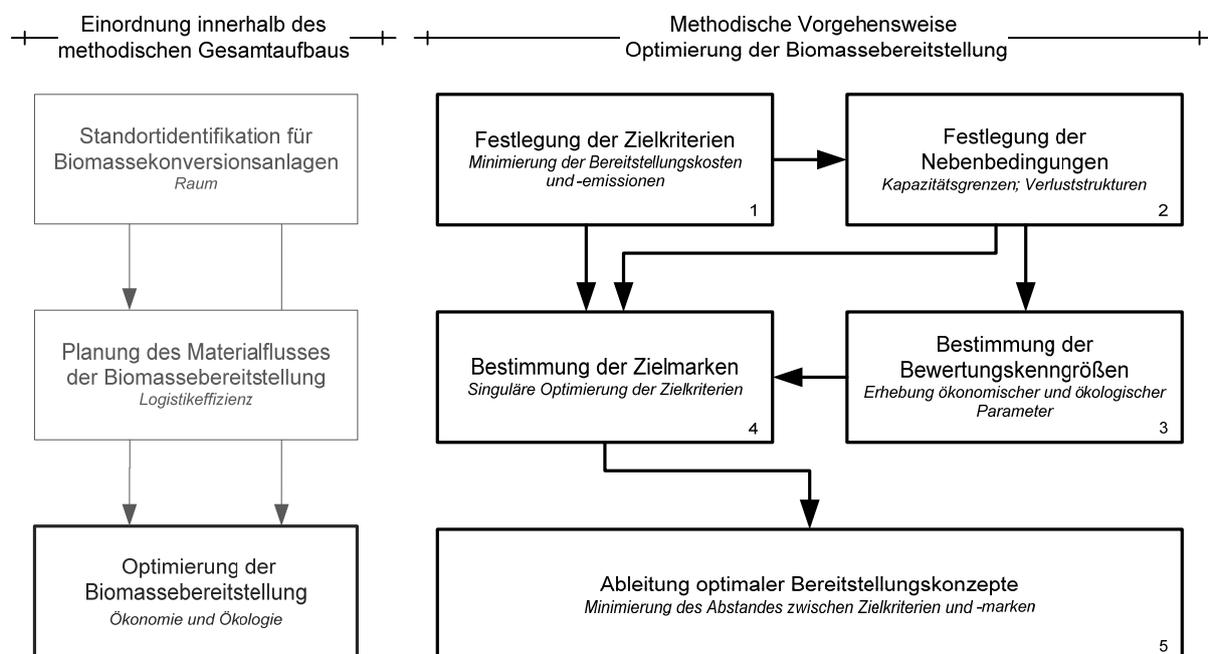


Abb. 4-7: Vorgehensweise bei der Optimierung der Biomassebereitstellung

Zunächst werden die Zielkriterien (1) sowie die für das Optimierungsproblem relevanten Nebenbedingungen festgelegt (2). Anschließend werden die ökonomischen und ökologischen

Kenngrößen der betrachteten Bereitstellungsketten für jedes Prozesselement erhoben (3). Aufgrund der Nicht-Skalierbarkeit und der unvollständigen Komplementarität der Zielgrößen erfolgt die Bestimmung der Lösung nach dem Pareto-Optimum. Für die Lösungsfindung werden Zielmarken in Abhängigkeit der betrachteten Zielkriterien ermittelt (4). Abschließend werden die optimalen Bereitstellungskonzepte durch Minimierung des Abstandes zwischen den Zielkriterien und Zielmarken abgeleitet (5) [83], [86], [114].

4.4.1 Festlegung der Zielkriterien

Um Aussagen über die sich ergebende Kosten- und Emissionsstruktur innerhalb der Bereitstellung von Biomasse geben zu können, werden hierfür in der ökonomisch-ökologischen Optimierung die folgenden Teilziele berücksichtigt:

- Minimierung der Kosten für die Bereitstellung der Brennstoffe
- Minimierung der Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung der Brennstoffe

Dabei ergeben sich die zu minimierenden Gesamtkosten (c) der Bereitstellung aus der Summe der Kosten der einzelnen Prozesselemente. Gleichung (4-18) fasst diese Zielsetzung der Minimierung der Bereitstellungskosten frei Anlage zusammen und beinhaltet die Kosten für die Prozesse Ernte/Verfügbarmachung, Lagerung, Aufbereitung, Umschlag und Transport.

$$\begin{aligned}
 F(c, x) = & \hspace{20em} (4-18) \\
 & \sum_{i \in A} \sum_{e \in E_V} (c_{E,ie} x_{E,ie}) + \\
 & \sum_{i \in L_O} \sum_{l \in L_V} (c_{L,il} x_{L,il}) + \\
 & \sum_{i \in AB_O} \sum_{ab \in AB_V} (c_{AB,iab} x_{AB,iab}) + \\
 & \sum_{i \in U_O} \sum_{u \in U_V} (c_{U,iu} x_{U,iu}) + \\
 & \sum_{i \in A} \sum_{j \in L_O} \sum_{t \in T_{LF}} \sum_{e \in E_V} (c_{T,ijte} x_{T,ijte}) + \sum_{i \in U_O \setminus (A \cup B)} \sum_{j \in U_O \setminus (A \cup L_O)} \sum_{t \in T_V \setminus T_{LF}} . i \neq j
 \end{aligned}$$

$$F(c, x) \rightarrow \min$$

Das zweite Zielkriterium, welches die Minimierung der anfallenden Treibhausgasemissionen (h) entlang der gesamten Bereitstellungskette verfolgt, ist in Gleichung (4-19) beschrieben und setzt sich aus der Summe der Einzelemissionen der entsprechenden Prozesse zusammen. Dies beinhaltet die Emissionen der eingesetzten Technologien für die Prozesse Ernte/Verfügbarmachung, Lagerung, Aufbereitung, Umschlag und Transport, welche sich aus dem Verbrauch von Kraft- und Schmierstoffen bzw. Strom ergeben.

$$F(h, x) = \tag{4-19}$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{e \in E_V} (h_{E, hie} x_{E, ie}) +$$

$$\sum_{i \in L_O} \sum_{l \in L_V} (h_{L, hil} x_{L, il}) +$$

$$\sum_{i \in AB_O} \sum_{ab \in AB_V} (h_{AB, hiab} x_{AB, iab}) +$$

$$\sum_{i \in U_O \setminus A} \sum_{u \in U_V} (h_{U, hiiu} x_{U, iu}) +$$

$$\sum_{i \in A} \sum_{j \in L_O} \sum_{t \in T_{LF}} \sum_{e \in E_V} (h_{T, hijte} x_{T, ijte}) + \sum_{i \in U_O \setminus (A \cup B)} \sum_{j \in U_O \setminus (A \cup L_O)} \sum_{t \in T_V \setminus T_{LF}} (h_{T, hijt} x_{T, ijt}) + i \neq j$$

$$F(h, x) \rightarrow \min$$

4.4.2 Festlegung der Nebenbedingungen

Durch die nachfolgende Definition der Nebenbedingungen im Optimierungsmodell werden die Wechselwirkungen und Einschränkungen abgebildet. Zunächst wird auf die Restriktionen an Quelle und Senke eingegangen. Im Anschluss werden die Nebenbedingungen innerhalb der Bereitstellung spezifiziert (z. B. Mengen, Verluste, Durchsatzleistung). Abschließend wird auf die Restriktionen der Ganzzahligkeit und der Nichtnegativität eingegangen.

Ort des Biomasseanfalls (Quelle)

Grundsätzlich muss gewährleistet sein, dass mindestens die Menge an Biomasse ($m_{F,i}$), welche am Ort des Biomasseanfalls geerntet bzw. verfügbar gemacht wird ($x_{E,ie}$), auch von dieser Quelle bereitgestellt wird (Gleichung (4-20)).

$$\sum_{e \in E_V} x_{E,ie} \leq m_{F,i} \text{ es gilt: } i \in A \tag{4-20}$$

Konversionsanlage (Senke)

Analog gilt für die Senke, dass mindestens die Menge an Biomasse bereitgestellt werden muss ($x_{T,ijt}$) die durch die Konversionsanlage nachgefragt wird (Gleichung (4-21)).

$$\sum_{i \in U_O \setminus (A \cup B)} \sum_{t \in T_V \setminus T_{LF}} x_{T,ijt} \geq m_{KVA} \tag{4-21}$$

Bereitstellungsmenge

Es kann maximal nur die Menge an Biomasse von der Quelle bereitgestellt werden, die abzüglich der Verluste während der Ernte- und Verfügbarmachung gegeben ist (Gleichung (4-22)).

$$\sum_{e \in E_V} \left(\left(1 - \frac{z_{E,e}}{100\%} \right) x_{E,ie} \right) \geq \sum_{j \in L_O} \sum_{t \in T_{L,F}} \sum_{e \in E_V} x_{T,ijte} \text{ es gilt: } i \in A \quad (4-22)$$

Umschlagsmenge

Die Menge an Biomasse die zu einem Ort geliefert wird, muss vollständig umgeschlagen werden ($x_{U,ju}$). Dazu gelten die folgenden Zusammenhänge für Lagerorte (Gleichung (4-23)), für Verladebahnhöfe, Binnenhäfen und den Konversionsanlagenstandort (Gleichung (4-24)).

$$\sum_{i \in A} \sum_{t \in T_{L,F}} \sum_{e \in E_V} x_{T,ijte} = \sum_{u \in U_{EL}} x_{U,ju} \text{ es gilt: } j \in L_O \quad (4-23)$$

$$\sum_{i \in U \setminus (A \cup B)} \sum_{t \in T_V \setminus T_{L,F}} x_{T,ijte} = \sum_{u \in U_{RU}} x_{U,ju} \text{ es gilt: } j \in U_O \setminus (A \cup L_O) \text{ und } i \neq j \quad (4-24)$$

Umschlagsverluste

Die mit dem Umschlag der Biomasse in ein Lager einhergehenden Verluste werden mit der Gleichung (4-25) berücksichtigt. Demnach ist die Lagermenge ($x_{L,il}$) gleich der Umschlagsmenge abzüglich der Verluste.

$$\sum_{u \in U_{EL}} \left(\left(1 - \frac{z_{U,iu}}{100\%} \right) x_{U,iu} \right) = \sum_{l \in L_V} x_{L,il} \text{ es gilt: } i \in L_O \quad (4-25)$$

Die bei der Auslagerung oder beim Umschlag zwischen Transportmitteln entstehenden Verluste werden entsprechend Gleichung (4-26) berücksichtigt, wobei die Umschlagsmenge abzüglich Verluste gleich der Menge sein muss, die vom Ort des Umschlages abtransportiert wird.

$$\sum_{u \in U_V \setminus U_{EL}} \left(\left(1 - \frac{z_{U,iu}}{100\%} \right) x_{U,iu} \right) = \sum_{j \in U_O \setminus (A \cup B)} \sum_{t \in T_V \setminus T_{L,F}} x_{T,ijt} \quad (4-26)$$

es gilt: $i \in U_O \setminus (A \cup B)$ und $i \neq j$

Lagerungsverluste

Während der Lagerung von Biomasse treten Trockenmasseverluste auf, so dass die Aus- der Einlagerungsmenge abzüglich Lagerungsverlusten entspricht (Gleichung (4-27)).

$$\sum_{l \in L_V} \left(\left(1 - \frac{z_{L,il}}{100\%} \right) x_{L,il} \right) = \sum_{u \in U_{AL}} x_{U,iu} \text{ es gilt: } i \in L_O \quad (4-27)$$

Durchsatzleistung

Grundsätzlich ist jede eingesetzte Technologievariante durch eine maximale Durchsatzleistung ($m_{...ges}$) gekennzeichnet. Bei Überschreitung der zugehörigen Obergrenze innerhalb der Bereitstellungskette wird eine weitere Variante hinzugefügt ($y_{...}$) (d. h. modular erweiterbar). Entsprechend gelten nachfolgende Bedingungen für die Prozesse Ernte/Verfügbarmachung (Gleichung (4-28)), Lagerung (Gleichung (4-29)), Aufbereitung (Gleichung (4-30)), Umschlag (Gleichung (4-31)) sowie Transport (Gleichung (4-32) und (4-33)).

$$m_{Eges,ie} y_{E,ie} \geq x_{E,ie} \text{ es gilt: } i \in A \text{ und } e \in E_V \quad (4-28)$$

$$m_{Lges,il} y_{L,il} \geq x_{L,il} \text{ es gilt: } i \in L_O \text{ und } l \in L_V \quad (4-29)$$

$$m_{ABges,iab} y_{AB,iab} \geq x_{AB,iab} \text{ es gilt: } i \in AB \quad (4-30)$$

$$m_{Uges,iu} y_{U,iu} \geq x_{U,iu} \text{ es gilt: } i \in U_O \setminus A \text{ und } u \in U_V \quad (4-31)$$

$$m_{Tges,ijte} y_{T,ijte} \geq x_{T,ijte} \text{ es gilt: } i \in A, j \in L_O, t \in T_{LF} \text{ und } e \in E_V \quad (4-32)$$

$$\left(\sum_{u \in U_V \cup U_{EL}} m_{Tges,ijtu} \right) y_{T,ijt} \geq x_{T,ijt} \quad (4-33)$$

$$\text{es gilt: } i \in U_O \setminus (A \cup B), j \in U_O \setminus (A \cup B), t \in T_V \setminus T_{LF}$$

Grenzen

Standortspezifische Gegebenheiten, wie beispielsweise limitierte infrastrukturelle Voraussetzungen, können die maximale Durchsatzleistung einer Technologie begrenzen. Durch die Definition von Unter- ($u_{...}$) und Obergrenzen ($o_{...}$) ist es möglich, solche Einflüsse in das Modell zu integrieren. Die in der Bereitstellungskette integrierten Prozesse werden wie folgt berücksichtigt: Ernte/Verfügbarmachung (Gleichung (4-34)), Lagerung (Gleichung (4-35)), Aufbereitung (Gleichung (4-36)), Umschlag (Gleichung (4-37)) sowie Transport (Gleichung (4-38) und (4-39)).

$$u_{E,ie} \leq x_{E,ie} \leq o_{E,ie} y_{E,ie} \text{ es gilt: } i \in A \text{ und } e \in E_V \quad (4-34)$$

$$u_{L,il} \leq x_{L,il} \leq o_{L,il} y_{L,il} \text{ es gilt: } i \in L_O \text{ und } l \in L_V \quad (4-35)$$

$$u_{AB,iab} \leq x_{AB,iab} \leq o_{AB,iab} y_{AB,iab} \text{ es gilt: } i \in AB \text{ und } ab \in AB_V \quad (4-36)$$

$$u_{U,iu} \leq x_{U,iu} \leq o_{U,iu} y_{U,iu} \text{ es gilt: } i \in U_O \setminus A \text{ und } u \in U_V \quad (4-37)$$

$$u_{T,ijt} \leq x_{T,ijt} \leq o_{T,ijt} y_{T,ijt} \text{ es gilt: } i \in A, j \in L_O, t \in T_{LF} \quad (4-38)$$

$$u_{T,ijte} \leq x_{T,ijte} \leq o_{T,ijte} y_{T,ijte} \text{ es gilt: } i \in U_O \setminus (A \cup L_O), t \in T_V \setminus T_{LF} \text{ und } e \in E_V \quad (4-39)$$

Nichtnegativität

Die Bereitstellung von Biomasse kann in einem realen System nur positive Mengen beinhalten. Diese Nichtnegativitätsbedingung wird durch Gleichung (4-40) berücksichtigt.

$$x_{E,ie}, x_{L,il}, x_{AB,iab}, x_{U,iu}, x_{T,ijt}, x_{T,ipte} \geq 0 \text{ es gilt: für alle } i, j, e, ab, l, u \text{ und } t \quad (4-40)$$

Ganzzahligkeit

Da die Lösungsfindung mit Hilfe einer gemischt-ganzzahligen Optimierung durchgeführt wird, dürfen die Variablen y nur Werte aus der Menge der positiven Ganzzahlen und Null annehmen (Gleichung (4-41)).

$$y_{E,ie}, y_{L,il}, y_{AB,iab}, y_{U,iu}, y_{T,ijt}, y_{T,ipte} \in \mathbb{Z}^{+0} \text{ es gilt: für } i, j, e, ab, l, u \text{ und } t \quad (4-41)$$

4.4.3 Bestimmung der Bewertungskenngrößen

Um sowohl die ökologischen und ökonomischen Dimensionen der Bereitstellung zu ermitteln, bedarf es der Bestimmung der zugehörigen Parameter für alle beteiligten Prozesselemente entlang der Gesamtbereitstellungskette von Biomasse (Abb. 4-8). Für jeden aus ökonomischer und ökologischer Sicht wirksamen Prozess werden die CO₂-Äquivalente sowie die anfallenden Prozesskosten zur Leistungserbringung erhoben.

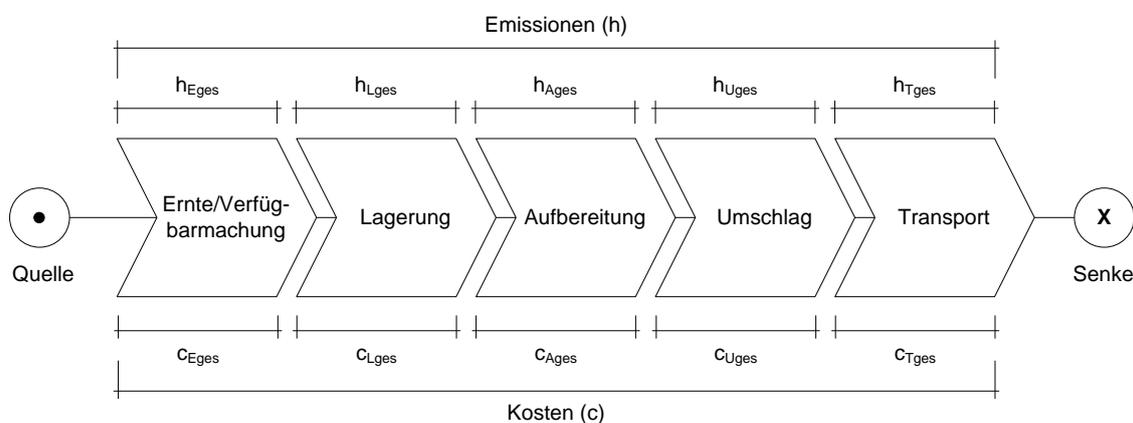


Abb. 4-8: Exemplarische Bestimmung der ökonomischen und ökologischen Bewertungskenngrößen entlang der Gesamtbereitstellungskette von Biomasse

4.4.4 Bestimmung der Zielmarken

Eine Option zur Lösung multikriterieller Optimierungsprobleme stellt die Festlegung von Zielmarken und deren bestmöglicher Erreichung durch die zugehörigen Zielkriterien dar. Die Bestimmung entsprechender Zielmarken kann durch die singuläre Optimierung der ausgewählten technisch effizienten Bereitstellungskonzepte hinsichtlich der festgelegten Zielkriterien, d. h. der Minimierung nach den Kosten bzw. Emissionen entlang der Bereitstellungskette

erfolgen. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems wird die Software „Clip Mathematical Optimization Systems“ eingesetzt. Zu deren Anwendung ist der Aufbau einer Optimierungsmatrix in MS Excel notwendig. In dieser Matrix sind in Abhängigkeit der betrachteten Zielkriterien alle relevanten ökonomischen, ökologischen und technischen Informationen der Bereitstellungsprozesse anzugeben.

Die Matrix ist in drei Hauptspalten unterteilt, wobei die linke Spalte die Nebenbedingungen, die mittlere Spalte die Bereitstellungskosten bzw. Treibhausgasemissionen, die durchschnittlichen Verluststrukturen sowie den Variablentyp (gemischt) beinhaltet. Die rechte Spalte enthält die mittleren Durchsatzleistungen der betrachteten Prozesselemente und den Variablentyp (ganzzahlig). Durch die Auswahl der Nebenbedingungen werden die einzelnen Bereitstellungsprozesse untereinander verknüpft und darüber hinaus die Bereitstellungskonzepte festgelegt (inkl. Verluststrukturen). Abb. 4-9 zeigt eine Übersicht der Matrix beispielhaft für die ökonomische Optimierung.

	Bestimmung Brennstoffmenge				Bestimmung Arbeitsmittellanzahl					
	PE1	PE2	PE3	S	PE1	PE2	PE3	S		
Bereitstellungskosten [€/t _{atmo}]	c _{PE1}	c _{PE2}	c _{PE3}	-	-	-	-	-		
Untergrenze	UG	UG	UG	m _{KVA}	UG	UG	UG	m _{KVA}		
Obergrenze	INF	INF	INF	OG	INF	INF	INF	OG		
Variablentyp	CON	CON	CON	CON	INT	INT	INT	CON		
Bereitstellungsmenge PE1 → PE2	-(1-z _%)*m _{PE1}	m _{PE2}							=	0
Bereitstellungsmenge PE2 → PE3		-(1-z _%)*m _{PE2}	m _{PE3}						=	0
Bereitstellungsmenge PE3 → S			-m _{PE3}	1					=	0
Entscheidung S				-1				m _{KVA}	=	0
Entscheidung PE1	1				-Q _{PE1} /a				≤	0
Entscheidung PE2		1				-Q _{PE2} /a			≤	0
Entscheidung PE3			1				-Q _{PE3} /a		≤	0
THG-Emissionen [kg _{CO2-Aquiv} /t _{atmo}]	h _{PE1}	h _{PE2}	h _{PE3}						≤	h _{Ges}

c – Kosten; h – Emissionen; m – Brennstoffmenge; z_% – Verlustanteil; CON – continuously; INF – infinite; INT – integer; PE – Prozesselement; S – Senke

Abb. 4-9: Beispiel des Aufbaus der Optimierungsmatrix

4.4.5 Ableitung optimaler Bereitstellungskonzepte

Aufgrund der nicht gemeinsam messbaren Größe der Zielkriterien werden nachfolgend die optimalen Bereitstellungskonzepte durch die Ermittlung des Pareto-Optimums bestimmt. Ziel dabei ist es, die im vorangegangenen Abschnitt bestimmten Zielmarken durch die relevanten Zielkriterien so gut wie möglich zu erreichen. In Abb. 4-10 ist eine grafische Übersicht zur Ermittlung der pareto-optimalen Lösung gegeben.

Nach der Festlegung der Zielmarken erfolgt innerhalb eines iterativen Prozesses die schrittweise Annäherung an das Bereitstellungskonzept, welches unter Berücksichtigung beider Zielkriterien am weitesten die Wertezuordnungen der Zielmarke annimmt. Hierzu werden die zuvor bestimmten minimalen Bereitstellungskosten, die gleichzeitig das aus ökonomischer Sicht optimale Bereitstellungskonzept charakterisieren, als eine zusätzliche Restriktion in die

Matrix für eine ökologische Optimierung einbezogen. Analog wird in diesen Zusammenhang mit den minimalen Bereitstellungsemissionen verfahren (Abb. 4-10, linke Darstellung). Führt die wiederholte Optimierung unter Einbindung der Zielmarken zu den vorab bestimmten Bereitstellungskonzepten, ist bei Übereinstimmung die optimale Lösung bereits gefunden. Sofern diese Option nicht vorliegt, wird durch eine kontinuierliche Erhöhung der Zielmarken für Kosten und Emissionen bei paralleler Optimierung das Bereitstellungskonzept ermittelt, das die geringsten Abweichungen zwischen den vordefinierten Zielmarken und dem Ergebniswert aufzeigt (bei gleichzeitiger Erfüllung der vollständigen Bereitstellung über das entsprechende Konzept; Abb. 4-10, rechte Darstellung).

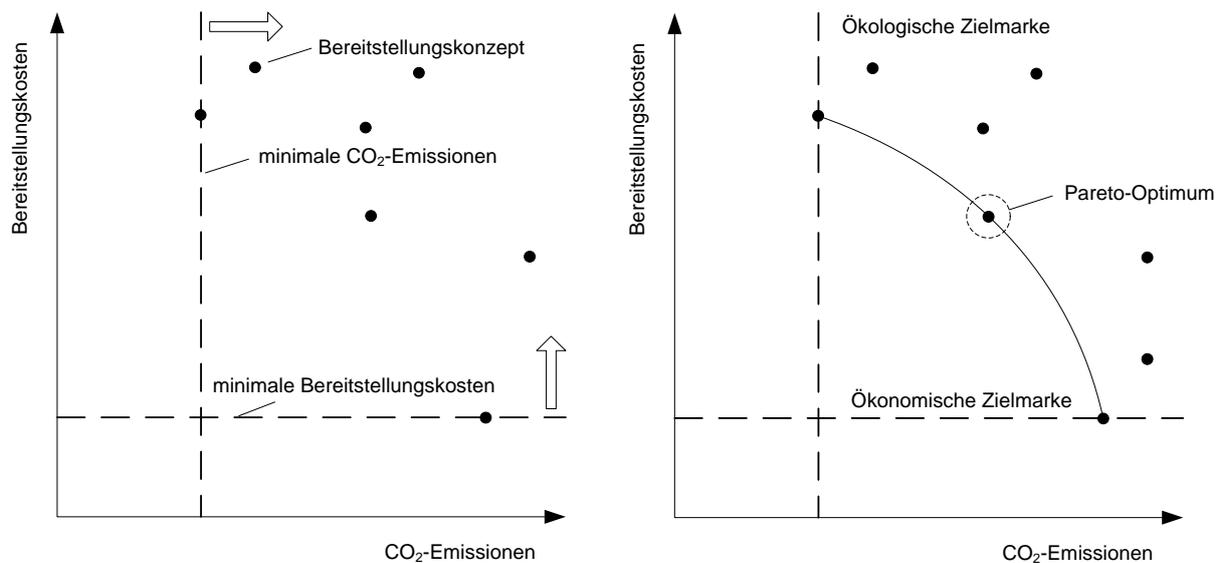


Abb. 4-10: Exemplarische Darstellung der pareto-optimalen Lösung und der zugehörigen Zielmarken

Demnach ist das Bereitstellungskonzept, das den geringsten Abstand zwischen den Zielmarken und den zugehörigen Zielkriterien aufweist, als die pareto-optimale Lösung zu verstehen.

Die Methodik ermöglicht Aussagen zur Ausprägung der Bereitstellungskosten und THG-Emissionen der betrachteten Bereitstellungskonzepte. Zusätzlich werden Informationen in Bezug auf die Verluststruktur entlang der Bereitstellungskette gegeben. Somit können je Prozessschritt innerhalb der Biomassebereitstellung die einzelnen Verluste bilanziert werden. Auf Basis der Gesamtverluststruktur einer Bereitstellungskette wird die notwendige Menge an bereitzustellender Biomasse bestimmt.

5 Fallbeispiele

Die in dieser Arbeit entwickelte methodische Vorgehensweise zur Identifikation von Standorten für Biomassekonversionsanlagen sowie zur Planung des Materialflusses und zur Optimierung der zugehörigen Biomassebereitstellung wird nachfolgend an ausgewählten Fallbeispielen angewendet.

5.1 Referenzanlagen

Die Anwendung der Methodik zur Identifikation von Standorten für Polygeneration-Anlagen sowie zur nachfolgenden Planung der Biomassebereitstellung erfolgt am Beispiel von Bio-SNG-Produktionsanlagen. Mit entsprechenden Konversionsanlagen können aus biogenen Festbrennstoffen (z. B. Holz) über den thermo-chemischen Umwandlungsweg Methan, Wärme und Strom bereitgestellt werden (ergänzende Informationen zur Produktion von Bio-SNG sind Kapitel A.2 gegeben). Der räumliche Bezug liegt auf Deutschland.

5.1.1 Konversionsanlagen

Aufgrund verfahrenstechnischer Kriterien (z. B. Vergaserauswahl) als auch infrastruktureller Anforderungen an die potenziellen Konversionsanlagenstandorte (in Bezug auf die Biomassebereitstellung und die Distribution von Nutz- und Endenergie) werden exemplarisch die in Tabelle 5-1 dargestellten Leistungsbereiche betrachtet.

Tabelle 5-1: Referenzanlagen für die Produktion von Bio-SNG [115]

Konversionsanlagengröße in MW _{BWL}	Volllaststunden in h/a	Brennstoffbedarf in t _{atro} /a
30	8000	50000
200	8000	350000

Die hier betrachteten Bio-SNG-Anlagen besitzen einen Verfahrensaufbau, der nachfolgende Anforderungen an die Distribution der Nutz- bzw. Endenergie stellt:

- Wärme – für die Einbindung der aus dem Produktionsprozess von Bio-SNG hervorgehenden Restwärme wird vereinfachend eine Wärmesenke mit hohen Volllaststunden (d. h. industrieller Abnehmer) gefordert
- Strom – für die Einspeisung von bereitgestellten Strom ist ein Stromnetz notwendig, dass über die entsprechende Kapazität verfügt
- Methan – für das produzierte Bio-SNG wird die Einspeisung in ein Erdgasnetz angenommen, wobei in Abhängigkeit des Leistungsbereiches der Konversionsanlage spezifische Anforderungen an das Gasnetz gestellt werden (z. B. Leitungsdruck)

Darüber hinaus wird für die betrachteten Referenzanlagen unterstellt, dass für den Betrieb einer entsprechenden Bio-SNG-Anlage die ausreichende Bereitstellung von Prozess- und Kühlwasser über ein fließendes Oberflächengewässer gewährleistet ist.

5.1.2 Brennstoffanforderungen

Für die Biomassevergasung sind unter gegenwärtigen Rahmenbedingungen insbesondere holzartige Festbrennstoffe vorteilhaft. Dabei sind chemisch-stoffliche Merkmale wie ein geringer Stickstoffgehalt als ebenso günstig zu bewerten wie die im Vergleich zu anderen biogenen Festbrennstoffen höhere Ascheerweichungstemperatur [7], [116], [117]. Biogene Festbrennstoffe können als direkt oder indirekt aus Biomasse hergestellte Brennstoffe verstanden werden, die zum Zeitpunkt ihrer energetischen Nutzung in fester Form vorliegen [4], [118], [119].

5.1.2.1 Brennstoffqualitäten

Durch die Bereitstellung von biogenen Brennstoffen in ungenügender Qualität sowohl in Bezug auf chemisch-stoffliche als auch physikalisch-mechanische Merkmale an eine Konversionsanlage können maßgebliche Beeinträchtigungen des Prozessablaufs hervorgerufen werden. In der Wachstumsphase der Biomasse sind insbesondere anbautechnische Aspekte sowie klimatische Einflüsse von Bedeutung. Dahingegen beeinflussen in der Bereitstellungsphase alle durchgeführten Prozesse die Qualitätsmerkmale des Brennstoffes [3], [117]. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig an die bereitzustellenden Brennstoffe qualitative Anforderungen zu stellen, wobei sich diese vorrangig aus der zum Einsatz kommenden Konversionsanlagentechnologie ableiten (u. a. Vergasungsverfahren, Gasreinigungskonzept).

Basierend auf den vorliegenden Erfahrungen im Bereich der Brennstoffaufbereitung und -zufuhr, können die qualitativen Anforderungen gemäß Tabelle 5-2 festgelegt werden.

Tabelle 5-2: Ausgewählte Spezifikationen und Mindestanforderungen für Brennstoffe zur Produktion von Bio-SNG (Beispiel Biomassevergasung Güssing) [7], [14], [120], [121]

Kriterium	Einheit	Spezifikation
Herkunft	-	Holzartige Biomasse auf Basis von Waldrest- und Kurzumtriebsholz
Handelsform	-	Hackschnitzel
Wassergehalt	in %	20 bis 30
Größe	in mm	30 bis 50
Anteil an Fremdstoffen	-	Grobe Verunreinigungen, wie Steine, Metallteile und sonstige Fremdkörper, sowie die Zugabe von brennbaren Fremdstoffen, wie z. B. Holzschleifstaub, sind unzulässig
Aschegehalt	in %	< 2

Wassergehalt – entspricht W 20 bis W 30 der Österreichischen Norm M 7133; Größe – entspricht G 30 bis G 50 der Österreichischen Norm M 7133; Aschegehalt – entspricht A 2 der Österreichischen Norm M 7133

5.1.2.2 Brennstoffquantitäten

Ausgehend von der installierten Leistung des Konversionsprozesses kann die benötigte Brennstoffmenge für einen festgelegten Zeitraum mit Hilfe praktischer Erfahrungswerte oder

über Verbrauchsstatistiken und -prognosen bestimmt werden [122], [123]. Für Letzteres sind neben der Konversionsanlagengröße dazu Informationen zu den Durchlaufzeiten der Brennstoffbereitstellung (Zeit die für die Bereitstellung z. B. einer Mengeneinheit vom Ort des Biomasseanfalls an die Konversionsanlage benötigt wird) sowie dem Lagerbestand für die Bedarfsermittlung notwendig (vgl. Abb. 5-1).

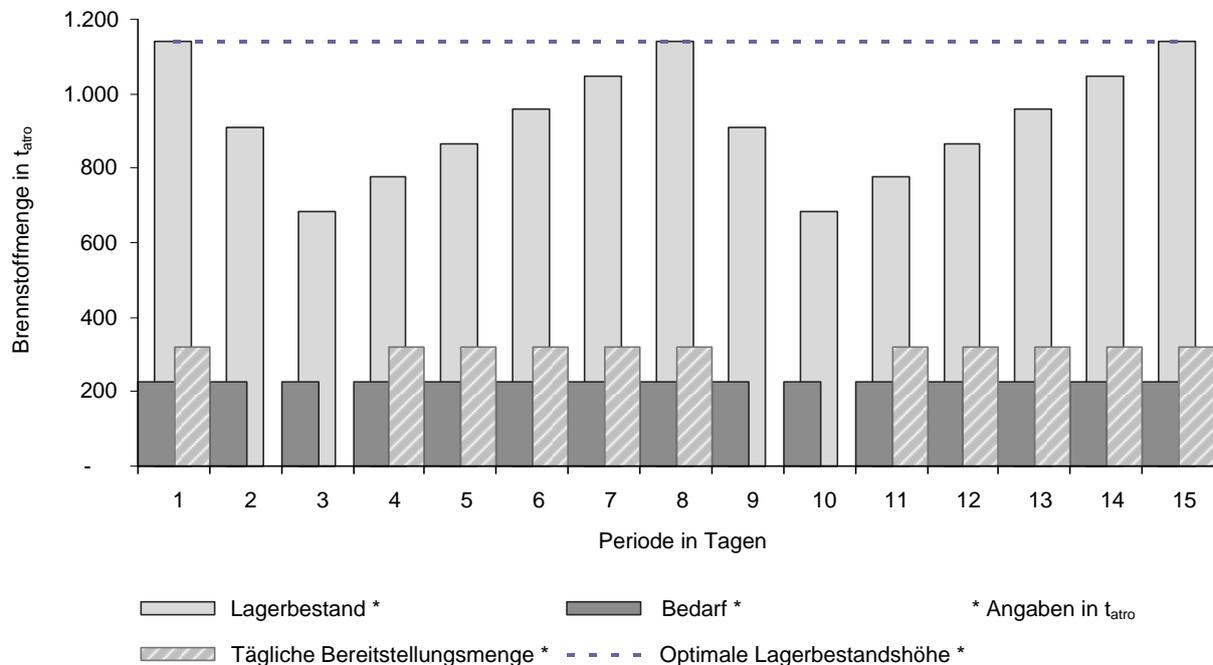


Abb. 5-1: Lagerbestands- und Bereitstellungsmengen exemplarisch für eine Bio-SNG-Produktionsanlage im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

Die Abbildung gibt einen Überblick zu den täglich bereitzustellenden Brennstoffmengen unter Berücksichtigung eines vorrätigen Lagerbestandes zur Überbrückung anlieferungsfreier Tage (z. B. Sonn- und Feiertage, Witterungseinflüsse) und dem täglichen Brennstoffbedarf. Dabei wird der reduzierte Lagerbestand kontinuierlich innerhalb der Lieferperiode wieder auf den optimalen Lagerbestand aufgefüllt [4].

5.2 Standortidentifikation für Bio-SNG-Anlagen

Im Folgenden werden die für die Ermittlung von Standorten für Bio-SNG-Produktionsanlagen verwendeten Daten Grundlagen vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt die Durchführung der Standortidentifikation auf Basis der in Kapitel 4.2 beschriebenen Methodik. Im Anschluss werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

5.2.1 Datengrundlage

5.2.1.1 Regionale Standortfaktoren

Das flächenspezifische Biomassepotenzial basiert auf Angaben zum technischen Potenzial der entsprechenden Biomassefraktionen (vgl. [9]). Für die Potenzialermittlung bilden nachfolgende Datenquellen die Basis:

Waldrestholz

- Waldbestand und jährlicher Zuwachs [124]
- Baumartenverteilung [125]
- Naturschutzflächen [126]

Kurzumtriebsholz

- Agrarflächenstruktur [9]
- Niederschlagsverteilung und Bodenqualität [127]
- Ertragsstruktur [128]

Die zur Ableitung des flächenspezifischen Biomassepotenzials notwendigen Flächeninformationen auf Kreisebene (z. B. Landkreisgröße) werden durch die statistischen Landesämter bereitgestellt. Darüber hinaus werden flächenbezogene Informationen, wie z. B. Angaben zur Betriebsgrößenstruktur land- und forstwirtschaftlicher Unternehmen sowie zur Verfügbarkeit von Verkehrsträgern verwendet [129], [130]. Einen Überblick zu den regionalen Standortfaktoren gibt Tabelle A 3-1.

5.2.1.2 Lokale Standortfaktoren

Für die Etablierung entsprechender Bio-SNG-Anlagen werden ausschließlich Industriegebiete in Betracht gezogen. Diese Eingrenzung ist u. a. in Bezug auf genehmigungsrechtliche Fragestellungen, die Verfügbarkeit des Straßen- sowie entsprechenden Stromnetzes von Vorteil. Darüber hinaus wird unterstellt, dass ein ausreichender Bauplatz verfügbar ist.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Flexibilität innerhalb der Bereitstellungskette und hoher logistischer Leistungen wird für einen potenziellen Konversionsanlagenstandort die Anbindung an das Schienennetz vorausgesetzt. Für die Bahnanbindung werden hier Güterbahnhöfe betrachtet, die für den Verkehr mit Teil- und Ganzzügen in Frage kommen (nicht berücksichtigt werden Grenzübergangsbahnhöfe sowie Bahnhöfe mit Privatgleisanschluss) [131], [132].

Für Bio-SNG-Anlagen die neben dem Schienennetz ebenso die Binnenwasserstraße für die Rohstoffbereitstellung benötigen, werden intermodale Binnenhäfen als Verkehrsträgeranbindung vorausgesetzt [129], [130], [133].

Die Verfügbarkeit eines adäquaten fließenden Oberflächengewässers wird mit Hilfe eines geografischen Informationssystems geprüft (ESRI ARCGIS 9.3) [134]. Zur Distribution des erzeugten Biomethans über das Erdgasnetz sind Informationen zur Gasnetzverfügbarkeit und der Druckstufe des Gasnetzes notwendig [135].

Für die Bestimmung potenzieller Wärmesenken werden aus dem Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister relevante Industrien abgefragt [136]. Folgende Industrien werden berücksichtigt: (i) Energiesektor, (ii) Herstellung und Verarbeitung von Metallen, (iii) Mineralverarbeitende Industrie, (iv) Chemische Industrie, (v) Be- und Verarbeitung von Papier und Holz sowie (vi) Lebensmittel- und Getränkektor.

5.2.1.3 Standortkriterien

Als Datengrundlage für die infrastrukturellen Anforderungen im Rahmen der Biomassebereitstellung an Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} werden Ergebnisse aus Projekten zur Biomasseversorgung von Konversionsanlagen (z. B. Biomasseheizkraftwerke) in Deutschland und Österreich zugrunde gelegt [102], [137].

Informationen für die notwendige infrastrukturelle Ausgestaltung der Brennstoffbereitstellung an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} werden aus sich in der Planungsphase befindlichen Projekten zur Errichtung von großtechnischen Biomassekonversionsanlagen (z. B. BtL Anlage Schwedt) verwendet [102], [137], [138]. Erfahrungswerte aus Skandinavien werden ebenso einbezogen, wo bereits bestehende Biomasseheizkraftwerke im Leistungsbereich von 170 MW_{BWL} mit Biomasse versorgt werden [139], [140]. In Tabelle 5-3 ist eine Übersicht zu den Anforderungen an die Infrastruktur zur Brennstoffbereitstellung am Konversionsanlagenstandort gegeben.

Tabelle 5-3: Infrastrukturelle Anforderungen an die Brennstoffbereitstellung

Konversionsanlagengröße in MW _{BWL}	Notwendige Infrastruktur für die Biomassebereitstellung
30	Straße, Schiene
200	Schiene, Binnenwasserstraße

Die Spezifikationen im Bereich der End- bzw. Nutzenergieverteilung werden anhand der Anlagenkonfiguration abgeleitet. Hierzu werden Ergebnisse aus den Simulationen von Bio-SNG-Konzepten verwendet [115], [141]. Die Anforderungen von Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 und 200 MW_{BWL} an die Distributionsinfrastruktur von Wärme und Methan am Konversionsanlagenstandort sind in Tabelle 5-4 gegeben.

Tabelle 5-4: Infrastrukturelle Anforderungen an die Distribution von Wärme und Methan

Konversionsanlagengröße in MW _{BWL}	Wärmesenke in MW _{th}	Gasnetz in bar
30	1,5 bis 5,0	< 25
200	7,0 bis 35,0	< 70

Für die Einspeisung von Strom wird ein 20 kV Netz zugrunde gelegt.

5.2.2 Durchführung der Standortidentifikation

5.2.2.1 Standortfaktoren

Die Ermittlung der regionalen Standortfaktoren wird unabhängig von den betrachteten Konversionsanlagengrößen nach der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Herleitung durchgeführt (vgl. dazu auch Kapitel A.3).

5.2.2.2 Standortanforderungsprofil

In der Standortplanung ist es notwendig, die durch eine Konversionsanlage gestellten Forderungen in einem Standortanforderungsprofil zu klassifizieren. Tabelle 5-5 gibt einen Überblick zu einem Anforderungsprofil der betrachteten Referenzanlagen.

Tabelle 5-5: Standortanforderungsprofil für Bio-SNG-Produktionsanlagen [70], [142]

KVA*	Festforderungen		Mindestforderungen	
	30	200	30	200
Regionale Standortkriterien	Hohes flächenspezifisches Biomassepotenzial		-	
	Hohe Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion		-	
	Verfügbarkeit Schienennetz		-	
	Verfügbarkeit Binnenwasserstraßennetz		-	
Lokale Standortkriterien	Netzanbindung Schiene		Verladebahnhof	
	Netzanbindung Binnenwasserstraße		Hafen	
	Fließendes Oberflächengewässer		-	
	Industrielle Wärmesenke		1,5 bis 5,0 MW _{th}	7,0 bis 35,0 MW _{th}
	Erdgasnetzzugang		< 25 bar	< 70 bar

KVA* Konversionsanlagengröße in MW_{BWL}

Hierbei wird zwischen regionalen und lokalen Standortkriterien sowie deren Anforderungsarten differenziert. Es ist ersichtlich, dass Anlagen im höheren Leistungsbereich eine geringere Flexibilität in Bezug auf potenzielle Konversionsanlagenstandorte besitzen, insbesondere aufgrund der höheren Anforderungen an die Infrastruktur der Brennstoffbereitstellung.

5.2.2.3 Regionale Einordnung

Die Auswahl aussichtsreicher Regionen erfolgt unter Verwendung des Rangfolgeverfahrens und der Nutzwertanalyse. Tabelle 5-6 zeigt die Rangfolgematrix zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien 2. Stufe für Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}.

Tabelle 5-6: Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien 2. Stufe für Bio-SNG Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

Nr.	Biomassepot. ^a	Betriebsgr. ^b	Verf. Netz ^c	Anzahl der „+“ ^c	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Biomassepot. ^a		+	+	2	6	0,50
Betriebsgr. ^b	-		+	1	4	0,33
Verf. Netz ^c	-	-		0	2	0,17
Anzahl der „-“ ^c	2	1	0			

^a Flächenspezifisches Biomassepotenzial; ^b Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion; ^c Verfügbarkeit Verkehrsnetz; „+“ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1}, Wert: 3; „0“ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1}, Wert: 2; „-“ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1}, Wert: 1

Das flächenspezifische Biomassepotenzial wird als das wichtigste Standortkriterium angesehen und hat dementsprechend einen Gewichtungsfaktor von 0,50. Die Betriebsgrößenstruktur in der Primärproduktion wird wichtiger als die Verfügbarkeit Verkehrsnetz betrachtet und resultiert in einem Gewichtungsfaktor von 0,33. Das Kriterium Verfügbarkeit Verkehrsnetz generiert aufgrund seiner Wichtigkeit einen Gewichtungsfaktor von 0,17. Für Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} ergeben sich die in Tabelle 5-7 dargestellten Gewichtungsfaktoren. Die Rangfolgematrizen für die Kriterien der 3. Stufe sind im Anhang abgebildet (vgl. Tabelle A 3-4 bis Tabelle A 3-6).

Tabelle 5-7: Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien 2. Stufe für Bio-SNG Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

Nr.	Biomassepot. ^a	Betriebsgr. ^b	Verf. Netz ^c	Anzahl der „+“ ^c	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Biomassepot. ^a		+	-	1	4	0,33
Betriebsgr. ^b	-		-	0	2	0,17
Verf. Netz ^c	+	+		2	6	0,50
Anzahl der „-“ ^c	1	0	2			

^a Flächenspezifisches Biomassepotenzial; ^b Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion; ^c Verfügbarkeit Verkehrsnetz; „+“ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1}, Wert: 3; „0“ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1}, Wert: 2; „-“ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1}, Wert: 1

Die Gewichtungsfaktoren der Kriterien entsprechen in Abhängigkeit der Kriterienstufe dem Gruppengewicht. In Abb. 5-2 sind am Beispiel einer Bio-SNG-Anlage im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} die Standortkriterien hierarchisch geordnet. Aus dem gegebenen Gruppengewicht und dem Knotengewicht eines übergeordneten Kriteriums ergibt sich das Knotengewicht des betrachteten Kriteriums.

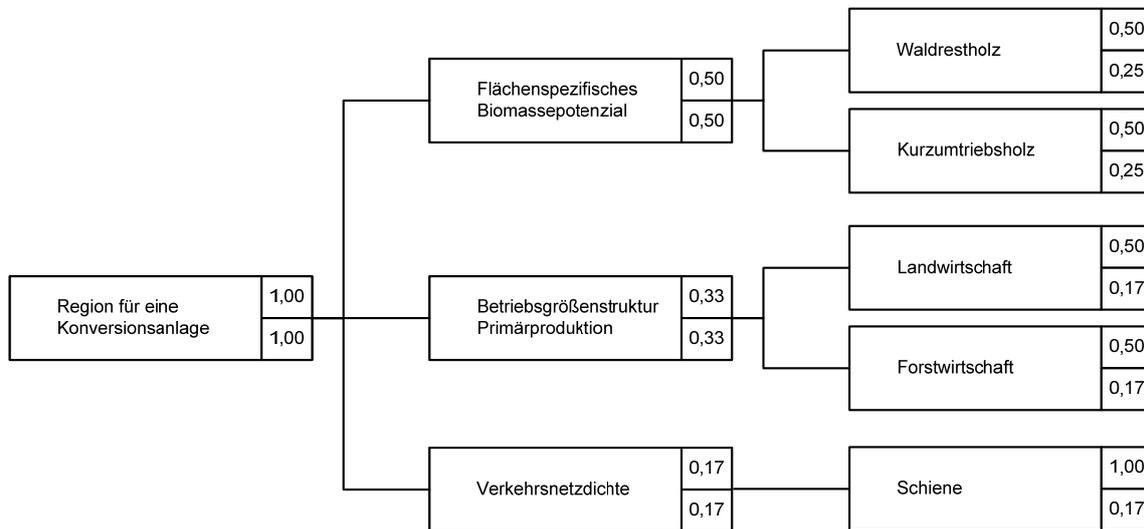


Abb. 5-2: Hierarchie der Standortkriterien beispielhaft für eine Bio-SNG-Produktionsanlage im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

Die Einordnung der gewichteten Standortkriterien für eine Bio-SNG-Anlage mit einer Kapazität von 200 MW_{BWL} ist in Abb. 5-3 dargestellt.

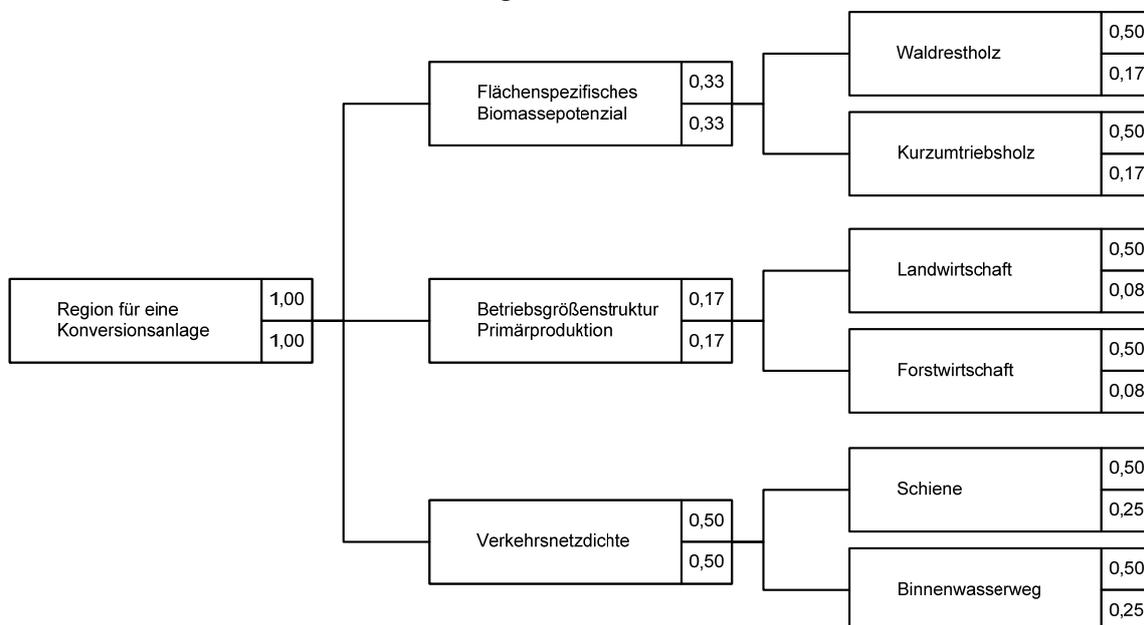


Abb. 5-3: Hierarchie der Standortkriterien beispielhaft für eine Bio-SNG-Produktionsanlage im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

Die Zuordnung der zugehörigen Wertigkeiten zu den entsprechenden Standortkriterien erfolgt gemäß der im Kapitel 4.2.3 vorgestellten Methodik. Im Anschluss an die Zuordnung der Wer-

te zu den entsprechenden Standortkriterien der betrachteten Landkreise wird der Nutzwert bestimmt. Dieser entspricht der Summe der mit den jeweiligen Knotengewichten multiplizierten Teilwerte der Kriterien. Im Ergebnis kann aus den einzelnen Summen eine Rangfolge der Landkreise untereinander abgeleitet werden.

5.2.2.4 Lokale Einordnung

Die Auswahl viel versprechender Standorte innerhalb günstiger Regionen orientiert sich an den Standortanforderungen auf lokaler Ebene.

Es wird davon ausgegangen, dass für jeden potenziellen Standort einer Bio-SNG-Produktionsanlage in einem Industriegebiet eine Straßenanbindung verfügbar ist (vgl. Kapitel 5.2.1.2). Demgegenüber können jedoch Anbindungen an die Verkehrsträger Schiene und Binnenwasserstraße nicht prinzipiell vorausgesetzt werden.

Konversionsanlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}: In den ausgewählten Landkreisen erfolgt eingangs die Bestimmung verfügbarer Verladebahnhöfe. Darauf aufbauend werden mit Hilfe des Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister in den viel versprechenden Landkreisen industrielle Wärmesenken analysiert. An den Standorten, die sowohl einen Verladebahnhof als auch eine Wärmesenke aufweisen, wird im Anschluss das Vorhandensein des Gasnetzes sowie dessen Spezifikation in Bezug auf die geforderte Druckstufe mittels einer online verfügbaren Abfragemaske überprüft. Abschließend wird an den potenziellen Standorten für Bio-SNG-Anlagen die Verfügbarkeit von fließenden Oberflächengewässern mit Hilfe der Software ESRI ARCGIS 9.3 beurteilt (vgl. Kapitel 5.2.1.2).

Konversionsanlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}: Entsprechend der Hierarchie der Unterkriterien des Kriteriums Verkehrsnetzichte werden in den ausgewählten Landkreisen eingangs die Standorte mit Binnenhafen und Verladebahnhof bestimmt. Die weitere Vorgehensweise ist an die lokale Einordnung für 30 MW_{BWL} Anlagen angelehnt unter Berücksichtigung spezifischer Forderungen die in Abhängigkeit des Leistungsbereichs der Konversionsanlage stehen (z. B. Druckstufe Gasnetz).

Eine Übersicht zur Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} und 200 MW_{BWL} ist in Tabelle A 3-7 bis Tabelle A 3-12 gegeben.

5.2.3 Ergebnisse

5.2.3.1 Standortfaktoren

In Bezug auf die flächenspezifischen Biomassepotenziale der Landkreise Deutschlands geht hervor, dass die höchsten Potenziale für Waldrestholz in den Mittelgebirgsregionen Deutschlands (z. B. Schwarzwald mit 0,18 PJ/(km² a), Erzgebirge mit 0,17 PJ/(km² a) und Thüringer Wald mit 0,17 PJ/(km² a)) gegeben sind. In Bezug auf das flächenspezifische Potenzial für Kurzumtriebsholz verfügen Regionen in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern (z. B. Landkreis Nordwestmecklenburg 1,62 PJ/(km² a)), Brandenburg (z. B. Landkreis

Uckermark 1,57 PJ/(km² a)) und Sachsen-Anhalt (z. B. Landkreis Börde 1,13 PJ/(km² a)) über die höchsten Werte.

Die Ergebnisse zur durchschnittlichen land- und forstwirtschaftlichen Betriebsgrößenstruktur zeigen, dass zwischen den neuen und alten Bundesländern deutliche Unterschiede in der Betriebsgrößenstruktur insbesondere im Bereich der Landwirtschaft vorliegen. Großflächige landwirtschaftliche Betriebsstrukturen weisen vor allem die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern (2,5 km²), Sachsen-Anhalt (2,4 km²) und Brandenburg (2,0 km²) auf. Größer strukturierte Betriebe im Bereich der Forstwirtschaft befinden sich u. a. in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern (2,2 km²), Brandenburg (1,6 km²) und Hessen (1,1 km²).

In Bezug auf die Verkehrsträger zur Brennstoffbereitstellung gilt grundsätzlich, dass sich die jeweiligen Verkehrsnetzichten zwischen den Regionen deutlich unterscheiden, wobei besonders die Bundesländer Rheinland-Pfalz (0,93 km/km²), Nordrhein-Westfalen (0,87 km/km²) und Saarland (0,79 km/km²) über eine hohe Straßennetzichte verfügen. Das Verkehrsnetz der Bahn weist in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen (0,19 km/km²), Sachsen (0,15 km/km²) und Saarland (0,15 km/km²) die höchsten Dichten auf. Insbesondere die küstennahen Bundesländer wie Niedersachsen und Schleswig-Holstein besitzen eine gut ausgeprägte Infrastruktur schiffbarer Binnenwasserstraßen. Darüber hinaus besitzt ebenso das Land Brandenburg aufgrund eines stark ausgeprägten Kanalsystems eine verhältnismäßig hohe Binnenwasserstraßendichte.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass sich für die Ausprägung der Standortfaktoren flächenspezifisches Biomassepotenzial für Waldrestholz, landwirtschaftliche Betriebsgrößenstruktur und Verkehrsnetzichte Straße sowie Binnenwasserstraße eindeutig regionale Agglomerationen herstellen lassen. Dagegen weisen die verbleibenden Standortfaktoren eine eher heterogene Ausprägung über das gesamte Bundesgebiet auf.

5.2.3.2 Regionale Einordnung

In Abb. 5-4 und Abb. 5-5 ist die Klassifizierung der einzelnen Landkreise nach ihrer Eignung in Abhängigkeit der betrachteten Konversionsanlagengröße gegeben.

Für Konversionsanlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} erscheinen Regionen in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern (z. B. Landkreis Bad Doberan), Sachsen-Anhalt (z. B. Landkreis Altmarkkreis Salzwedel) und Thüringen (z. B. Landkreis Altenburger Land) aussichtsreich. Dies begründet sich u. a. auf den günstigen Voraussetzungen im Bereich des flächenspezifischen Biomassepotenzials und der Betriebsgrößenstruktur im Primärproduktionssektor.

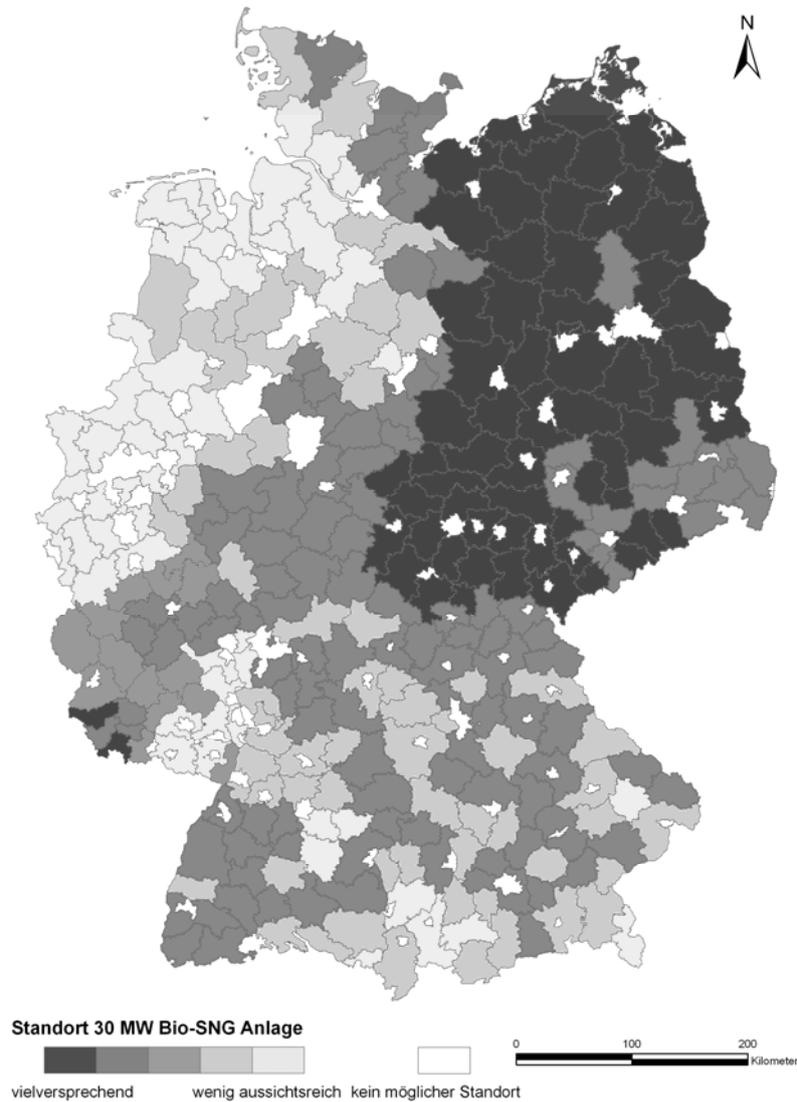


Abb. 5-4: Einordnung der Landkreise nach ihrer Eignung zur Etablierung von Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

Für die Etablierung einer Bio-SNG-Produktionsanlage im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} stellen sich Regionen in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern (z. B. Landkreis Ostvorpommern), Brandenburg (z. B. Landkreis Uckermark) und Saarland (z. B. Landkreis Merzig-Wadern) als vorteilhaft dar (Abb. 5-5).

In die nachfolgende lokale Klassifizierung werden die Landkreise einbezogen, die sowohl aus Sicht des flächenspezifischen Biomassepotenzials, der Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion als auch der Infrastruktur für die Biomassebereitstellung viel versprechend erscheinen.

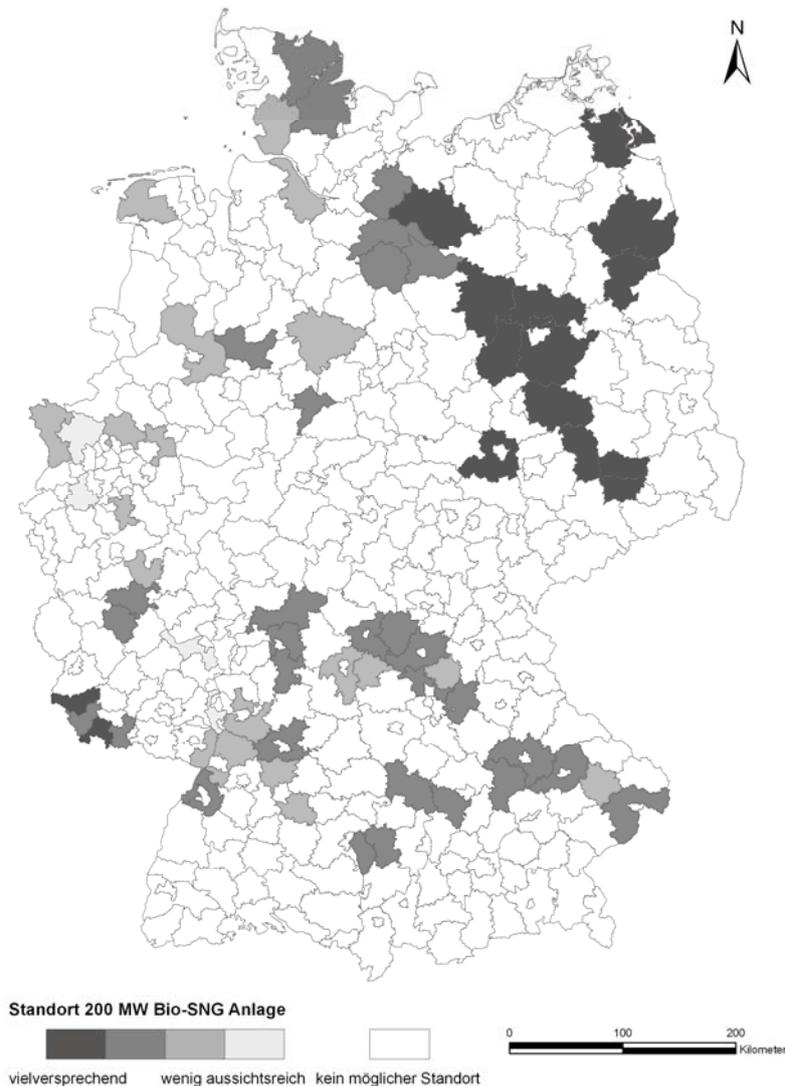


Abb. 5-5: Einordnung der Landkreise nach ihrer Eignung zur Etablierung von Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von $200 \text{ MW}_{\text{BWL}}$

5.2.3.3 Lokale Einordnung

In den ausgewählten Regionen werden in Abhängigkeit der betrachteten Leistungsgrößen entsprechende Konversionsanlagenstandorte anhand der in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Tabelle 5-8 gibt einen Überblick zu den ausgewählten Standorten.

Die Standorte Rostock, Staßfurt und Greiz erscheinen u. a. für Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von $30 \text{ MW}_{\text{BWL}}$ als besonders geeignet, da diese neben den Voraussetzungen an das Gasnetz und die notwendige Wärmesenke zusätzlich günstige infrastrukturelle Bedingungen beschaffungsseitig aufweisen. Ergänzend zu dem geforderten Straßen- und Schienenanbindung verfügen alle Standorte über einen Zugang an ein Oberflächengewässer. Die Standorte Staßfurt und Rostock sind durch ein hohes Kurzumtriebsholz-Potenzial charakterisiert ($0,6$ bis $0,7 \text{ TJ}/(\text{a km}^2)$), wohingegen am Standort Greiz das Waldrestholz-Potenzial dominiert ($0,7 \text{ TJ}/(\text{a km}^2)$).

Notwendige Standortkriterien für die Etablierung von Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} weisen u. a. die Standorte Anklam, Schwedt und Völklingen auf.

Tabelle 5-8: Optimale Standorte für die Etablierung von Bio-SNG-Anlagen in Abhängigkeit der Konversionsanlagengröße

Konversionsanlagen- größe in MW _{BWL}	Standort 1	Standort 2	Standort 3
30	Rostock * LK Bad Doberan BL Mecklenburg- Vorpommern	Staßfurt * LK Salzlandkreis BL Sachsen-Anhalt	Greiz LK Greiz BL Thüringen
200	Anklam LK Ostvorpommern BL Mecklenburg- Vorpommern	Schwedt LK Uckermark BL Brandenburg	Völklingen LK Stadtverband Saarbrücken BL Saarland

* - Kreisfreie Stadt – durch Landkreis umschlossen; LK – Landkreis; BL – Bundesland

Während die Standorte Anklam und Schwedt durch hohe flächenspezifische Potenziale für Kurzumtriebsholz gekennzeichnet sind, verfügt der Standort Völklingen über bedeutende Waldrestholz-Potenziale. Ebenso unterscheiden sich die Standorte in Bezug auf die Infrastruktur, während Letzterer deutlich höhere Verkehrsnetzdichten aufweist (vgl. Tabelle A 3-1).

5.2.4 Fazit

Die in diesem Kapitel angewendete methodische Vorgehensweise ermöglicht unter Berücksichtigung der anwenderspezifischen Präferenzen eine objektive und nachvollziehbare Bestimmung vorteilhafter Regionen und Standorte, welche für die Etablierung sowie den nachfolgenden Betrieb von Biomassekonversionsanlagen geeignet erscheinen.

Der entwickelte Ansatz lässt aufgrund der Betrachtung der aufkommenseitigen Voraussetzungen sowie der nachfrageseitigen Anforderungen eine integrierte Standortidentifikation zu. Die Methodik ermöglicht darüber hinaus eine Anpassung an das jeweils vorliegende Standortproblem bzw. die definierte Aufgabe der Standortidentifikation durch (i) die Auswahl der Standortfaktoren (z. B. Betrachtungsebene – regional und lokal), (ii) die Einbeziehung weiterer Standortkriterien (z. B. Biomassefraktionen; infrastrukturelle Forderungen) und (iii) die Gewichtung der Kriterien eines Standortes.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Flexibilität bei der Standortauswahl und damit die Standortverfügbarkeit mit zunehmender Leistungsgröße abnehmen. Um jedoch einen wirtschaftlichen Betrieb der Konversionsanlage langfristig sicherstellen zu können, bedarf es in der Standortplanung der Berücksichtigung des Aspektes Flexibilität. Demnach müssen insbesondere aus logistischer Sicht Anpassungen beispielsweise in Bezug auf sich verändernde Biomasseverfügbarkeiten zwischen Sortimenten und damit variierende Rohstoffbereitstel-

lungskonzepte in Betracht gezogen werden. Davon ausgehend stellt sich die Gestaltung und Umsetzung betrachteter Bio-SNG-Anlagen wie folgt dar:

- Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} zeichnen sich insbesondere aufgrund der verhältnismäßig geringen infrastrukturellen Anforderungen durch eine hohe Flexibilität aus und erscheinen in diesem Zusammenhang viel versprechend in Bezug auf die praktische Umsetzung. Potenzielle Konversionsanlagenstandorte sollten bimodal erschlossen sein.
- Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} sind aufgrund der deutlich höheren logistischen Anforderungen an die Brennstoffbereitstellung sowie die Distribution der Energieträger durch eine geringere Flexibilität charakterisiert. Eine erweiterte Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Voraussetzungen (z. B. Transportsystem Hauptlauf – Substitution des Binnenschifftransportes über den Bahntransport) ist gegeben. Eine Etablierung entsprechender Anlagen sollte vorrangig an Standorten erfolgen, welche trimodal erschlossen sind und über die notwendige Distributionsinfrastruktur verfügen.

5.3 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung

Nachfolgend wird die Datengrundlage für die Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung vorgestellt. Im Anschluss daran werden die zur Dimensionierung der Bereitstellungskonzepte sowie die zur Ableitung relevanter Logistikkennzahlen notwendigen Durchführungsschritte beschrieben und die daraus resultierenden Ergebnisse eingeordnet und diskutiert.

5.3.1 Datengrundlage

Für die Planung des Materialflusses zur Bereitstellung von Waldrest- bzw. Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen werden als Datengrundlage die nachfolgend aufgeführten Technologien zur Ernte und Verfügbarmachung, Lagerung, Aufbereitung, Umschlag sowie Transport betrachtet. Es werden hierzu entlang der Gesamtbereitstellungskette gebräuchliche Technologien vorgestellt und in Bezug auf ausgewählte Kriterien (z. B. Durchsatzleistung, typische Leistung der Technologie) eingeordnet. Zusätzlich werden die verwendeten Daten zur Festlegung der Randbedingungen Raum, Zeit und Technik von der Quelle bis zur Senke beschrieben.

5.3.1.1 Identifikation und Auswahl von Bereitstellungskonzepten

Ernte und Verfügbarmachung

Einen Überblick zu ausgewählten Technologien der Ernte- und Verfügbarmachung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz in Stückgutform gibt Tabelle 5-9. Demnach verfügen Ernteverfahren für Kurzumtriebsholz über durchschnittlich höhere Durchsatzleistungen als forstwirtschaftliche Technologien für die Verfügbarmachung von Waldrestholz. Letztere weisen demgegenüber deutlich höhere Fälldurchmesser auf.

Tabelle 5-9: Gebräuchliche Technologien für die Ernte und Verfügbarmachung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz in Stückgutform [35], [46], [48], [49]

Technologie	Basismaschine	Typische Leistung ^a in kW	Typischer Durchsatz in t _{atro} /MAS	Max. Fäll-durchmesser in mm
Motorsäge	-	2 bis 5	0,4 bis 0,8 ^b	900
Harvester	Harvester	46 bis 270	3,4 bis 5,3 ^b	800
Prozessor	Bagger	52 bis 110	2,6 bis 3,2 ^b	600
Seilkran	LKW	13 bis 133	1,2 bis 2,2	-
Forstschlepper	Forsttraktor	68 bis 146	1,7 bis 2,1	-
Seil-/Zangenschlepper	Forstspeziialschlepper	50 bis 224	4,2 bis 5,2	-
Forwarder	Tragschlepper	64 bis 181	4,7 bis 5,8	-
Mähbündler	Standardtraktor	50 bis 80	11,0 bis 17,4 ^c	80
Fäller-Bündler	Harvester	46 bis 270	3,3 bis 4,4 ^b	200
Landwirtschaftlicher Gliederzug	Standardtraktor	61 bis 90	2,5 bis 6,0 ^d	-

^aNotwendige Motorleistung der Basismaschine; ^bUnter Berücksichtigung eines Brusthöhendurchmessers von 15 bis 20 cm; ^cUnter Berücksichtigung eines Schnittdurchmessers kleiner 8 cm; ^dUnter Berücksichtigung einer einmaligen Beladung je MAS; MAS Maschinenarbeitsstunde

Für die Ernte und Verfügbarmachung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz in Schüttgutform stehen unter gegenwärtigen Bedingungen vollmechanisierte Verfahren zur Verfügung. In Tabelle 5-10 sind die hier betrachteten Technologien dargestellt.

Tabelle 5-10: Ausgewählte Technologien für die Ernte und Verfügbarmachung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz in Schüttgutform [47], [50], [51], [104], [143]

Technologie	Basismaschine	Typische Leistung in kW	Typischer Durchsatz in t _{atro} /MAS	Max. Fäll-durchmesser in mm
Anbauhäcksler	Standardtraktor	75 bis 100	5,0 bis 10,0	70
Gehölzfeldhäcksler	Feldhäcksler	265 bis 360	10,0 bis 40,0	70
Gehölzfeldhäcksler mit Bunker	Feldhäcksler	265 bis 360	7,5 bis 30,0 ^a	70
Modifizierter Zuckerrohrernter	Zuckerrohrernter	176 bis 250	10,0 bis 25,0	70
Hackschnitzel-Harvester	Harvester	~ 240	4,1 bis 6,3	380
Shuttle	Forwarder	64 bis 181	~ 4,0	k. A.
Landwirtschaftlicher Gliederzug	Standardtraktor	75 bis 100	5,0 bis 40,0 ^b	k. A.

^aUnter Berücksichtigung eines Anteils für Nebenzeiten von 25 %; ^bIn Abhängigkeit der Erntetechnologie; MAS Maschinenarbeitsstunde

Lagerung

Eine Einordnung ausgewählter Technologien die für eine Lagerung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz in Stück- bzw. Schüttgutform in Frage kommen, ist in Tabelle 5-11 gegeben.

Tabelle 5-11: Ausgewählte Technologien für die Stück- und Schüttgutlagerung [26], [30], [31], [53]

Technologie	Art des Gutes	Stetigkeit Ein- und Auslagerung
Blocklager	Stückgut	Unstetig
Reihenlager	Stückgut	Unstetig
Haldenlager	Schüttgut	Stetig und unstetig
Silolager	Schüttgut	Stetig und unstetig
Bunkerlager	Schüttgut	Stetig und unstetig

Aufbereitung

In Tabelle 5-12 bis Tabelle 5-16 sind Technologien für die Aufbereitung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz dargestellt. Eine Übersicht zu Bündeltechnologien für Lastkraftwagen und Forwarder ist in Tabelle 5-12 gegeben.

Tabelle 5-12: Technologien für die Bündelung von Holz [59], [144], [145]

Technologie	Durchsatz in $t_{\text{atro}}/\text{MAS}$	Motorleistung in kW	Bündellänge in m	Bündeldurchmesser in mm
Bündler - LKW	2,4 bis 3,4	~ 350	~ 3	$\leq 800^a$
Bündler - Forwarder	4,3 bis 5,0	~ 140	~ 3	$\leq 730^a$

^a variabel einstellbar; MAS Maschinenarbeitsstunde

In Tabelle 5-13 sind ausgewählte Verfahren zur Trocknung von Stückgut abgebildet. Neben den Trockenmasseverlusten differieren die Verfahren deutlich in Bezug den Wassergehalt am Ende der Trocknung. Die Trocknung von Schlagabraum ist durch besonders günstige Ausprägungen gekennzeichnet.

Tabelle 5-13: Ausgewählte Trocknungsverfahren für Stückgut [52], [146]

Technologie	Bauliche Voraussetzungen	Trocknungsdauer in Monaten	Trockenmasseverlust in %	Wassergehalt Ende Trocknung in %
Ganzbaumtrocknung	keine	6	~ 5	25 bis 30
Rundholztrocknung	keine	6	2 bis 9	25 bis 50
Bündeltrocknung	keine	10	~ 14	~ 32
Schlagabraumtrocknung	keine	2	1 bis 2	~ 20

Für die Bereitstellung von Hackgut kommen stationäre und mobile Hackertechnologien in Frage. Die höchsten Durchsatzleistungen weisen dabei stationäre Großhacker und mobile Aufbauhacker auf (Tabelle 5-14).

Tabelle 5-14: Ausgewählte Hackertechnologien für die Hackschnitzelproduktion [40], [48], [49], [147], [148], [149]

Technologie	Durchsatz in $t_{\text{atro}}/\text{MAS}$	Motorleistung in kW	Max. Stamm- durchmesser in mm	Max. Gut- länge in mm
Anbauhacker ^a	12,5 bis 32,0	80 bis 250	150 bis 500	5 bis 40
Anbauhacker ^b	25,0 bis 40,0	360 bis 475	480 bis 900	20 bis 50
Aufbauhacker ^c	14,0 bis 50,0	240 bis 353	bis 550	20 bis 40
Stationärer Großhacker	9,3 bis 413,7	55 bis 1200	250 bis 1000	20 bis 35

^a Antrieb Zapfwelle; ^b Antrieb Dieselmotor; ^c Basisfahrzeug LKW; MAS Maschinenarbeitsstunde

Die Lagerung von Schüttgut kann sowohl mit als auch ohne bauliche Voraussetzungen erfolgen (Tabelle 5-15). Vor allem die Verwendung von Abdeckungen und die Einbindung von Be- und Entlüftungskanälen erzielen einen geringen Trockenmasseverlust sowie einen niedrigen Wassergehalt am Ende der Trocknung (im Vergleich zu den übrigen Verfahren).

Tabelle 5-15: Ausgewählte Trocknungsverfahren für Hackgut [30], [52],[143]

Technologie	Bauliche Vor- aussetzungen	Trocknungs- dauer in Monaten	Trockenmasse- verlust in %	Wassergehalt Ende Trocknung in %
Halde ohne Abde- ckung und Belüftung	keine	12	26 bis 28 ^a	33 bis 41 ^a
Halde mit Abdeckung und ohne Belüftung	Abdeckfolie	12	22 bis 26 ^a	22 bis 26 ^a
Halde mit Abdeckung und Belüftung	Abdeckfolie, Be- und Entlüf- tungskanäle	13	5 bis 10	~ 15

^a Feinhackgut weist höhere Trockenmasseverluste und Wassergehalte am Ende der Lagerung auf als Grobhackgut

Für die Sortierung von Holzhackschnitzeln können unterschiedliche Siebtechnologien verwendet werden. In Tabelle 5-16 ist eine Auswahl von Sieben dargestellt. Plansiebe ermöglichen eine starke Differenzierung der Siebfraktionen, wohingegen Sternsiebe die höchsten Durchsatzleistungen aufweisen.

Tabelle 5-16: Siebtechnologien für Holzhackschnitzel [60], [150], [151], [152]

Technologie	Durchsatz in $t_{\text{atro}}/\text{MAS}$	Motorleistung in kW	Anzahl der Absieb- fraktionen	Absiebung in mm
Plansieb	5 bis 50	3 bis 11	1 bis 6	0 bis 50
Sternsieb	40 bis 150	158 bis 168	1 bis 3	0 bis 120
Trommelsieb	2 bis 60	28 bis 68	1 bis 2 ^a	0 bis 100

^a 3. Fraktion durch Steingitter möglich; MAS Maschinenarbeitsstunde

Umschlag

Für den Umschlag von Stückgut sind ausgewählte Technologien in Tabelle 5-17 vorgestellt. Vor allem schienenfreie Flurfahrzeuge kommen beim Umschlag von Holz in Stückgutform sowie Wechselbehältern zum Einsatz. Deutlich Unterschiede liegen in Bezug auf den Durchsatz vor. Stationäre flurfreie Anlagen verfügen durchschnittlich über höhere Hubleistungen und können in Abhängigkeit der Greiferausstattung alle Stückgutformen bedienen.

Tabelle 5-17: Ausgewählte Umschlagstechnologien für Stückgut [31], [153]

Technologie	Hublasten in t	Hubhöhe in m	Stückgut ^a	Betriebsweise
Stapler	5,5 bis 7,5 ^b	6,5 bis 8,0	B, R	Flurgebunden, schienenfrei
Reachstacker	~ 45,0	~ 15,0 ^c	W	Flurgebunden, schienenfrei
Radlader	2,9 bis 4,8	4,5 bis 5,4	B, G, R	Flurgebunden, schienenfrei
Bagger	6,1 bis 10,1	10,0 bis 12,5	B, G, R	Flurgebunden, schienenfrei
Fahrzeugkran	~ 55,0 ^d	~ 50,0	B, G, R, W	Flurgebunden, schienenfrei
Auslegerkran	25,0 bis 33,0 ^e	15,0 bis 30,0	B, G, R, W	Flurfrei
Portalkran	40,0 bis 60,0	26,0 bis 38,0	B, G, R, W	Flurfrei

^a B – Bündel, G – Ganzbaum, R – Rundholz, W – Wechselbehälter; ^b Schwerpunktabstand von 0,6 m; Hubhöhe 6,0 m; ^c sechs Containerstapelreihen bei einer Containerhöhe von 2,4 m; ^d Ausladung von 2,5 m; ^e Ausladung von 30,0 m

Ein Überblick zu ausgewählten Schüttgutumschlagstechnologien ist in Tabelle 5-18 gegeben. Während Stetigförderer vorrangig fest installiert sind, können Unstetigförderer variabel betrieben werden. Die Förderleistung ist für reine Senkrechtförderer bei Seitenkippern am höchsten. Trogkettenförderer sind dagegen im variablen Betrieb (d. h. waagerechte bis senkrechte Förderung) durch die höchste Förderleistung gekennzeichnet.

Tabelle 5-18: Typische Umschlagstechnologien für Schüttgut [31], [153], [154], [155], [156], [157]

Technologie	Förderleistung in t/MAS	Förder-richtung	Betriebsweise	Leistungs-vermögen
Becherwerke	bis 160	Steil bis senkrecht	Mechanischer Stetigförderer	Fest installiert
Trogkettenförderer	bis 300	Waagrecht, steil bis senkrecht	Mechanischer Stetigförderer	Fest installiert
Schneckenförderer ^a	bis 100	Waagrecht, leicht geneigt	Mechanischer Stetigförderer	Fest installiert
Saugluftförderer ^b	bis 120	Waagrecht, steil bis senkrecht	Pneumatischer Stetigförderer	Variabel bis fest installiert
Seitenkipper ^c	bis 600	Senkrecht	Hydraulischer Unstetigförderer	Variabel
Selbstentlader ^d	bis 250	Senkrecht	Hydraulischer Unstetigförderer	Variabel

^a unter Berücksichtigung mobiler und stationärer Bauweisen – im Spezialfall senkrechte Förderung möglich; ^b unter Berücksichtigung mobiler und stationärer Bauweisen; ^c Güterwagen; ^d unter Berücksichtigung einer regelbaren Schwerkraftentladung an Güterwagen; MAS Maschinenarbeitsstunde

Transport

Eine Übersicht zu ausgewählten Transporttechnologien für Stück- und Schüttgut ist in Tabelle 5-19 gegeben. Unter den verfügbaren Technologien für den Straßentransport weisen Sattelzüge eine höhere Ladekapazität im Vergleich zu Gliederzügen auf (sowohl für den Schütt- und Stückguttransport). Beim Bahntransport sind insbesondere offene Kastenwagen aus Sicht des Transportvolumens von Vorteil. Für den Transport auf Binnenwasserstraßen haben Containerschiffe den größten Laderaum. Deren Einsatzgebiet ist in Deutschland jedoch regional stark eingegrenzt.

Tabelle 5-19: Ausgewählte Technologien für den Transport von Stück- und Schüttgut [63], [64], [158], [159], [160]

Technologie	Max. Ladekapazität in m ³	Max. Ladebreite in m	Max. Ladelänge in m	Max. Lastgrenze in t
Gliederzug mit Rungensystem	75,0 ^a	2,4	6,0/7,0	20,0
Sattelzug mit Rungensystem	84,0 ^b	2,4	21,0	22,0
Gliederzug mit Wechselbehälter	74,0	2,2	7,0	19,0
Gliederzug mit Kippsystem	33,4 ^c	2,2	4,8/6,8	27,6

Sattelzug mit Schubbodenaufleger	92,0	2,4	13,5	31,3
Sattelzug mit Kastenmuldenaufleger	61,5	2,4	7,3	25,0
Offener Güterwagen ^d	1800,0	2,8	12,8	1325,0
Drehgestellflachwagen ^d	1150,0	2,7	18,4	1311,0
Tragwagen ^d	1394,0	2,4	18,5	1470,0
Schüttgutwagen mit Seitenkippsystem ^d	840	2,8	10,2	1239,0
Schüttgutwagen mit Schwerkraftentladung ^d	1080,0	2,0	12,9	1305,0
Trockengüterschiff ^e	1900,0	9,5	85,0	1350,0
Schubverband mit Leichtern ^f	k. A.	22,0	193,0	7000,0
Containerschiff ^g	17390,0	17,0	135,0	10222,0

^a Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Beladungshöhe von 2,5 m; ^b Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Beladungshöhe von 2,0 m; ^c Unter Berücksichtigung eines 3-Achs-LKW und eines 2-Achs-Anhänger mit einer Bordwandhöhe von 1,3 m; ^d Unter Berücksichtigung einer max. Zuglast von 2000,0 t, einem Lokomotivengewicht von 80,0 t und der Streckenklasse D; ^e Europaschiff; ^f Schubverband mit vier Leichtern – Gebiet Donau;

^g Containerschiff – max. Tragfähigkeit von 470 Container (20-Fuß-Container) – Gebiet Rhein

5.3.1.2 Festlegung der Randbedingungen Raum, Zeit und Technik

Um eine objektive Beurteilung der Randbedingungen entlang der gesamten Biomassebereitstellungskette zu gewährleisten, werden für die Bereiche Quelle, Bereitstellungskette und Senke die Aspekte Raum, Zeit und Technik betrachtet.

Räumliche Kriterien

Quelle: Am Ort des Biomasseanfalls sind Informationen zum notwendigen Biomasseeinzugsgebiet bedeutend, welche durch Gleichung (4-1) bereitgestellt werden. Der Brennstoffbedarf der jeweils betrachteten Anlage sowie das flächenspezifische Biomassepotenzial wird aus Kapitel 5.1.1 und Kapitel 5.2.3 entnommen.

Bereitstellungskette: Für die nachfolgende Ausgestaltung der Bereitstellungskette von Biomasse sind vor allem die Entfernungen von der Quelle an die Senke als auch die zugehörigen Teilentfernungen (z. B. von einem Ort des Biomasseanfalls an ein Lager sowie von einem Lager an eine Konversionsanlage) von Interesse. Somit sind in der Bereitstellungskette Lageinformationen von Bedeutung, wie beispielsweise die Lage von Lager- sowie Umschlagsstandorten (z. B. Verladebahnhof, Hafen). Die jeweiligen Informationen zur Verteilung der Lagerstandorte und deren Anzahl wird aus Gleichung (4-7) ersichtlich. Die Lageinformationen für Umschlagsstandorte werden aus [131] und [133] entnommen. Darüber hinaus werden die Einzugsgebiete der Umschlagsstandorte vordefiniert.

Senke: Am Konversionsanlagenstandort sind Angaben zur räumlichen Ausdehnung des Lagerstandortes bedeutend. Hierfür werden die notwendigen Daten des Lagerraums in Abhängigkeit von der betrachteten Anlagengröße mit Hilfe der in Kapitel 5.1.2.2 beschriebenen Vorgehensweise erhoben. Für die Bestimmung der Leistungskennzahlen ist zusätzlich die infrastrukturelle Erschließung der Standorte (u. a. bi- bzw. trimodal) von Interesse.

Zeitliche Kriterien

Quelle: Am Ort des Biomasseanfalls sind für die Ausgestaltung der Logistikkette vor allem Angaben zu den Zeiträumen der Ernte bzw. Verfügbarmachung von Kurzumtriebs- und Waldrestholz von Bedeutung. Die Datengrundlage bildet [35] und [161].

Bereitstellungskette: Innerhalb der Bereitstellungskette sind Informationen zur mittleren Fahrzeit ausgewählter Transportmedien zu bestimmen (Bezugszeitraum ein Jahr). Dabei werden für den Lastkraftwagen-Transport die Feiertags- und Sonntagsfahrverbote für das Jahr 2009 berücksichtigt [162]. Für den Transport auf der Schiene besteht über das gesamte Jahr die Möglichkeit des Transportes [163]. Dagegen ist der Transport mit dem Binnenschiff aufgrund witterungsbedingter Einflüsse (z. B. Niedrigwasser, Eisgang) zeitlich begrenzt verfügbar. Da entsprechende Daten zur mittleren Fahrzeit von Binnenschiffen jährlichen Schwankungen unterliegen, werden an dieser Stelle Durchschnittswerte zur Schiffbarkeit von Binnengewässern verwendet [164], [165]. Zusätzlich sind Angaben zu maximalen Umschlagszeiten zur Be- und Entladung von Transportmedien notwendig [166], [167].

Senke: An der Konversionsanlage sind Informationen zur Anlieferungsdauer innerhalb der Bereitstellung von Brennstoffen bedeutsam. Hierzu erfolgt eine Orientierung an den jeweils möglichen Fahrtzeiten der Transportmedien die in Abhängigkeit der Konversionsanlagengröße für den Haupt- bzw. Nachlauf in Frage kommen [162], [163], [164]. Daneben ist die zeitliche Dimensionierung der Lagervorhaltung festzulegen (d. h. für welche Anzahl von Tagen ein Vorratslager an der Konversionsanlage ausgelegt wird).

Technische Kriterien

Quelle: Neben dem flächenspezifischen Biomassepotenzial sind am Ort des Biomasseanfalls ebenso technische Informationen zu den eingesetzten Ernte- bzw. Verfügbarmachungstechnologien sowie den Arbeitsmitteln für den Transport, die Lagerung, die Aufbereitung und den Umschlag von Interesse. Die Datengrundlage stellen die in den vorangegangenen Kapitel beschriebenen Technologien dar (vgl. Kapitel 5.3.1.1).

Bereitstellungskette: Die technischen Angaben zu den in der Bereitstellungskette angewendeten Technologien sowie den relevanten Prozessen zur Bereitstellung des Brennstoffs vom Ort des Biomasseanfalls an die Konversionsanlage, basieren auf den in Kapitel 5.3.1.1 dargestellten Technologien.

Senke: Konversionsanlagenseitig sind neben den technischen Informationen zu ausgewählten Transport-, Aufbereitungs-, Lager- und Umschlagstechnologien auch der spezifische Brennstoffbedarf einer betrachteten Bio-SNG-Anlage von Bedeutung (vgl. Tabelle 5-1).

5.3.2 Durchführung der Planung des Materialflusses

5.3.2.1 Identifikation und Auswahl von Bereitstellungskonzepten

Die Auswahl der Prozesselemente für die Biomassebereitstellung erfolgt in Abhängigkeit (i) des Bereitstellungsobjektes, (ii) des Ernte- und Verfügbarmachungsprozesses und (iii) der Konversionsanlagengröße. Für die Bereitstellung von Kurzumtriebs- und Waldrestholz charakterisiert Tabelle 5-20 relevante in der Literatur beschriebene und hier betrachtete Technologien.

Tabelle 5-20: Technologien zur Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz [12], [40], [41], [43], [47], [49], [51], [102], [104], [168], [169], [170], [171]

Ernte/Verfügbarmachung	Lagerung	Aufbereitung	Umschlag	Transport
Motorsäge (E_1)				
Forstschlepper (E_2)				Landwirtschaftlicher Gliederzug (T_1)
Seilschlepper (E_3)				Gliederzug Wechselbehälter (T_2)
Harvester (E_4)				Sattelzug Schubodenaufleger (T_3)
Forwarder (E_5)				Gliederzug Rungensystem (T_4)
Zangenschlepper (E_6)		Anbauhacker ^a (A_1)	Radlader (R_1)	Tragwagen (T_5)
Hackschnitzel-Harvester (E_7)		Anbauhacker ^b (A_2)	Reachstacker (R_2)	Offener Güterwagen (T_6)
Shuttle (E_8)	Blocklager (L_1)	Aufbauhacker (A_3)	Saugluftförderer (R_3)	Schüttgutwagen mit Schwerkraftentladung (T_7)
Processor (E_9)	Haldenlager (L_2)	Stationärer Großhacker (A_4)	Bagger (R_4)	Drehgestellflachwagen (T_8)
Harvester-Bündler (E_{10})		Anbauhacksler (A_5)	Portalkran (R_5)	Trockengüterschiff (T_9)
Landwirtschaftlicher Gliederzug (E_{11})				
Anbauhacksler (E_{12})				
Gehölzfeldhacksler (E_{13})				
Gehölzfeldhacksler mit Bunker (E_{14})				
Modifizierter Zuckerrohrernter (E_{15})				
Mähbünder (E_{16})				
Fäller-Bündler (E_{17})				

^a Antrieb Zapfwelle; ^b Antrieb Dieselmotor

Die darauf aufbauenden Referenzbereitstellungskonzepte sind detailliert in Tabelle A 4-1 bis Tabelle A 4-6 dargestellt. Aufgrund der Kombinationsmöglichkeiten einzelner Bereitstellungsprozesse ergibt sich eine Vielzahl von Bereitstellungsketten. Nachfolgend werden hier

ausgewählte praxistaugliche sowie in der Fachliteratur beschriebene Bereitstellungsketten für Waldrest- und Kurzumtriebsholz in die Betrachtung einbezogen.

5.3.2.2 Festlegung der Randbedingungen

Räumliche Kriterien

Quelle: Das Biomasseeinzugsgebiet wird unter Verwendung des zusammengefassten flächenspezifischen Biomassepotenzials für Waldrest- und Kurzumtriebsholz ermittelt. In Tabelle 5-21 sind die Biomasseeinzugsbereiche für die in Kapitel 5.2.3.3 bestimmten Anlagenstandorte dargestellt.

Tabelle 5-21: Durchschnittliche Biomasseeinzugsgebiete nach ausgewählten Bio-SNG-Anlagenstandorten

Konversionsanlagen- größe in MW _{BWL}	Biomasseeinzugsgebiet in km ²		
	Standort 1	Standort 2	Standort 3
30	Rostock (752)	Staßfurt (1072)	Greiz (707)
200	Anklam (6816)	Schwedt (8343)	Völklingen (3361)

Bereitstellungskette: Die Festlegung von Lager- und Umschlagsstandorten ist erforderlich, um Aussagen über die Entfernung zwischen dem Ort des Biomasseanfalls und der Konversionsanlage geben zu können. Die Bestimmung der Lagerorte erfolgt unter Berücksichtigung der Konversionsanlagengröße, der jeweils vorhandenen Verkehrsnetzinfrastruktur und der vorgegebenen Lagergröße. Für Konversionsanlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} wird eine gleichmäßige Verteilung der Lagerflächen im Einzugsgebiet nach dem in Abb. 4-5 dargestellten Ansatz zugrunde gelegt. Für die Verteilung der Standorte ist die durchschnittliche Größe der Lager zu definieren, welche gleichzeitig die Lageranzahl bestimmt. Zusätzlich sind für Lagerstandorte innerhalb der Biomassebereitstellung an Konversionsanlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} die infrastrukturellen Gegebenheiten und insbesondere Umschlagsstandorte zu berücksichtigen. Die Bestimmung von Orten für den Umschlag von Biomasse bezieht sich hier auf den Transport mit Vor- und Hauptlauf, d. h. Orte an denen ein Umschlag von einem straßengebundenen Verkehrsmittel auf die Bahn bzw. das Binnenschiff erfolgt (vgl. Kapitel A.3). Dabei werden Umschlagsstandorte ausgewählt die in der Nähe der Konversionsanlage liegen sowie über die notwendigen technischen Ausstattungen für den Umschlag verfügen. Darüber hinaus dürfen sich die einzelnen Standorte mit ihren zugehörigen vordefinierten Biomasseeinzugsgebieten nicht überschneiden. Für die Einzugsgebiete der Lager- und Umschlagsstandorte werden folgende Annahmen getroffen.

Das Einzugsgebiet eines Lagerstandortes ergibt sich aus der Lagergröße und dem flächenspezifischen Biomassepotenzial (vgl. Abb. A 4-1). An dieser Stelle wird eine durchschnittliche

Lagerkapazität von 10000 m³ unterstellt [128], wobei in der Literatur heterogene Angaben zur Lagergröße in Abhängigkeit des Lagergutes zu finden sind [30], [52], [172].

Das Einzugsgebiet von einem Holzverladebahnhof steht in direkter Abhängigkeit mit den vor Ort gegebenen Umschlagsvoraussetzungen. Nachfolgend wird ausschließlich die Möglichkeit der Beladung von Ganzzügen in Betracht gezogen. Bei einer durchschnittlichen Vorlaufzeit von drei Tagen zur Befüllung des Zwischenlagers an einem Verladebahnhof, kann innerhalb von vier Tagen ein Ganzzug je Verladebahnhof bereitgestellt werden.

Das Einzugsgebiet eines Binnenhafens orientiert sich u. a. an der Klassifizierung der zugehörigen Binnenwasserstraße, welche Einfluss auf die zulässige Binnenschiffgröße hat (Begrenzung über Tonnage – vgl. [130]). Dabei werden an dieser Stelle drei Einordnungen für Binnenwasserstraßen betrachtet (vgl. Tabelle 5-22). Die mögliche Anzahl von Binnenschiffen die von einem Umschlagsstandort Biomasse bereitstellen können, leitet sich aus der resultierenden Tonnagebegrenzung und der notwendigen Zeit für Vorlauf und Schiffsbeladung ab.

Tabelle 5-22: Klassifizierung der Binnenwasserstraßen [130]

Klasse der Binnenwasserstraßen	Maximale Tonnage in t	Anzahl an Schiffsladungen je Umschlagsstandort/Monat ^a
III	1200	5
IV	1500	4
V	3000	2

^a Unter Berücksichtigung einer Vorlaufzeit von täglich 8 h unter Verwendung von LKW mit einer Lademenge von 16 t; Beladezeit ein Tag

Senke: Für eine effiziente Ausgestaltung der Logistikkette sowie für die Gewährleistung einer optimalen Lagerbestandshöhe sind in Abhängigkeit der Konversionsanlagengröße die nachfolgenden Lagerkubaturen vorzuhalten (vgl. Tabelle 5-23). Dabei soll der vorzuhaltende Lagerbestand an der Konversionsanlage den Anlagenbetrieb von fünf Tagen gewährleisten.

Tabelle 5-23: Notwendige Lagerkapazitäten für Hackschnitzel, Rundholz sowie Bündel an ausgewählten Konversionsanlagen [59], [173]

Konversionsanlagengröße in MW _{BWL}	Hackschnitzel in Srm	Rundholz in RM	Bündel in RM ^a	Lagermenge in t _{atro}
30	3970	2350	3680	810
200	26470	15670	24540	5400

^a bei einem Rauminhalt von 1,15 RM und einem Gewicht von 0,25 t_{atro} je Bündel; RM – Raummeter; Srm – Schüttraummeter

Die Anzahl der an einem Standort gegebenen Verkehrsanbindungen hat einen Einfluss auf die gesamte Verfügbarkeit der logistischen Kette. Demnach werden an den festgelegten Konversionsanlagenstandorten die Anbindungen an das Straßen-, Schienen- und Binnenwasserstraßennetz bestimmt und in die Beurteilung einbezogen.

Zeitliche Kriterien

Quelle: Die Ernte- und Verfügbarmachung von Kurzumtriebsholz sollte innerhalb der Wintermonate Dezember bis Februar erfolgen, um sowohl verfahrenstechnische Besonderheiten (z. B. niedriger Wassergehalt des Erntegutes) als auch biologische Kriterien (z. B. Vegetationsruhe) optimal auszunutzen [161]. In diesen Zusammenhang wird ein Zeitraum von drei Monaten für die Ernte- und Verfügbarmachung von Kurzumtriebsholz festgelegt. Dagegen kann Waldrestholz über das gesamte Jahr verfügbar gemacht werden, so dass an dieser Stelle ein Zeitraum von 12 Monaten definiert wird.

Bereitstellungskette: Den Arbeitsmitteln, die für den Biomassetransport an die Konversionsanlage in Frage kommen, werden folgende mittlere Fahrzeiten pro Jahr zugeordnet: (i) Lastkraftwagen 303 Tage, (ii) Bahn 365 Tage und (iii) Binnenschiff 250 Tage.

Für den Umschlag von Biomasse an den einzelnen Umschlagsstandorten werden die in der Praxis geläufigen mittleren Umschlagszeiten in Abhängigkeit der jeweiligen Transportmittel wie folgt berücksichtigt: (i) Lastkraftwagen 0,25 h, (ii) Bahn 14,00 h und (iii) Binnenschiff 14,00 h [166], [167].

Senke: Für die Bereitstellung der Biomasse wird angenommen, dass täglich 24 Stunden die Brennstoffaufnahme erfolgen kann (unter Berücksichtigung eines Anlagenstandortes innerhalb eines Industriegebietes). Demnach stellen die zuvor benannten mittleren Fahrzeiten die Basis für die Anzahl von Anlieferungstagen dar.

Technische Kriterien

Bereitstellungskette: In die Betrachtung möglicher Bereitstellungstechnologien werden sowohl Alternativen im Nullserien- und Serienstadium einbezogen. Insbesondere im Bereich der Ernte und Verfügbarmachung stehen viel versprechende Technologien im Prototypenstadium zur Verfügung. Grundsätzlich werden für Serienmodelle nur die anfallenden Wartungszeiten innerhalb der Ausfallzeiten berücksichtigt. Demgegenüber werden in die Ermittlung der Ausfallzeiten für Nullserienmodelle ebenso technische Ausfallzeiten einbezogen (z. B. Reversier- oder Verstopfungszeiten), die durch Mängel in der Ausführung und Konzeption verursacht werden. Letztere basieren auf Zeitstudien aus der relevanten Fachliteratur. Demnach werden folgende Ausfallzeiten zugrunde gelegt:

- Nullserie: 26 bis 36 % [59], [174], [175], [176], [177]
- Serie: 5 bis 12 % [44], [178], [179], [180]

5.3.2.3 Dimensionierung der Prozesselemente

Für eine Brennstoffbereitstellung über die Schiene an die festgelegten Anlagenstandorte kommen für den Hauptlauf die in Tabelle 5-24 dargestellten durchschnittlichen Transportdistanzen in Frage. Dabei ergeben sich die mittleren Transportentfernungen aus der Anzahl notwendiger Umschlagsstandorte für die Versorgung einer SNG-Anlage und der Verteilung von Holzverladebahnhöfen in der Fläche (vgl. Abb. A 4-3).

Tabelle 5-24: Durchschnittliche Transportdistanzen über den Verkehrsträger Schiene an ausgewählte Konversionsanlagenstandorte [131]

Konversionsanlagen- größe in MW _{BWL}	Transportdistanzen in km		
	Standort 1	Standort 2	Standort 3
30	Rostock (105)	Staßfurt (108)	Greiz (102)
200	Anklam (161)	Schwedt (166)	Völklingen (143)

Die für den Biomassetransport an Bio-SNG-Anlagen über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße einzuplanenden Transportentfernungen sind in Tabelle 5-25 gegeben. Die Entfernungen leiten sich aus der Anzahl notwendiger Umschlagstandorte und der Verfügbarkeit von Binnenhäfen in der betrachteten Region ab. Aufgrund der geringeren Verteilung von Binnenhäfen im Nordosten Deutschlands, resultieren in Anklam und Schwedt höhere Distanzen für den Transport über die Binnenwasserstraße gegenüber dem Standort Völklingen.

Tabelle 5-25: Durchschnittliche Transportdistanzen über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an ausgewählte Konversionsanlagenstandorte [130], [181]

Konversionsanlagen- größe in MW _{BWL}	Transportdistanzen in km		
	Standort 1	Standort 2	Standort 3
200	Anklam (390)	Schwedt (380)	Völklingen (300)

Die Bestimmung der Anzahl von Arbeitsmitteln basiert auf der Methodik des Kapitels 4.3.3. Darauf aufbauend wird in Abhängigkeit der integrierten Prozessschritte je Konzept die mittlere Arbeitsmittellanzahl bestimmt. Aufgrund der heterogenen Detailtiefe und Belastbarkeit von Angaben, werden die Eingangsparameter in Bandbreiten berücksichtigt.

Angaben zur Bandbreite der Arbeitsmittellanzahl in Abhängigkeit der betrachteten Anlagengröße sind in Abb. 5-6 und Abb. 5-7 dargestellt. Detaillierte Informationen zu den jeweiligen Bereitstellungskonzepten befinden sich in Tabelle A 4-8 bis Tabelle A 4-11. Aus der Ermittlung der Arbeitsmittellanzahl geht hervor, dass für die Bereitstellung von Biomasse mit teilmechanisierten Konzepten deutlich mehr Arbeitsmittel notwendig sind. Deswegen erscheinen teilmechanisierte Verfahren der Brennstoffbereitstellung an Bio-SNG-Anlagen nicht aussichtsreich. Wegen der hohen Arbeitsmittellanzahl und der damit höheren Komplexität der Bereitstellung, kann u. a. von einer Zunahme der organisatorischen Ausfallzeiten und damit einer Verringerung der technischen Verfügbarkeit ausgegangen werden. Für die weitere Betrachtung werden deshalb ausschließlich vollmechanisierte Konzepte betrachtet.

Die für die Brennstoffbereitstellung an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} notwendigen Arbeitsmittel werden durch den Bereich Ernte und Verfügbarmachung sowie Lagerung dominiert.

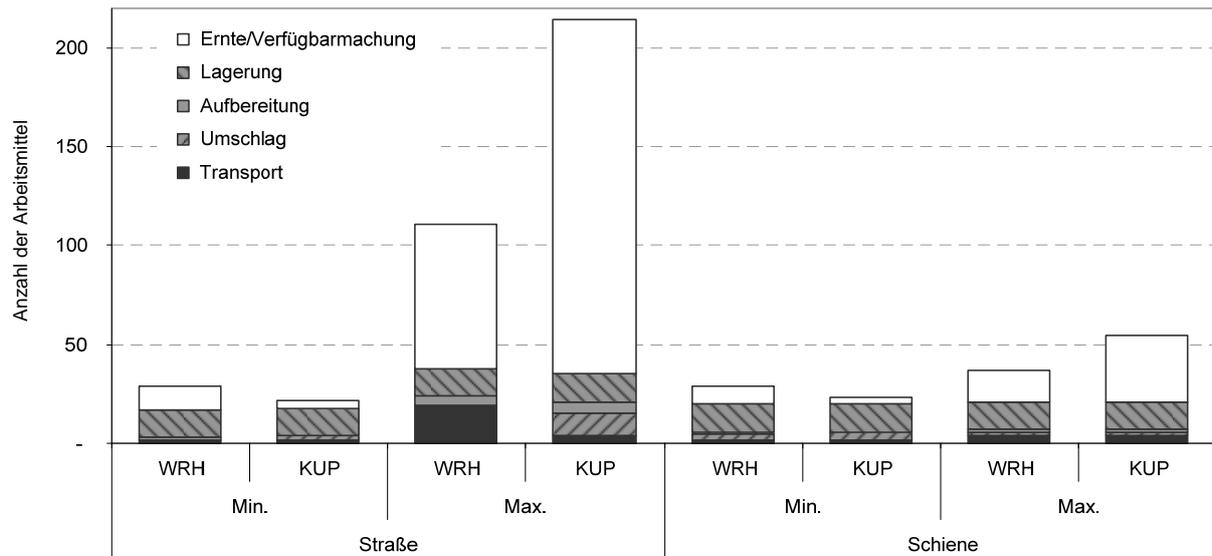


Abb. 5-6: Bandbreiten der Arbeitsmittelanzahl für Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Anlagen im Leistungsbereich von $30 \text{ MW}_{\text{BWL}}$

Die Ausprägung der Arbeitsmittelanzahl für die Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz ist in Abb. 5-7 dargestellt. Die Waldrestholzbereitstellung ist gegenüber der von Kurzumtriebsholz über die Schiene bzw. die Binnenwasserstraße an Anlagen im Leistungsbereich von $200 \text{ MW}_{\text{BWL}}$ durch eine geringere Anzahl an Arbeitsmitteln gekennzeichnet.

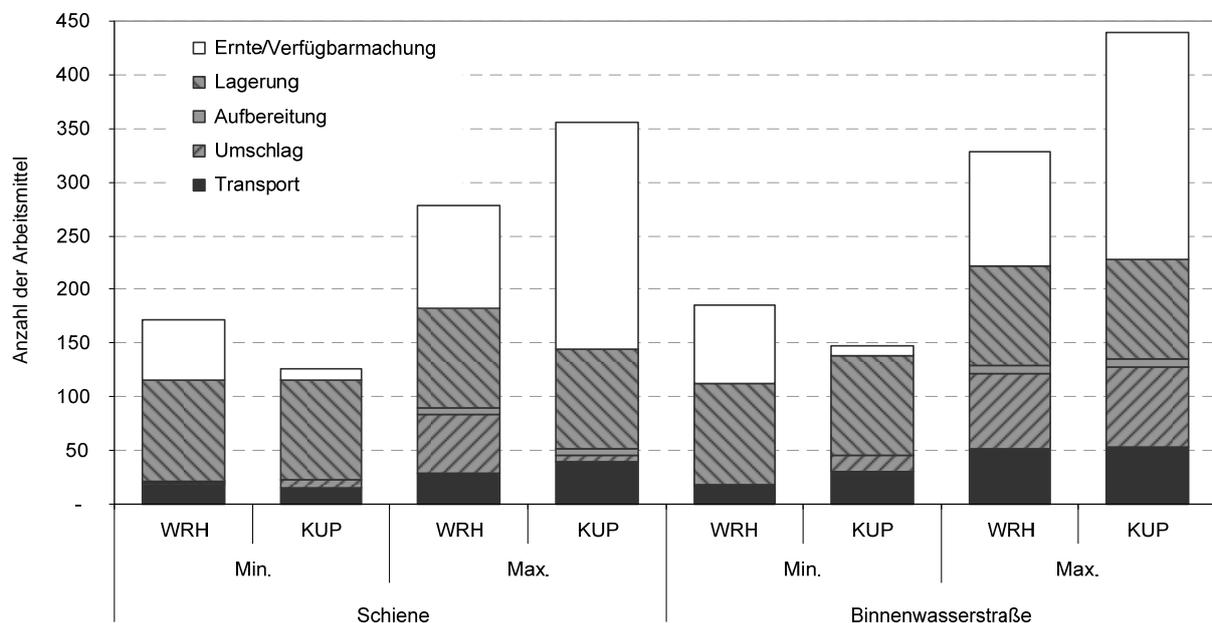


Abb. 5-7: Bandbreiten der Arbeitsmittelanzahl für Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Anlagen im Leistungsbereich von $200 \text{ MW}_{\text{BWL}}$

Im Vergleich zur Bereitstellung mit der Bahn verlangt die Brennstoffversorgung mit dem Binnenschiff tendenziell eine höhere Anzahl an Umschlags- und Transporttechnologien.

5.3.2.4 Bewertung und Ableitung effizienter Bereitstellungskonzepte

Für die Ermittlung der Logistikkennzahlen wird die in Kapitel 4.3.4 beschriebene Vorgehensweise verwendet. Dazu werden die im vorangegangenen Kapitel bestimmten Arbeitsmittel mit ihren spezifischen technischen Ausfallzeiten verknüpft und in Abhängigkeit ihrer Stellung in der Bereitstellungskette (serielle bzw. parallele Struktur) die technischen Verfügbarkeiten berechnet. Die Durchlaufzeiten leiten sich aus der Durchsatzleistung der betrachteten Technologie ab. Für die Ermittlung der Auslastungsgrade bildet das Verhältnis aus gemischter und ganzzahliger Arbeitsmittellanzahl die Basis.

Grundsätzlich kann bei der Berechnung der technischen Verfügbarkeit einer Technologie festgehalten werden, dass insbesondere deren Anordnung in der Bereitstellungskette von Bedeutung ist. Während die Ausfallzeit innerhalb einer parallelen Struktur von geringer Bedeutung ist, hat die berücksichtigte Ausfallzeit in einer seriellen Anordnung einen signifikanten Einfluss auf die technische Verfügbarkeit. Bei der Berechnung der Durchlaufzeiten stellt vor allem bei Konzepten mit Vor- und Hauptlauf die unterstellt Übergabezeit zur Be- und Entladung des Hauptlaufmediums die dominierend Größe dar. Die spezifischen Bereitstellungskosten ergeben sich aus den Einzelkosten der integrierten Prozesselemente.

Die Gewichtung der einzelnen Leistungskennzahlen untereinander ist in Tabelle 5-26 gegeben. In diesem Kontext sind die Kriterien Logistikleistung und -kosten gleich wichtig.

Tabelle 5-26: Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Leistungskennzahlen

Nr.	Auslastung	Verfügbarkeit ^a	Durchlaufzeit	Anzahl der „+“ ^c	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Auslastung		+	+	2	6	0,50
Verfügbarkeit ^a	-		+	1	4	0,33
Durchlaufzeit	-	-		0	2	0,17
Anzahl der „-“ ^c	2	1	0			

^a Technische Verfügbarkeit; ‚+‘ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1} , Wert: 3; ‚0‘ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1} , Wert: 2; ‚-‘ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1} , Wert: 1

5.3.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Kennzahlenberechnung und der darauf aufbauenden Ableitung technisch effizienter Bereitstellungskonzepte vorgestellt und diskutiert. Die Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz variieren deutlich zwischen den analysierten Bereitstellungskonzepten (vgl. Abb. A 4-4 bis Abb. A 4-27). Die spezifischen Bereitstellungskonzepte für einen Leistungsbereich weisen zwischen den Standorten Ähnlichkeiten in Bezug auf die Ausprägung der Logistikkennzahlen auf.

Im Rahmen der Brennstoffbereitstellung an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} sind vollmechanisierte Konzepte tendenziell durch höhere Wertigkeiten gekennzeichnet als teilmechanisierte. In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass leistungsbezo-

gene Kennzahlen auf teilmechanisierte Bereitstellungskonzepte eine stärkere Ausprägung haben als Kostenkennzahlen. Dies resultiert vor allem aus den höheren Auslastungsgraden der ausgewählten Technologien sowie der verhältnismäßig hohen Anzahl an Arbeitsmitteln im Gegensatz zu vollmechanisierten Alternativen (vgl. Tabelle A 4-8). In Abb. 5-8 ist eine Übersicht zu den Bandbreiten der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} gegeben.

Aus dem Vergleich der straßen- und schienengebundenen Bereitstellungskonzepte geht hervor, dass die Versorgung über die Straße geringere Durchlaufzeiten und durchschnittlich höhere Auslastungsgrade aufweist. Sowohl für die Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz erreichen schienengebundene Konzepte eine höhere logistische Effizienz was insbesondere auf der günstigeren Kostenstruktur basiert. Daneben ist die Bereitstellung von Waldrest- gegenüber von Kurzumtriebsholz sowohl über die Straße als auch über die Schiene durch marginal höhere Wertigkeiten gekennzeichnet.

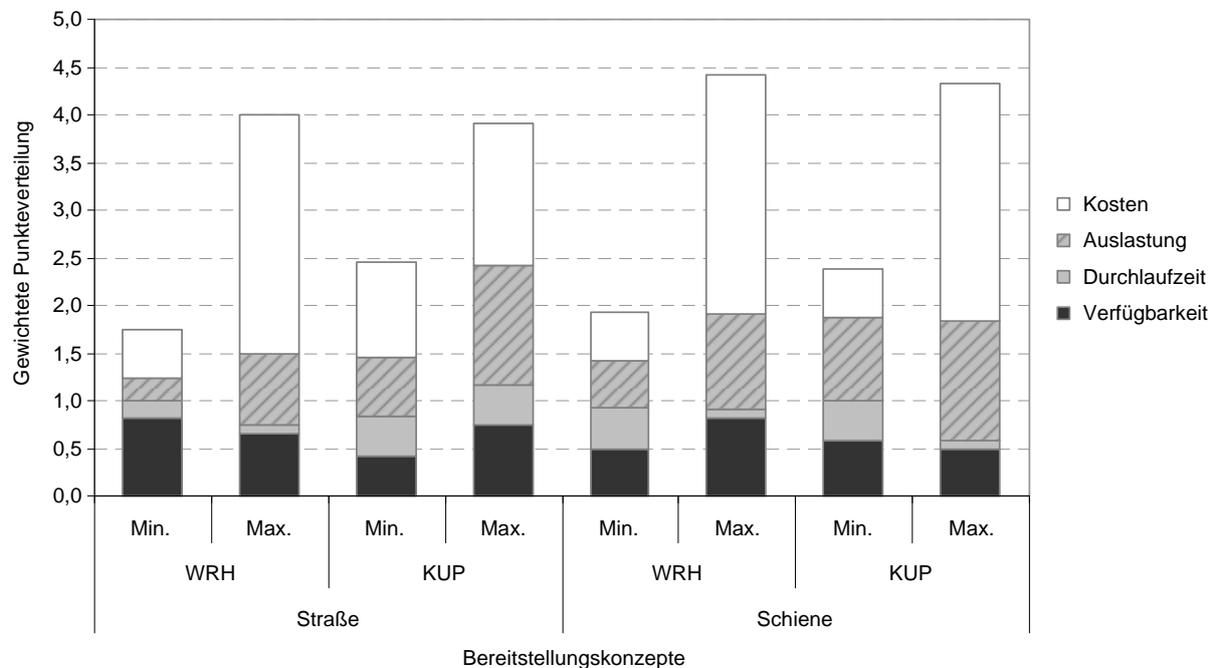


Abb. 5-8: Bandbreiten analysierter Logistikkennzahlen für die Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

Innerhalb der Bereitstellung von biogenen Festbrennstoffen an Anlagen zur Bio-SNG-Produktion im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} liegen die höchsten Wertigkeiten für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene vor (vgl. Abb. 5-9). Die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz ist durch geringere Wertausprägungen charakterisiert. Vorrangig leistungsbezogene Kriterien (z. B. geringere technische Verfügbarkeit) rufen diese Tendenz hervor. Die Brennstoffbereitstellung über die Binnenwasserstraße ist durch geringere Schwankungsbreiten gegenüber der Bahnversorgung gekennzeichnet, da u. a. geringere technische Verfügbarkeiten für den Binnenschifftransport gegeben sind (vgl. zeitliche Kriterien der Bereitstellungskette in Kapitel 5.3.2.2).

Darüber hinaus sind Bereitstellungsketten von Waldrest- und Kurzumtriebsholz mit dem Verkehrsmittel Bahn gegenüber dem Transport mit dem Binnenschiff durch deutlich niedrigere Bereitstellungskosten und Durchlaufzeiten charakterisiert. Im Vergleich zu einem Bereitstellungskonzept via Bahntransport ist für die Versorgung über die Binnenwasserstraße durchschnittlich die sechsfache Durchlaufzeit einzuplanen (vgl. Tabelle A 4-7 sowie Gl. (A 4-1) bis (A 4-4)).

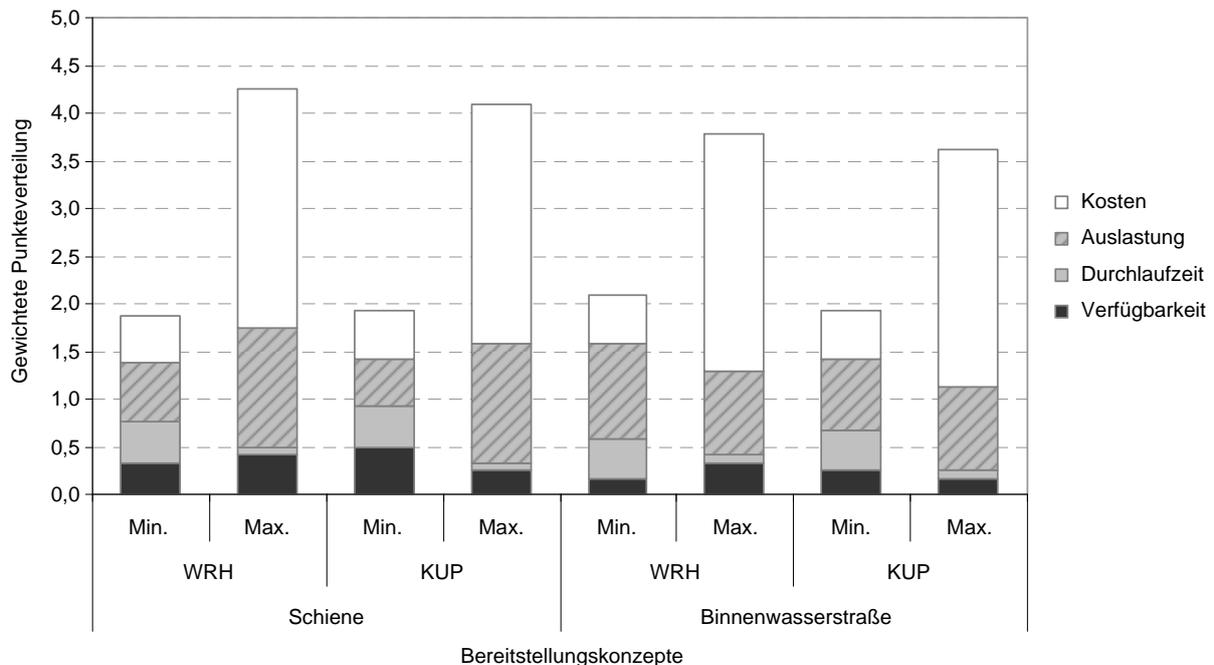


Abb. 5-9: Bandbreiten analysierter Logistikkennzahlen für die Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von $200 \text{ MW}_{\text{BWL}}$

Nachfolgend werden exemplarisch die drei Konzepte mit der höchsten logistischen Effizienz in Abhängigkeit des bereitzustellenden Brennstoffs, der Konversionsanlagengröße und den zugehörigen Verkehrsträger für die betrachteten Standorte vorgestellt.

Bereitstellungskonzepte für den Leistungsbereich $30 \text{ MW}_{\text{BWL}}$

Für die Bereitstellung von Waldrest- und Kurumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von $30 \text{ MW}_{\text{BWL}}$ kommen die in Tabelle 5-27 dargestellten Konzepte in Frage. Dies bedeutet für die Waldrestholzbereitstellung, dass aus Sicht der Verfügbarmachung sowohl Stammholz- bzw. Ganzbaumlinien sowie Hackgutlinien aussichtsreich erscheinen. Für die Versorgung von Konversionsanlagen mit Kurzumtriebsholz sind aus technischer und ökonomischer Sicht sowohl Hackgut- als auch Bündellinien als viel versprechend einzuordnen.

Im Gegensatz zum Straßentransport, bei dem sowohl der lose Transport als auch die Nutzung von Wechselbehältern aussichtsreich erscheint, stellt sich der Transport mit der Bahn eher mit offenen Kastenwagen bzw. mit Selbstentladungskonzepten vorteilhaft dar.

Aus der Übereinstimmung der Bereitstellungskonzepte in Bezug auf den Verkehrsträger und die Biomasse zwischen den Standorten kann geschlussfolgert werden, dass die Unterschiede des flächenspezifischen Biomassepotenzial oder aber der Transportdistanzen einen untergeordneten Einfluss auf die Auswahl der Bereitstellungskonzepte haben.

Tabelle 5-27: Effiziente Bereitstellungskonzepte für Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

Verkehrsträger	Biomasse	Standort		
		Rostock	Staßfurt	Greiz
Straße	WRH	WI/5; WI/7; WI/6	WI/5; WI/7; WI/6	WI/5; WI/6; WI/7
	KUP	KI/9; KI/5; KI/3	KI/9; KI/5; KI/3	KI/9; KI/5; KI/3
Schiene	WRH	WII/5; WII/6; WII/4	WII/5; WII/6; WII/4	WII/5; WII/6; WII/4
	KUP	KII/3; KII/5; KII/2	KII/3; KII/5; KII/2	KII/3; KII/5; KII/2

Bereitstellungskonzepte für den Leistungsbereich 200 MW_{BWL}

Die Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Anlagen zur Bio-SNG-Produktion im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} ist unter Berücksichtigung einer hohen Logistikeffizienz mit den in Tabelle 5-28 abgebildeten Konzepten von Vorteil. Dabei wird deutlich, dass für Waldrestholz überwiegend die Stammholz- bzw. Ganzbaumlinie mit Harvester unter Verwendung einer dezentralen Hackung an der Waldstraße zum Einsatz kommt. Der Transport der Biomasse wird überwiegend in loser Form organisiert.

Für eine effiziente Bereitstellung von Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen in diesem Leistungsbereich sind vorrangig Verfahren geeignet, deren Ernte- und Verfügbarmachungsprozess durch Hackschnitzelverfahren charakterisiert sind. Ebenso wie im Rahmen des Transportes von Waldrestholz stellt sich die Bereitstellung ohne Wechselbehälter als effizienter dar.

Der Biomassetransport mit dem Binnenschiff ohne Wechselbehälter begründet sich u. a. auf den deutlich höheren Lademengen für lose Güter, welche insbesondere während des Transportes über höhere Distanzen von Bedeutung sind.

Tabelle 5-28: Effiziente Bereitstellungskonzepte für Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

Verkehrsträger	Biomasse	Standort		
		Anklam	Schwedt	Völklingen
Schiene	WRH	WII/5; WII/4; WII/2	WII/5; WII/4; WII/2	WII/5; WII/4; WII/2
	KUP	KII/3; KII/5; KII/2	KII/3; KII/5; KII/2	KII/3; KII/5; KII/2
Binnenwasserweg	WRH	WIII/3; WIII/4; WIII/2	WIII/3; WIII/4; WIII/2	WIII/3; WIII/4; WIII/2
	KUP	KIII/4; KIII/2; KIII/3	KIII/4; KIII/2; KIII/3	KIII/4; KIII/2; KIII/3

5.3.4 Fazit

Die verwendete systematische Vorgehensweise zur quantitativen und qualitativen Bestimmung von logistisch-effizienten Bereitstellungskonzepten ist aussichtsreich, da:

- eine Vielzahl von in Frage kommenden Konzepten für die Bereitstellung von Biomasse an Konversionsanlagen unterschiedlicher Leistungsgrößen bewertet werden können,
- die Einbeziehung der Dimensionierung des Materialflusses Aussagen über die Komplexität der Bereitstellungsketten erlaubt und
- die Beurteilung nach ausgewählten Logistikkennzahlen eine Meßbarmachung der Logistikleistung und -kosten ermöglicht.

Die Methodik zur Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung ermöglicht neben der ganzheitlichen Betrachtung der Brennstoffbereitstellung von dem Ort des Biomasseanfalls an die Konversionsanlage die anwenderspezifische Variation von technischen, räumlichen als zeitlichen Randbedingungen. Somit erlaubt die entwickelte Methodik die Integration standortspezifischer Gegebenheiten. Darüber hinaus kann die Berechnung der Transportdistanzen mit dem vorgestellten Ansatz die bisher durchgeführte Kalkulation mit Hilfe von geschätzten Umwegfaktoren ablösen. Schließlich bietet die Dimensionierung des Materialflusses eine Datengrundlage, welche eine einfache Beurteilung von Bereitstellungsketten anhand von Kennzahlen in Bezug auf die Logistikleistung und -kosten erlaubt.

Aus der hier durchgeführten Planung des Materialflusses von Bereitstellungskonzepten für Waldrest- und Kurzumtriebsholz kann geschlussfolgert werden, dass grundsätzlich vollmechanisierte Bereitstellungskonzepte sowohl für Waldrest- als auch für Kurzumtriebsholz aufgrund ihrer geringeren Komplexität, insbesondere durch die Reduktion der Arbeitsmittelanzahl sowie höheren Logistikeffizienz als vorteilhafter gegenüber teilmechanisierten Konzepten einzuordnen sind. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass Bereitstellungskonzepte für Kurzumtriebsholz aufgrund tendenziell geringerer technischer Verfügbarkeiten eine niedrigere Logistikleistung aufweisen als Konzepte für die Bereitstellung von Waldrestholz. In Bezug

auf die Logistikkosten resultieren für Versorgungskonzepte mit Kurzumtriebsholz deutlich geringere Bereitstellungskosten. Der Transport mit Vor- und Hauptlauf hat eine niedrigere Logistikleistung zur Folge aufgrund abnehmender Auslastungsgrade. Aus den Ergebnissen zur Ermittlung logistisch effizienter Bereitstellungsketten lassen sich zusätzlich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Für die Brennstoffbereitstellung an Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} werden vorrangig gegenwärtig etablierte Technologien ausgewählt, die nicht über maximale Durchsatzleistungen verfügen, sondern hohe Auslastungsgrade aufweisen
- Innerhalb der Versorgung von Konversionsanlagen der Größenordnung 200 MW_{BWL} sind effiziente Konzepte durch tendenziell höhere Durchsatzleistungen als auch flexible Strukturen gekennzeichnet.

5.4 Optimierung der Biomassebereitstellung

In diesem Kapitel werden zu Beginn die für die ökonomisch-ökologische Optimierung der Biomassebereitstellung an ausgewählte Bio-SNG-Anlagenstandorte notwendigen Eingangsdaten vorgestellt. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung der relevanten Optimierungsschritte und abschließend die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.

5.4.1 Datengrundlage

Vor dem Hintergrund, dass sich die Optimierung an den Bereitstellungskosten und -emissionen je bereitgestellter Mengeneinheit Brennstoff orientiert, werden nachfolgend die ökonomischen und ökologischen Bewertungskenngrößen beschrieben.

5.4.1.1 Ökonomische Bewertungskenngrößen

Die ökonomische Zielfunktion ist auf die Minimierung der Gesamtbereitstellungskosten frei Anlage ausgerichtet ($\text{€}/t_{\text{atro}}$). Dabei werden die einzelnen Bereitstellungskosten je notwendigen Prozessschritt durch Summierung einbezogen (vgl. Gleichung (4-18)). Hierzu werden die Prozesskosten zur Leistungserbringung je Betriebsstunde erhoben. Die Bereitstellungskosten beinhalten neben den Maschinenkosten, die anfallenden verbrauchsgebundenen Kosten sowie die Kosten für Personal.

5.4.1.2 Ökologische Bewertungskenngrößen

Zur Bestimmung des ökologischen Einflusses auf die integrierten Prozesselemente werden die Treibhausgasemissionen in $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-Äquivalente}}$ je t_{atro} angeben. Diese Kennzahlen werden in Abhängigkeit des spezifischen Kraftstoffverbrauchs und der Durchsatzleistung für die in Frage kommenden Prozessschritte unter Verwendung von Ecoinvent ermittelt [182]. Die Treibhausgasemissionen sind abgeleitet aus dem Kraftstoffverbrauch der betrachteten Prozesselemente.

Entlang der gesamten Bereitstellungskette werden in Tabelle 5-29 bis Tabelle 5-32 die Bereitstellungskosten sowie die Treibhausgasemissionen für die betrachteten Prozessschritte und Technologien dargestellt (sowohl für Waldrest- als auch Kurzumtriebsholz). In Tabelle 5-29

ist eine Übersicht über die ökonomischen und ökologischen Eingangsdaten für den Prozessschritt Ernte und Verfügbarmachung gegeben.

Tabelle 5-29: Eingangsdaten für den Prozessschritt Ernte und Verfügbarmachung [128], [143], [145], [170], [182], [183]

Technologie	Bereitstellungskosten in €/t _{atro}	THG-Emissionen in kgCO ₂ -Äquivalente/t _{atro}
Gehölzfeldhäcksler	7,51	6,90
Gehölzfeldhäcksler mit Bunker	10,02	9,07
Modifizierter Zuckerrohrernter	8,82	7,70
Hackschnitzel-Harvester	31,73	12,06
Mähbündler	10,26	3,90
Harvester	23,68	11,40
Shuttle	19,23	6,24
Landwirtschaftlicher Gliederzug	6,90	7,49
Forwarder	22,25	8,94
Zangenschlepper	11,84	5,06

Die für die Aufbereitung einbezogenen ökonomischen und ökologischen Bewertungskenngrößen sind in Tabelle 5-30 abgebildet.

Tabelle 5-30: Eingangsdaten für den Prozessschritt Aufbereitung [46], [48], [182], [184]

Technologie	Bereitstellungskosten in €/t _{atro}	THG-Emissionen in kgCO ₂ -Äquivalente/t _{atro}
Aufbauhacker	3,59	13,31
Stationärer Großhacker	2,75	28,52

Tabelle 5-31 gibt einen Überblick zu den Bereitstellungskosten und THG-Emissionen der berücksichtigten Technologien für den Umschlag von Stück- und Schüttgut.

Tabelle 5-31: Eingangsdaten für den Prozessschritt Umschlag [182], [185], [186]

Technologie	Bereitstellungskosten in €/t _{atro}	THG-Emissionen in kgCO ₂ -Äquivalente/t _{atro}
Radlader	0,29	0,14
Bagger	0,64	0,25
Reachstacker	1,82	0,30
Portalkran	2,54	0,58
Saugluftförderer	1,67	4,59

Für den Transport mit den Verkehrsmittel Bahn bzw. Binnenschiff werden aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit hier keine Prozesskosten, sondern Preise für die entsprechende Leistungserbringung verwendet (vgl. Tabelle 5-32; erhoben mittels Angebotsinformationen).

Tabelle 5-32: Eingangsdaten für den Prozessschritt Transport [182], [187], [188]

Technologie	Bereitstellungskosten bzw. -preise* in €/((t _{at} km))	THG-Emissionen in kg _{CO2} -Äquivalente/((t _{at} km))
LKW Gliederzug mit Wechselbehälter	0,14	0,14
LKW Gliederzug mit Rungensystem	0,11	0,13
LKW Schubbodenaufleger	0,12	0,14
Bahn Tragwagen	0,24*	0,04
Bahn Schüttgutwagen mit Schwerkraftentladung	0,24*	0,04
Bahn offener Kastenwagen	0,19*	0,04
Trockengüterschiff	0,11*	0,05

5.4.2 Durchführung der Optimierung

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Zielmarken und Ableitung optimaler Bereitstellungskonzepte ist nachfolgend in vereinfachter Form die Optimierung von 2 Bereitstellungskonzepten dargestellt. Mit Hilfe von Detailpunkten (DP) soll eine nachvollziehbare Beschreibung des Aufbaus und der Funktion der Optimierung gewährleistet werden.

5.4.2.1 Bestimmung der Zielmarken

In Abhängigkeit der betrachteten Zielfunktion sind die relevanten Bereitstellungskonzepte (DP 1) und die zugehörigen Prozessparameter, wie beispielsweise Bereitstellungskosten je Prozessschritt (DP 2), in das Modell einzupflegen. Unter Beachtung der zu versorgenden Konversionsanlagengröße sowie der Verteilung der Brennstoffsortimente werden die Untergrenzen der notwendigen Brennstoffmenge festgelegt (DP 3). Im Anschluss daran sind für die dargestellten Bereitstellungsketten die Verluststrukturen zwischen den jeweiligen Prozess-elementen (PE) abzubilden. In diesem Zusammenhang beschreibt DP 4, dass nur 90 % des Prozessinputs durch PE1 bereitgestellt werden (z. B. 10 % Ernteverlust). Zur Sicherstellung des zielgerichteten Materialflusses an die Konversionsanlage, ist eine Verknüpfung zwischen der Outputmenge einer Bereitstellungskette und der Senke herzustellen (DP 5).

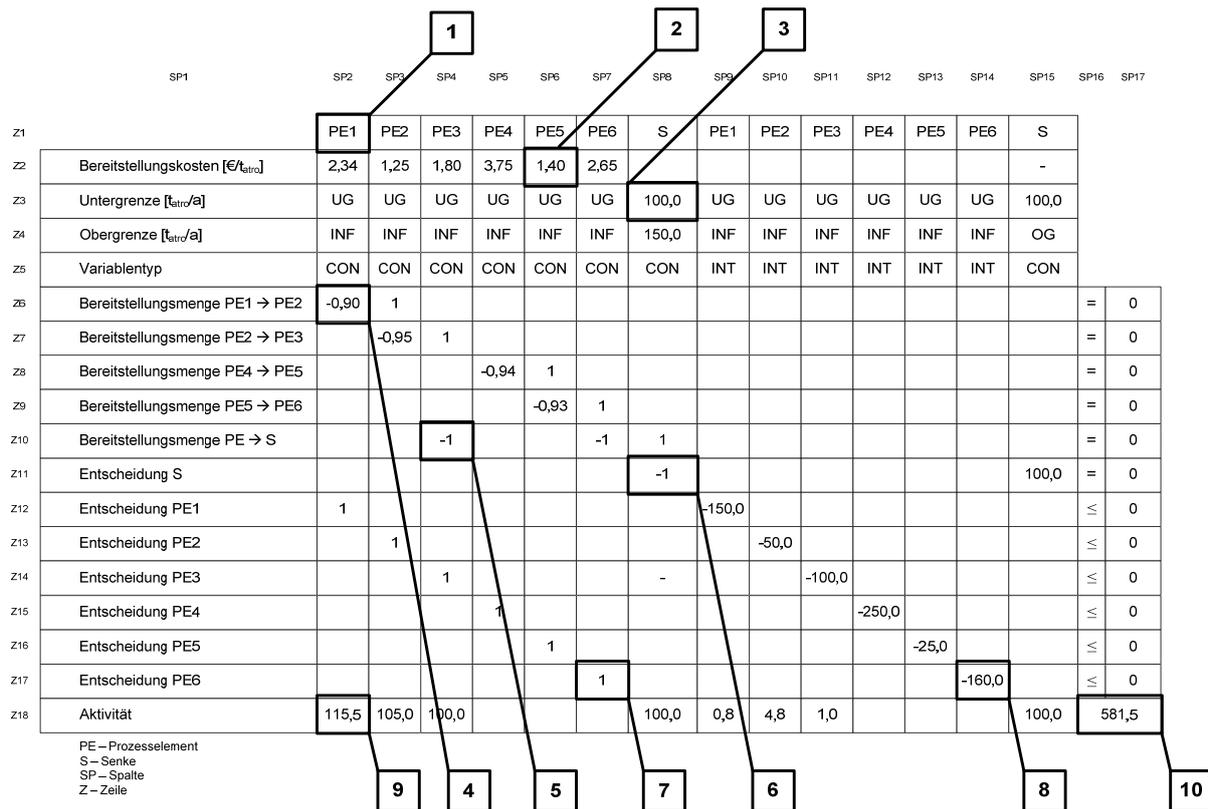


Abb. 5-10: Matrixaufbau für die Optimierung nach ökonomischen Zielkriterien

Die Höhe der bereitzustellenden Brennstoffmenge wird über Z 11 definiert. DP 6 trifft die Festlegung, dass 100 % der Menge bereitgestellt werden. Des Weiteren sind die jährlichen Durchsatzleistungen der betrachteten Prozesselemente respektive Technologien in das Modell einzubeziehen. Hierzu bedarf es der Verknüpfung zwischen der Entscheidungsvariable für ein Prozesselement (DP 7) und der zugehörigen Durchsatzleistung pro Jahr (DP 8). Auf dieser Basis wird die in Kapitel 4.4.4 beschriebene Software angewendet. Als Ergebnis liefert das Tool für die optimale Bereitstellungskette (PE 1 – PE 3) die notwendigen Bereitstellungsmengen der Prozesselemente (DP 9) sowie die Gesamtbereitstellungskosten (DP 10). Analog zur Bestimmung der ökonomischen Zielmarken erfolgt die Bestimmung ökologischer Zielwerte, wohingegen für die Prozessparameter die anfallenden THG-Emissionen integriert werden (DP 2). Dementsprechend werden unter DP 10 die minimalen THG-Emissionen der optimierten Bereitstellungskonzepte ausgegeben.

5.4.2.2 Ableitung optimaler Bereitstellungskonzepte

Die in Abb. 5-11 dargestellte Optimierungsmatrix verdeutlicht, dass das Bereitstellungskonzept (PE 4 - PE 6) unter ökologischen Gesichtspunkten optimal erscheint (DP 11). Zur Bestimmung der ökonomisch-ökologisch optimalen Bereitstellungskette werden die zuvor ermittelten Zielmarken als Restriktion in die Matrix eingebunden. Am Beispiel der Optimierungsmatrix zur Minimierung der THG-Emissionen werden die Bereitstellungskosten der einzelnen Prozesselemente (DP 12) sowie die minimalen Gesamtbereitstellungskosten integriert

(DP 13). Gleichartig erfolgt die Einbindung der ökologischen Restriktion, d. h. der minimalen THG-Emissionen, in die ökonomische Optimierungsmatrix.

	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	SP9	SP10	SP11	SP12	SP13	SP14	SP15	SP16	SP17	
Z1	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	S	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	S				
Z2	THG-Emissionen [kg _{CO2-Aquiv} /t _{tro}]	0,70	8,51	1,63	0,64	7,18	1,57											-
Z3	Untergrenze [t _{tro} /a]	UG	UG	UG	UG	UG	UG	100,0	UG	UG	UG	UG	UG	UG	UG	UG	UG	100,0
Z4	Obergrenze [t _{tro} /a]	INF	INF	INF	INF	INF	INF	150,0	INF	INF	INF	INF	INF	INF	INF	INF	OG	
Z5	Variablentyp	CON	CON	CON	CON	CON	CON	CON	INT	INT	INT	INT	INT	INT	CON			
Z6	Bereitstellungsmenge PE1 → PE2	-0,90	1															= 0
Z7	Bereitstellungsmenge PE2 → PE3		-0,95	1														= 0
Z8	Bereitstellungsmenge PE4 → PE5				-0,94	1												= 0
Z9	Bereitstellungsmenge PE5 → PE6					-0,93	1											= 0
Z10	Bereitstellungsmenge PE → S			-1			-1	1										= 0
Z11	Entscheidung S							-1								100,0		= 0
Z12	Entscheidung PE1	1							-150,0									≤ 0
Z13	Entscheidung PE2		1							-50,0								≤ 0
Z14	Entscheidung PE3			1							-100,0							≤ 0
Z15	Entscheidung PE4				1							-250,0						≤ 0
Z16	Entscheidung PE5					1							-25,0					≤ 0
Z17	Entscheidung PE6						1							-160,0				≤ 0
Z18	Bereitstellungskosten [€/t _{tro}]	2,34	1,25	1,80	3,75	1,40	2,65											≤ 581,5
Z19	Aktivität				113,4	107	100	100,0				0,5	4,3	1,6	100,0			997,84

PE – Prozesselement
S – Senke
SP – Spalte
Z – Zeile

12

11

13

Abb. 5-11: Matrixaufbau für die Optimierung nach ökologischen Zielkriterien

Sofern die Restriktionen in Bezug auf die ökonomischen und ökologischen Kriterien in beiden Optimierungsmatrizen nicht das gleiche Bereitstellungskonzept als optimale Lösung zulassen (wie in dem dargestellten Beispiel), ist die schrittweise Erhöhung der Restriktionen (DP 13) notwendig. Letztendlich ist das Bereitstellungskonzept optimal, welches die geringste Abweichung zwischen der Zielmarke und den angepassten Restriktionen aufweist. In diesem Beispiel stellt das Bereitstellungskonzept (PE 1 – PE 3) die optimale Lösung dar, da die Abweichung von der ökologischen Zielmarke mit 14 % deutlich geringer ausfällt als die Abweichung des Konzeptes (PE 4 – PE 6) von der Zielmarke Bereitstellungskosten mit 44 %. Abschließend wird für die ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskette anhand der berücksichtigten Verlustraten der Materialfluss bilanziert. Dieser Schritt ermöglicht Aussagen zur notwendigen Menge an Biomasse, welche an der Senke verfügbar gemacht werden muss.

5.4.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der ökonomisch-ökologischen Optimierung vorgestellt. Darüber hinaus werden die zugehörigen Verluststrukturen von der Quelle bis zur Senke für die optimalen Bereitstellungsketten abgebildet. Analog zu den vorangegangenen Ausführungen werden die Bereitstellungsketten unter Berücksichtigung der zu versorgenden Anlagengröße optimiert.

5.4.3.1 Leistungsbereich 30 MW_{BWL}

Ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte

Die Ergebnisse zur Optimierung der Brennstoffbereitstellung im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} zeigen, dass für die Bereitstellung über den Verkehrsträger Straße sowohl von Waldrestholz ein Konzept (WI/7) an allen betrachteten Standorten optimal erscheint als auch für Kurzumtriebsholz (KI/3). Gleiches gilt für Bereitstellungskonzepte mit dem Hauptlauf Bahntransport (Konzepte WII/6 und KII/3). Darüber hinaus wird ersichtlich, dass die Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz mit Konzepten ökonomisch-ökologisch optimal erscheint, welche ungebrochene Ernte- bzw. Verfügbarmachungstechnologien integrieren. Dies gilt für die straßen- und schienegebundene Versorgung von Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}. In Abb. 5-12 ist eine Übersicht zu den aus ökonomischer und ökologischer Sicht optimalen Bereitstellungskonzepten gegeben.

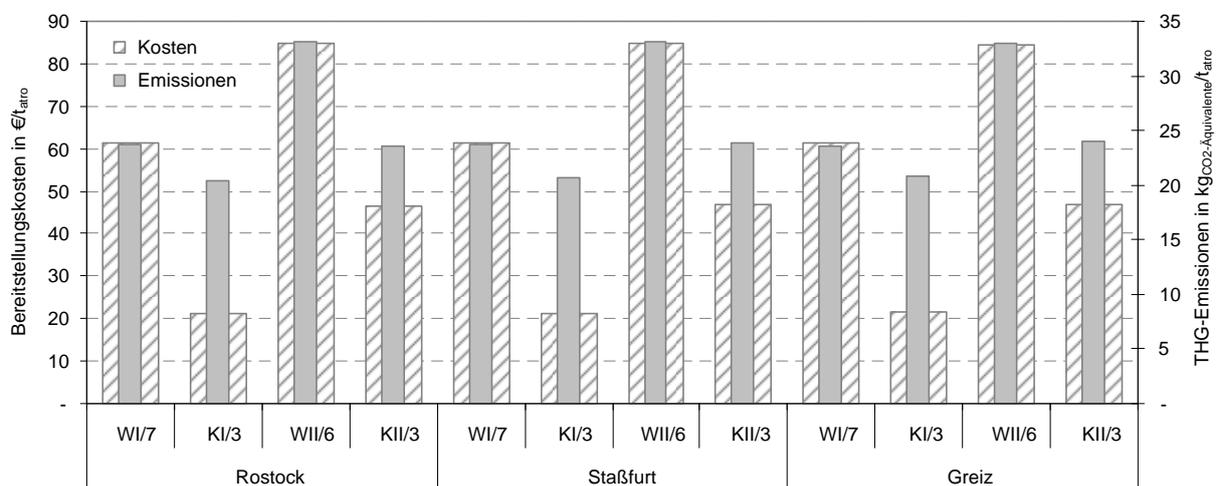


Abb. 5-12: Bereitstellungskosten und THG-Emissionen der optimalen Versorgungskonzepte für Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

Die Bereitstellungskosten von Waldrest- und Kurzumtriebsholz differieren deutlich. Zwischen den einzelnen Standorten liegen jedoch nur marginale Unterschiede vor. Für Waldrestholz fallen Gesamtbereitstellungskosten in Höhe von 61,3 €/t_{atro} (Hauptlauf: Straße) bzw. 84,6 €/t_{atro} (Hauptlauf: Schiene) an. Dagegen ergeben sich für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz Kosten zwischen 21,1 €/t_{atro} (Hauptlauf: Straße) bzw. 46,8 €/t_{atro} (Hauptlauf: Schiene). Die Kosten für den Prozess der Ernte und Verfügbarmachung dominieren hierbei.

Bei der Beurteilung der THG-Emissionen fällt auf, dass Waldrestholz bei der Bereitstellung höhere Emissionen verursacht, sowohl bei Konzepten mit einem Transport über den Verkehrsträger Straße als auch Schiene. Dabei ergeben sich für die Waldrestholzbereitstellung Emissionen zwischen 23,6 (Hauptlauf: Straße) und 33,0 kgCO₂Äquivalente/t_{atro} (Hauptlauf: Schiene) gegenüber der Bereitstellung von Kurzumtriebsholz mit 20,5 (Hauptlauf: Straße) bzw. 23,9 kgCO₂Äquivalente/t_{atro} (Hauptlauf: Schiene). Dies beruht vor allem auf den höheren Emissionen für den Prozess der Ernte und Verfügbarmachung. Detaillierte Angaben zu den Kosten und THG-Emissionen der jeweiligen Prozesselemente befinden sich in Abb. A 5-1 bis

Abb. A 5-4. Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass unter Berücksichtigung einer Brennstofflogistik auf Basis von Waldrestholz der Standort Greiz als viel versprechend einzuordnen ist. Dagegen erscheint der Standort Rostock vorteilhaft unter Voraussetzung einer Kurzumtriebsholzlogistik. In diesem Zusammenhang ist jedoch auf die marginalen Unterschiede zwischen den jeweiligen Standorten hinzuweisen.

Verluststrukturen

Die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Straße an eine Anlage mit einer Brennstoffwärmeleistung von 30 MW ist maßgeblich durch den Ernteprozess charakterisiert, welcher die Verfügbarmachung und die Aufbereitung in einem Prozessschritt integriert. Aus dem systemtechnischen Aufbau der Verfügbarmachung (Fällung des Baumes und direkte Zuführung in ein Häckselaggregat ohne Zwischenablage) ergeben sich Verluste in diesem Prozessschritt von durchschnittlich 6 %. Für die Lagerung der Hackschnitzel über sechs Monate resultieren Verlusten von ca. 7 % Trockenmasse. Die Beladung der Transportmittel erfolgt mit Hilfe von flurgebundenen Umschlagsmitteln, wobei für den Schüttgutumschlag Verluste in Höhe von ungefähr 3 % einhergehen. Daraus leitet sich eine Verlustrate über die gesamte Bereitstellungskette WI/7 von 16 % ab.

Die Ernte von Kurzumtriebsholz mit kontinuierlichen Verfahren verursacht Trockenmasseverluste von 6 %. Bei einer Lagerdauer von sechs Monaten resultieren Lagerungsverluste in einer Größenordnung von 7 %. Analog zu dem vorangegangenen Umschlagsprozess resultieren Verlusten in Höhe von ca. 3 %. Demnach ergeben sich für die Gesamtbereitstellung von Kurzumtriebsholz mit dem Konzept K I/3 Verluste von 18 % (vgl. Tabelle 5-33).

Tabelle 5-33: Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an eine 30 MW_{BWL} Bio-SNG-Anlage

Prozesselemente		Bereitstellungsmenge in t _{atro} /a		Verluste in %	
WI/7	KI/3	WI/7	KI/3	WI/7	KI/3
Hackschnitzel-Harvester	Gehölpfeldhäcksler	58291	59748	6,0	6,0
Shuttle	Landwirtschaftlicher Gliederzug	54991	56366	–	–
			Radlader	56366	
Haldenlager	Haldenlager	54991	54991	7,3	7,3
Radlader	Radlader	51250	51250	2,5	2,5
LKW Gliederzug mit Wechselbehälter	LKW Schubodenaufleger	50000	50000	–	–

Für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen mit einer Leistung von 30 MW_{BWL} resultieren Gesamtverlusten von ungefähr 18 %. Im Rahmen des Ernte- und Verfügbarmachungsprozesses von Waldrestholz mit konti-

nuierlichen Verfahren ergeben sich mittlere Trockenmasseverluste von 6 %. Die Lagerung stellt eine weitere bedeutsame Verlustquelle dar. Bei der Haldenlagerung von Hackschnitzel über sechs Monate ergeben sich Trockenmasseverluste von 7 %.

Die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz via Bahn an eine Bio-SNG-Anlage (30 MW_{BWL}) hat eine ähnliche Verluststruktur wie die Versorgung über die Straße. Zusätzlich ergeben sich für den Umschlag in die Bahn Verluste, welche sich insgesamt auf einen Verlust von 21 % summieren (vgl. Tabelle 5-34).

Tabelle 5-34: Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an eine 30 MW_{BWL} Bio-SNG-Anlage

Prozesselemente		Bereitstellungsmenge in t _{atro} /a		Verluste in %	
WII/6	KII/3	WII/6	KII/3	WII/6	KII/3
Hackschnitzel-Harvester	Gehölzfeldhäcksler	59748	61242	6,0	6,0
Shuttle	Landwirtschaftlicher Gliederzug	56366	57775	–	–
	Radlader		57775		
Haldenlager	Haldenlager	56366	56366	7,3	7,3
Radlader	Radlader	52531	52531	2,5	2,5
LKW Schubbodenaufleger	LKW Schubbodenaufleger	51250	51250	–	–
Radlader	Radlader	51250	51250	2,5	2,5
Bahn offener Kastenwagen	Bahn Schüttgutwagen mit Schwerkraftentladung	50000	50000	–	–
Saugluftförderer		50000		–	

Leistungsbereich 200 MW_{BWL}

Ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte

Für die Biomassebereitstellung an Anlagen mit einer Leistung von 200 MW_{BWL} stellen die in Abb. 5-13 beschriebenen Konzepte die optimale Lösung dar. Für die Kurzumtriebsholzbereitstellung erweist sich Konzept KII/3 (Hauptlauf: Schiene, unter Einbeziehung der Schwerkraftentladung) und KIII/3 (Hauptlauf: Binnenwasserstraße) an allen Standorten als optimal. Beide Konzepte sind durch eine Kombination von Ernte und Aufbereitung innerhalb der Verfügbarmachung gekennzeichnet.

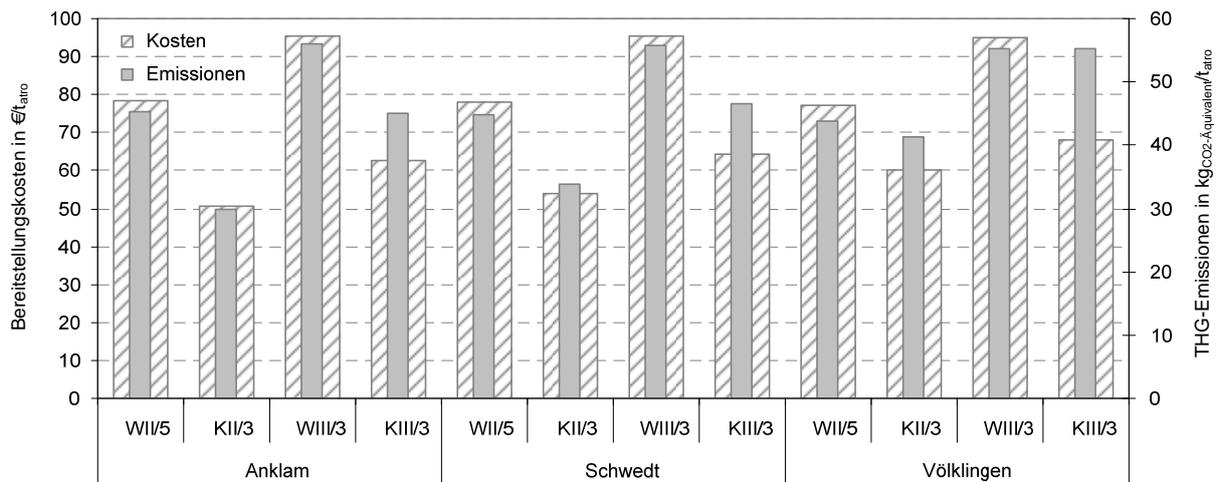


Abb. 5-13: Bereitstellungskosten und THG-Emissionen der optimalen Versorgungskonzepte für Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

Die Bereitstellung von Waldrestholz ist durch eine der Ernte nachgelagerte Aufbereitung charakterisiert. Für den Transport über den Verkehrsträger Schiene stellt sich die Alternative des Bahntransportes mit Schwerkraftentladung als optimal dar (WII/5). Im Gegensatz dazu ist für den Binnenschifftransport die Einbindung von Wechselbehältern vorteilhaft. Dies begründet sich vor allem auf der geringeren Verluststruktur für das Konzept WIII/3.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Bereitstellungskosten als auch die THG-Emissionen für die schienengebundene Waldrestholzbereitstellung (78,1 €/t_{atro}; 44,9 kgCO₂Äquivalente/t_{atro}) höher als für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz sind (53,8 €/t_{atro}; 33,8 kgCO₂Äquivalente/t_{atro}). Darüber hinaus verursacht die Biomasseversorgung über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße höhere Kosten (WRH: 95,4 €/t_{atro}; KUP: 64,5 €/t_{atro}) und THG-Emissionen (WRH: 55,8 kgCO₂Äquivalente/t_{atro}; KUP: 46,5 kgCO₂Äquivalente/t_{atro}) als die schienengebundene Versorgung. Innerhalb der Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene dominieren die Ernte- und Verfügbarmachungskosten (vgl. Abb. A 5-5). Letztere sind am Standort Völklingen am niedrigsten, aufgrund der günstigen infrastrukturellen Voraussetzungen. Im Rahmen der Versorgung über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße dominieren die Transportkosten mit Ausnahme des Standortes Völklingen, aufgrund der vergleichsweise geringen Hauptlaufdistanzen (vgl. Abb. A 5-7).

Die THG-Emissionen der Bereitstellung von Waldrestholz sind am Standort Völklingen am niedrigsten, aufgrund der günstigen infrastrukturellen Bedingungen und der geringeren Hauptlaufdistanzen (vgl. Abb. A 5-6 und Abb. A 5-8). Der Verfügbarmachungsprozess stellt in Bezug auf die gesamten THG-Emissionen die maßgebliche Einflussgröße dar. Grundsätzlich erscheint der Standort Völklingen bei einer waldrestholzbasierten Biomassebereitstellung als aussichtsreichster Standort.

Innerhalb der Bereitstellung von Kurzumtriebsholz nehmen die Transportkosten die dominierende Stellung ein. Deutlich wird der Einfluss des flächenspezifischen Potenzials auf die Transportkosten, welche im Rahmen der Bereitstellung über die Schiene am Standort Anklam

am niedrigsten sind. Am Beispiel der Bereitstellung über die Binnenwasserstraße kompensieren die geringeren Hauptlaufdistancen am Standort Völklingen das niedrigere flächenspezifische Potenzial für Kurzumtriebsholz und resultieren in den niedrigsten Transportkosten. Die Erntekosten von Kurzumtriebsholz stellen die zweitgrößte Position dar.

Die THG-Emissionen, die bei der Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über die Schiene entstehen, werden übergeordnet durch den Prozess der Ernte verursacht. Eine Ausnahme stellt der Standort Völklingen dar, an welchen die Transportemissionen dominieren. Dies ist in dem niedrigen flächenspezifischen Biomassepotenzial begründet. Demgegenüber dominieren innerhalb der Bereitstellung mit dem Binnenschiff die Transportemissionen, wohingegen auch der Anteil der Emissionen für den Umschlag deutlich zunimmt. Letzteres ist auf den stromintensiven Containerumschlag zurückzuführen. Zusammenfassend weist der Standort Anklam die niedrigsten Kosten und Emissionen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz auf, mit Ausnahme der Bereitstellungskosten über die Binnenwasserstraße am Standort Völklingen.

Verluststrukturen

Das optimale Konzept zur Bereitstellung von Waldrestholz über die Schiene greift auf diskontinuierliche Ernteverfahren zurück. Dies resultiert in mittleren Trockenmasseverlusten von 10 %. Durch die Lagerung von Ganzbäumen über sechs Monate ergeben sich Trockenmasseverluste von 5 %. Unter Berücksichtigung der Hack- und Umschlagsverluste, ergeben sich entlang der gesamten Bereitstellungskette Verluste in Höhe von 22 % (vgl. Tabelle 5-35).

Tabelle 5-35: Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an eine 200 MW_{BWL} Bio-SNG-Anlage

Prozesselemente		Bereitstellungsmenge in t _{atro} /a		Verluste in %	
WII/5	KII/3	WII/5	KII/3	WII/5	KII/3
Harvester	Gehölzfeldhächsler	433.209	428692	10,0	6,0
Zangenschlepper	Landwirtschaftlicher Gliederzug	393.827	404426	–	–
	Radlader		404426		2,5
Blocklager	Haldenlager	393.827	394562	5,0	7,3
Aufbauhacker		375.073		2,0	
Radlader	Radlader	367.719	367719	2,5	2,5
LKW Schubbodenaufleger	LKW Schubbodenaufleger	358.750	358750	–	–
Radlader	Radlader	358.750	358750	2,5	2,5
Bahn Schüttgutwagen mit Schwerkraftentladung	Bahn Schüttgutwagen mit Schwerkraftentladung	350000	350000	–	–

Die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über die Schiene an Bio-SNG-Anlagen in einem Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} verursacht mit dem ökonomisch-ökologisch optimalen Konzept Verluste von 21 %.

Für die Versorgung derartiger Anlagen über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße mit Waldrestholz resultieren Gesamtverluste von 17 %. Hohen Einfluss haben die diskontinuierliche Verfügbarmachung sowie die Lagerung der Biomasse. Die ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über die Binnenwasserstraße weist innerhalb der Lagerung der Hackschnitzel Trockenmasseverluste von ungefähr 7 % sowie Ernteverluste in der Höhe von 6 % auf. Die einzelnen Umschlagsverluste summieren sich entlang der Bereitstellungskette auf ca. 8 % (vgl. Tabelle 5-36). Daraus resultiert ein Gesamtverlust von 21 %.

Tabelle 5-36: Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an eine 200 MW_{BWL} Bio-SNG-Anlage

Prozesselemente		Bereitstellungsmenge in t _{atro} /a		Verluste in %	
WIII/3	KIII/3	WIII/3	KIII/3	WIII/3	KIII/3
Harvester	Gehölzfeldhäcksler mit Bunker	412335	428692	10,0	6,0
Zangenschlepper	LKW Gliederzug mit Wechselbehälter	374850	404426	–	–
	Radlader		404426		2,5
Blocklager	Haldenlager	374850	394562	5,0	7,3
	Radlader		367719		2,5
Aufbauhacker		357000		2,0	
LKW Gliederzug mit Wechselbehälter	LKW Schubbodenaufleger	350000	358750	–	–
Portalkran	Radlader	350000	358750	–	2,5
Trockengüterschiff	Trockengüterschiff	350000	350000	–	–
Portalkran	Saugluftförderer	350000	350000	–	–

5.4.4 Fazit

Ausgehend von der Zielstellung, eine methodische Vorgehensweise zur Bestimmung ökonomisch-ökologisch optimaler Bereitstellungskonzepte zu entwickeln, kann festgestellt werden, dass mit der hier entwickelten Methode die Optimierung der Bereitstellungsketten nach den definierten Zielkriterien erfolgreich durchgeführt werden kann.

Mit dieser methodischen Vorgehensweise steht ein Optimierungsansatz zur Verfügung, der neben der singulären Optimierung ebenso die gleichzeitige Betrachtung von ökonomischen und ökologischen Zielsetzungen erlaubt. Aufgrund des Modellaufbaus können Zielsetzungen

anwenderspezifisch variiert werden. Ebenso ist die aufwandsarme Einbeziehung von Nebenbedingungen als auch zu analysierender Bereitstellungskonzepte möglich.

Damit steht eine Methodik zur Verfügung, die innerhalb der Optimierung der Biomassebereitstellung genaue Aussagen zu dem optimalen Bereitstellungskonzept, der notwendigen bereitzustellenden Brennstoffmenge (inklusive der zugehörigen Verlusten) und der ökonomischen und ökologischen Ausprägung liefert.

Auf Basis der hier durchgeführten Optimierung lassen sich anhand der Ergebnisse folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- die Bereitstellungskonzepte zur Versorgung einer Konversionsanlagengröße weisen verhältnismäßig geringe Variationen zwischen den Standorten auf,
- maßgeblichen Einfluss auf die ökonomische und ökologische Ausprägung eines Bereitstellungskonzeptes haben die Verfahrensschritte Transport sowie Ernte- bzw. Verfügbarmachung,
- die Versorgung von Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} ist aus ökonomisch-ökologischer Sicht optimal mit ungebrochenen Ernteverfahren, während die optimale Bereitstellung an Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} für Waldrestholz mit diskontinuierlichen und für Kurzumtriebsholz mit kombinierten Verfahren der Ernte bzw. Verfügbarmachung erfolgt
- grundsätzlich ergeben sich im Rahmen der Bereitstellung von Kurzumtriebsholz deutlich niedrigere Bereitstellungskosten sowie Treibhausgasemissionen als für Waldrestholz,
- die Bereitstellung über die Straße wird sowohl in Bezug auf die Kosten als auch Emissionen durch den Prozessschritt Ernte und Verfügbarmachung dominiert
- die Bereitstellung über die Schiene wird übergeordnet von den Prozessschritten Ernte und Verfügbarmachung sowie dem Transport bezüglich der ökonomischen und ökologischen Ausprägung beeinflusst,
- die bei der Bereitstellung über die Binnenwasserstraße anfallenden Kosten und Emissionen werden durch die Transportprozesse des Vor- und Hauptlaufes dominiert.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Ziel in dieser Arbeit war es, eine methodische Vorgehensweise zu entwickeln, die es erlaubt zum Einen günstige Standorte für Biomassekonversionsanlagen zu identifizieren und zum Anderen für diese Standorte logistisch effiziente Biomassebereitstellungsketten zu ermitteln sowie anhand dieser die aus ökonomischer und ökologischer Sicht optimalen Versorgungskonzepte abzuleiten. Der methodische Gesamtansatz untergliedert sich in (i) die Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen, (ii) die Planung des Materialflusses und (iii) die anschließende Optimierung der Biomassebereitstellung.

Zur Identifikation von Konversionsanlagenstandorten werden eingangs Standortfaktoren in Abhängigkeit der betrachteten Biomassesortimente und Konversionsanlagentechnologie ermittelt. Im Anschluss wird ein Standortanforderungsprofil erstellt, unter Berücksichtigung der innerhalb der Standortfaktoren gewählten Zielgrößen. Mit Hilfe der Nutzwertanalyse werden vorteilhafte Regionen anhand der festgelegten Standortkriterien bzw. -anforderungen abgeleitet. Darauf aufbauend erfolgt die Ermittlung optimaler Konversionsanlagenstandorte basierend auf der Einordnung von Standortalternativen in Bezug auf die Verfügbarkeit infrastruktureller Voraussetzungen.

Im Rahmen der Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung werden zunächst logistische Konzepte identifiziert und ausgewählt, die unter Berücksichtigung der Brennstoffnachfrage der Konversionsanlage in Frage kommen. In Abhängigkeit der regionalen Voraussetzungen und der Konversionsanlagentechnologie sowie -größe werden die räumlichen, zeitlichen und technischen Randbedingungen festgelegt. Darauf aufbauend erfolgen die Dimensionierung der Bereitstellungskette sowie die Berechnung logistischer Kennzahlen in Bezug auf Logistikleistung und -kosten. Auf Basis der ermittelten Logistikkennzahlen werden die betrachteten Bereitstellungskonzepte nach ihrer logistischen Effizienz eingeordnet.

Innerhalb der Optimierung der Biomassebereitstellung werden nach der Festlegung der Zielkriterien und Nebenbedingungen die ökonomischen und ökologischen Kenngrößen für die zu betrachtenden logistisch effizienten Bereitstellungskonzepte für jedes Prozesselement erhoben. Da die Zielgrößen u. a. keine gemeinsame Skalierbarkeit besitzen erfolgt die Bestimmung der Lösung nach dem Pareto-Optimum. Zur Lösungsfindung werden Zielmarken in Abhängigkeit der betrachteten Zielkriterien ermittelt.

Es kann festgestellt werden, dass die neu entwickelte Methodik der Standortidentifikation von Biomassekonversionsanlagen und der anschließenden Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung einen ganzheitlichen Ansatz innerhalb der Planung von Biomassekonversionsanlagen verfolgt. Dieser Sachverhalt stellt gegenüber den bisher diskutierten Vorgehensweisen zur Planung von Standort und Logistik von Biomassekonversionsanlagen ein Alleinstellungsmerkmal dar. Durch die Einbeziehung der Voraussetzungen am Ort des Biomasseanfalls und der Anforderungen der Nachfrageseite ist eine genauere und damit bessere Identifikation von Konversionsanlagenstandorten möglich. Aufgrund der Berücksichtigung zeitlicher, technischer und räumlicher Kriterien an der Quelle, innerhalb der Bereitstellungskette

und an der Senke während der Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung, ist es möglich integriert die logistische Effizienz zu bestimmen. Die entwickelte Vorgehensweise der ökonomisch-ökologischen Optimierung der Biomassebereitstellung stellt eine aussichtreiche Möglichkeit der Lösungsfindung dar. In diesem Zusammenhang kann ein signifikanter Beitrag zu einer verbesserten und effizienteren Ressourcennutzung geleistet werden.

Aufgrund der integrierten Herangehensweise zwischen den einzelnen Planungsschritten kann eine transparente Planung der Biomassebereitstellung gewährleistet werden. Darüber hinaus erlaubt die Berücksichtigung und Verknüpfung unterschiedlicher Zielgrößen innerhalb der Planungsschritte eine realitätsnahe Abbildung des betrachteten Sachverhaltes der Biomassebereitstellungsplanung gegenüber der bisherigen Beurteilung anhand singulärer Kriterien.

Die modulare Struktur der methodischen Vorgehensweise ermöglicht es dem Anwender den Identifikations- und Planungssachverhalt in Abhängigkeit der Detailtiefe und der Datenverfügbarkeit anzupassen. Des Weiteren können die zur Verfügung stehenden Handlungsalternativen für die Planung (u. a. räumliche, zeitliche und technische Variablen) angepasst werden, womit die standortspezifische Darstellung und in diesem Zusammenhang das Erreichen des angestrebten Zustands möglich ist. Darüber hinaus besteht für den Planer mit dieser Methodik die Möglichkeit, die Zielsetzungen der einzelnen Planungshorizonte der Biomassebereitstellung individuell und damit regions- bzw. standortbezogen zu definieren. Demnach können mit diesem methodischen Ansatz jeweils nachvollziehbare Handlungsergebnisse bereitgestellt werden, unter Berücksichtigung der Ausgangssituation (u. a. regionale und lokale Randbedingungen, Angebots- und Nachfragestruktur, Bereitstellungskonzepte) sowie der definierten Zielvorgaben.

In Anlehnung an die in Kapitel 1.2 formulierten Schlüsselfragen gliedert sich nachfolgend die zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Untersuchungsergebnisse.

Wie ist eine zielorientierte Vorgehensweise zur Identifikation von Standorten für Polygeneration-Anlagen aufzubauen, die sowohl biomasseaufkommenseitige Voraussetzungen als auch Anforderungen der Nachfrageseite berücksichtigt?

Die hier entwickelte und angewendete methodische Vorgehensweise zur Identifikation von Standorten für Polygeneration-Anlagen besteht aus einer zweistufigen Beurteilungsstruktur. Dabei erfolgt eine objektive und nachvollziehbare Bestimmung vorteilhafter Regionen auf Landkreisebene mit Hilfe der Nutzwertanalyse und anschließend die Ableitung vorteilhafter Standorte, welche für die Etablierung sowie den nachfolgenden Betrieb von Biomassekonversionsanlagen aussichtsreich erscheinen.

Der methodische Ansatz betrachtet sowohl aufkommenseitige Voraussetzungen (z. B. flächenspezifisches Biomassepotenzial) als auch nachfrageseitige Anforderungen (z. B. Brennstoffbedarf; Infrastruktur zur Distribution der bereitgestellten Nutz- und Endenergie) und ermöglicht damit eine integrierte Standortidentifikation. Eine Anpassung der Vorgehensweise an das jeweils vorliegende Standortproblem bzw. an die definierte Aufgabe der Standortiden-

tifikation ist durch (i) die Auswahl der Standortfaktoren mit der entsprechenden Betrachtungsebene, (ii) die Einbeziehung anwenderspezifischer Standortkriterien (z. B. Biomassefraktionen; infrastrukturelle Forderungen) und (iii) die Gewichtung der Kriterien eines Standortes möglich.

Wie ist die Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung zu gestalten, so dass eine Messung der logistischen Effizienz (d. h. der Logistikleistung und -kosten) der betrachteten Brennstoffbereitstellungskonzepte möglich ist?

Zur Systemplanung der Biomassebereitstellung bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung der Brennstoffbereitstellung vom Ort des Biomasseanfalls an die Konversionsanlage, wobei zur Gewährleistung einer standortspezifischen Anwendung eine Variation der technischen, räumlichen als auch zeitlichen Randbedingungen notwendig ist.

Die hierfür entwickelte Methodik ermöglicht aufgrund der Unterteilung der Modellstruktur in die Bereiche Quelle, Bereitstellungskette und Senke die Einbeziehung standortspezifischer Gegebenheiten. Durch die Dimensionierung des Materialflusses mittels eines in dieser Arbeit entwickelten Erklärungsmodells wird eine transparente Datengrundlage bereitgestellt, die Aussagen über die Struktur und die Komplexität der betrachteten Bereitstellungskonzepte erlaubt. Auf Basis der Dimensionierung ist eine einfache Beurteilung bzw. Messbarmachung der logistischen Effizienz der untersuchten Konzepte anhand von Kennzahlen der Logistikleistung und -kosten möglich.

Wie ist die Biomassebereitstellung zu optimieren, damit eine gleichzeitige Beurteilung der Bereitstellungskonzepte für Biomasse anhand ökonomischer und ökologischer Zielkriterien erfolgen kann?

Bei der entwickelten methodischen Vorgehensweise zur Optimierung der Biomassebereitstellung kommt ein gemischt ganzzahliger linearer Optimierungsansatz zur Anwendung, der die gleichzeitige Betrachtung der Zielsetzungen auf Basis der lexikographischen Herangehensweise erlaubt. Der Modellaufbau ermöglicht die individuelle Variation der Zielsetzungen, Nebenbedingungen und zu analysierenden Bereitstellungskonzepte. Das Optimierungsmodell benötigt für die Lösungsfindung in Abhängigkeit der definierten Zielsetzungen spezifische Bewertungskenngrößen je integrierter Prozesstechnologie und den zugehörigen Verluststrukturen. Darüber hinaus werden mit Hilfe der Nebenbedingungen Aspekte wie u. a. der jährliche Brennstoffbedarf definiert.

Somit ist eine methodische Vorgehensweise gegeben, die innerhalb der Optimierung der Biomassebereitstellung genaue Aussagen zu dem optimalen Bereitstellungskonzept, der bereitzustellenden Brennstoffmenge und der ökonomischen und ökologischen Ausprägung der betrachteten Bereitstellungskonzepte gibt.

Anhand eines Beispiels, bei welchem die Identifikation von Standorten für die Produktion von Bio-SNG in Deutschland und der anschließenden Planung der Brennstoffbereitstellung an

entsprechende Anlagen im Mittelpunkt der Betrachtung stand, wurde der in dieser Arbeit entwickelte methodische Ansatz erfolgreich implementiert und bestätigt. Als Grundlage für die Anwendung der Methodik wurden Referenzanlagen zur Produktion von Bio-SNG definiert. Die Anlagengrößen haben eine Brennstoffwärmeleistung von 30 und 200 MW. Als bereitzustellende Rohstoffe wurden die Biomassen Waldrest- und Kurzumtriebsholz unterstellt.

Zu Beginn der Standortidentifikation wurden die regionalen und lokalen Standortfaktoren festgelegt. Daneben wurde ein Standortanforderungsprofil erstellt, welches die Forderungen der definierten Anlagengrößen auf regionaler und lokaler Ebene spiegelt. Darauf aufbauend erfolgte die Klassifizierung der Landkreise in Bezug auf die Erfüllung der relevanten Anforderungen an das flächenspezifische Biomassepotenzial, die Betriebsgrößenstruktur in Land- und Forstwirtschaft sowie die Verfügbarkeit notwendiger Verkehrsnetze für die Biomassebereitstellung. Die lokale Einordnung wurde unter Einbeziehung von Anforderungen an die Infrastruktur der Biomassebereitstellung und der Distribution von Nutz- und Endenergie durchgeführt.

Bei der Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung an Anlagen zur Produktion von Bio-SNG wurden Bereitstellungsverfahren für Waldrest- und Kurzumtriebsholz identifiziert und etablierte sowie aussichtsreiche Konzepte für die Beurteilung ausgewählt. Ausgehend von den identifizierten Standorten für Bio-SNG-Produktionsanlagen wurden die Randbedingungen der Brennstoffbereitstellung am Ort des Biomasseanfalls, entlang der Bereitstellungskette sowie an der Konversionsanlage in Bezug auf technische, zeitliche und räumliche Kriterien festgelegt. In Abhängigkeit der analysierten Bereitstellungskonzepte erfolgte daraufhin die Bestimmung der notwendigen Arbeitsmittellanzahl. Anhand dieser Dimensionierung konnten die Logistikkosten der einzelnen Technologien sowie die Logistikleistung mit Hilfe der Kennzahlen technische Verfügbarkeit, Durchlaufzeit und Auslastung bestimmt werden. Die Effizienz der Bereitstellungsketten wurde aus der berechneten Logistikleistung und den relevanten Kosten abgeleitet.

Innerhalb der Optimierung der Biomassebereitstellung wurden die zuvor ermittelten logistisch effizienten Bereitstellungskonzepte für Waldrest- und Kurzumtriebsholz mit der Zielsetzung Minimierung der Bereitstellungskosten und THG-Emissionen optimiert. Hierzu wurden die notwendigen ökonomischen und ökologischen Eingangsdaten erhoben. Darauf aufbauend wurden mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen Optimierungstools die Zielmarken für die analysierten Bereitstellungskonzepte ermittelt. Die Ableitung der optimalen Bereitstellungskette, d. h. des ökonomisch-ökologisch optimalen und logistisch effizienten Bereitstellungskonzeptes für Waldrest- bzw. Kurzumtriebsholz an einem definierten Standort, erfolgte nach dem pareto-optimalen Lösungsansatz.

Die Ergebnisse zeigen, dass in einem Leistungsbereich von $30 \text{ MW}_{\text{BWL}}$ unter Berücksichtigung einer Brennstoffbereitstellung auf Basis von Kurzumtriebsholz der Standort Rostock/Mecklenburg Vorpommern als viel versprechend einzuordnen ist. Demgegenüber erscheint der Standort Greiz/Thüringen vorteilhaft unter der Voraussetzung einer Waldrestholz-logistik. Sowohl bei der Bereitstellung von Waldrest- als auch Kurzumtriebsholz über den

Verkehrsträger Straße erfolgt bei ökonomisch-ökologisch optimalen Konzepten die Ernte bzw. Verfügbarmachung mit ungebrochenen Verfahren. Die schienengebundene Bereitstellung an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} erscheint mit Konzepten vorteilhaft, welche ungebrochene Ernte- und Verfügbarmachungsverfahren einbeziehen und einen schnellen Umschlag vom Hauptlauftransportmittel ermöglichen (u. a. Schwerkraftentladung).

Für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen mit einer Brennstoffwärmeleistung von 200 MW stellt sich der Standort Anklam/Mecklenburg Vorpommern als aussichtsreich dar, wohingegen tendenziell der Standort Völklingen/Saarland für die Versorgung einer potenziellen Anlage mit Waldrestholz in Frage kommt. Die ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellung über die Schiene an entsprechende Konversionsanlagen ist durch den Transport von losem Schüttgut innerhalb des Hauptlaufes charakterisiert. Dagegen verfügen optimale Konzepte, die den Hauptlauf über Binnenwasserstraßen organisieren, sowohl über gebrochene als auch ungebrochene Verfahren bei der Ernte bzw. der Verfügbarmachung als auch über den Transport von losem Schüttgut sowie Wechselbehältern im Rahmen des Hauptlaufes.

Die Struktur der Methodik und der modulare Aufbau der einzelnen Planungsmodelle lassen eine grundsätzliche Anpassung an die standortspezifischen Bedingungen sowie eine Erweiterung zu. Einzelne Bestandteile (z. B. Standortkriterien in der Standortidentifikation; zeitliche, technische und räumliche Rahmenbedingungen innerhalb der Planung oder Prozesselemente in der Optimierung) können einfach ausgetauscht, verändert sowie hinzugefügt werden.

Anhand der entwickelten methodischen Vorgehensweise konnten ebenso Inhalte identifiziert werden, welchen weiteren Forschungsbedarf verlangen. Im Rahmen der Standortidentifikation und Planung des Materialflusses haben sich Ansatzpunkte für eine detaillierte Einbindung von infrastrukturellen Voraussetzungen sowie Angaben zur Rohstoffverfügbarkeit ergeben. In diesem Zusammenhang besteht die Notwendigkeit entsprechende Daten mit Hilfe von räumlichen Informationssystemen genauer aufzubereiten und zu integrieren. Innerhalb der ökonomisch-ökologischen Optimierung hat sich gezeigt, dass in einem nächsten Schritt die Annäherung an die optimale Lösung bspw. durch die Einführung eines Algorithmus vereinfacht werden kann.

Die eingangs formulierten Schlüsselfragen konnten hier beantwortet und das definierte Hauptziel der Arbeit, die Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Identifikation von Anlagenstandorten zur Polygeneration sowie der anschließenden Planung des Materialflusses und Optimierung der Biomassebereitstellung, erreicht werden.

Literatur- und Referenzverzeichnis

- [1] Kaltschmitt, M.: Biomass for energy - the need of efficiency; Bioraffinerie 2021 - Bioraffinerie der Zukunft, Berlin, 2009
- [2] Vogel, A.: Dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen; Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig, 2007
- [3] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer, Berlin, 2001
- [4] Eltrop, L. u. a.: Leitfaden Bioenergie: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2005
- [5] Hamelinck, C.N. u. a.: Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential; Energy, Bd. 29, 2004
- [6] Schulz, T.F. u. a.: Assessing wood-based synthetic natural gas technologies using the SWISS-MARKAL model; Energy, 2006
- [7] Institut für Verfahrenstechnik, TU Wien: Energiezentrale zur Umwandlung von biogenen Roh- und Reststoffen einer Region in Wärme, Strom, BioSNG und flüssige Kraftstoffe; Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Wien, 2005
- [8] Seiffert, M.; Müller-Langer, F.; Kaltschmitt, M.: Demonstration of the production and utilization of synthetic natural gas (SNG) from solid biofuels – presentation of the European project "BIO-SNG"; 16th European Biomass Conference & Exhibition, Valencia, 2008
- [9] Thrän, D. u. a.: Sustainable strategies for biomass use in the European context; Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig, 2006
- [10] Fuchs, M.; Rauch, R.; Hofbauer, H.: Final report on systematic studies of steam gasification in pilot plant; Deliverable des EU Projektes "Demonstration of the Production and Utilization of Synthetic Natural Gas (SNG) from Solid Biofuels", European Commission 6th framework programme, Wien, 2008
- [11] Becher, S.: Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe: Energie- und Emissionsbilanzen; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 1998
- [12] Junginger, M. u. a.: Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden; Biomass and Bioenergy, Bd. 29, 2005
- [13] Werner, A.; Vetter, A.; Reinhold, G.: Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Energieholz; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, 2006
- [14] Fuchs, M.; Rauch, R.; Hofbauer, H.: Interim report on systematic studies of steam gasification in pilot plant; Deliverable des EU Projektes "Demonstration of the Production and Utilization of Synthetic Natural Gas (SNG) from Solid Biofuels", Technische Universität Wien, Wien, 2007
- [15] Stucki, S.; Biollaz, S.: Basic process design as input for WP3; Deliverable des EU Projektes "Demonstration of the Production and Utilization of Synthetic Natural Gas (SNG) from Solid Biofuels", Paul Scherrer Institut, Villigen, 2006
- [16] Michaelis, P.: Betriebliches Umweltmanagement; NWB Verlag, 1999
- [17] de Mol, R. u. a.: Simulation and optimization of the logistics of biomass fuel collection; Netherland Journal of Agricultural Science, 1997
- [18] Johansson, J. u. a.: Transport and handling of forest energy bundles--advantages and problems; Biomass and Bioenergy, Bd. 30, 2006
- [19] Forsberg, M. u. a.: Agricultural supply of biomass fuels to large-scale cogeneration plants – a case study of the Värtan power plant.; 16th European biomass conference,

- Valencia, 2008
- [20] Wehberg, G.: Ökologieorientiertes Logistikmanagement. Ein evolutionstheoretischer Ansatz; Deutscher Universitäts-Verlag, 1998
- [21] Schulte, C.: Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain; Vahlen Franz GmbH, 2004
- [22] Buscher, U.: Kostenorientiertes Logistikmanagement in Metalogistiksystemen; Gabler, 2003
- [23] Arnold, D. u. a.: Handbuch Logistik; Springer, Berlin, 2008
- [24] Jünemann, R. u. a.: Materialfluß und Logistik. Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen; Springer-Verlag GmbH, 1989
- [25] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik: VDI 4400: Logistikkennzahlen für die Beschaffung; Beuth Verlag, 2001
- [26] Grossmann, V.G.; Krampe, H.; Ziems, D.: Technologie fuer Transport, Umschlag und Lagerung im Betrieb; VEB Verlag Technik, Berlin, 1989
- [27] Löhr, K.; Melchiorre, M.; Kettemann, B.: Aufbereitungstechnik. Recycling von Produktionsabfällen und Altprodukten; Hanser Fachbuchverlag, 1995
- [28] Vereinigung, A.E.: Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung; Ernst & Sohn, 2001
- [29] Frick, S.; Müller-Langer, F.; Thrän, D.: Bereitstellung biogener Festbrennstoffe zur Strom- und Kraftstofferzeugung - Bewertung unterschiedlicher Logistikansätze; Abschlussbericht FKZ 22009904, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig, 2005
- [30] Brummack, J.: Fremdenergiefreie Hackschnitzeltrocknung; Experten Workshop zur Lagerung von Holzhackschnitzeln, Potsdam-Bornim, 2008
- [31] Krampe, H.: Transport - Umschlag - Lagerung; Fachbuchverlag Leipzig, 1989
- [32] DIN 30781-1: Transportkette; Grundbegriffe; Beuth Verlag, 2005
- [33] Gudehus, T.: Logistik . Grundlagen - Strategien - Anwendungen; Springer, Berlin, 2005
- [34] Hompel, M.T.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik; Springer, Berlin, 2007
- [35] Heide, J.V.D.: Der Forstwirt; Ulmer (Eugen), 2004
- [36] Erler, J.: Forsttechnik. Verfahrensbewertung; UTB, Stuttgart, 2000
- [37] Alakangas, E.; Valtanen, J.; Levlin, J.: CEN technical specification for solid biofuels-- Fuel specification and classes; Biomass and Bioenergy, Bd. 30, 2006
- [38] Knoef, H.: Handbook biomass gasification; BTG Biomass. Technology Group, Enschede, 2005
- [39] Kuhn, A.; Bernemann, S.: Prozessketten in der Logistik: Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien; Praxiswissen, 1995
- [40] Cremer, T.; Becker, G.; Sauter, H.: Mobilisierung und wirtschaftliche Nutzung von Rohholz aus Wald und Landschaft zur Energieerzeugung; Abschlussbericht, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Freiburg, 2007
- [41] Kühmaier, M. u. a.: Wertschöpfungskette Waldhackgut - Optimierung von Ernte, Transport und Logistik; Projektstudie, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2007
- [42] Silvatec: Fäll/Sammler-Aggregat für Bioenergieholz; Produktinformation, Farso, 2006
- [43] Wittkopf, S.: Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern; Technische Universität München, 2004
- [44] Affenzeller, G.; Stampfer, K.: Energieholzbereitstellung mit Traktor und Krananhänger mit Fallbeilklingenaggregat; Fallstudie, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2007
- [45] Kuratorium für Wald und Forsttechnik e.V.: Kranvollernter Logset 8H TITAN mit Vollernteaggregat Logset 7 L; Prüfbericht, Kuratorium für Wald und Forsttechnik e.V., Groß-Umstadt, 2008

- [46] Forbig, A.: Holzernteverfahren - Vergleichende Erhebungen und Beurteilung; Kuratorium für Wald und Forsttechnik e.V., Groß-Umstadt, 2004
- [47] Scholz, V.; Lorbacher, R.F.; Spikermann, H.: Stand der Pflanz- und Erntetechnik für Kurzumtriebsplantagen.; 1. Fachtagung Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen, Tharandt, 2006
- [48] Pröll, W. u. a.: Forstmaschinen; Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Wien, 2003
- [49] Morat, J.; Forbig, A.; Graupner, J.: Holzernteverfahren: Vergleichende Erhebung und Beurteilung der Holzernteverfahren in der Bundesrepublik Deutschland; Kuratorium f. Waldarbeit u. Forsttechnik, 2001
- [50] Burger, F.; Sommer, W.: Erntetechnik für Energiewälder; Forst & Technik, 2005
- [51] Burger, F.; Scholz, V.: Stand der Technik bei der Ernte von Energiewäldern; Holz-Zentralblatt, 2004
- [52] Golser, M.; Pichler, W.; Hader, F.: Energieholztrocknung; Endbericht, Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier, Wien, 2005
- [53] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik; Vieweg+Teubner, 2006
- [54] Rinschede, A.; Wehking, K.: Entsorgungslogistik, in 3 Bdn., Bd.1, Grundlagen, Stand der Technik; Schmidt (Erich), Berlin, 1998
- [55] Kast, W.: Möglichkeiten der Energieeinsparung beim Trocknen; VDI Bericht, Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1981
- [56] Kröll, K.: Trockner und Trocknungsverfahren.; Springer, Berlin, 1978
- [57] Thuneke, K. u. a.: Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2007
- [58] Pampel, W.: Technik der Holzernte und Holzaufbereitung; Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 1987
- [59] Kanzian, C.: Bereitstellung von Waldhackgut Verfahren Energieholzbündel im Gebirge; Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2005
- [60] Lake, C.; Hacke, E.: Neue Siebtechnik für Ersatzbrennstoffe - Erfahrungsbericht mit Kontrollsieben in Kraftwerken; in: Energie aus Abfall, TK Verlag, Neu-Ruppin, 2008
- [61] Buchholz, J.; Clausen, U.; Vastag, A.: Handbuch der Verkehrslogistik; Springer, Berlin, 1998
- [62] Berndt, T.: Eisenbahngüterverkehr; Teubner Verlag, 2001
- [63] Schiffstypen; Technische Informationen, viaDonau - Donauschiffahrt, 2008, (http://www.donauschiffahrt.info/daten_fakten/schiffe/schiffstypen/trockengueterschiffe/)
- [64] Güterwagen der Bahn; Technische Informationen, DB Schenker, 2008, (<http://www.stinnes-freight-logistics.de/gueterwagenkatalog/>)
- [65] Dolezalek, C.M.; Warnecke, H.; Dangelmaier, W.: Planung von Fabrikanlagen; Springer, Berlin, 1981
- [66] Domschke, W.; Drexl, A.: Logistik, Bd.3, Standorte; Oldenbourg, 1996
- [67] Hansen, U.: Minimierung des Transportrisikos bei der Standortplanung in der Sonderabfallwirtschaft; Praxiswissen, 1998
- [68] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung; Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 2001
- [69] Arbeitsgemeinschaft Industriebau e.V.: Grundlagen der Standortentwicklung im Industriebau - Ein Leitfaden für Architekten, Ingenieure und Unternehmen.; Callwey Verlag, München, 2004
- [70] Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management. Betriebshütte: 2 Bde.; Springer, Berlin, 1996
- [71] Wiendahl, H.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Mit CD; Hanser Fachbuch, 2009

- [72] Aggteleky, B.: Fabrikplanung I/ III: 3 Bände; Hanser Fachbuch, 1998
- [73] Hansmann, K.: Entscheidungsmodelle zur Standortplanung der Industrieunternehmen; Gabler, Betriebswirt.-Vlg, Wiesbaden, 1974
- [74] Breiing, A.; Knosala, R.: Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen; Springer, Berlin, 2007
- [75] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik: VDI 2498: Vorgehen bei der Materialflussplanung; VDI Verlag, 2008
- [76] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik: VDI 2689: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen; Beuth Verlag, 1974
- [77] Reinhardt, A.: Simulationswerkzeuge in Unternehmen; Tagungsbandbeitrag, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, München, 1992
- [78] Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.: Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik; Vieweg+Teubner, 1993
- [79] Adam, D.: Planung und Entscheidung. Modelle - Ziele - Methoden. Mit Fallstudien und Lösungen: Modelle - Ziele - Methoden; Gabler Verlag, 1996
- [80] Rieper, B.: Betriebswirtschaftliche Entscheidungsmodelle. Grundlagen; NWB Verlag, 1998
- [81] Pfohl, H.; Stölzle, W.: Planung und Kontrolle. Konzeption, Gestaltung, Implementierung; Vahlen, 1997
- [82] Pati, R.K.; Vrat, P.; Kumar, P.: A goal programming model for paper recycling system; Omega, Bd. 36, 2008
- [83] Quariguasi Frota Neto, J. u. a.: A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks; European Journal of Operational Research, Bd. 193, 2009
- [84] Pfohl, H.: Ökologische Herausforderungen an die Logistik in den 90er Jahren. Umweltschutz in der Logistikkette bei Ver- und Entsorgung; Schmidt (Erich), Berlin, 1993
- [85] Grünert, T.; Irnich, S.: Optimierung im Transport 1: Grundlagen; Shaker, 2005
- [86] Kallrath, J.: Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modelle und Anwendungen: Mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Metallgewerbe, Produktion und Logistik; Vieweg+Teubner, 2002
- [87] Beuermann, G.; Ellinger, T.; Leisten, R.: Operations Research: Eine Einführung; Springer, Berlin, 2003
- [88] Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research; Springer, Berlin, 2007
- [89] Domschke, W.; Scholl, A.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht; Springer, Berlin, 2005
- [90] Lück, W.: Lexikon der Betriebswirtschaft; Oldenbourg, 2003
- [91] Köhler, R.; Küpper, H.; Pfungsten, A.: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft (HWB) 1; Schäffer-Poeschel, 2007
- [92] Hillier, F.S.; Lieberman, G.J.: Introduction to Operations Research; Mcgraw-Hill Higher Education, 2004
- [93] Schwarze, J.: Mathematik für Wirtschaftswissenschaftler, Elementare Grundlagen für Studienanfänger; NWB Verlag, 2003
- [94] Hillier, F.S.; Liebermann, G.J.: Operations Research: Einführung; Oldenbourg, 2002
- [95] Suhl, L.; Mellouli, T.: Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen; Springer, Berlin, 2005
- [96] Homburg, C.: Quantitative Betriebswirtschaftslehre: Entscheidungsunterstützung durch Modelle. Mit Beispielen, Übungsaufgaben und Lösungen; Dr. Th. Gabler Verlag, 2000
- [97] Shi, X. u. a.: Using spatial information technologies to select sites for biomass power plants: A case study in Guangdong Province, China; Biomass and Bioenergy, Bd. 32, 2008
- [98] Kappler, G.O.: Systemanalytische Untersuchung zum Aufkommen und zur Bereitstellung von energetisch nutzbarem Reststroh und Waldrestholz in Baden-Württemberg –

- eine auf das Karlsruher bioliq®-Konzept ausgerichtete Standortanalyse –; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2007
- [99] Kerdoncuff, P.: Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation; Universität Karlsruhe, 2008
- [100] Schuck, O. u. a.: Beseitigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Hemmnisse bei der Einspeisung biogener Gase in das Erdgasnetz zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen durch Aufbau und Anwendung einer georeferenzierten Datenbank; Endbericht, Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, 2009
- [101] Koch, M.: Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl; Universitaetsverlag Karlsruhe, 2009
- [102] Fink, R.: Überregionale Biomasselogistik in Österreich; Symposium - Biomassebedarf und Biomassebereitstellung, Güssing, 2006
- [103] Jones, P.; Ohlmann, J.: Long-range timber supply planning for a vertically integrated paper mill; European Journal of Operational Research, 2007
- [104] Agriteam; Regione Lombardia: ALPENENERGYWOOD Project - providing a sector platform for Short Rotation Forestry cultivation and harvesting; Projektbericht, Mailand, 2006
- [105] Lange & Fendel Software GmbH: WASP - Integrierte Logistik für Forst und Holz; WASP - Integrierte Logistik für Forst und Holz, 2010
- [106] Frombo, F. u. a.: Planning woody biomass logistics for energy production: A strategic decision model; Biomass and Bioenergy, Bd. 33, 2009
- [107] Eriksson, L.N.; Gustavsson, L.: Biofuels from stumps and small roundwood--Costs and CO2 benefits; Biomass and Bioenergy, Bd. 32, 2008
- [108] Thorn, J.: Taktisches Supply Chain Planning: Planungsunterstützung durch deterministische und stochastische Optimierungsmodelle: 65; Lang, Peter Frankfurt, 2002
- [109] Kinkel, S.: Erfolgsfaktor Standortplanung. In- und ausländische Standorte richtig bewerten; Springer, Berlin, 2004
- [110] Sattler, H.: Holzmobilisierung der burgenländische Weg; Symposium - Biomassebedarf und Biomassebereitstellung, Güssing, 2006
- [111] Traurig, R.: Verbesserung und Effizienzsteigerung landwirtschaftlicher Verfahrenstechnik durch wettbewerbsorientierte organisatorische Maßnahmen; Cuvillier, E, Göttingen, 2007
- [112] VDI-Gesellschaft Produktionstechnik: VDI 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen; Beuth Verlag, 2002
- [113] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik: VDI 3581: Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente; Beuth Verlag, 2004
- [114] Frota Neto, J.Q. u. a.: Designing and evaluating sustainable logistics networks; International Journal of Production Economics, Bd. 111, 2008
- [115] Müller-Langer, F. u. a.: Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen Energiesystem; Endbericht, Deutsches BiomasseForschungsZentrumk, Leipzig, 2009
- [116] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung von Biomasse; Landwirtschaftsverlag, 2007
- [117] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.: Biomasse-Vergasung; Landwirtschaftsverlag, 2004
- [118] CEN/TS 14588: Feste Biobrennstoffe - Terminologie, Definitionen und Beschreibungen; Deutsche Fassung CEN/TS 14588:2003; Beuth Verlag, 2004
- [119] Wagner, U.: Bereitstellung fossiler und nuklearer Brennstoffe: Vorlesungsmanuskript Grundlagen der Energieversorgung; Energie & Management, 1996
- [120] Obernberger, I.; Brunner, T.; Bärnthaler, G.: Chemical properties of solid biofuels-

- significance and impact; Biomass and Bioenergy, Bd. 30, 2006
- [121] Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM M 7133 Hackgut für energetische Zwecke - Anforderungen und Prüfbestimmungen; 1993
- [122] Günther, H.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik; Springer, Berlin, 2007
- [123] Thonemann, U.: Operations Management: Konzepte, Methoden und Anwendungen; Pearson Studium, 2005
- [124] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Bundeswaldinventur II; Bundeswaldinventur II, 2009
- [125] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Umweltbundesamt; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Corine Landcover 2000 - Bodenbedeckungsdaten für Deutschland; Corine Landcover 2000 - Bodenbedeckungsdaten für Deutschland, 2009, (http://www.corine.dfd.dlr.de/intro_de.html)
- [126] Bundesamt für Naturschutz: Naturschutzflächen in Deutschland; Leipzig, 2009
- [127] Julius Kühn Institut: Niederschlagsverteilung und Bodenqualitäten in Deutschland; Quedlinburg, 2009
- [128] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft: Kalkulationsprogramm zur KTBL-Datensammlung Betriebsplanung Landwirtschaft 2006/2007; Darmstadt, KTBL-Datensammlung
- [129] Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 2008; Statistisches Bundesamt, 2008
- [130] Bundeswasserstraßenkarte DBWK 1000; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin, 2008
- [131] Holzverladebahnhofsuche DB Schenker; Holzverladebahnhofsuche, 2008, (<http://stinner.hacon.de/>)
- [132] Raillon Deutschland AG: Einheitlicher Entfernungszeiger für den internationalen Güterverkehr: Verzeichnis der Güterverkehrstellen - Verzeichnis der Übernahme-/Ablieferungsorte; Raillon Deutschland AG, Mainz, 2008
- [133] The European Federation of Inland Ports; EFIP, 2008, (<http://www.inlandports.be/map.php>)
- [134] Environmental Systems Research Institute: Geoinformationssystem ESRI ArcGIS 9.3; Redlands
- [135] BDEW: Gasnetz Karte; Gasnetz Karte, 2008, (<http://www.gasnetz Karte.de/>)
- [136] Umweltbundesamt: Schadstofffreisetzungs- und Verbringungsregister; 2009, (<http://www.prtr.bund.de/>)
- [137] Fiedler, P.; Schultze, M.; Sonntag, H.: Bereitstellung von Dendromasse für die Versorgung von Biomassekraftwerken - Analyse am Beispiel des Standorts Elsterwerda; TFH Wildau, Wildau, 2006
- [138] M+W Zander; Repotec - renewable power technologies; CTU - Concepte Technik Umwelt: GoBiGas - Gothenburg Biomass Gasification; Pre Study, Stuttgart, 2007
- [139] Malarenergi: Biomass supply for CHP Västerås; 2008
- [140] Held, J.: Large scale biofuelled CHP plants in Sweden; 2008
- [141] Rönsch, S. u. a.: Frame conditions and assumptions; Deliverable des EU Projektes "Demonstration of the Production and Utilization of Synthetic Natural Gas (SNG) from Solid Biofuels", Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig
- [142] Rönsch, S.; Seiffert, M.; Kaltschmitt, M.: Technical assessment; Deliverable des EU Projektes "Demonstration of the Production and Utilization of Synthetic Natural Gas (SNG) from Solid Biofuels", Deutsches BiomasseForschungsZentrum, Leipzig, 2008
- [143] Scholz, V.: Anbau und Verwertung von holzartigen Energiepflanzen; Tagungsbandbeitrag, Rabenau, 2006
- [144] Wittkopf, S.: Einsatz der Bündelmaschine Fiberpac; Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2005

- [145] Nolte, N.; Reuther, C.; Lechner, H.: Industrie- und Waldrestholzernte mit dem Restholzbündler; Bd. 5, 2005
- [146] Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.: Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut; in: Bornimer Agrartechnische Berichte, Selbstverlag, Potsdam-Bornim, 39
- [147] Ellmauer Umwelttechnik: Stationäre Zerkleinerungstechnologie; Informationsbroschüre, Ellmauer Umwelttechnik, 2008, (<http://www.ellmauer-umwelttechnik.at/>)
- [148] Eschelböck: Holzhackmaschinenprogramm; Informationsbroschüre, Eschelböck, Prambachkirchen, 2007, (www.eschelboeck.at)
- [149] Doppstadt: Exakthacker; Informationsbroschüre, Doppstadt, Velbert, 2007, (www.doppstadt.com)
- [150] Doppstadt: Umwelttechnik Mobil - Baureihe SM; Informationsbroschüre, Doppstadt, Velbert, 2007, (www.doppstadt.com)
- [151] HAAS: HAAS Siebtechnik - System und Konzepte für alle Anforderungen; Informationsbroschüre, Dreisbach, 2008, (www.haas-recycling.de)
- [152] Backers Maschinenbau GmbH: Siebtechnik; Informationsbroschüre, 2008, (<http://www.backers.de/>)
- [153] Hoffmann, K.; Krenn, E.; Stanker, G.: Fördertechnik 2: Maschinensätze - Fördermittel - Tragkonstruktionen - Logistik; Oldenbourg Verlag Wien, 2004
- [154] Heil, H.G.: Fördertechnik, Tl.3, Aufzüge, Flurförderzeuge, Stetigförderer; Beuth Verlag, 1994
- [155] Rong, V.O.: Auslegungsverfahren für Hochleistungsschneckenförderer; Technische Universität München, 2004
- [156] Herrmann, V.W.: Beitrag zur optimierten Auslegung senkrechter Trogkettenförderer; VDI Verlag, Rothenburg, 1993
- [157] Selig, H.J.: Technik der pneumatischen Förder- und Mischverfahren.; Krausskopf, Mainz, 1972
- [158] Meiller: Dreiseitenkipper Typ 16 für Mercedes-Benz Actros; Informationsbroschüre, Meiller, München, 2008, (<http://www.meiller.com/>)
- [159] Meiller: Behälter-Transportanhänger G 18 E B/L 5,0; Informationsbroschüre, Meiller, München, Dezember 2008, (<http://www.meiller.com/>)
- [160] Huttner: Aufbauten und Nachläufer zum Lang- und Kurzholztransport; Informationsbroschüre, Huttner, Landsberg am Lech, 2008, (<http://www.huttner.de/>)
- [161] Boelcke, B.: Schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen - Leitfaden zur Erzeugung von Energieholz; Leitfaden, Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin, 2006
- [162] Bundesministerium der Justiz: Straßenverkehrsordnung; 2009
- [163] Raillon Deutschland AG: RAILIONdisposal-solution - Logistiklösungen für die Entsorgungsbranche - alles aus einer Hand.; Informationsbroschüre, Mainz, 2007
- [164] Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes - Herr Jähnicke: Schiffbarkeit von Binnengewässern; 2009
- [165] Stöhr, M.: Variable Logistik für den Rundholztransport am Beispiel des Zellstoffwerks Stendal; Interforst 2006, München, 2006
- [166] DB Schenker Rail Deutschland AG: Preise und Konditionen der DB Schenker Rail Deutschland AG; Allgemeine Bestimmungen für Gütertransportleistungen mit allgemeiner Preisliste, DB Kommunikationstechnik GmbH, Karlsruhe, 2009
- [167] Bundesministerium der Justiz: Verordnung über die Lade- und Löschzeiten sowie das Liegegeld in der Binnenschifffahrt (Lade- und Löschzeitenverordnung - BinSchLV); 1999
- [168] Hakkila, P.: Developing technology for large-scale production of forest chips; Projektendbericht, National Technology Agency, Helsinki, 2003

- [169] Kanzian, C. u. a.: Waldhackguterzeugung aus Schlagrücklass; Forschungsbericht, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2006
- [170] Wittkopf, S.; Hömer, U.; Feller, S.: Bereitstellungsverfahren für Waldhackschnitzel - Leistungen, Kosten, Rahmenbedingungen; Bericht aus der LWF, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2003
- [171] Schultze, M.; Fiedler, P.; Sonntag, H.: Regionale Logistikstrategien zur Bereitstellung von Dendromasse; 3. Fachtagung Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen, Cottbus, 2008
- [172] Costa, S.; Ibanez, L.: Can wood storage be profitable? French experience after the windstorms in 1999; Journal of Forest Economics, Bd. 11, 2005
- [173] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Bioenergie - Basisdaten Deutschland; Datensammlung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, 2008
- [174] Affenzeller, G.; Stampfer, K.: Energieholzbereitstellung mit Forwarder und Fällersammler Moipu 400E; Prüfbericht, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2008
- [175] Grosse, W. u. a.: Ernte und Aufbereitung von Plantagenholz; Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 2008
- [176] Handler, F.; Blumauer, E.: Zeitstudien über Anbau-, Pflege- und Erntegeräte; St. Pölten, 2008
- [177] Wilwerding, A.; Textor, B.: Anbau, Bereitstellung und energetische Nutzung holzartiger Biomasse; Abschlussbericht, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg Abteilung Waldnutzung, Freiburg im Breisgau, 2003
- [178] Feller, S. u. a.: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln; Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2003
- [179] Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.: Kranvollernter John Deere 1070 D mit Vollernteaggregat 745; Prüfbericht, Kuratorium für Wald und Forsttechnik e.V., Groß-Umstadt, 2009
- [180] Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.: Kranvollernter Logset 5H TITAN mit Vollernteaggregat Logset 4M; Prüfbericht, Kuratorium für Wald und Forsttechnik e.V., Groß-Umstadt, 2008
- [181] Deutsche Transport-Genossenschaft Binnenschifffahrt eG: Kilometrierung des Rheins und der Nebenflüsse und Kanäle; 2009, (<http://www.dtg-eg.de/>)
- [182] Frischknecht, R.; Jungbluth, N.: Ecoinvent – overview and methodology - data v2.0 (2007); Projektbericht, Dübendorf, 2007
- [183] Brhel, P. u. a.: Forsttechnik für naturnahe Waldwirtschaft; Forsttechnische Informationen - Fachzeitschrift für Waldarbeit und Forsttechnik, 1996
- [184] Seiffert, M.; Kaltschmitt, M.: Biomass provision technologies and concepts; Deliverable des EU Projektes "Demonstration of the Production and Utilization of Synthetic Natural Gas (SNG) from Solid Biofuels", Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig, 2007
- [185] Liebherr: Radlader L 524 - L 542; Informationsbroschüre, Liebherr Firmengruppe, Bischofshofen, 2009
- [186] Schwarz, F.: Trimodaler Containerumschlag - Hinterland-Terminals - Typen und Umsetzung; Hebezeuge und Fördermittel, 2008
- [187] Krauß R. - MAN Truck & Bus Deutschland GmbH, Truck-Center Leipzig-Dresden: Persönliche Mitteilung; 2008
- [188] Sächsische Binnenhäfen Oberelbe GmbH: Indikation für den Binnenschifftransport; Angebot, Sächsische Binnenhäfen Oberelbe GmbH, Dresden, 2008
- [189] VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik: VDI 2525: Praxisorientierte Logistikkennzahlen für kleine und mittelständische Unternehmen; Beuth Verlag, 1999
- [190] Arnold, D.: Die Verfügbarkeit – Selbstzweck oder Kostenfaktor?; in: Verfügbarkeit von Materialflusssystemen, VDI Verlag, 1988

- [191] Perry, M.; Eliason, D.: CO₂ Recovery and Sequestration at Dakota Gasification Company.; Gasification Technology Conference, Washington DC, 2004
- [192] Seemann, M.; Biollaz, S.: Improved process modelling biomass to gaseous fuel; Deliverable des EU Projektes "Renewable fuels for advanced powertrains", Paul Scherrer Institut, Villigen, 2007
- [193] Rönsch, S. u. a.: Erdgassubstitut aus biogenen Festbrennstoffen – Eine technische Analyse.; VGB PowerTech, 2008
- [194] Seiffert, M.; Kaltschmitt, M.; Miranda, J.: The biomethane potential in Chile; Biomass and Bioenergy, Bd. 33 (2009), Nr. 4, S. 564-572, (doi:10.1016/j.biombioe.2008.09.005)
- [195] Thrän, D. u. a.: Möglichkeiten einer europäischen Biogaseinspeisungsstrategie.; Endbericht, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig, 2007
- [196] PTV Planung Transport Verkehr AG: Geschwindigkeiten Transportmedien; 2008

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1-1:	Kapitel der Arbeit und deren Interdependenzen	4
Abb. 2-1:	Einbindung der Bereitstellung in die Bereiche Biomasseproduktion und Brennstoffnutzung [29]	7
Abb. 2-2:	Allgemeine Struktur einer Logistikkette zur Biomassebereitstellung	9
Abb. 3-1:	Anforderungen eines Konversionsanlagenstandortes an die Bereiche der Biomassebereitstellung, der Versorgung mit Betriebsmitteln sowie der Distribution von Nutz- und Endenergie	20
Abb. 3-2:	Zielsystem innerhalb der Bereitstellung (in Anlehnung an [25], [77])	22
Abb. 4-1:	Methodischer Gesamtansatz	28
Abb. 4-2:	Vorgehensweise bei der Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen	29
Abb. 4-3:	Beispielhafte Hierarchiestruktur zur Einordnung von Kriterien und Bestimmung des Kriteriengewichtes nach der Nutzwertanalyse [68], [74]	33
Abb. 4-4:	Vorgehensweise bei der Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung	35
Abb. 4-5:	Vereinfachter Ansatz zum Aufbau der räumlichen Struktur	37
Abb. 4-6:	Mögliche Ablaufstruktur für die Bereitstellung biogener Festbrennstoffe wie beispielsweise Kurzumtriebs- und Waldrestholz	38
Abb. 4-7:	Vorgehensweise bei der Optimierung der Biomassebereitstellung	42
Abb. 4-8:	Exemplarische Bestimmung der ökonomischen und ökologischen Bewertungskenngrößen entlang der Gesamtbereitstellungskette von Biomasse	47
Abb. 4-9:	Beispiel des Aufbaus der Optimierungsmatrix	48
Abb. 4-10:	Exemplarische Darstellung der pareto-optimalen Lösung und der zugehörigen Zielmarken	49
Abb. 5-1:	Lagerbestands- und Bereitstellungsmengen exemplarisch für eine Bio- SNG-Produktionsanlage im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	52
Abb. 5-2:	Hierarchie der Standortkriterien beispielhaft für eine Bio-SNG- Produktionsanlage im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	57
Abb. 5-3:	Hierarchie der Standortkriterien beispielhaft für eine Bio-SNG- Produktionsanlage im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	57
Abb. 5-4:	Einordnung der Landkreise nach ihrer Eignung zur Etablierung von Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	60
Abb. 5-5:	Einordnung der Landkreise nach ihrer Eignung zur Etablierung von Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	61

Abb. 5-6:	Bandbreiten der Arbeitsmittelanzahl für Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	76
Abb. 5-7:	Bandbreiten der Arbeitsmittelanzahl für Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	76
Abb. 5-8:	Bandbreiten analysierter Logistikkennzahlen für die Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	78
Abb. 5-9:	Bandbreiten analysierter Logistikkennzahlen für die Bereitstellungskonzepte von Kurzumtriebs- und Waldrestholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	79
Abb. 5-10:	Matrixaufbau für die Optimierung nach ökonomischen Zielkriterien	85
Abb. 5-11:	Matrixaufbau für die Optimierung nach ökologischen Zielkriterien	86
Abb. 5-12:	Bereitstellungskosten und THG-Emissionen der optimalen Versorgungskonzepte für Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	87
Abb. 5-13:	Bereitstellungskosten und THG-Emissionen der optimalen Versorgungskonzepte für Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	90
Abb. A 2-1:	Systemaufbau der Produktion von Bio-SNG [192]	118
Abb. A 4-1:	Einzugsfläche eines Lagers	129
Abb. A 4-2:	Einzugsgebiet eines Umschlagsstandortes	130
Abb. A 4-3:	Versorgungslayout für drei Verladebahnhöfe	131
Abb. A 4-4:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Greiz ...	134
Abb. A 4-5:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Greiz	135
Abb. A 4-6:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Rostock	135
Abb. A 4-7:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Rostock	136
Abb. A 4-8:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Staßfurt	136
Abb. A 4-9:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Staßfurt	137
Abb. A 4-10:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Greiz.	137

Abb. A 4-11:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Greiz.....	138
Abb. A 4-12:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Rostock	138
Abb. A 4-13:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Rostock	139
Abb. A 4-14:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Staßfurt.....	139
Abb. A 4-15:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Staßfurt.....	140
Abb. A 4-16:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Anklam.....	140
Abb. A 4-17:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Anklam.....	141
Abb. A 4-18:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Schwedt.....	141
Abb. A 4-19:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Schwedt.....	142
Abb. A 4-20:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Völklingen.....	142
Abb. A 4-21:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Völklingen.....	143
Abb. A 4-22:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Anklam	143
Abb. A 4-23:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Anklam	144
Abb. A 4-24:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Schwedt	144

Abb. A 4-25:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Schwedt	145
Abb. A 4-26:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Völklingen	145
Abb. A 4-27:	Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Völklingen	146
Abb. A 5-1:	Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	147
Abb. A 5-2:	Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	147
Abb. A 5-3:	Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	148
Abb. A 5-4:	Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	148
Abb. A 5-5:	Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	149
Abb. A 5-6:	Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	149
Abb. A 5-7:	Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	150
Abb. A 5-8:	Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	150

Tabelle 2-1:	Charakteristika der Bereitstellungsprozesse (in Anlehnung an [26])	8
Tabelle 2-2:	Einordnung von Stück- und Schüttgut auf Basis von Waldrest- und Kurzumtriebsholz.....	8
Tabelle 2-3:	Systematik von Lagerarten für biogene Brennstoffe [23], [31].....	12
Tabelle 4-1:	Beispielhaftes Standortanforderungsprofil (in Anlehnung an [70])	31
Tabelle 4-2:	Gewichtungstabelle nach dem Rangfolgeverfahren zur Ermittlung der Gewichtungsfaktoren [66]	32
Tabelle 4-3:	Exemplarische Beurteilung von lokalen Standortalternativen [68].....	34
Tabelle 4-4:	Festzulegende Randbedingungen entlang der Bereitstellungskette von Biomasse	36
Tabelle 5-1:	Referenzanlagen für die Produktion von Bio-SNG [115].....	50
Tabelle 5-2:	Ausgewählte Spezifikationen und Mindestanforderungen für Brennstoffe zur Produktion von Bio-SNG (Beispiel Biomassevergasung Güssing) [7], [14], [120], [121]	51
Tabelle 5-3:	Infrastrukturelle Anforderungen an die Brennstoffbereitstellung.....	54
Tabelle 5-4:	Infrastrukturelle Anforderungen an die Distribution von Wärme und Methan	55
Tabelle 5-5:	Standortanforderungsprofil für Bio-SNG-Produktionsanlagen [70], [142].....	55
Tabelle 5-6:	Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien 2. Stufe für Bio-SNG Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	56
Tabelle 5-7:	Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Kriterien 2. Stufe für Bio-SNG Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	56
Tabelle 5-8:	Optimale Standorte für die Etablierung von Bio-SNG-Anlagen in Abhängigkeit der Konversionsanlagengröße.....	62
Tabelle 5-9:	Gebräuchliche Technologien für die Ernte und Verfügbarmachung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz in Stückgutform [35], [46], [48], [49].....	64
Tabelle 5-10:	Ausgewählte Technologien für die Ernte und Verfügbarmachung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz in Schüttgutform [47], [50], [51], [104], [143]	64
Tabelle 5-11:	Ausgewählte Technologien für die Stück- und Schüttgutlagerung [26], [30], [31], [53].....	65
Tabelle 5-12:	Technologien für die Bündelung von Holz [59], [144], [145].....	65
Tabelle 5-13:	Ausgewählte Trocknungsverfahren für Stückgut [52], [146]	65
Tabelle 5-14:	Ausgewählte Hackertechnologien für die Hackschnitzelproduktion [40], [48], [49], [147], [148], [149].....	66
Tabelle 5-15:	Ausgewählte Trocknungsverfahren für Hackgut [30], [52],[143]	66
Tabelle 5-16:	Siebtechnologien für Holzhackschnitzel [60], [150], [151], [152]	67
Tabelle 5-17:	Ausgewählte Umschlagstechnologien für Stückgut [31], [153]	67
Tabelle 5-18:	Typische Umschlagstechnologien für Schüttgut [31], [153], [154], [155], [156], [157].....	68

Tabelle 5-19:	Ausgewählte Technologien für den Transport von Stück- und Schüttgut [63], [64], [158], [159], [160].....	68
Tabelle 5-20:	Technologien zur Bereitstellung von Waldrest- und Kurzumtriebsholz [12], [40], [41], [43], [47], [49], [51], [102], [104], [168], [169], [170], [171].....	71
Tabelle 5-21:	Durchschnittliche Biomasseeinzugsgebiete nach ausgewählten Bio-SNG-Anlagenstandorten	72
Tabelle 5-22:	Klassifizierung der Binnenwasserstraßen [130]	73
Tabelle 5-23:	Notwendige Lagerkapazitäten für Hackschnitzel, Rundholz sowie Bündel an ausgewählten Konversionsanlagen [59], [173]	73
Tabelle 5-24:	Durchschnittliche Transportdistanzen über den Verkehrsträger Schiene an ausgewählte Konversionsanlagenstandorte [131]	75
Tabelle 5-25:	Durchschnittliche Transportdistanzen über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an ausgewählte Konversionsanlagenstandorte [130], [181]	75
Tabelle 5-26:	Bestimmung der Gewichtungsfaktoren der Leistungskennzahlen.....	77
Tabelle 5-27:	Effiziente Bereitstellungskonzepte für Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW _{BWL}	80
Tabelle 5-28:	Effiziente Bereitstellungskonzepte für Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	81
Tabelle 5-29:	Eingangsdaten für den Prozessschritt Ernte und Verfügbarmachung [128], [143], [145], [170], [182], [183].....	83
Tabelle 5-30:	Eingangsdaten für den Prozessschritt Aufbereitung [46], [48], [182], [184].....	83
Tabelle 5-31:	Eingangsdaten für den Prozessschritt Umschlag [182], [185], [186]	83
Tabelle 5-32:	Eingangsdaten für den Prozessschritt Transport [182], [187], [188].....	84
Tabelle 5-33:	Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an eine 30 MW _{BWL} Bio-SNG-Anlage...88	
Tabelle 5-34:	Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an eine 30 MW _{BWL} Bio-SNG-Anlage	89
Tabelle 5-35:	Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an eine 200 MW _{BWL} Bio-SNG-Anlage	91
Tabelle 5-36:	Bereitstellungsmengen und Verluste für die ökonomisch-ökologisch optimalen Versorgungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an eine 200 MW _{BWL} Bio-SNG-Anlage.....	92

Tabelle A 3-1:	Regionale Standortfaktoren [9], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [134].....	119
Tabelle A 3-2:	Rangfolgematrix der Kriterien 2. Stufe für Biomassekonversionsanlagen mit straßengebundenen Brennstoffbereitstellungskonzepten.....	124
Tabelle A 3-3:	Rangfolgematrix der Kriterien 2. Stufe für Biomassekonversionsanlagen mit Brennstoffbereitstellungskonzepten bestehend aus Vor- und Hauptlauf.....	124
Tabelle A 3-4:	Rangfolgenmatrix für das Kriterium flächenspezifisches Biomassepotenzial	125
Tabelle A 3-5:	Rangfolgenmatrix für das Kriterium Betriebsgrößenstruktur.....	125
Tabelle A 3-6:	Rangfolgenmatrix für das Kriterium Verkehrsnetzverfügbarkeit am Beispiel von Konversionsanlagen in einem Leistungsbereich von 200 MW _{BWL}	125
Tabelle A 3-7:	Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern (30 MW _{BWL})	126
Tabelle A 3-8:	Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Sachsen-Anhalt (30 MW _{BWL}).....	126
Tabelle A 3-9:	Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Thüringen (30 MW _{BWL}).....	126
Tabelle A 3-10:	Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern (200 MW _{BWL})	126
Tabelle A 3-11:	Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Brandenburg (200 MW _{BWL}).....	126
Tabelle A 3-12:	Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen im Saarland (200 MW _{BWL}).....	126
Tabelle A 4-1:	Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Waldrestholz – Hauptlauf Straße	127
Tabelle A 4-2:	Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Kurzumtriebsholz – Hauptlauf Straße	127
Tabelle A 4-3:	Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Waldrestholz – Hauptlauf Schiene.....	127
Tabelle A 4-4:	Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Kurzumtriebsholz – Hauptlauf Schiene.....	128
Tabelle A 4-5:	Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Waldrestholz – Hauptlauf Binnenwasserstraße.....	128
Tabelle A 4-6:	Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Kurzumtriebsholz – Hauptlauf Binnenwasserstraße.....	128
Tabelle A 4-7:	Durchschnittsgeschwindigkeiten ausgewählter Verkehrsmittel [62], [196].....	132

- Tabelle A 4-8: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Straße.....132
- Tabelle A 4-9: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Schiene133
- Tabelle A 4-10: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Schiene ..133
- Tabelle A 4-11: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße.....134

Anhang

A.1 Begriffsdefinitionen

Standortidentifikation

Nachfolgend werden ausgewählte Begriffe definiert, die im Rahmen der Standortidentifikation von Bedeutung sind.

Standort: Ein Standort wird als geographischer Ort verstanden, an dem ein Unternehmen Leistungen verwertet und erstellt [73].

Standortanforderungsprofil: In einem Standortanforderungsprofil sind die zusammengefassten Standortkriterien als Fest-, Mindest- und Wunschforderungen definiert. Unter Festforderungen sind dabei Ausschlusskriterien zu verstehen die jeder potenzielle Standort erfüllen muss. Dahingegen repräsentieren Mindestforderungen, beispielsweise aufbauend auf Festforderungen, Grenzwerte die durch relevante Standorte erfüllt werden müssen. Wunschforderungen sind zusätzlich definierte Forderungen [70].

Standortfaktoren: Die Beschreibung der Eigenschaften von einem Standort hinsichtlich quantitativer und qualitativer Aspekte erfolgt mit Hilfe von Standortfaktoren. In Abhängigkeit der Betrachtungsebene können diese in globale, regionale und lokale Standortfaktoren eingeteilt werden. Ausgehend von den jeweiligen unternehmensbezogenen Zielsetzungen erfolgt eine Charakterisierung der Standortfaktoren, wobei hierzu relevante Orientierungsschwerpunkte festgelegt werden. Mögliche Aspekte der Orientierung sind dabei Rohstoff, Infrastruktur, Energie, Absatz oder Personal [68], [70].

Standortkriterien: Die Gesamtheit aller Standortkriterien umfasst alle Anforderungen an einen Standort, die unmittelbar aus den unternehmensspezifischen Zielsetzungen abgeleitet werden [70].

Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung

Im Anschluss werden ausgewählte Begriffe definiert, die im Rahmen der Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung von Bedeutung sind.

Auslastung: Auslastung bezeichnet das Verhältnis zwischen genutzter und verfügbarer Kapazität [23].

Durchlaufzeit: Die Durchlaufzeit wird hier als die Zeit verstanden, die ein logistisches Objekt vom Eingang in ein System (u. a. Bereitstellungskette) bis zum Ausgang benötigt [25].

Leistungskennzahl: Zur Beurteilung der logistischen Leistung eines Systems dienen Leistungskennzahlen, die individuell zugeschnitten sein sollen, da Schwerpunkte innerhalb logisti-

scher Systeme stark variieren können. In Anlehnung an die definierten untergeordneten Zielstellungen der Logistikleistung werden bewusst die Kriterien technische Verfügbarkeit, Durchlaufzeit und Auslastung als Kennzahlen zur Einschätzung der logistischen Leistung verwendet [189].

Logistikleistung: Der Begriff Logistikleistung kann als Teil eines Zielsystems basierend auf den zugehörigen Unterzielen hohe technische Verfügbarkeit, niedrige Durchlaufzeit und hohe Auslastung verstanden werden [25].

Logistisches System: Der vordefinierte Bereich zwischen dem Eingang und Ausgang von Bereitstellungsobjekten wird hier als logistisches System verstanden. Ergänzend kann die Kombination von mindestens zwei Elementen innerhalb einer Bereitstellungskette, die eine Zustandsveränderung von Objekten hinsichtlich der Kriterien Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung und Qualität hervorrufen, als System bezeichnet werden [23], [76].

Technische Verfügbarkeit: Unter der technischen Verfügbarkeit wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, eine betrachtete Einheit in einem frei gewählten Zeitpunkt der Betriebszeit funktionsfähig anzutreffen. Darüber hinaus ermöglicht die Verfügbarkeit als Kennzahl die zahlenmäßige Beurteilung der Einsatzbereitschaft eines Systems [112], [113], [190].

Optimierung der Biomassebereitstellung

Nachfolgend werden ausgewählte Begriffe definiert, die im Rahmen der Optimierung der Biomassebereitstellung von Bedeutung sind.

Gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung: Diese Form der Optimierung stellt eine Erweiterung gegenüber der linearen Optimierung dar, wonach einige oder alle Variablen der Ganzzahligkeitsbedingung unterliegen [89], [95].

Nebenbedingung: Eine Nebenbedingung ist eine algebraisch formulierte Gleichung bzw. Ungleichung, die Variablen und Daten von einem Optimierungsmodell miteinander verknüpft [23], [86].

Pareto-Optimum: Eine Lösung „x“ wird als pareto-optimal verstanden, solange keine andere Lösung gegeben ist, die in allen Zielsetzungen genauso gut wie „x“ und in mindestens einem Zielkriterium besser ist [86].

Variable: Eine Variable beschreibt eine Entscheidung oder aber eine unbekannte Größe in einem Optimierungsmodell, die ermittelt werden soll [114].

Zielsetzung: Die Zielsetzung ist ein mathematischer Term in einem Optimierungsmodell, der zu maximieren bzw. minimieren ist [86].

A.2 Bio-SNG Produktion

Die SNG Produktion wird bisher auf Basis von Kohle mit marktreifer Technologie erfolgreich praktiziert. Seit dem Jahr 1984 sind derartige Anlagen in North Dakota in Betrieb. Mit einem Tagesbrennstoffbedarf von 18500 t Braunkohle werden 4247520 m³ Methan produziert [191]. Im Gegensatz dazu befindet sich die Umwandlung von Biomasse über den Weg der thermo-chemischen Konversion in Bio-SNG im Demonstrationsstadium.

Grundsätzlich kann die Umwandlung von biogenen Festbrennstoffen zu Bio-SNG in die vier folgenden Teilschritte gegliedert werden [8], [192] (Abb. A 2-1).

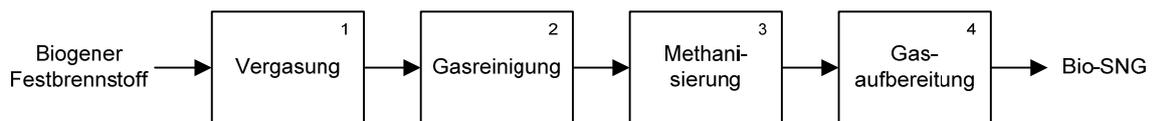


Abb. A 2-1: Systemaufbau der Produktion von Bio-SNG [192]

Nach der Bereitstellung des Brennstoffes in ausreichender Qualität und Quantität an die Konversionsanlage kann dieser dem Vergasungsreaktor zugeführt werden. Dabei stellt die Vergasung einen thermo-chemischen Umwandlungsprozess dar, bei dem ein Produktgas mit den Hauptkomponenten Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid und Methan hergestellt wird. Aufgrund der im Produktgas enthaltenen Verunreinigungen wie u. a. Teer und Staub ist eine Gasreinigung für nachfolgende Prozesse notwendig. Innerhalb der anschließenden Methanisierung erfolgt unter Verwendung der katalytischen Synthese von Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff zu Methan die Erhöhung des Methangehaltes. Um das methanreiche Produktgas in das Erdgasnetz einspeisen zu können, ist eine Gasaufbereitung in Form einer CO₂ und H₂O Abtrennung notwendig [192], [193].

Seit dem Jahr 2002 wird die Biomassevergasung unter Verwendung des Vergasungsmittels Wasserdampf erfolgreich am Standort Güssing (Österreich) durchgeführt [7]. In Erweiterung dazu wurde die Methanisierung des Produktgases im Pilotstadium von 100 kW thermischer Leistung demonstriert. Aufbauend auf den vorangegangenen Erfahrungen, erfolgten im Zeitraum 2007 bis 2008 in Güssing der Bau und die Inbetriebnahme einer Methanisierungsanlage mit einer Gasleistung von 1 MW [8], [194]. Die zu erwartenden Umwandlungseffizienzen vom Festbrennstoff zu Biomethan liegen dabei zwischen 60 bis 70 % [6], [193], [195].

A.3 Standortidentifikation für Biomassekonversionsanlagen

Standortfaktoren

Tabelle A 3-1: Regionale Standortfaktoren [9], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [134]

Bundesland	Landkreis	Fläche in km ²	Technisches Biomassepotenzial				Betriebsgrößenstruktur in km ²		Infrastruktur	
			WRH in PJ/a	WRH in PJ/a km ²	KUP in PJ/a	KUP in PJ/a km ²	Forstwirtschaft	Landwirtschaft	Schiene	BSS
Hessen	LK Bergstrasse	720	0,66	0,0009	0,04	0,0001	1,09	0,35	1,00	-
	LK Darmstadt-Dieburg	659	0,53	0,0008	0,10	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Fulda	1.380	0,80	0,0006	0,24	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Giessen	855	0,61	0,0007	0,19	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Gross-Gerau	453	0,21	0,0005	0,06	0,0001	1,09	0,35	1,00	-
	LK Hersfeld-Rotenburg	1.097	1,18	0,0011	0,18	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Hochtaunuskreis	482	0,52	0,0011	0,06	0,0001	1,09	0,35	1,00	-
	LK Kassel	1.293	1,07	0,0008	0,36	0,0003	1,09	0,35	1,00	-
	LK Lahn-Dill-Kreis	1.067	1,05	0,0010	0,06	0,0001	1,09	0,35	1,00	-
	LK Limburg-Weilburg	738	0,51	0,0007	0,21	0,0003	1,09	0,35	1,00	-
	LK Main-Kinzig-Kreis	1.398	1,38	0,0010	0,16	0,0001	1,09	0,35	1,00	1,00
	LK Main-Taunus-Kreis	222	0,10	0,0005	0,03	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Marburg-Biedenkopf	1.263	1,14	0,0009	0,24	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Odenwaldkreis	624	0,92	0,0015	0,05	0,0001	1,09	0,35	1,00	-
	LK Offenbach	356	0,37	0,0010	0,03	0,0001	1,09	0,35	1,00	1,00
	LK Rheingau-Taunus-Kreis	811	0,93	0,0011	0,13	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Schwalm-Eder-Kreis	1.539	1,22	0,0008	0,46	0,0003	1,09	0,35	1,00	-
	LK Vogelsbergkreis	1.459	1,30	0,0009	0,27	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Waldeck-Frankenberg	1.849	1,77	0,0010	0,37	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
	LK Werra-Meißner-Kreis	1.025	0,92	0,0009	0,22	0,0002	1,09	0,35	1,00	-
LK Wetteraukreis	1.101	0,67	0,0006	0,32	0,0003	1,09	0,35	1,00	-	
Schleswig-Holstein	LK Dithmarschen	1.428	0,21	0,0001	0,36	0,0003	0,28	0,58	1,00	1,00
	LK Herzogtum Lauenburg	1.263	1,18	0,0009	0,57	0,0005	0,28	0,58	1,00	1,00
	LK Nordfriesland	2.049	0,36	0,0002	0,69	0,0003	0,28	0,58	1,00	-
	LK Ostholstein	1.392	0,49	0,0004	1,01	0,0007	0,28	0,58	1,00	-
	LK Pinneberg	664	0,19	0,0003	0,11	0,0002	0,28	0,58	1,00	-
	LK Ploen	1.083	0,43	0,0004	0,68	0,0006	0,28	0,58	1,00	-
	LK Rendsburg-Eckernförde	2.185	0,89	0,0004	0,94	0,0004	0,28	0,58	1,00	1,00
	LK Schleswig-Flensburg	2.072	0,51	0,0002	1,01	0,0005	0,28	0,58	1,00	1,00
	LK Segeberg	1.344	1,01	0,0007	0,55	0,0004	0,28	0,58	1,00	-
	LK Steinburg	1.056	0,39	0,0004	0,29	0,0003	0,28	0,58	1,00	-
LK Stormarn	766	0,35	0,0005	0,57	0,0007	0,28	0,58	1,00	-	
Niedersachsen	LK Ammerland	728	0,22	0,0003	0,12	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Aurich	1.287	0,15	0,0001	0,24	0,0002	0,40	0,52	1,00	1,00
	LK Celle	1.545	2,21	0,0014	0,20	0,0001	0,40	0,52	1,00	-
	LK Cloppenburg	1.418	0,54	0,0004	0,44	0,0003	0,40	0,52	1,00	-
	LK Cuxhaven	2.073	0,52	0,0002	0,42	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Diepholz	1.988	0,57	0,0003	0,72	0,0004	0,40	0,52	1,00	-
	LK Emsland	2.881	1,56	0,0005	0,67	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Friesland	607	0,13	0,0002	0,10	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Gifhorn	1.563	1,52	0,0010	0,34	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Goettingen	1.117	1,05	0,0009	0,47	0,0004	0,40	0,52	1,00	-
	LK Goslar	965	1,47	0,0015	0,19	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Grafschaft Bentheim	981	0,47	0,0005	0,23	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Hameln-Pyrmont	796	0,69	0,0009	0,27	0,0003	0,40	0,52	1,00	-
	LK Harburg	1.245	0,92	0,0007	0,25	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Helmstedt	674	0,46	0,0007	0,23	0,0003	0,40	0,52	1,00	-
	LK Hildesheim	1.206	0,82	0,0007	0,33	0,0003	0,40	0,52	1,00	-
	LK Holzminden	692	0,92	0,0013	0,20	0,0003	0,40	0,52	1,00	1,00
	LK Leer	1.086	0,08	0,0001	0,11	0,0001	0,40	0,52	1,00	-
	LK Luechow-Dannenberg	1.220	1,30	0,0011	0,29	0,0002	0,40	0,52	1,00	1,00
	LK Lüneburg	1.323	1,16	0,0009	0,32	0,0002	0,40	0,52	1,00	1,00
	LK Nienburg (Weser)	1.399	0,74	0,0005	0,54	0,0004	0,40	0,52	1,00	-
	LK Northeim	1.267	1,43	0,0011	0,41	0,0003	0,40	0,52	1,00	-
	LK Oldenburg	1.063	0,56	0,0005	0,31	0,0003	0,40	0,52	1,00	-
	LK Osnabrueck	2.122	1,28	0,0006	0,58	0,0003	0,40	0,52	1,00	1,00
	LK Osterholz	651	0,20	0,0003	0,10	0,0001	0,40	0,52	1,00	-
	LK Osterode am Harz	636	0,96	0,0015	0,14	0,0002	0,40	0,52	1,00	-
	LK Peine	535	0,15	0,0003	0,14	0,0003	0,40	0,52	1,00	1,00
	LK Region Hannover	2.290	1,24	0,0005	0,61	0,0003	0,40	0,52	1,00	1,00
	LK Rotenburg (Wuemme)	2.070	0,93	0,0004	0,55	0,0003	0,40	0,52	1,00	-
	LK Schaumburg	676	0,49	0,0007	0,26	0,0004	0,40	0,52	1,00	-
	LK Soltau-Fallingb.ostel	1.873	1,72	0,0009	0,26	0,0001	0,40	0,52	1,00	-
	LK Stade	1.255	0,25	0,0002	0,30	0,0002	0,40	0,52	1,00	1,00
LK Uelzen	1.454	1,54	0,0011	0,25	0,0002	0,40	0,52	1,00	1,00	
LK Vechta	813	0,31	0,0004	0,28	0,0003	0,40	0,52	1,00	-	
LK Verden	788	0,30	0,0004	0,27	0,0003	0,40	0,52	1,00	-	
LK Wesermarsch	822	0,03	0,0000	0,04	0,0000	0,40	0,52	1,00	-	
LK Wittmund	657	0,12	0,0002	0,10	0,0002	0,40	0,52	1,00	-	
LK Wolfenbuettel	722	0,38	0,0005	0,30	0,0004	0,40	0,52	1,00	-	

Bundes- land	Landkreis	Technisches Biomassepotenzial				Betriebsgrößen- struktur in km ²		Infrastruktur		
		Fläche in km ²	WRH in PJ/a	WRH in PJ/a km ²	KUP in PJ/a	KUP in PJ/a km ²	Forstwirt- schaft	Landwirt- schaft	Schiene	BSS
Nordrhein-Westfalen	LK Aachen	547	0,35	0,0006	0,03	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Borken	1.419	0,62	0,0004	0,33	0,0002	0,31	0,32	1,00	-
	LK Coesfeld	1.110	0,42	0,0004	0,32	0,0003	0,31	0,32	1,00	-
	LK Dueren	941	0,40	0,0004	0,20	0,0002	0,31	0,32	1,00	-
	LK Ennepe-Ruhr-Kreis	408	0,33	0,0008	0,03	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Euskirchen	1.249	1,12	0,0009	0,15	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Guetersloh	967	0,36	0,0004	0,19	0,0002	0,31	0,32	1,00	-
	LK Heinsberg	628	0,17	0,0003	0,13	0,0002	0,31	0,32	1,00	-
	LK Herford	450	0,10	0,0002	0,17	0,0004	0,31	0,32	1,00	-
	LK Hochsauerlandkreis	1.959	3,07	0,0016	0,15	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Hoexter	1.200	0,81	0,0007	0,48	0,0004	0,31	0,32	1,00	-
	LK Kleve	1.232	0,41	0,0003	0,24	0,0002	0,31	0,32	1,00	1,00
	LK Lippe	1.246	0,80	0,0006	0,41	0,0003	0,31	0,32	1,00	-
	LK Maerkischer Kreis	1.059	1,56	0,0015	0,07	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Mettmann	407	0,17	0,0004	0,08	0,0002	0,31	0,32	1,00	-
	LK Minden-Luebbecke	1.152	0,34	0,0003	0,37	0,0003	0,31	0,32	1,00	1,00
	LK Oberbergischer Kreis	919	1,04	0,0011	0,01	0,0000	0,31	0,32	1,00	-
	LK Olpe	711	1,34	0,0019	0,01	0,0000	0,31	0,32	1,00	-
	LK Paderborn	1.245	0,79	0,0006	0,38	0,0003	0,31	0,32	1,00	-
	LK Recklinghausen	760	0,58	0,0008	0,10	0,0001	0,31	0,32	1,00	1,00
	LK Rhein-Erft-Kreis	704	0,16	0,0002	0,10	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Rheinisch-Bergischer Kreis	438	0,38	0,0009	0,01	0,0000	0,31	0,32	1,00	1,00
	LK Rhein-Kreis Neuss	576	0,09	0,0001	0,07	0,0001	0,31	0,32	1,00	1,00
	LK Rhein-Sieg-Kreis	1.153	0,69	0,0006	0,09	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Siegen-Wittgenstein	1.132	2,04	0,0018	0,00	0,0000	0,31	0,32	1,00	-
	LK Soest	1.327	0,62	0,0005	0,56	0,0004	0,31	0,32	1,00	-
	LK Steinfurt	1.792	0,73	0,0004	0,37	0,0002	0,31	0,32	1,00	-
	LK Unna	543	0,16	0,0003	0,17	0,0003	0,31	0,32	1,00	1,00
	LK Viersen	563	0,26	0,0005	0,06	0,0001	0,31	0,32	1,00	-
	LK Warendorf	1.317	0,41	0,0003	0,40	0,0003	0,31	0,32	1,00	-
LK Wesel	1.042	0,43	0,0004	0,15	0,0001	0,31	0,32	1,00	1,00	
Rheinland-Pfalz	LK Ahrweiler	787	1,11	0,0014	0,06	0,0001	0,65	0,28	1,00	-
	LK Altkirchen (Westerwald)	642	0,96	0,0015	0,03	0,0000	0,65	0,28	1,00	-
	LK Alzey-Worms	588	0,07	0,0001	0,07	0,0001	0,65	0,28	1,00	-
	LK Bad Duerkheim	595	0,42	0,0007	0,02	0,0000	0,65	0,28	1,00	-
	LK Bad Kreuznach	864	0,87	0,0010	0,17	0,0002	0,65	0,28	1,00	-
	LK Bernkastel-Wittlich	1.178	1,68	0,0014	0,11	0,0001	0,65	0,28	1,00	-
	LK Birkenfeld	777	1,16	0,0015	0,08	0,0001	0,65	0,28	1,00	-
	LK Cochem-Zell	720	0,91	0,0013	0,15	0,0002	0,65	0,28	1,00	1,00
	LK Donnersbergkreis	645	0,47	0,0007	0,18	0,0003	0,65	0,28	1,00	-
	LK Eifelkreis Bitburg-Pruem	1.626	1,67	0,0010	0,20	0,0001	0,65	0,28	1,00	-
	LK Germersheim	463	0,48	0,0010	0,02	0,0001	0,65	0,28	1,00	1,00
	LK Kaiserslautern	640	0,62	0,0010	0,07	0,0001	0,65	0,28	1,00	-
	LK Kusel	573	0,50	0,0009	0,12	0,0002	0,65	0,28	1,00	-
	LK Mainz-Bingen	606	0,23	0,0004	0,07	0,0001	0,65	0,28	1,00	1,00
	LK Mayen-Koblenz	817	0,62	0,0008	0,30	0,0004	0,65	0,28	1,00	1,00
	LK Neuwied	627	0,75	0,0012	0,05	0,0001	0,65	0,28	1,00	1,00
	LK Rhein-Hunsrueck-Kreis	963	1,24	0,0013	0,28	0,0003	0,65	0,28	1,00	-
	LK Rhein-Lahn-Kreis	782	0,94	0,0012	0,18	0,0002	0,65	0,28	1,00	-
	LK Rhein-Pfalz-Kreis	305	0,13	0,0004	0,02	0,0001	0,65	0,28	1,00	1,00
	LK Suedliche Weinstrasse	640	0,39	0,0006	0,03	0,0001	0,65	0,28	1,00	-
LK Suedwestpfalz	954	0,83	0,0009	0,08	0,0001	0,65	0,28	1,00	-	
LK Trier-Saarburg	1.091	1,45	0,0013	0,12	0,0001	0,65	0,28	1,00	-	
LK Vulkaneifel	911	1,20	0,0013	0,05	0,0001	0,65	0,28	1,00	-	
LK Westerwaldkreis	989	1,16	0,0012	0,06	0,0001	0,65	0,28	1,00	-	

Bundes- land	Landkreis	Technisches Biomassepotenzial				Betriebsgrößen- struktur in km ²		Infrastruktur		
		Fläche in km ²	WRH in PJ/a	WRH in PJ/a km ²	KUP in PJ/a	KUP in PJ/a km ²	Forstwirt- schaft	Landwirt- schaft	Schiene	BSS
Bayern	LK Aichach-Friedberg	781	0,65	0,0008	0,20	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Altoetting	569	0,50	0,0009	0,17	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Amberg-Weizsach	1.256	2,02	0,0016	0,24	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Ansbach	1.972	1,81	0,0009	0,51	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Aschaffenburg	699	1,16	0,0017	0,06	0,0001	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Augsburg	1.071	1,16	0,0011	0,26	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Bad Kissingen	1.137	1,05	0,0009	0,24	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Bad Toelz-Wolfratshausen	1.111	1,60	0,0014	0,02	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Bamberg	1.167	1,38	0,0012	0,30	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Bayreuth	1.274	1,92	0,0015	0,19	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Berchtesgadener Land	840	0,56	0,0007	0,02	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Cham	1.512	2,16	0,0014	0,20	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Coburg	590	0,58	0,0010	0,20	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Dachau	579	0,32	0,0006	0,23	0,0004	0,19	0,26	1,00	-
	LK Deggenhofen	861	0,71	0,0008	0,11	0,0001	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Dillingen a.d. Donau	792	0,54	0,0007	0,27	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Dingolfing-Landau	878	0,61	0,0007	0,27	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Donau-Ries	1.275	1,00	0,0008	0,36	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Ebersberg	549	0,68	0,0012	0,11	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Eichstaett	1.214	1,54	0,0013	0,36	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Erding	871	0,39	0,0004	0,36	0,0004	0,19	0,26	1,00	-
	LK Erlangen-Hoechst	565	0,77	0,0014	0,10	0,0002	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Forchheim	643	0,75	0,0012	0,10	0,0001	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Freising	800	0,45	0,0006	0,34	0,0004	0,19	0,26	1,00	-
	LK Freyung-Grafenau	984	1,57	0,0016	0,03	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Fuerstenfeldbruck	435	0,31	0,0007	0,16	0,0004	0,19	0,26	1,00	-
	LK Fuerth	308	0,26	0,0008	0,09	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Garmisch-Partenkirchen	1.012	1,17	0,0012	0,00	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Guenzburg	762	0,68	0,0009	0,22	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Hassberge	956	1,08	0,0011	0,27	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Hof	893	1,05	0,0012	0,24	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Kelheim	1.067	1,35	0,0013	0,22	0,0002	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Kitzingen	684	0,43	0,0006	0,16	0,0002	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Kronach	651	1,27	0,0020	0,05	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Kulmbach	658	0,78	0,0012	0,12	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Landsberg am Lech	805	0,73	0,0009	0,16	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Landshut	1.348	0,99	0,0007	0,67	0,0005	0,19	0,26	1,00	-
	LK Lichtenfels	520	0,62	0,0012	0,11	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Lindau (Bodensee)	323	0,27	0,0008	0,00	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Main-Spessart	1.322	2,03	0,0015	0,27	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Miesbach	864	1,46	0,0017	0,01	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Miltenberg	716	1,31	0,0018	0,09	0,0001	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Muehlhofen a. Inn	805	0,58	0,0007	0,28	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Muenchen	667	0,98	0,0015	0,12	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Neuburg-Schrobenhausen	740	0,53	0,0007	0,16	0,0002	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Neumarkt i.d. OPf.	1.344	1,33	0,0010	0,34	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Neustadt a.d. Aisch-Bad Windsheim	1.268	1,12	0,0009	0,37	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Neustadt a.d. Waldnaab	1.430	1,85	0,0013	0,21	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Neu-Ulm	515	0,45	0,0009	0,14	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Nuernberger Land	799	1,33	0,0017	0,07	0,0001	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Oberallgaeu	1.528	1,69	0,0011	0,00	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Ostallgaeu	1.395	1,16	0,0008	0,05	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Passau	1.530	1,39	0,0009	0,29	0,0002	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Pfaffenhofen a.d. Ilm	760	0,59	0,0008	0,17	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Regen	975	1,81	0,0019	0,02	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Regensburg	1.393	1,55	0,0011	0,33	0,0002	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Rhoen-Grabfeld	1.022	0,71	0,0007	0,34	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Rosenheim	1.439	1,54	0,0011	0,11	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Roth	895	1,37	0,0015	0,15	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Rottal-Inn	1.282	1,06	0,0008	0,43	0,0003	0,19	0,26	1,00	-
	LK Schwandorf	1.473	2,22	0,0015	0,26	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Schweinfurt	841	0,55	0,0006	0,29	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Starnberg	488	0,57	0,0012	0,05	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Straubing-Bogen	1.202	1,04	0,0009	0,20	0,0002	0,19	0,26	1,00	1,00
	LK Tirschenreuth	1.084	1,73	0,0016	0,23	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Traunstein	1.534	1,65	0,0011	0,20	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Unterallgaeu	1.229	1,01	0,0008	0,17	0,0001	0,19	0,26	1,00	-
	LK Weilheim-Schongau	966	0,91	0,0009	0,02	0,0000	0,19	0,26	1,00	-
	LK Weissenburg-Gunzenhausen	971	1,04	0,0011	0,24	0,0002	0,19	0,26	1,00	-
	LK Wuerzburg	968	0,55	0,0006	0,30	0,0003	0,19	0,26	1,00	1,00
LK Wunsiedel i. Fichtelgebirge	606	0,92	0,0015	0,10	0,0002	0,19	0,26	1,00	-	

Bundes- land	Landkreis	Technisches Biomassepotenzial				Betriebsgrößen- struktur in km ²		Infrastruktur		
		Fläche in km ²	WRH in PJ/a	WRH in PJ/a km ²	KUP in PJ/a	KUP in PJ/a km ²	Forstwirt- schaft	Landwirt- schaft	Schiene	BSS
Baden-Württemberg	LK Alb-Donau-Kreis	1.357	1,18	0,0009	0,46	0,0003	0,46	0,25	1,00	1,00
	LK Biberach	1.410	1,56	0,0011	0,45	0,0003	0,46	0,25	1,00	-
	LK Bodenseekreis	665	0,70	0,0011	0,07	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
	LK Boeblingen	618	0,73	0,0012	0,12	0,0002	0,46	0,25	1,00	-
	LK Breisgau-Hochschwarzwald	1.378	2,37	0,0017	0,04	0,0000	0,46	0,25	1,00	-
	LK Calw	798	1,95	0,0024	0,06	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
	LK Emmendingen	680	0,99	0,0015	0,02	0,0000	0,46	0,25	1,00	-
	LK Enzkreis	574	0,72	0,0012	0,09	0,0002	0,46	0,25	1,00	-
	LK Esslingen	641	0,46	0,0007	0,05	0,0001	0,46	0,25	1,00	1,00
	LK Freudenstadt	871	2,16	0,0025	0,09	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
	LK Goepplingen	642	0,60	0,0009	0,10	0,0002	0,46	0,25	1,00	-
	LK Heidenheim	627	0,93	0,0015	0,12	0,0002	0,46	0,25	1,00	-
	LK Heilbronn	1.100	0,86	0,0008	0,20	0,0002	0,46	0,25	1,00	1,00
	LK Hohenlohekreis	777	0,68	0,0009	0,22	0,0003	0,46	0,25	1,00	-
	LK Karlsruhe	1.085	1,15	0,0011	0,15	0,0001	0,46	0,25	1,00	1,00
	LK Konstanz	818	0,95	0,0012	0,11	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
	LK Loerrach	807	1,32	0,0016	0,02	0,0000	0,46	0,25	1,00	-
	LK Ludwigsburg	687	0,37	0,0005	0,12	0,0002	0,46	0,25	1,00	1,00
	LK Main-Tauber-Kreis	1.304	1,27	0,0010	0,52	0,0004	0,46	0,25	1,00	-
	LK Neckar-Odenwald-Kreis	1.126	1,64	0,0015	0,30	0,0003	0,46	0,25	1,00	-
	LK Ortenaukreis	1.861	3,09	0,0017	0,06	0,0000	0,46	0,25	1,00	-
	LK Ostalbkreis	1.512	2,15	0,0014	0,30	0,0002	0,46	0,25	1,00	-
	LK Rastatt	739	1,31	0,0018	0,02	0,0000	0,46	0,25	1,00	1,00
	LK Ravensburg	1.632	1,82	0,0011	0,20	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
	LK Rems-Murr-Kreis	858	1,20	0,0014	0,06	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
	LK Reutlingen	1.094	0,85	0,0008	0,10	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
	LK Rhein-Neckar-Kreis	1.062	1,23	0,0012	0,14	0,0001	0,46	0,25	1,00	1,00
	LK Rottweil	769	1,35	0,0018	0,16	0,0002	0,46	0,25	1,00	-
	LK Schwaebisch Hall	1.484	1,65	0,0011	0,41	0,0003	0,46	0,25	1,00	-
	LK Schwarzwald-Baar-Kreis	1.025	1,85	0,0018	0,12	0,0001	0,46	0,25	1,00	-
LK Sigmaringen	1.204	1,76	0,0015	0,27	0,0002	0,46	0,25	1,00	-	
LK Tuebingen	519	0,61	0,0012	0,09	0,0002	0,46	0,25	1,00	-	
LK Tuttlingen	734	1,34	0,0018	0,06	0,0001	0,46	0,25	1,00	-	
LK Waldshut	1.131	2,02	0,0018	0,09	0,0001	0,46	0,25	1,00	-	
LK Zollernalbkreis	918	1,37	0,0015	0,07	0,0001	0,46	0,25	1,00	-	
Saarland	LK Merzig-Wadern	555	0,89	0,0016	0,06	0,0001	1,66	0,48	1,00	1,00
	LK Neunkirchen	249	0,30	0,0012	0,02	0,0001	1,66	0,48	1,00	-
	LK Saarlouis	459	0,48	0,0010	0,06	0,0001	1,66	0,48	1,00	1,00
	LK Saarpfalz-Kreis	419	0,34	0,0008	0,04	0,0001	1,66	0,48	1,00	-
	LK St. Wendel	476	0,67	0,0014	0,04	0,0001	1,66	0,48	1,00	-
LK Stadtverband Saarbruecken	411	0,62	0,0015	0,02	0,0001	1,66	0,48	1,00	1,00	
Brandenburg	LK Barnim	1.494	1,04	0,0007	0,28	0,0002	1,61	1,98	1,00	1,00
	LK Dahme-Spreewald	2.261	2,43	0,0011	0,23	0,0001	1,61	1,98	1,00	-
	LK Elbe-Elster	1.889	1,78	0,0009	0,41	0,0002	1,61	1,98	1,00	-
	LK Havelland	1.717	1,11	0,0006	0,44	0,0003	1,61	1,98	1,00	1,00
	LK Maerkisch-Oderland	2.128	1,24	0,0006	0,84	0,0004	1,61	1,98	1,00	-
	LK Oberhavel	1.796	1,71	0,0010	0,28	0,0002	1,61	1,98	1,00	-
	LK Oberspreewald-Lausitz	1.217	1,11	0,0009	0,15	0,0001	1,61	1,98	1,00	-
	LK Oder-Spree	2.242	2,83	0,0013	0,33	0,0001	1,61	1,98	1,00	-
	LK Ostprignitz-Ruppin	2.509	2,29	0,0009	0,67	0,0003	1,61	1,98	1,00	-
	LK Potsdam-Mittelmark	2.575	2,83	0,0011	0,38	0,0001	1,61	1,98	1,00	1,00
	LK Prignitz	2.123	0,97	0,0005	0,99	0,0005	1,61	1,98	1,00	-
	LK Spree-Neisse	1.648	1,96	0,0012	0,18	0,0001	1,61	1,98	1,00	-
	LK Teltow-Flaeming	2.092	2,12	0,0010	0,49	0,0002	1,61	1,98	1,00	-
LK Uckermark	3.058	1,10	0,0004	1,57	0,0005	1,61	1,98	1,00	1,00	

Bundesland	Landkreis	Technisches Biomassepotenzial					Betriebsgrößenstruktur in km ²		Infrastruktur		
		Fläche in km ²	WRH in PJ/a	WRH in PJ/a km ²	KUP in PJ/a	KUP in PJ/a km ²	Forstwirtschaft	Landwirtschaft	Schiene	BSS	
Mecklenburg-Vorpommern	LK Bad Doberan	1.362	0,69	0,0005	0,98	0,0007	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Demmin	1.921	0,90	0,0005	1,41	0,0007	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Guestrow	2.058	1,20	0,0006	1,21	0,0006	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Ludwigslust	2.517	2,57	0,0010	0,90	0,0004	2,22	2,50	1,00	1,00	
	LK Mecklenburg-Strelitz	2.089	1,85	0,0009	0,87	0,0004	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Mueritz	1.713	1,36	0,0008	0,71	0,0004	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Nordvorpommern	2.168	1,21	0,0006	1,34	0,0006	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Nordwestmecklenburg	2.075	0,83	0,0004	1,62	0,0008	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Ostvorpommern	1.910	1,13	0,0006	0,94	0,0005	2,22	2,50	1,00	1,00	
	LK Parchim	2.233	2,02	0,0009	1,00	0,0004	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Ruegen	975	0,34	0,0003	0,53	0,0005	2,22	2,50	1,00	-	
	LK Uecker-Randow	1.624	1,88	0,0012	0,61	0,0004	2,22	2,50	1,00	-	
	Sachsen	LK Annaberg	438	0,74	0,0017	0,06	0,0001	0,89	1,10	1,00	-
		LK Aue-Schwarzenberg	528	1,18	0,0022	0,03	0,0001	0,89	1,10	1,00	-
LK Bautzen		955	0,68	0,0007	0,41	0,0004	0,89	1,10	1,00	-	
LK Chemnitz Land		336	0,16	0,0005	0,15	0,0004	0,89	1,10	1,00	-	
LK Delitzsch		852	0,39	0,0005	0,45	0,0005	0,89	1,10	1,00	-	
LK Doebeln		424	0,08	0,0002	0,28	0,0006	0,89	1,10	1,00	-	
LK Freiberg		914	0,80	0,0009	0,48	0,0005	0,89	1,10	1,00	-	
LK Kamenz		1.335	1,88	0,0014	0,28	0,0002	0,89	1,10	1,00	-	
LK Leipziger Land		752	0,21	0,0003	0,34	0,0005	0,89	1,10	1,00	-	
LK Loebau-Zittau		699	0,55	0,0008	0,31	0,0004	0,89	1,10	1,00	-	
LK Meissen		632	0,31	0,0005	0,31	0,0005	0,89	1,10	1,00	1,00	
LK Mittlerer Erzgebirgskreis		595	0,91	0,0015	0,12	0,0002	0,89	1,10	1,00	-	
LK Mittweida		773	0,35	0,0004	0,43	0,0006	0,89	1,10	1,00	-	
LK Muldentalkreis		893	0,52	0,0006	0,48	0,0005	0,89	1,10	1,00	-	
LK Niederschlesischer Oberlausitzkreis		1.340	1,94	0,0014	0,25	0,0002	0,89	1,10	1,00	-	
LK Riesa-Grossenhain		821	0,36	0,0004	0,42	0,0005	0,89	1,10	1,00	1,00	
LK Saechsische Schweiz	888	1,03	0,0012	0,24	0,0003	0,89	1,10	1,00	1,00		
LK Stollberg	266	0,24	0,0009	0,09	0,0004	0,89	1,10	1,00	-		
LK Torgau-Oschatz	1.168	1,03	0,0009	0,61	0,0005	0,89	1,10	1,00	1,00		
LK Vogtlandkreis	1.310	2,03	0,0015	0,36	0,0003	0,89	1,10	1,00	-		
LK Weisseritzkreis	766	0,90	0,0012	0,27	0,0004	0,89	1,10	1,00	-		
LK Zwickauer Land	511	0,40	0,0008	0,27	0,0005	0,89	1,10	1,00	-		
Sachsen-Anhalt	LK Altmarkkreis Salzwedel	2.293	2,60	0,0011	0,76	0,0003	1,28	2,42	1,00	-	
	LK Anhalt-Bitterfeld	1.453	0,90	0,0006	0,67	0,0005	1,28	2,42	1,00	-	
	LK Boerde	2.366	1,53	0,0006	1,13	0,0005	1,28	2,42	1,00	-	
	LK Burgenlandkreis	1.413	0,49	0,0003	0,87	0,0006	1,28	2,42	1,00	-	
	LK Harz	2.104	2,29	0,0011	0,97	0,0005	1,28	2,42	1,00	-	
	LK Jerichower Land	1.577	1,84	0,0012	0,55	0,0003	1,28	2,42	1,00	1,00	
	LK Mansfeld-Suedharz	1.449	1,14	0,0008	0,67	0,0005	1,28	2,42	1,00	-	
	LK Saalekreis	1.433	0,30	0,0002	0,91	0,0006	1,28	2,42	1,00	1,00	
	LK Salzlandkreis	1.426	0,18	0,0001	0,90	0,0006	1,28	2,42	1,00	1,00	
	LK Stendal	2.423	1,92	0,0008	0,98	0,0004	1,28	2,42	1,00	1,00	
LK Wittenberg	1.930	2,67	0,0014	0,55	0,0003	1,28	2,42	1,00	1,00		
Thüringen	LK Altenburger Land	569	0,15	0,0003	0,37	0,0007	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Eichsfeld	940	0,67	0,0007	0,45	0,0005	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Gotha	936	0,68	0,0007	0,37	0,0004	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Greiz	844	0,61	0,0007	0,43	0,0005	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Hildburghausen	937	1,01	0,0011	0,17	0,0002	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Ilm-Kreis	843	0,87	0,0010	0,24	0,0003	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Kyffhauserkreis	1.035	0,52	0,0005	0,63	0,0006	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Nordhausen	711	0,48	0,0007	0,37	0,0005	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Saale-Holzland-Kreis	817	0,77	0,0009	0,34	0,0004	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Saale-Orla-Kreis	1.148	1,27	0,0011	0,43	0,0004	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Saalfeld-Rudolstadt	1.035	1,47	0,0014	0,17	0,0002	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Schmalkalden-Meiningen	1.210	1,43	0,0012	0,18	0,0001	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Soemmerda	804	0,11	0,0001	0,52	0,0007	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Sonneberg	433	0,72	0,0017	0,01	0,0000	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Unstrut-Hainich-Kreis	975	0,30	0,0003	0,65	0,0007	1,30	1,66	1,00	-	
	LK Wartburgkreis	1.305	0,98	0,0008	0,28	0,0002	1,30	1,66	1,00	-	
LK Weimarer Land	803	0,35	0,0004	0,52	0,0007	1,30	1,66	1,00	-		

Regionale Einordnung

In Tabelle A 3-2 und Tabelle A 3-3 wird exemplarisch die Gewichtung der Kriterien 2. Stufe für Biomassekonversionsanlagen mit straßengebunden Konzepten für die Brennstoffbereitstellung sowie aus Vor- und Hauptlauf bestehenden Konzepten dargestellt.

Tabelle A 3-2: Rangfolgematrix der Kriterien 2. Stufe für Biomassekonversionsanlagen mit straßengebundenen Brennstoffbereitstellungskonzepten

Nr.	Biomassepot. ^a	Betriebsgr. ^b	Verf. Netz ^c	Anzahl der „+“	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Biomassepot. ^a		+	+	2	6	0,50
Betriebsgr. ^b	-		+	1	4	0,33
Verf. Netz ^c	-	-		0	2	0,17
Anzahl der „-“	2	1	0			

^aFlächenspezifisches Biomassepotenzial; ^bBetriebsgrößenstruktur der Primärproduktion; ^cVerfügbarkeit Verkehrsnetz; ‚+‘ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1} , Wert: 3; ‚0‘ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1} , Wert: 2; ‚-‘ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1} , Wert: 1

Für Biomassekonversionsanlagen mit straßengebundenen Konzepten ist das flächenspezifische Biomassepotenzial in der Zielregion von höchster Bedeutung, gefolgt von der Betriebsgrößenstruktur der Land- und Forstwirtschaft sowie der Verfügbarkeit des Verkehrsnetzes. Dagegen ist für Konversionsanlagen deren Brennstoffbereitstellung auf Vor- und Hauptlauf basiert die Verfügbarkeit entsprechender Verkehrsnetze wichtiger als Betriebsgrößenstruktur der Primärproduktion und flächenspezifisches Biomassepotenzial.

Tabelle A 3-3: Rangfolgematrix der Kriterien 2. Stufe für Biomassekonversionsanlagen mit Brennstoffbereitstellungskonzepten bestehend aus Vor- und Hauptlauf

Nr.	Biomassepot. ^a	Betriebsgr. ^b	Verf. Netz ^c	Anzahl der „+“	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Biomassepot. ^a		+	-	1	4	0,33
Betriebsgr. ^b	-		-	0	2	0,17
Verf. Netz ^c	+	+		2	6	0,50
Anzahl der „-“	1	0	2			

^aFlächenspezifisches Biomassepotenzial; ^bBetriebsgrößenstruktur der Primärproduktion; ^cVerfügbarkeit Verkehrsnetz; ‚+‘ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1} , Wert: 3; ‚0‘ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1} , Wert: 2; ‚-‘ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1} , Wert: 1

Tabelle A 3-4 bis Tabelle A 3-6 gibt einen Überblick zur Gewichtung der Kriterien 3. Stufe innerhalb der Standortidentifikation von Biomassekonversionsanlagen. Für das Kriterium flächenspezifisches Biomassepotenzial Waldrestholz wird die gleiche Wichtigkeit wie für das Kriterium flächenspezifisches Biomassepotenzial Kurzumtriebsholz angenommen (Tabelle A 3-4).

Tabelle A 3-4: Rangfolgenmatrix für das Kriterium flächenspezifisches Biomassepotenzial

Nr.	Pot. WRH ^a	Pot. KUP ^b	Anzahl der „+“	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Pot. WRH ^a		0	0	2	0,50
Pot. KUP ^b	0		0	2	0,50
Anzahl der „-“	0	0			

^aFlächenspezifisches Biomassepotenzial Waldrestholz; ^bFlächenspezifisches Biomassepotenzial Kurzumtriebholz; „+“ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1} , Wert: 3; „0“ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1} , Wert: 2; „-“ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1} , Wert: 1

Zwischen den Betriebsgrößenstrukturen der Land- und Forstwirtschaft wird keine Präferenz festgelegt (Tabelle A 3-5).

Tabelle A 3-5: Rangfolgenmatrix für das Kriterium Betriebsgrößenstruktur

Nr.	BGS LW ^a	BGS FW ^b	Anzahl der „+“	Punkte	Gewichtungsfaktoren
BGS LW ^a		0	0	2	0,50
BGS FW ^b	0		0	2	0,50
Anzahl der „-“	0	0			

^aBetriebsgrößenstruktur Landwirtschaft; ^bBetriebsgrößenstruktur Forstwirtschaft; „+“ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1} , Wert: 3; „0“ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1} , Wert: 2; „-“ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1} , Wert: 1

Die Brennstoffbereitstellung an Anlagen im Leistungsbereich 30 MW_{BWL} erfolgt über die Verkehrsträger Straße und Schiene. Grundsätzlich wird von der flächendeckenden Verfügbarkeit des Verkehrsträgers Straße ausgegangen, wonach das Kriterium Schienennetzverfügbarkeit den Gewichtungsfaktor 1 erhält. Für die Brennstoffbereitstellung an Anlagen im Leistungsbereich 200 MW_{BWL} sind die Verkehrsträger Schiene und Binnenwasserstraße notwendig. Zwischen den Verkehrsträgern liegen keine Präferenzen vor (Tabelle A 3-6).

Tabelle A 3-6: Rangfolgenmatrix für das Kriterium Verkehrsnetzverfügbarkeit am Beispiel von Konversionsanlagen in einem Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

Nr.	Verf. Schiene ^a	Verf. BWW ^b	Anzahl der „+“	Punkte	Gewichtungsfaktoren
Verf. Schiene ^a		0	0	2	0,50
Verf. BWW ^b	0		0	2	0,50
Anzahl der „-“	0	0			

^aVerfügbarkeit Schienennetz; ^bVerfügbarkeit Binnenwasserstraßennetz; „+“ Kriterium K_i ist wichtiger als Kriterium K_{i+1} , Wert: 3; „0“ Kriterium K_i ist gleich wichtig wie Kriterium K_{i+1} , Wert: 2; „-“ Kriterium K_i ist weniger wichtig als Kriterium K_{i+1} ; Wert: 1

Lokale Einordnung

Tabelle A 3-7: Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern (30 MW_{BWL})

Bahnhof	Anzahl Bhf	Zugang Oberflächengewässer	Zugang Gasnetz	Druckstufe in bar
Rostock	7	Rostock	Rostock	25
Wismar	4	Wismar	Wismar	84

Tabelle A 3-8: Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Sachsen-Anhalt (30 MW_{BWL})

Bahnhof	Anzahl Bhf	Zugang Oberflächengewässer	Zugang Gasnetz	Druckstufe in bar
Leuna	15	Leuna	Leuna	100
Bitterfeld	9	Bernburg	Bernburg	63
Bernburg	5	Halle	Halle	63
Halle	2	Magdeburg	Magdeburg	25
Magdeburg	2	Staßfurt	Staßfurt	25
Staßfurt	2		Zeitz	100
Teutschenthal	2			
Zeitz	2			

Tabelle A 3-9: Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Thüringen (30 MW_{BWL})

Bahnhof	Anzahl Bhf	Zugang Oberflächengewässer	Zugang Gasnetz	Druckstufe in bar
Erfurt	3	Greiz	Greiz	25
Greiz	3	Rudolstadt	Rudolstadt	84
Rudolstadt	3	Bad Salzungen	Bad Salzungen	63
Arnstadt	2	Gerstungen	Gerstungen	84
Bad Salzungen	2			
Eisenach	2			
Gerstungen	2			

Tabelle A 3-10: Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern (200 MW_{BWL})

Binnenhafen	Bahnhof	Anzahl Bhf	Zugang Gasnetz	Druckstufe in bar
Anklam	Anklam	1	Anklam	84

Tabelle A 3-11: Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen in Brandenburg (200 MW_{BWL})

Binnenhafen	Bahnhof	Anzahl Bhf	Zugang Gasnetz	Druckstufe in bar
Brandenburg	Brandenburg	4	Brandenburg	63
Schwedt	Schwedt	3	Schwedt	84
Spremberg	Spremberg	3	Spremberg	25

Tabelle A 3-12: Einordnung potenzieller Standorte für Bio-SNG-Anlagen im Saarland (200 MW_{BWL})

Binnenhafen	Bahnhof	Anzahl Bhf	Zugang Gasnetz	Druckstufe in bar
Saarbrücken	Saarbrücken	6	Saarbrücken	23
Völklingen	Völklingen	4	Völklingen	76
Ensdorf	Ensdorf	2	Ensdorf	30
Merzig	Merzig	2	Merzig	30
Saarlouis	Saarlouis	2	Saarlouis	76

A.4 Planung des Materialflusses der Biomassebereitstellung

Identifikation und Auswahl von Bereitstellungsketten

Nachfolgend sind die betrachteten Bereitstellungsketten für Waldrest- und Kurzumtriebsholz dargestellt. Dabei werden die Konzepte systematisch geordnet nach den betrachteten Hauptlaufalternativen in Tabelle A 4-1 bis Tabelle A 4-6 vorgestellt.

Tabelle A 4-1: Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Waldrestholz – Hauptlauf Straße

WI/1	WI/2	WI/3	WI/4	WI/5	WI/6	WI/7	WI/8	WI/9	WI/10
$E_{1,2}$	$E_{1,2}$	$E_{1,3}$	$E_{4,5}$	$E_{4,6}$	$E_{4,6}$	$E_{7,8}$	$E_{9,5}$	$E_{10,5}$	$E_{10,5}$
L_1	L_1	L_1	L_1	L_1	L_1	L_2	L_1	L_1	L_1
A_1	A_2	A_2	A_3	A_3	A_3	R_1	A_2	T_4	A_3
T_1	T_1	T_2	T_2	T_2	R_1	T_2	T_2	A_4	T_2
					T_3				

Tabelle A 4-2: Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Kurzumtriebsholz – Hauptlauf Straße

KI/1	KI/2	KI/3	KI/4	KI/5	KI/6	KI/7	KI/8	KI/9	KI/10
E_1									
A_1	$E_{12,11}$	$E_{13,11}$	$E_{14,11}$	$E_{15,11}$	$E_{1,11}$	$E_{4,5}$	$E_{4,5}$	$E_{16,11}$	$E_{17,5}$
E_{11}	R_1	R_1	R_1	R_1	L_1	L_1	L_1	L_1	L_1
R_1	L_2	L_2	L_2	L_2	A_3	A_3	T_4	A_3	A_3
L_2	R_1	R_1	R_1	R_1	T_2	T_2	A_4	T_2	T_2
R_1	T_3	T_3	T_3	T_3					
T_3									

Tabelle A 4-3: Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Waldrestholz – Hauptlauf Schiene

WII/1	WII/2	WII/3	WII/4	WII/5	WII/6	WII/7	WII/8	WII/9	WII/10
$E_{4,5}$	$E_{4,5}$	$E_{4,6}$	$E_{4,6}$	$E_{4,6}$	$E_{7,8}$	$E_{9,5}$	$E_{10,5}$	$E_{10,5}$	$E_{10,5}$
L_1	L_1	L_1	L_1	L_1	L_2	L_1	L_1	L_1	L_1
A_3	A_3	A_3	A_3	A_3	R_1	A_3	T_4	T_4	A_3
T_2	R_1	A_3	R_1	R_1	T_3	T_2	R_4	R_1	T_3
R_2	T_3	R_2	T_3	T_3	R_1	R_2	T_6	T_8	R_2
T_5	R_1	T_5	R_1	R_1	T_6	T_5	R_4	R_1	T_5
R_2	T_6	R_2	T_6	T_7	R_3	R_2	A_4	A_4	R_2
	R_3		R_3						

Tabelle A 4-4: Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Kurzumtriebsholz – Hauptlauf Schiene

KII/1	KII/2	KII/3	KII/4	KII/5	KII/6	KII/7	KII/8	KII/9	KII/10
<i>E_{12,11}</i>	<i>E_{13,11}</i>	<i>E_{13,11}</i>	<i>E_{14,11}</i>	<i>E_{15,11}</i>	<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{16,11}</i>	<i>E_{17,5}</i>
<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>
<i>L₂</i>	<i>L₂</i>	<i>L₂</i>	<i>L₂</i>	<i>L₂</i>	<i>A₃</i>	<i>T₄</i>	<i>T₄</i>	<i>A₃</i>	<i>A₃</i>
<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>T₂</i>	<i>R₄</i>	<i>R₁</i>	<i>T₂</i>	<i>T₂</i>
<i>T₃</i>	<i>T₃</i>	<i>T₃</i>	<i>T₃</i>	<i>T₃</i>	<i>R₂</i>	<i>T₆</i>	<i>T₈</i>	<i>R₂</i>	<i>R₂</i>
<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>T₅</i>	<i>R₄</i>	<i>R₁</i>	<i>T₅</i>	<i>T₅</i>
<i>T₆</i>	<i>T₆</i>	<i>T₇</i>	<i>T₆</i>	<i>T₆</i>	<i>R₂</i>	<i>A₄</i>	<i>A₄</i>	<i>R₂</i>	<i>R₂</i>
<i>R₃</i>	<i>R₃</i>		<i>R₃</i>	<i>R₃</i>					

Tabelle A 4-5: Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Waldrestholz – Hauptlauf Binnenwasserstraße

WIII/1	WIII/2	WIII/3	WIII/4	WIII/5	WIII/6	WIII/7	WIII/8	WIII/9	WIII/10
<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{4,6}</i>	<i>E_{4,6}</i>	<i>E_{7,8}</i>	<i>E_{9,5}</i>	<i>E_{9,5}</i>	<i>E_{10,5}</i>	<i>E_{10,5}</i>	<i>E_{10,5}</i>
<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>
<i>A₃</i>	<i>A₃</i>	<i>A₃</i>	<i>A₃</i>	<i>R₁</i>	<i>A₃</i>	<i>A₃</i>	<i>T₄</i>	<i>T₄</i>	<i>A₃</i>
<i>T₂</i>	<i>R₁</i>	<i>T₂</i>	<i>R₁</i>	<i>T₃</i>	<i>R₁</i>	<i>T₂</i>	<i>R₄</i>	<i>R₅</i>	<i>T₃</i>
<i>R₅</i>	<i>T₃</i>	<i>R₅</i>	<i>T₃</i>	<i>R₁</i>	<i>T₃</i>	<i>R₅</i>	<i>T₉</i>	<i>T₉</i>	<i>R₅</i>
<i>T₉</i>	<i>R₁</i>	<i>T₉</i>	<i>R₁</i>	<i>T₉</i>	<i>R₁</i>	<i>T₉</i>	<i>R₄</i>	<i>R₅</i>	<i>T₉</i>
<i>R₅</i>	<i>T₉</i>	<i>R₅</i>	<i>T₉</i>	<i>R₃</i>	<i>T₉</i>	<i>R₅</i>	<i>A₄</i>	<i>A₄</i>	<i>R₅</i>
	<i>R₃</i>		<i>R₃</i>		<i>R₃</i>				

Tabelle A 4-6: Ausgewählte Bereitstellungskonzepte für Kurzumtriebsholz – Hauptlauf Binnenwasserstraße

KIII/1	KIII/2	KIII/3	KIII/4	KIII/5	KIII/6	KIII/7	KIII/8	KIII/9	KIII/10
<i>E_{12,11}</i>	<i>E_{13,11}</i>	<i>E_{14,11}</i>	<i>E_{15,11}</i>	<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{4,5}</i>	<i>E_{16,11}</i>	<i>E_{17,5}</i>	<i>E_{17,5}</i>
<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>	<i>L₁</i>
<i>L₂</i>	<i>L₂</i>	<i>L₂</i>	<i>L₂</i>	<i>A₃</i>	<i>T₄</i>	<i>T₄</i>	<i>A₃</i>	<i>A₃</i>	<i>A₃</i>
<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>T₂</i>	<i>R₄</i>	<i>R₅</i>	<i>T₂</i>	<i>T₂</i>	<i>R₁</i>
<i>T₃</i>	<i>T₃</i>	<i>T₃</i>	<i>T₃</i>	<i>R₅</i>	<i>T₉</i>	<i>T₉</i>	<i>R₅</i>	<i>R₅</i>	<i>T₃</i>
<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>R₁</i>	<i>T₉</i>	<i>R₄</i>	<i>R₅</i>	<i>T₉</i>	<i>T₉</i>	<i>R₁</i>
<i>T₉</i>	<i>T₉</i>	<i>T₉</i>	<i>T₉</i>	<i>R₅</i>	<i>A₄</i>	<i>A₄</i>	<i>R₅</i>	<i>R₅</i>	<i>T₉</i>
<i>R₃</i>	<i>R₃</i>	<i>R₃</i>	<i>R₃</i>						<i>R₃</i>

Dimensionierung der Bereitstellungskonzepte

Zur Ermittlung und Abbildung der Verteilung potenzieller Lagerstandorte werden folgende Annahmen getroffen:

- für die kontinuierliche Biomassebereitstellung werden 1 bis n Lager benötigt, wobei deren Anzahl vom Brennstoffbedarf der jeweiligen Konversionsanlage und von der vordefinierten Lagergröße abhängig ist,
- die notwendige Menge an Biomasse wird zwischen den Lagern in gleicher Größenordnung aufgeteilt,
- das Einzugsgebiet eines jeden Lagers wird als quadratische Fläche abgebildet,
- alle Lager befinden sich im Mittelpunkt ihres Einzugsgebietes,
- der Biomasseanfall wird als in der Fläche gleichmäßig verteilt betrachtet.

Das Einzugsgebiet eines Lagers hat demnach die in Abb. A 4-1 dargestellte Struktur.

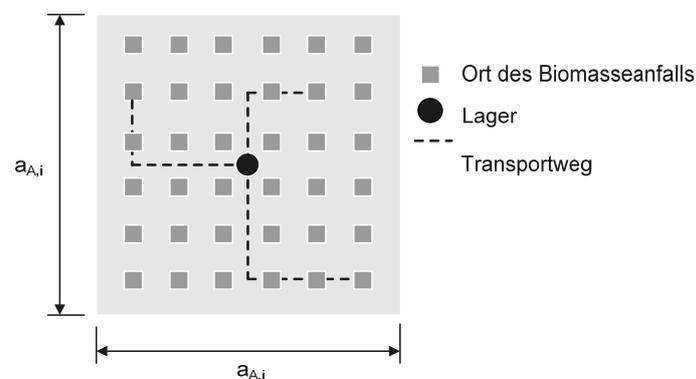


Abb. A 4-1: Einzugsfläche eines Lagers

Die Seitenlänge eines Lagereinzugsgebietes mit einem Lager am Ort i kann unter Verwendung von Gleichung (A 4-1) aus der festgelegten Lagergröße und dem flächenspezifischen Biomassepotenzial berechnet werden.

$$a_{A,i} = \sqrt{\frac{m_{L,i}}{p_A}} \text{ es gilt: } i \in L_O \quad (\text{A 4-1})$$

Im Rahmen der Bestimmung der mittleren Transportdistanz zwischen dem Ort des Biomasseanfalls und einem Lager kommt deren realer physischer Lage an dieser Stelle keine Bedeutung zu. Ferner ist der Ort i als Ort zu verstehen, an dem sich alle Quellen befinden und von dem aus die verfügbar gemachte Biomasse zum Ort j , an dem sich alle Lager befinden, transportiert wird. Die mittlere Transportdistanz zwischen dem Ort des Biomasseanfalls und einem Lager leitet sich aus der halben Seitenlänge der quadratischen Einzugsfläche ab (vgl. Gleichung (A 4-2)).

$$s_{T,ij} = \frac{1}{2} * a_{A,j} \text{ es gilt: } i \in A, j \in L_O \quad (\text{A 4-2})$$

Die Versorgung von Konversionsanlagen über Schiene bzw. Binnenwasserstraße bindet mindestens zwei Transportstufen ein. Hierbei ist zwischen dem straßengebundenen Vorlauf (von

einem Lagerstandort an einen Verladebahnhof bzw. Hafen) und dem Hauptlauf auf der Schiene bzw. der Binnenwasserstraße (von einem Verladebahnhof bzw. Hafen an die Konversionsanlage) zu unterscheiden. Für die Ermittlung der Transportentfernungen innerhalb des Vor- und Hauptlaufes werden folgende Annahmen getroffen:

- die gesamte Biomasseeinzugsfläche wird in Abhängigkeit der Anzahl an Verladebahnhöfen bzw. Binnenhäfen in rechteckige Teilflächen unterteilt, welche gleichzeitig das Einzugsgebiet eines Umschlagsstandortes beschreiben (vgl. Abb. A 4-2)

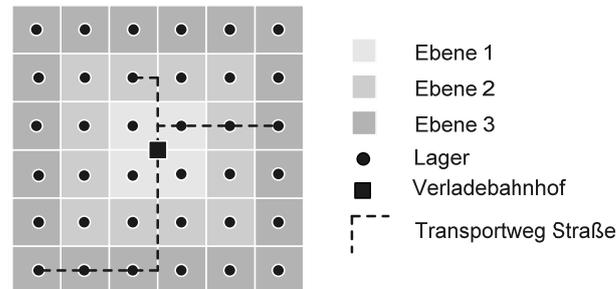


Abb. A 4-2: Einzugsgebiet eines Umschlagsstandortes

- die Verladebahnhöfe bzw. Binnenhäfen befinden sich im Mittelpunkt einer jeden Teilfläche,
- die Menge an Biomasse, die in einer Teilfläche anfällt, wird ausschließlich über die Lagerstruktur und die zugehörigen Verladebahnhöfe bzw. Häfen dieser Teilfläche bereitgestellt,

Die Anzahl der notwendigen Verladebahnhöfe bzw. Häfen errechnet sich aus der Größe des Einzugsgebietes eines Umschlagsstandortes, dem flächenspezifischen Biomassepotenzial der jeweiligen Teilflächen und dem jährlichen Brennstoffbedarf der Konversionsanlage. In Gleichung (A 4-3) ist beispielhaft die Ermittlung der Anzahl notwendiger Verladebahnhöfe beschrieben.

$$VB_n = \frac{m_{KVA}}{p_A A_{US}} \quad (\text{A 4-3})$$

In Abhängigkeit des Konversionsanlagenstandortes werden über eine online basierte Abfrage [131] die relevanten Umschlagsstandorte bestimmt. Der mögliche Aufbau einer Brennstoffbereitstellungsstruktur über die Schiene bzw. die Binnenwasserstraße ist in Abb. A 4-3 dargestellt. Dabei werden für die Brennstoffbereitstellung die Umschlagsstandorte nach ihrer Entfernung zur Konversionsanlage hierarchisiert. Die Einzugsgebiete werden nach ihrer Entfernung zur Konversionsanlage in die Biomassebereitstellung einbezogen. Sofern der Brennstoffbedarf nicht vollständig durch nahe gelegene Versorgungsgebiete gedeckt werden kann, ist die Integration von Einzugsgebieten notwendig, die eine höhere Entfernung zur Senke aufweisen. Mit zunehmender Entfernung zwischen den Umschlagsstandorten und der Konversionsanlage nimmt die Nutzung der zugehörigen Einzugsgebiete ab.

Der Vorlauf von einem Lagerstandort zu einem Verladebahnhof bzw. Binnenhafen wird mit Lastkraftwagen durchgeführt. Die Ermittlung der Transportdistanzen erfolgt in Anlehnung an die in Kapitel 4.3.3 beschriebene Vorgehensweise. Die mittlere Transportdistanz von einem Verladebahnhof bzw. Binnenhafen zur Konversionsanlage ergibt sich aus der Anzahl an Ver-

ladebahnhöfen bzw. Binnenhäfen und der jeweiligen Entfernung zwischen der Konversionsanlage und den Umschlagsstandorten.

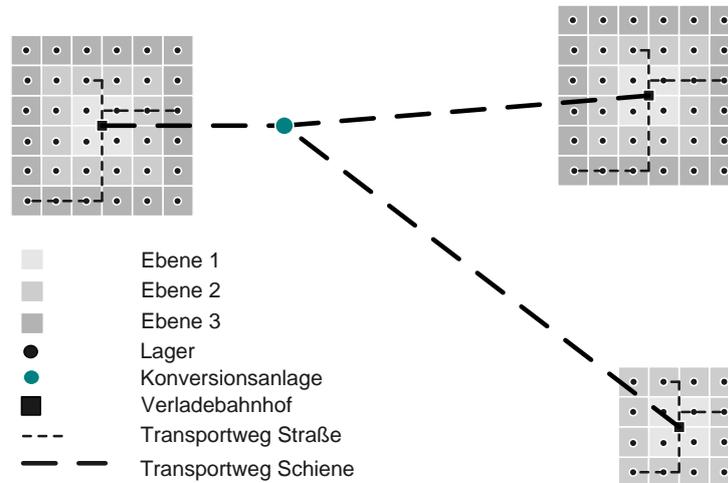


Abb. A 4-3: Versorgungslayout für drei Verladebahnhöfe

Zur Bestimmung der mittleren Transportentfernung des Hauptlaufes wird der Mittelwert der Summe der Transportdistanzen zwischen den einzelnen Verladebahnhöfen bzw. Binnenhäfen und der Konversionsanlage gebildet. In Gleichung (A 4-4) ist beispielhaft für den Binnenschifftransport die Ermittlung beschrieben.

$$s_{T,ij} = \frac{1}{n_{BSH}} \sum_{k=1}^{n_{BSH}} s_{K,ijk} \quad \text{es gilt: } i \in U_{BSH} \text{ und } j \in B \quad (\text{A 4-4})$$

Nachfolgend sind in Gleichung (A 4-1) bis Gleichung (A 4-4) die Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Gesamtfahrzeit eines Verkehrsmittels, der Zeit für ein Last- bzw. Leerfahrt sowie der Umschlags- bzw. Übergabezeit gegeben.

$$t_{GesTM} = t_{Last} + t_{Leer} + t_{Übergabe} \quad (\text{A 4-1})$$

$$t_{Last} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_{i,j,Last} \frac{s_{T,ij}}{v_{Fzg}} \quad (\text{A 4-2})$$

$$t_{Leer} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_{i,j,Leer} \frac{s_{T,ij}}{v_{Fzg}} \quad (\text{A 4-3})$$

$$t_{Übergabe} = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m k_{i,j,Last} \quad (\text{A 4-4})$$

Tabelle A 4-7 gibt einen Überblick zu den Bandbreiten für mittlere Geschwindigkeiten von ausgewählten Verkehrsmitteln.

Tabelle A 4-7: Durchschnittsgeschwindigkeiten ausgewählter Verkehrsmittel [62], [196]

Technologie	Geschwindigkeit in km/h	
	minimal	maximal
Landwirtschaftlicher Gliederzug	10,0	20,0
Lastkraftwagen	20,0	42,0
Bahn	45,0	80,0
Binnenschiff	10,5	12,7

In Tabelle A 4-8 bis Tabelle A 4-11 ist eine Übersicht zur Arbeitsmittellanzahl für die betrachteten Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz gegeben.

Tabelle A 4-8: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Straße

WRH Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel	KUP Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel
WI/1	88	KI/1	162
WI/2	85	KI/2	55
WI/3	71	KI/3	37
WI/4	36	KI/4	32
WI/5	33	KI/5	39
WI/6	38	KI/6	153
WI/7	36	KI/7	67
WI/8	39	KI/8	67
WI/9	36	KI/9	36
WI/10	37	KI/10	69

Tabelle A 4-9: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Schiene

WRH Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel	KUP Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel
WII/1	34	KII/1	34
WII/2	31	KII/2	28
WII/3	31	KII/3	30
WII/4	28	KII/4	24
WII/5	33	KII/5	28
WII/6	34	KII/6	50
WII/7	35	KII/7	48
WII/8	32	KII/8	48
WII/9	33	KII/9	29
WII/10	33	KII/10	50

Tabelle A 4-10: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Schiene

WRH Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel	KUP Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel
WII/1	212	KII/1	230
WII/2	205	KII/2	188
WII/3	195	KII/3	205
WII/4	189	KII/4	162
WII/5	220	KII/5	192
WII/6	227	KII/6	316
WII/7	225	KII/7	304
WII/8	204	KII/8	310
WII/9	209	KII/9	185
WII/10	208	KII/10	321

Tabelle A 4-11: Anzahl notwendiger Arbeitsmittel für Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL} über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße

WRH Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel	KUP Konzepte	Anzahl Arbeitsmittel
WIII/1	236	KIII/1	288
WIII/2	259	KIII/2	225
WIII/3	220	KIII/3	203
WIII/4	243	KIII/4	230
WIII/5	250	KIII/5	339
WIII/6	272	KIII/6	323
WIII/7	258	KIII/7	320
WIII/8	232	KIII/8	208
WIII/9	205	KIII/9	345
WIII/10	242	KIII/10	370

Bewertung und Ableitung logistisch effizienter Bereitstellungskonzepte

Die Ausprägung der gewichteten Logistikkennzahlen für die untersuchten Bereitstellungskonzepte ist geordnet nach den jeweiligen Konversionsanlagenstandorten und den Verkehrsträgern des Hauptlauf (Straße, Schiene und Binnenwasserstraße) in Abb. A 4-4 bis Abb. A 4-27 gegeben.

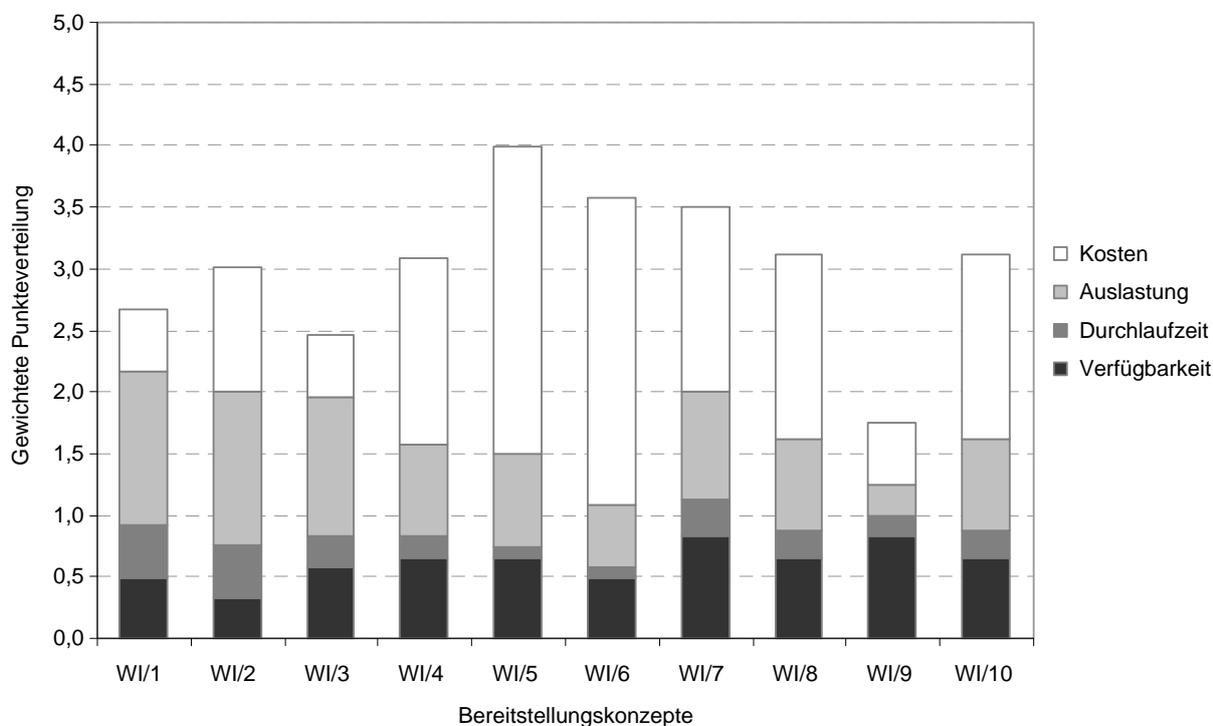


Abb. A 4-4: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Greiz

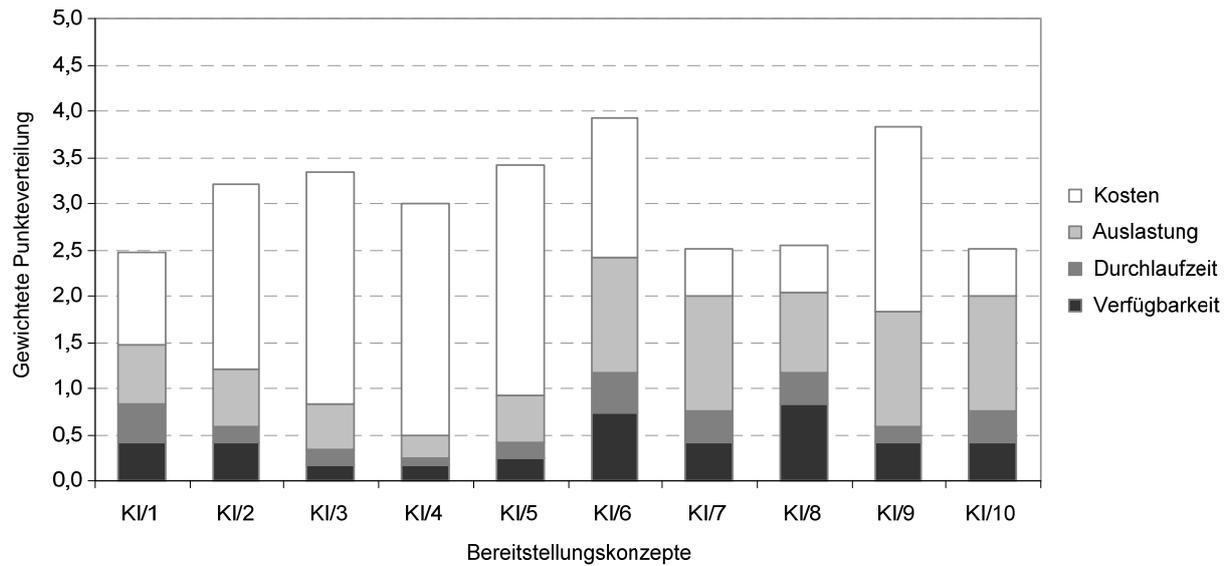


Abb. A 4-5: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Greiz

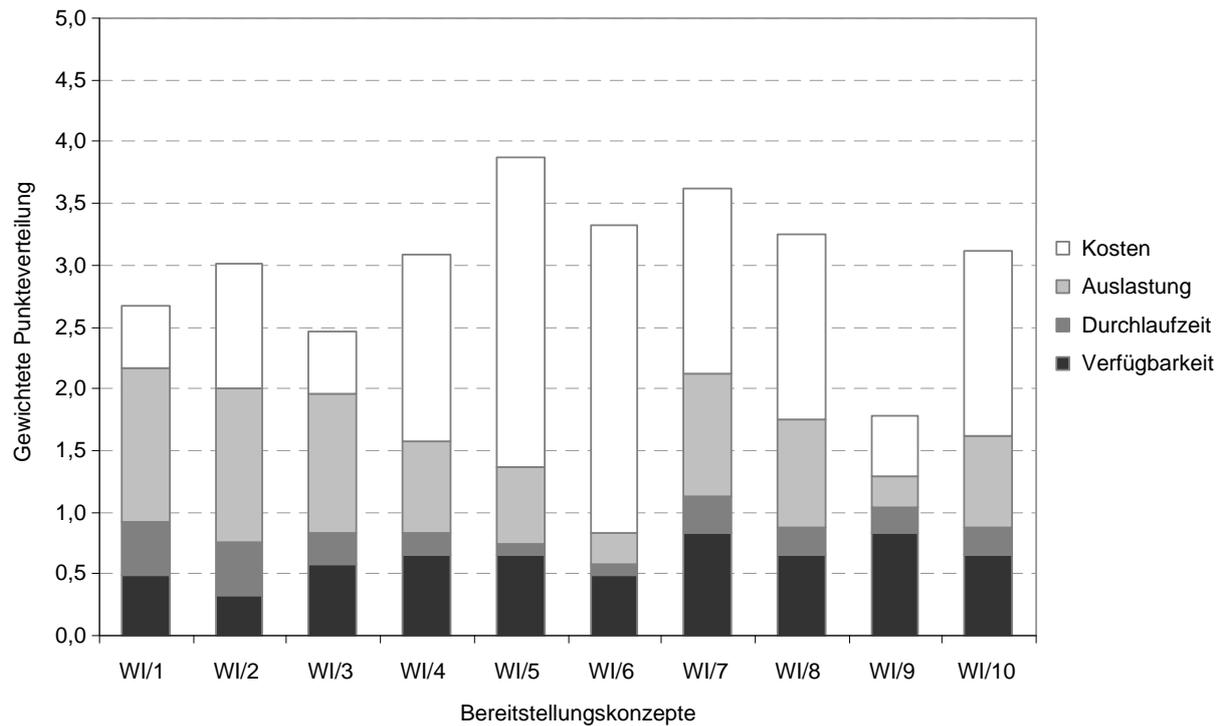


Abb. A 4-6: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Rostock

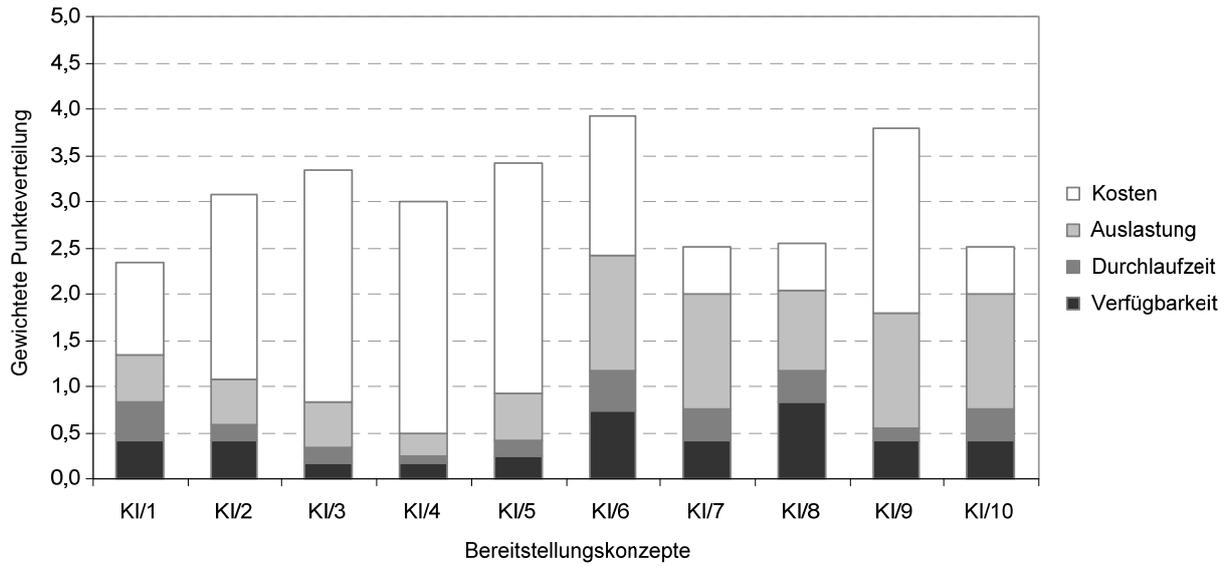


Abb. A 4-7: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Rostock

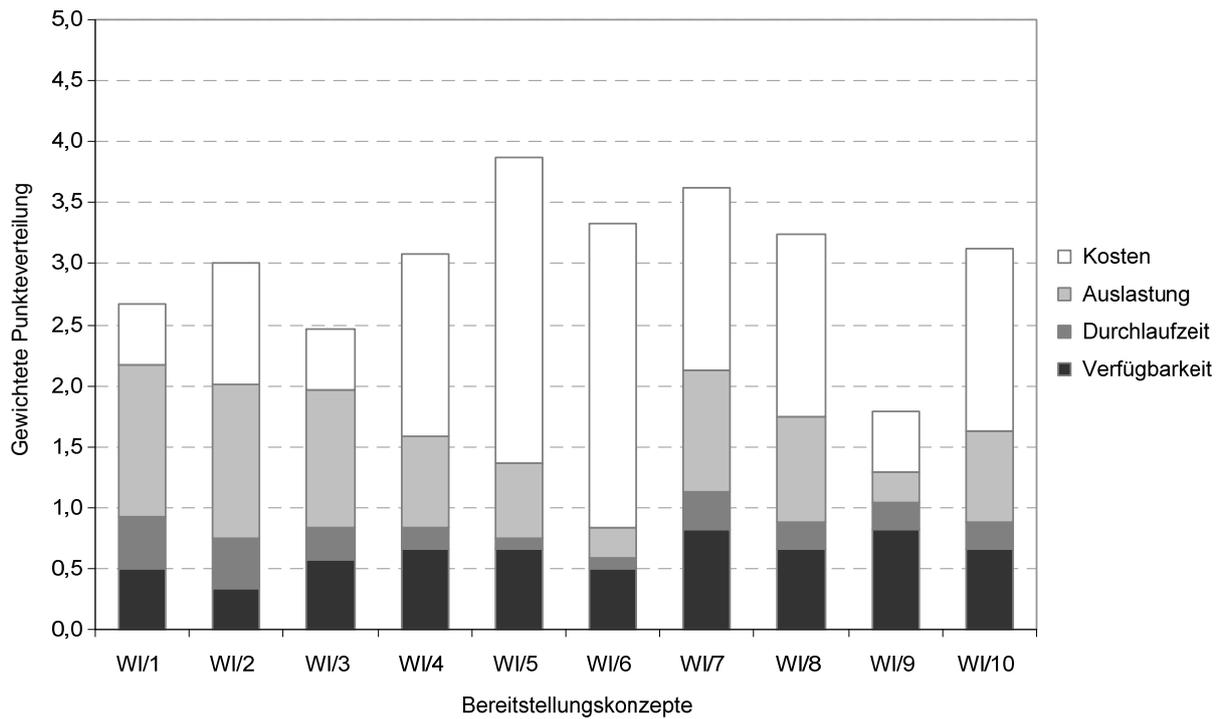


Abb. A 4-8: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Staßfurt

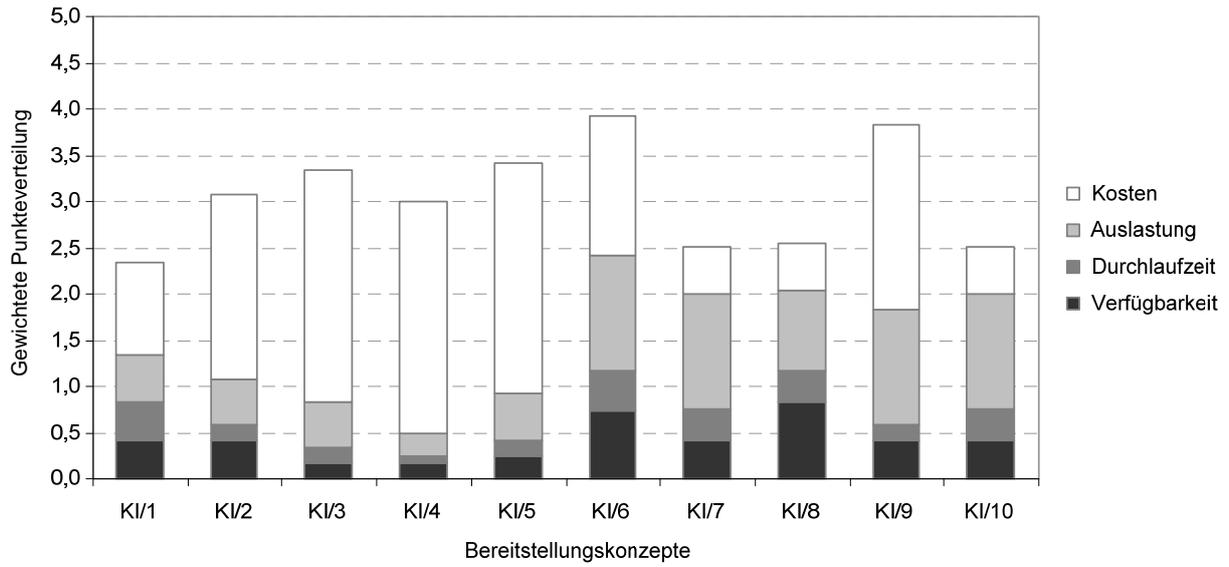


Abb. A 4-9: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an den Standort Staßfurt

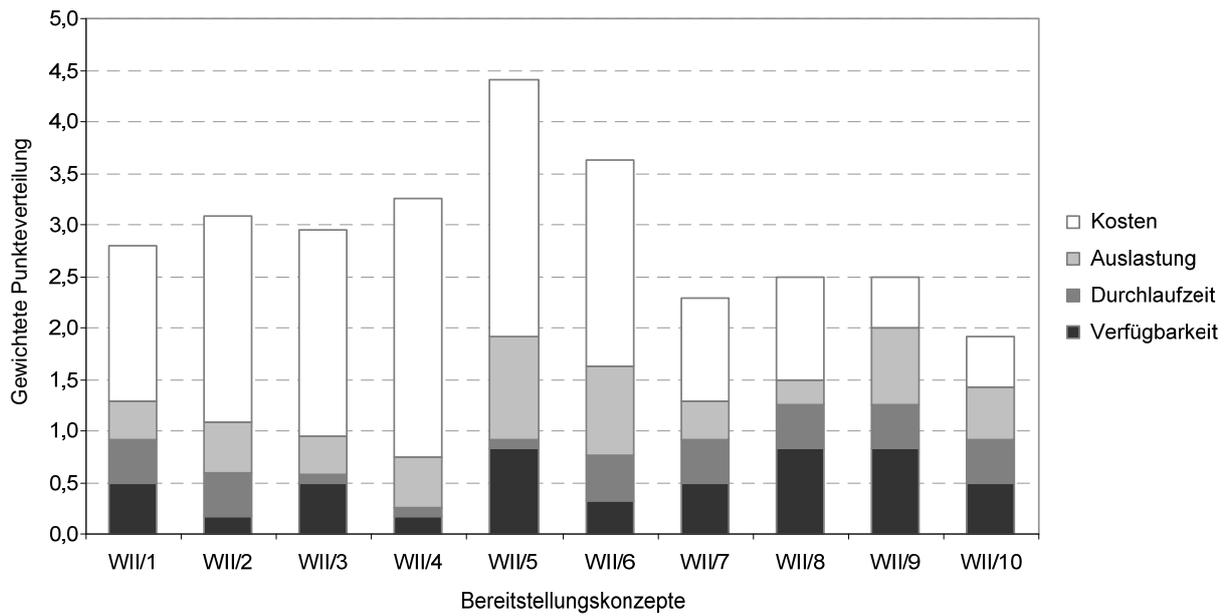


Abb. A 4-10: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Greiz

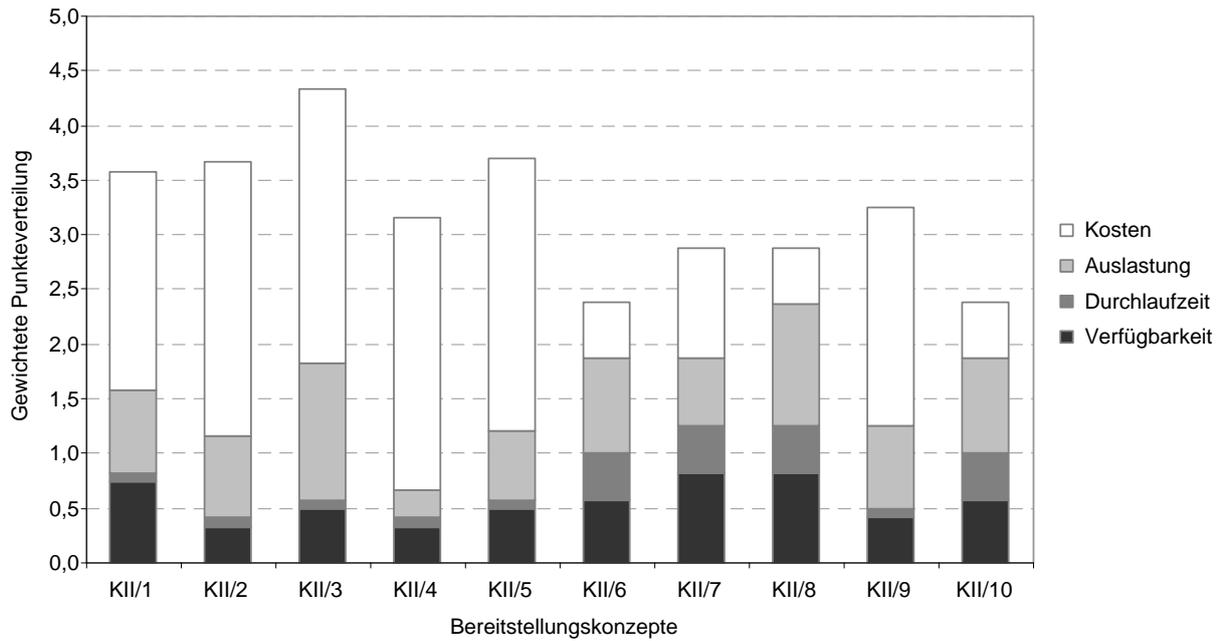


Abb. A 4-11: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Greiz

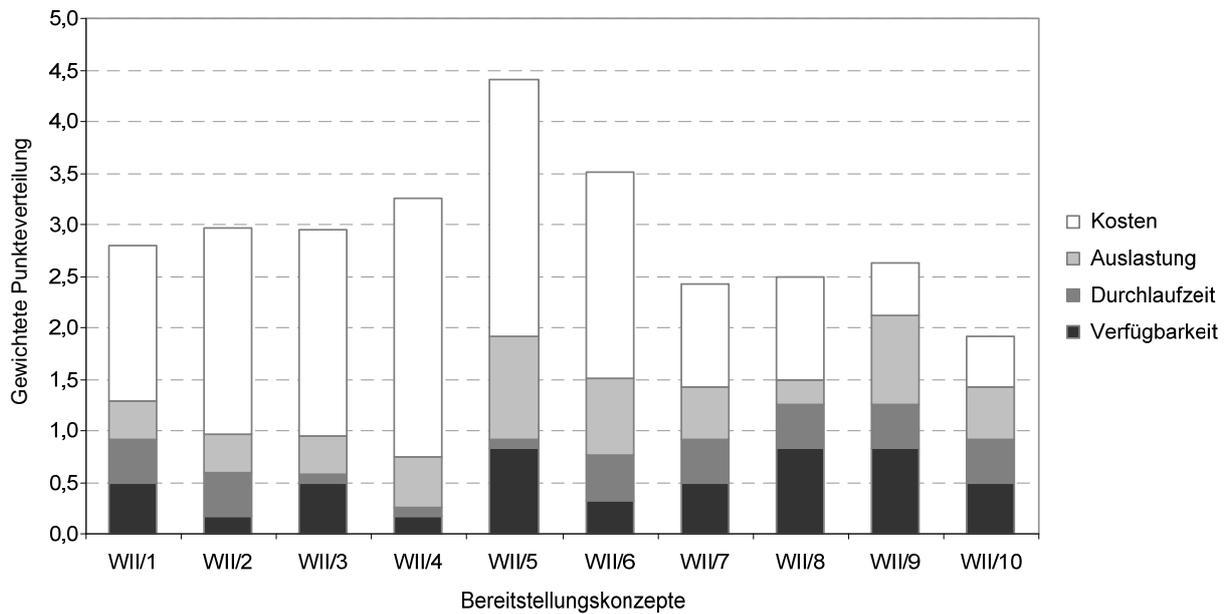


Abb. A 4-12: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Rostock

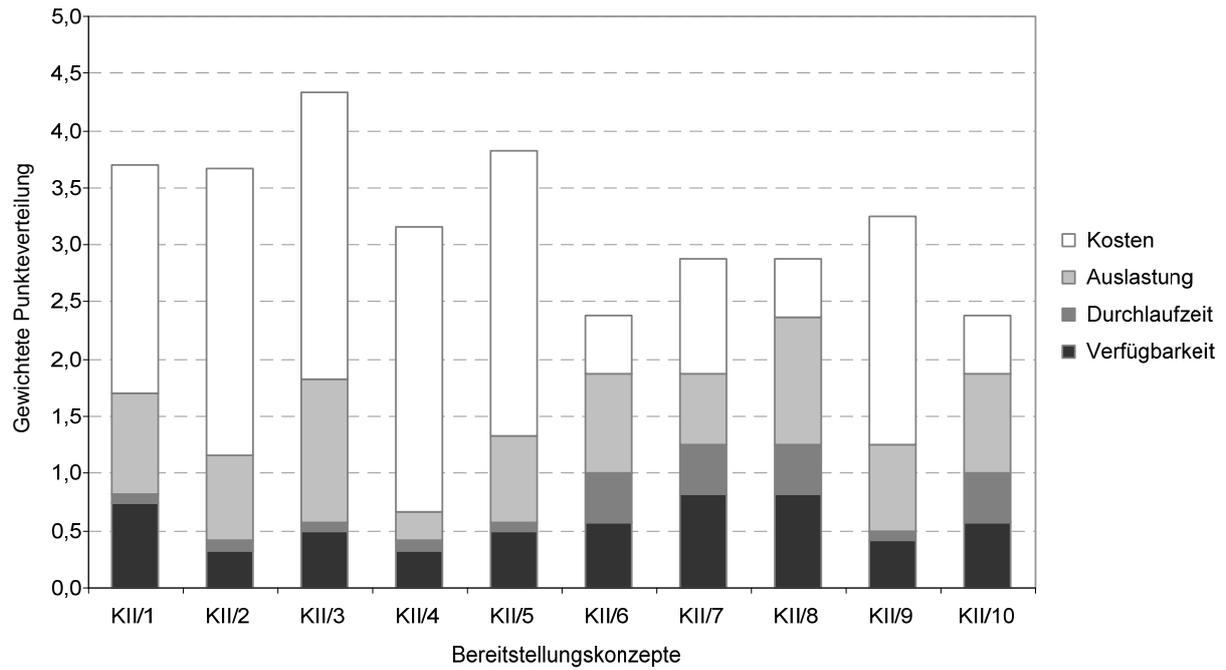


Abb. A 4-13: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Rostock

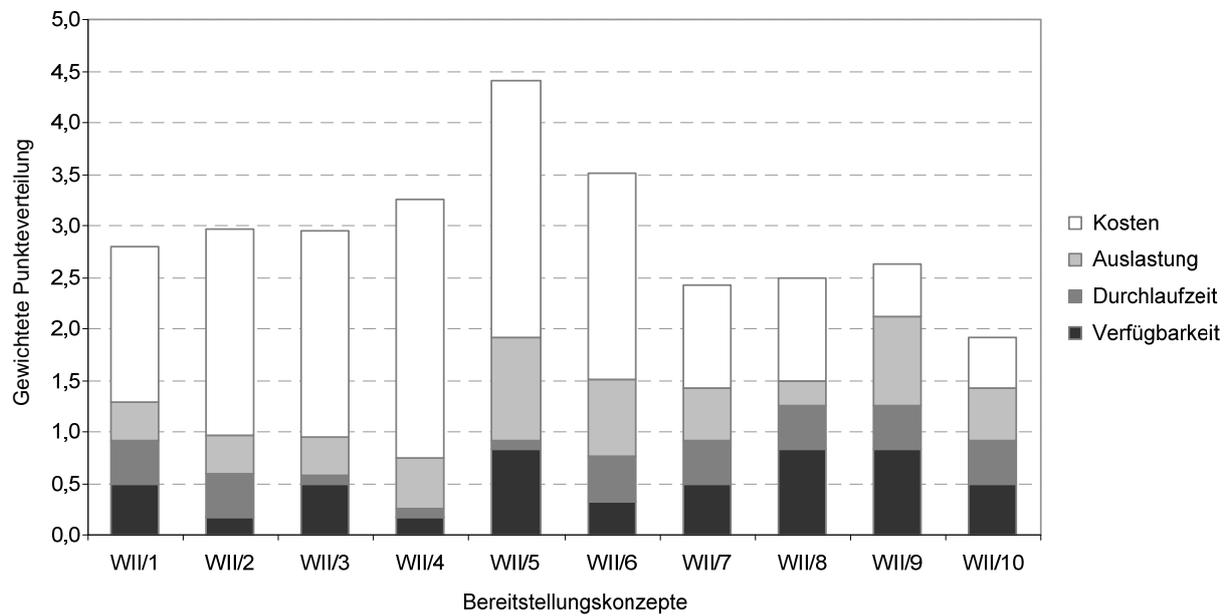


Abb. A 4-14: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Staßfurt

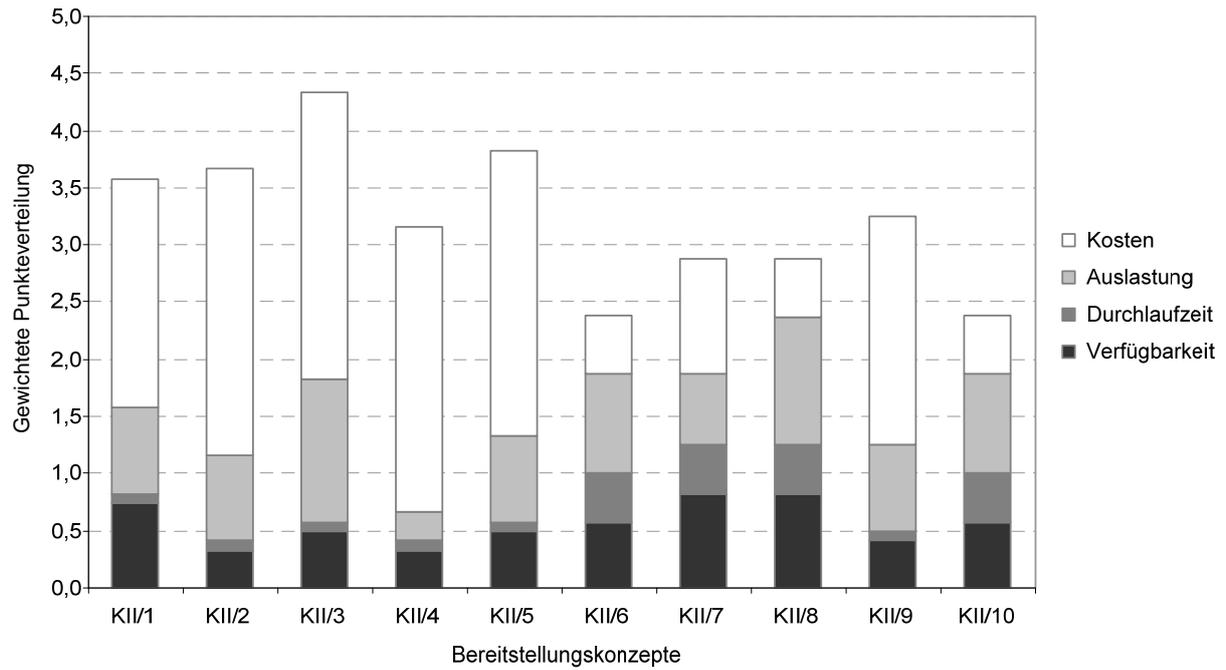


Abb. A 4-15: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Staßfurt

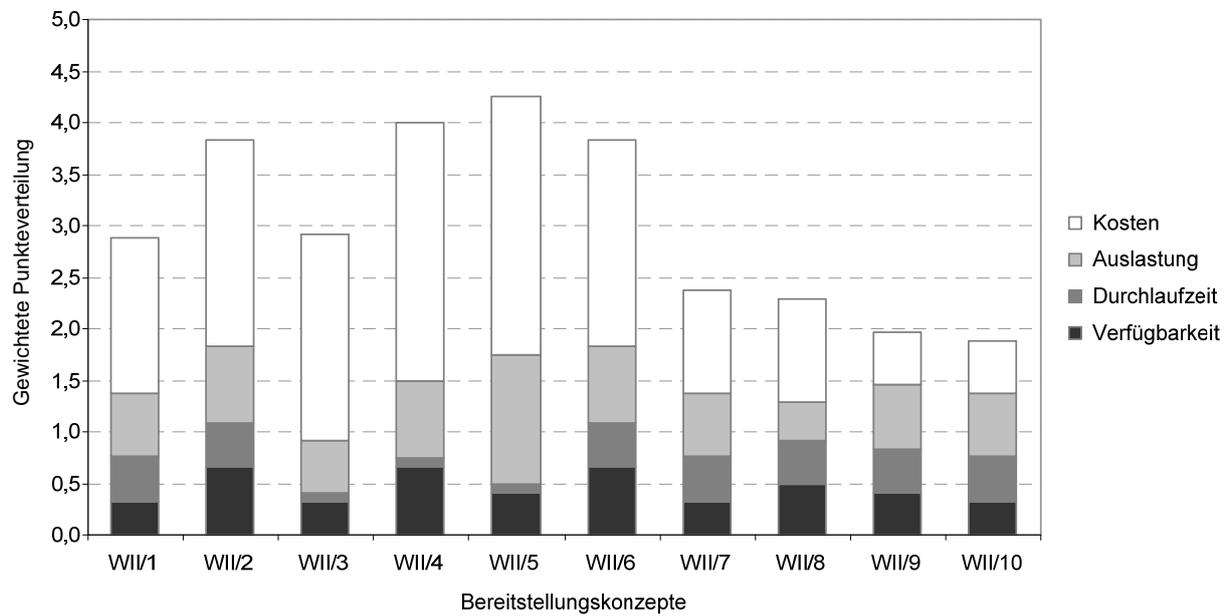


Abb. A 4-16: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Anklam

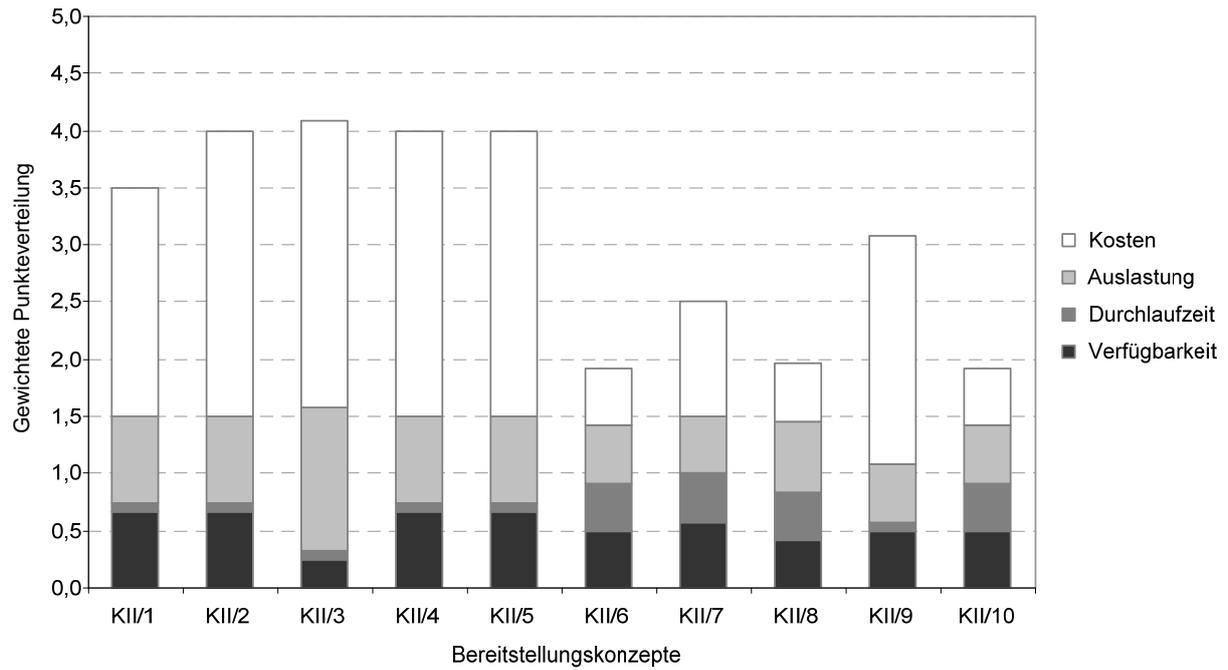


Abb. A 4-17: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Anklam

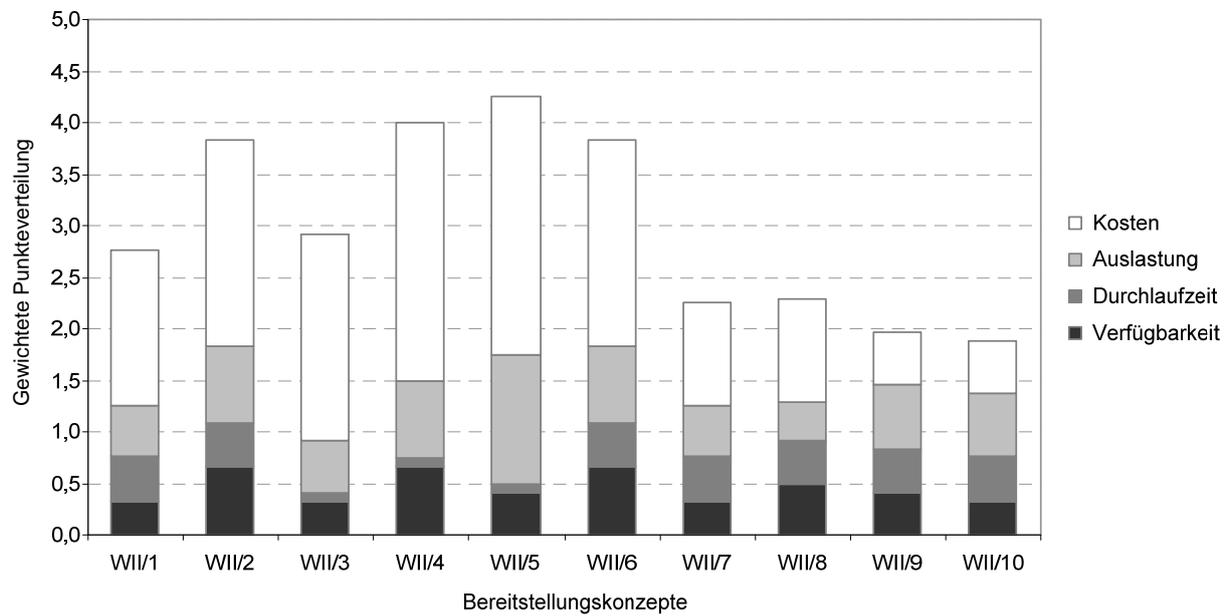


Abb. A 4-18: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Schwedt

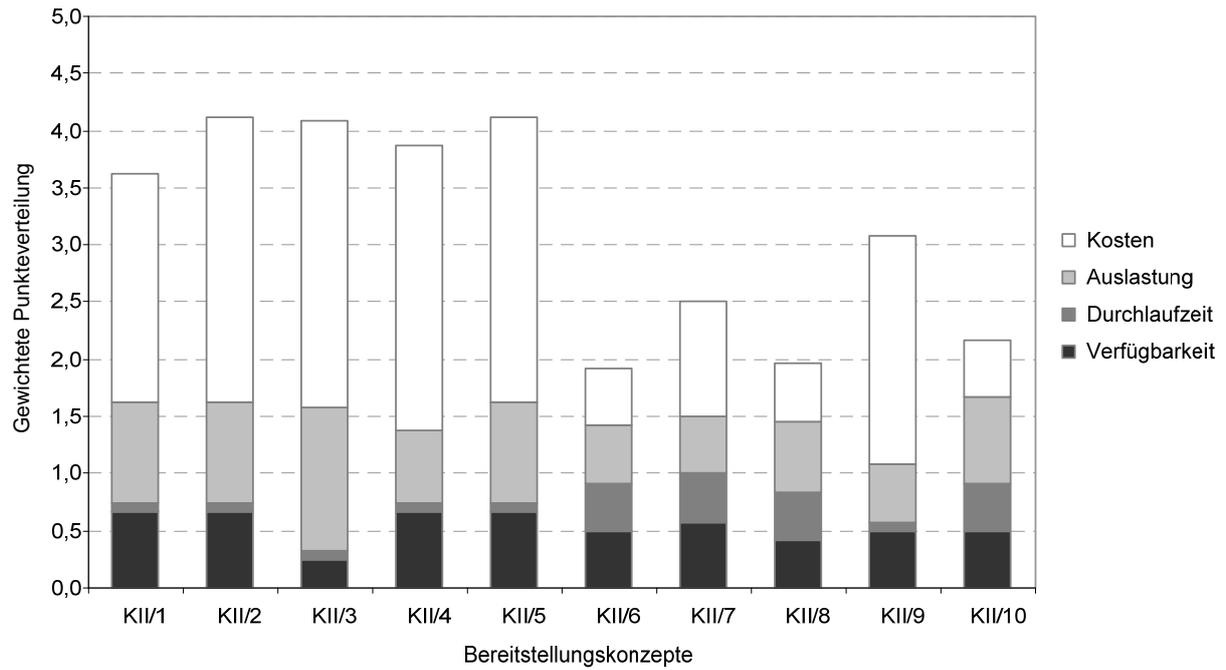


Abb. A 4-19: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Schwedt

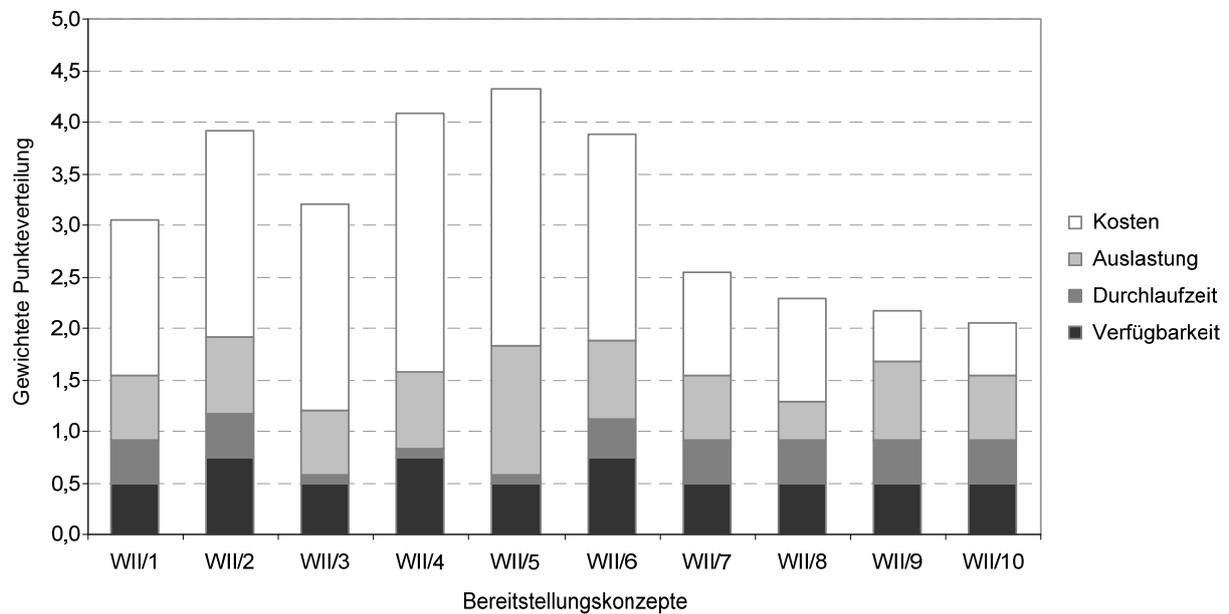


Abb. A 4-20: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Völklingen

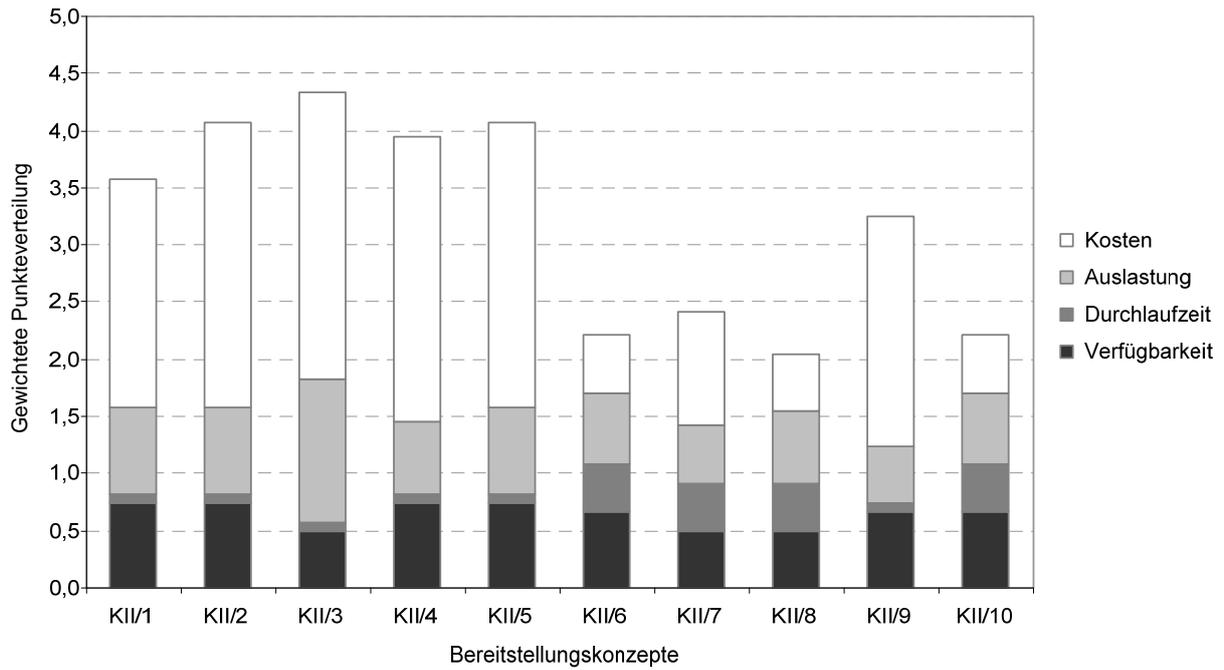


Abb. A 4-21: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an den Standort Völklingen

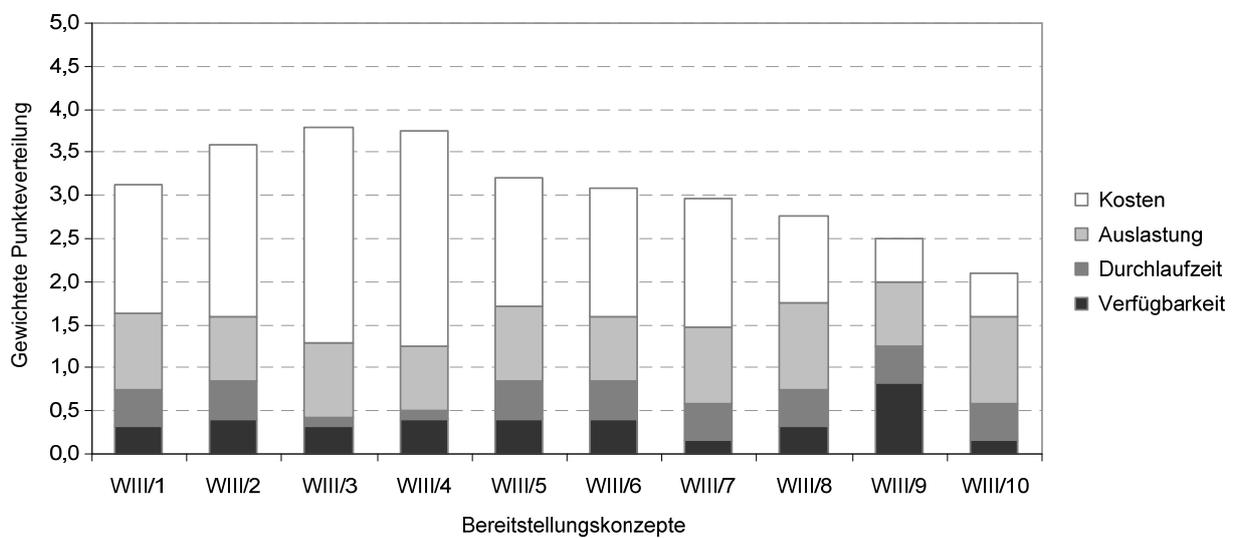


Abb. A 4-22: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Anklam

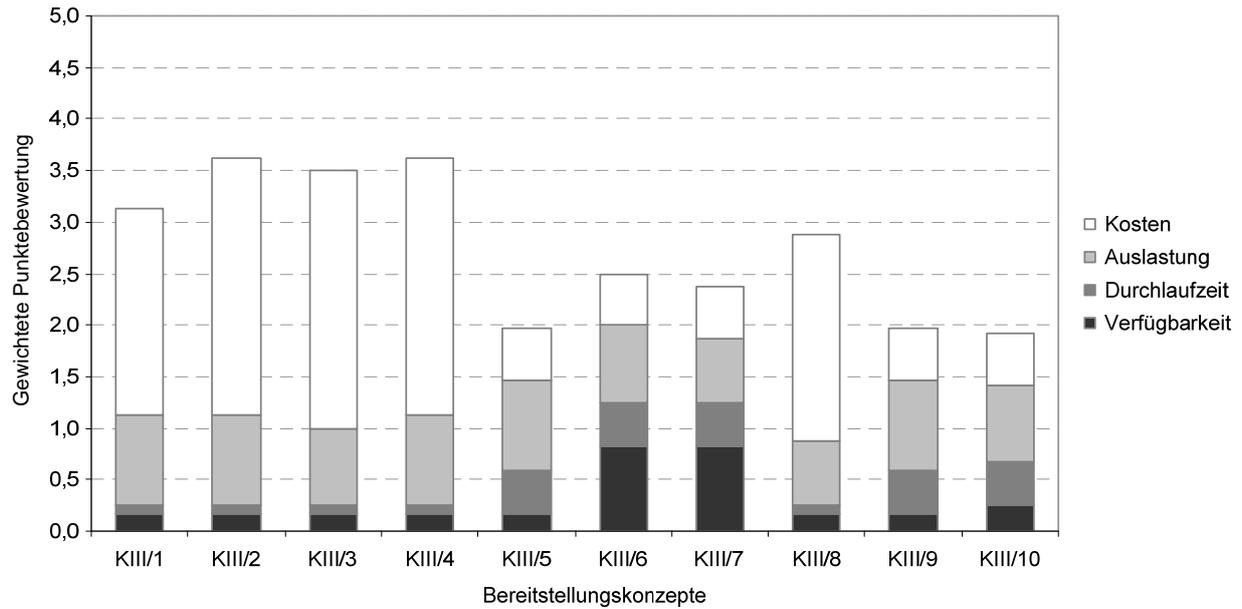


Abb. A 4-23: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Anklam

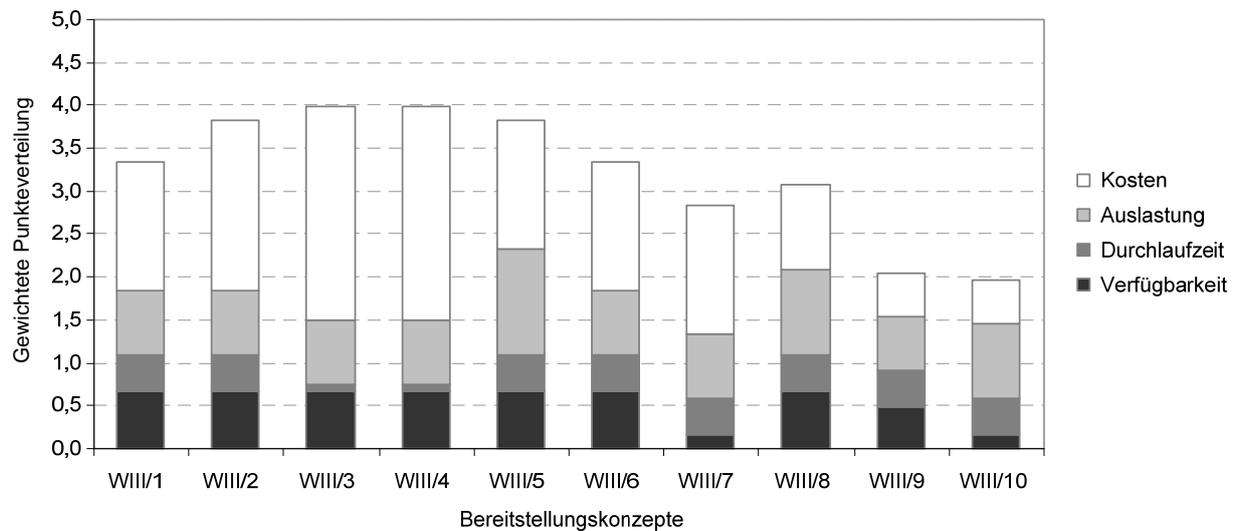


Abb. A 4-24: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Schwedt

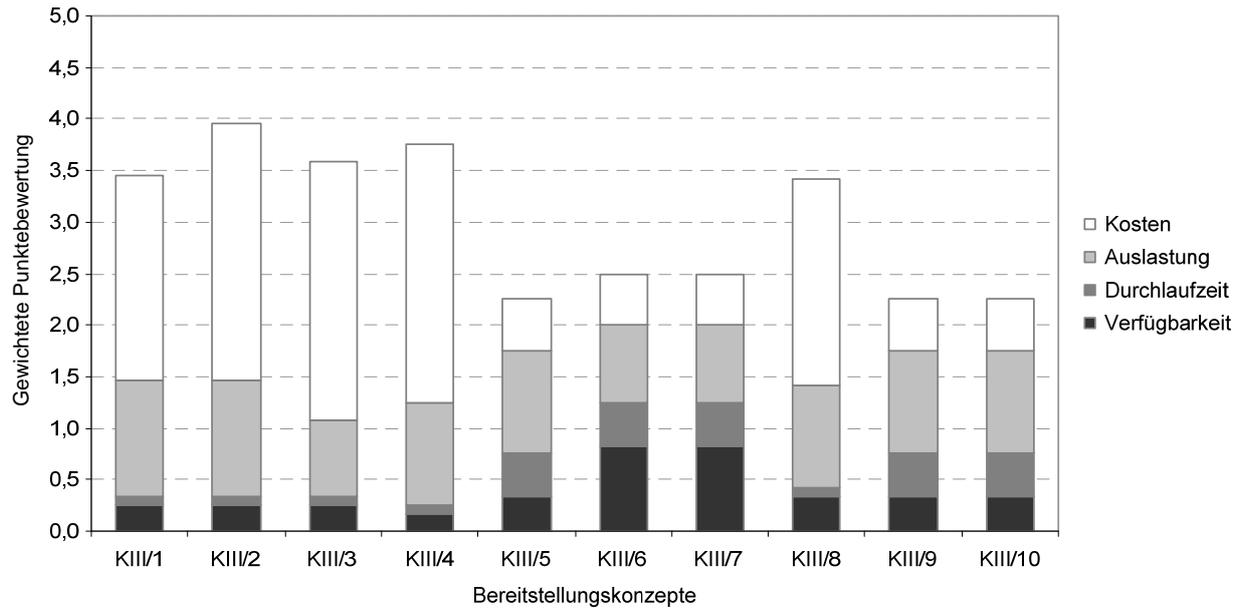


Abb. A 4-25: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Schwedt

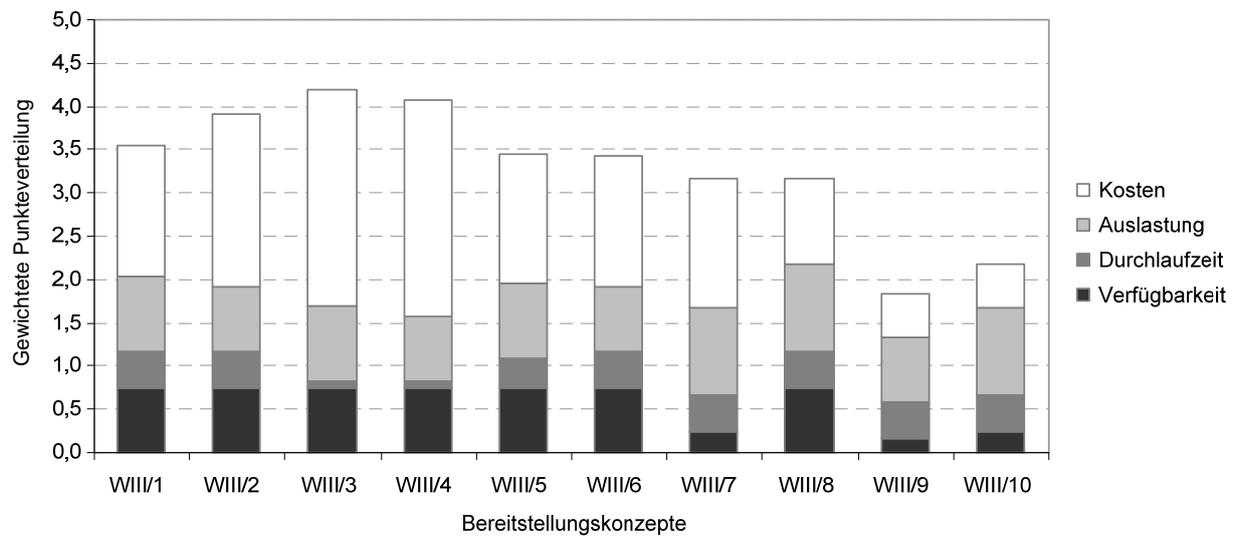


Abb. A 4-26: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Waldrestholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Völklingen

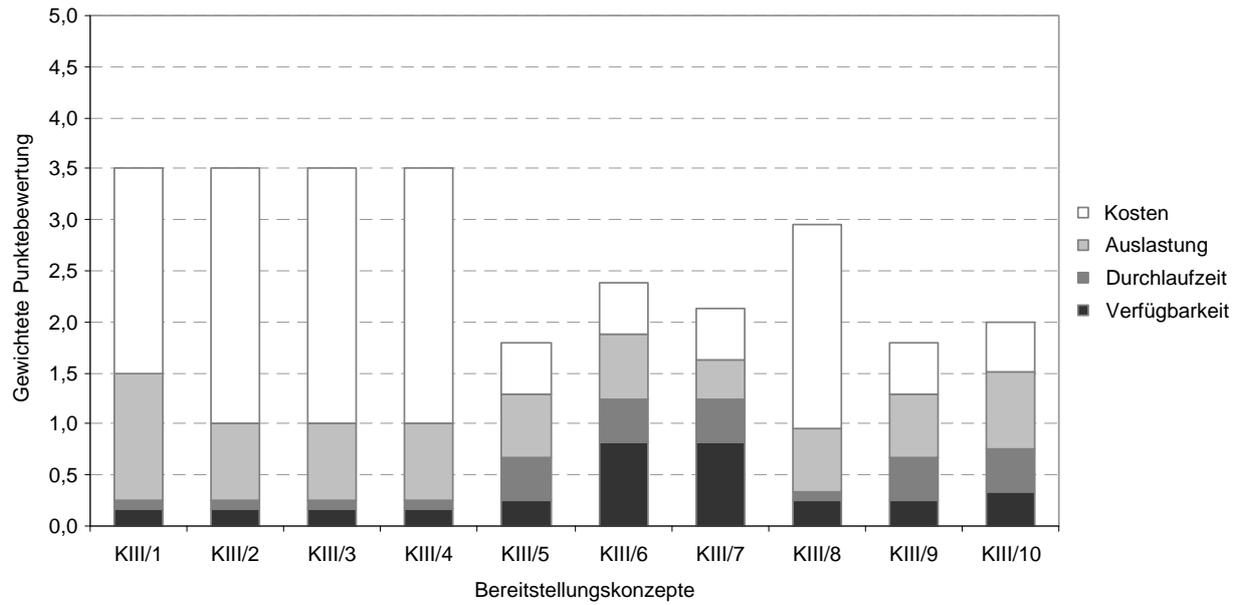


Abb. A 4-27: Ausprägung der Logistikkennzahlen für die Bereitstellung von Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an den Standort Völklingen

A.5 Optimierung der Biomassebereitstellung

Nachfolgend werden in Abhängigkeit der Konversionsanlagengröße und der möglichen Verkehrsträger des Hauptlaufes die Bereitstellungskosten und Treibhausgasemissionen detailliert für die optimalen Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz vorgestellt.

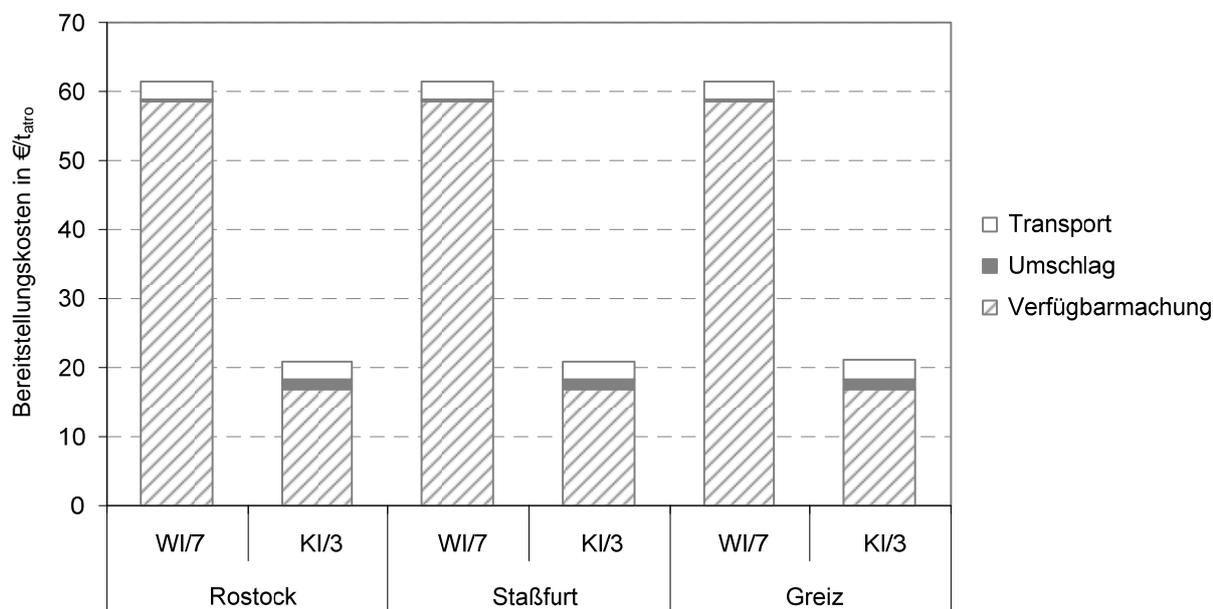


Abb. A 5-1: Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

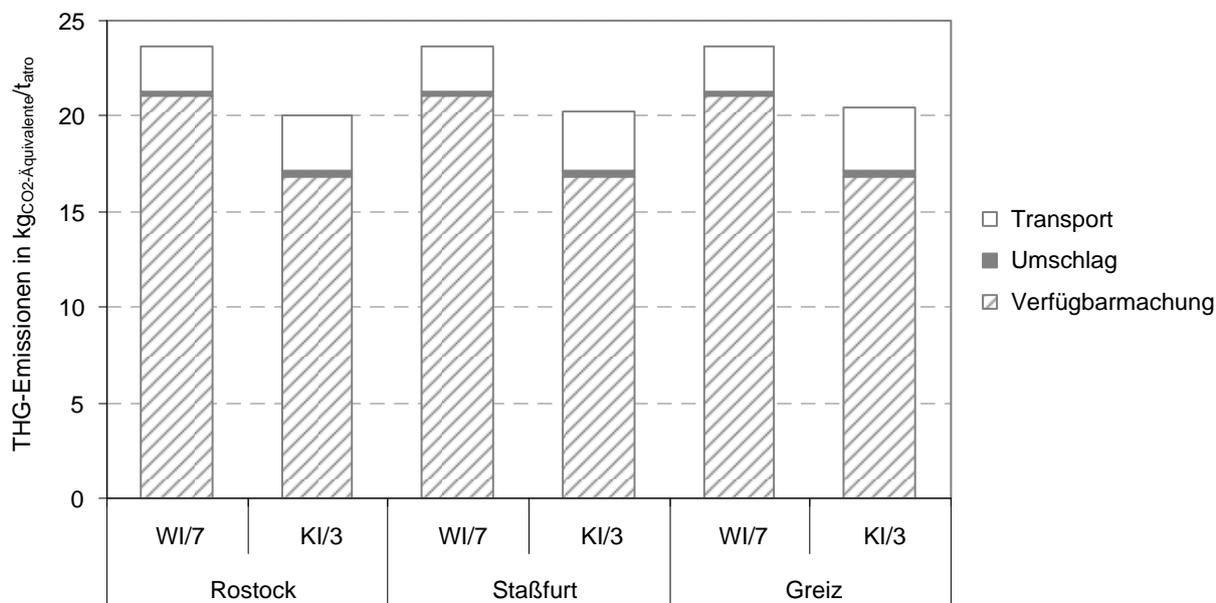


Abb. A 5-2: Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Straße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

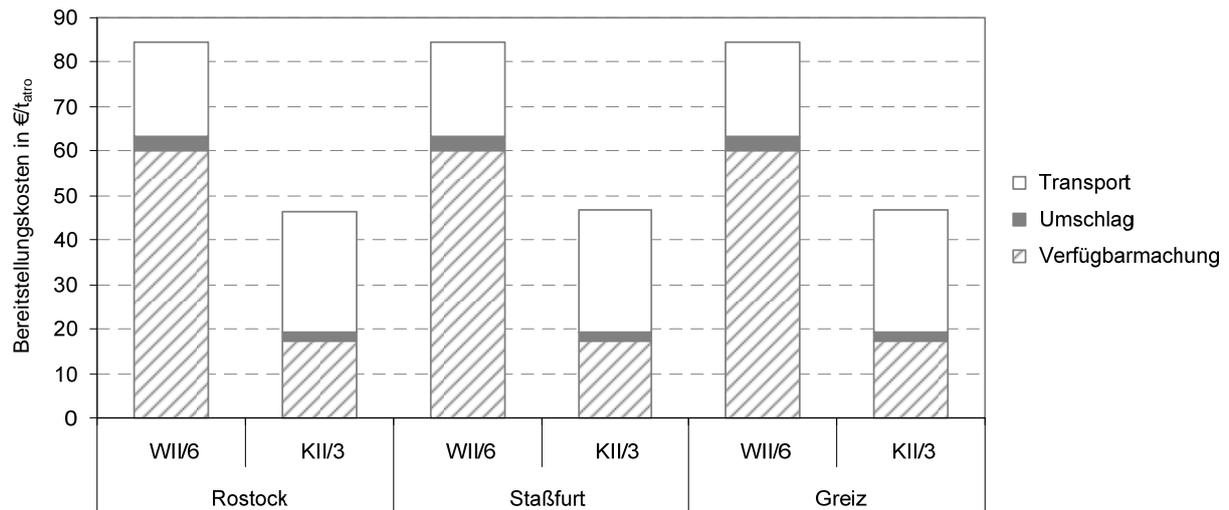


Abb. A 5-3: Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

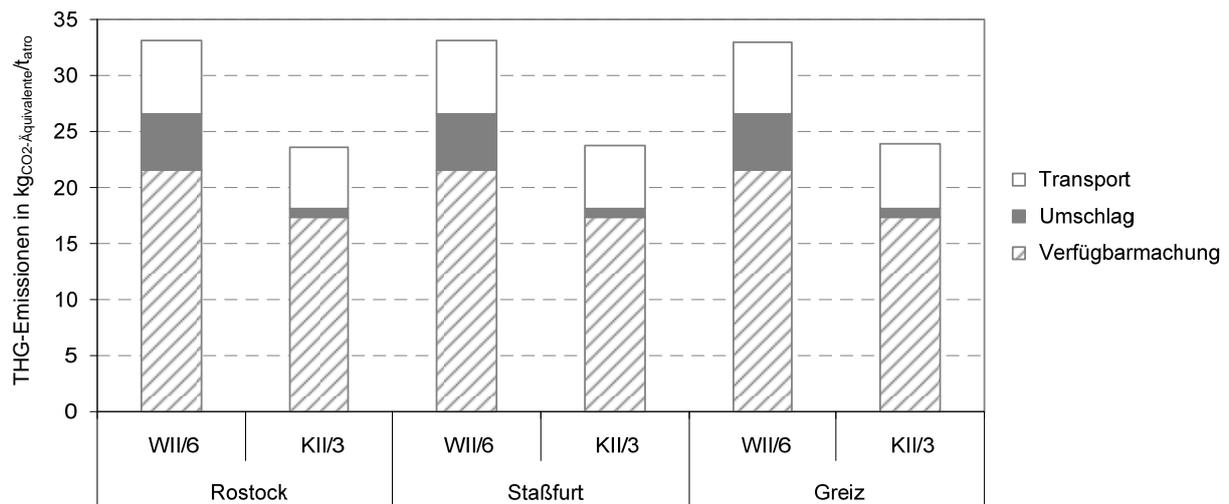


Abb. A 5-4: Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 30 MW_{BWL}

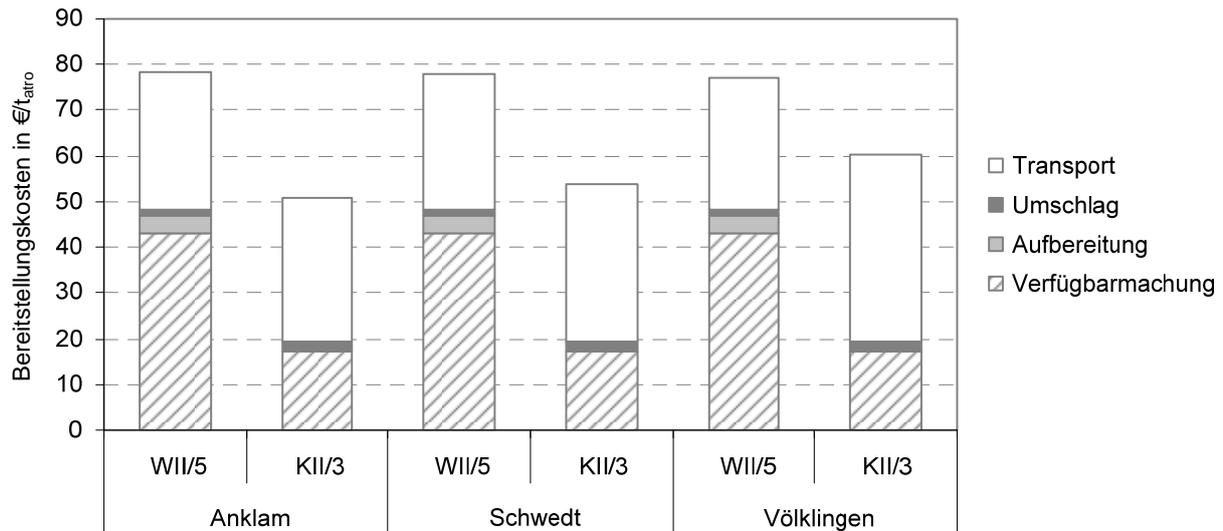


Abb. A 5-5: Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

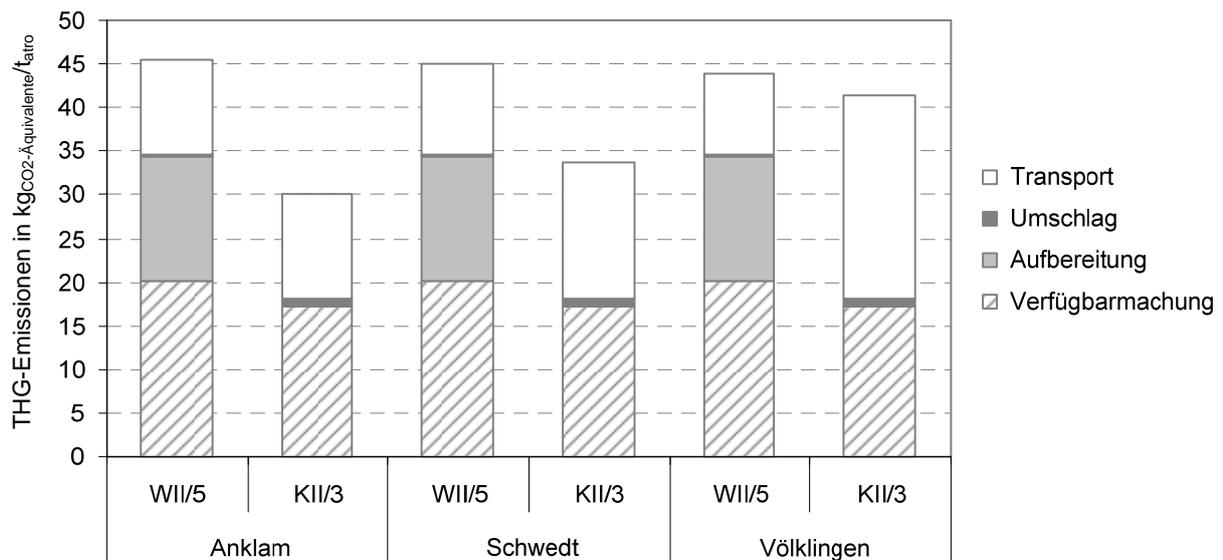


Abb. A 5-6: Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Schiene an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

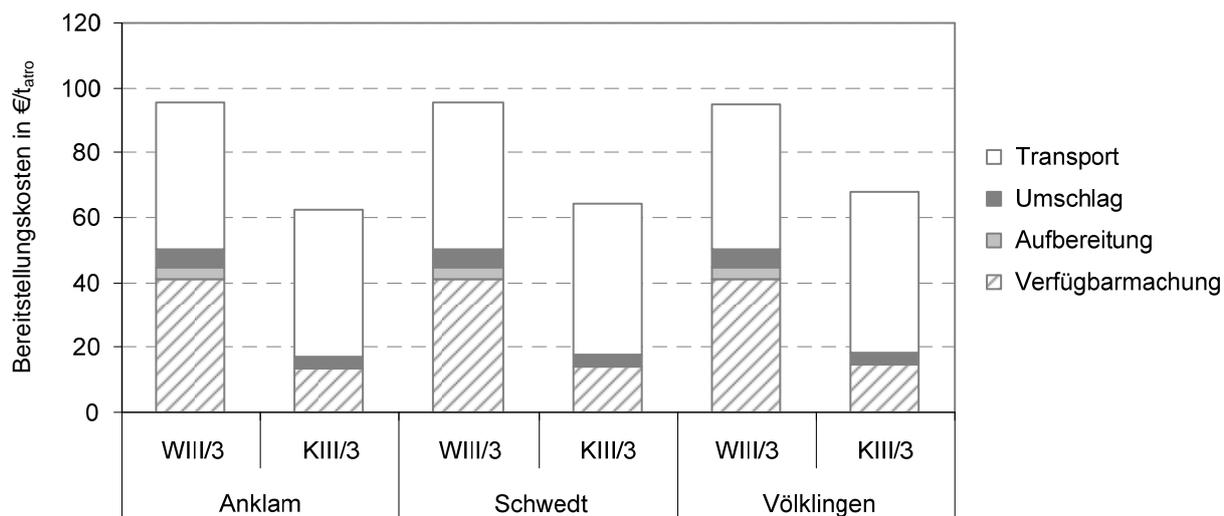


Abb. A 5-7: Bereitstellungskosten für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}

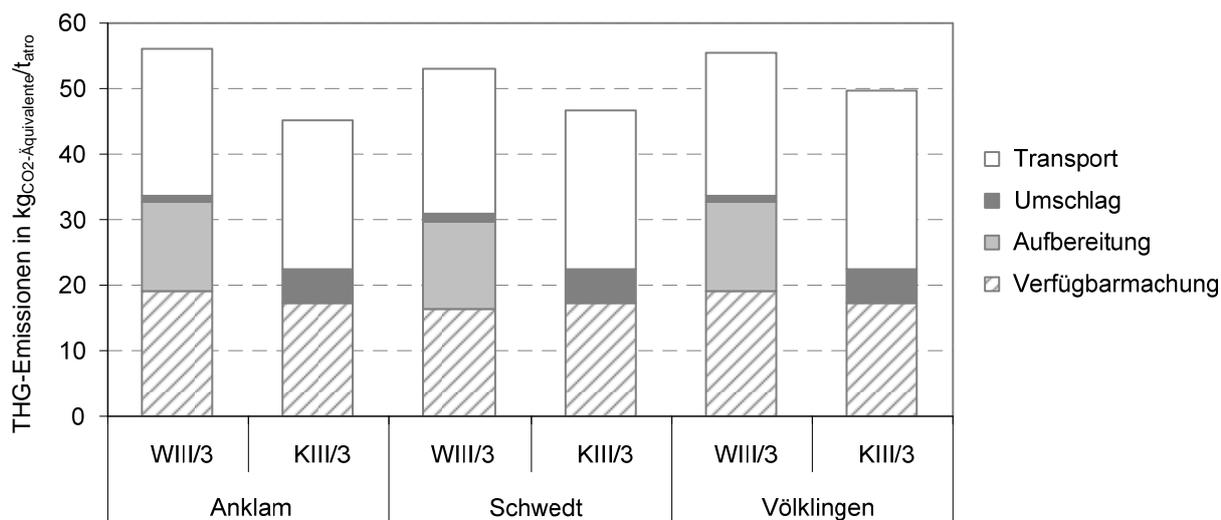
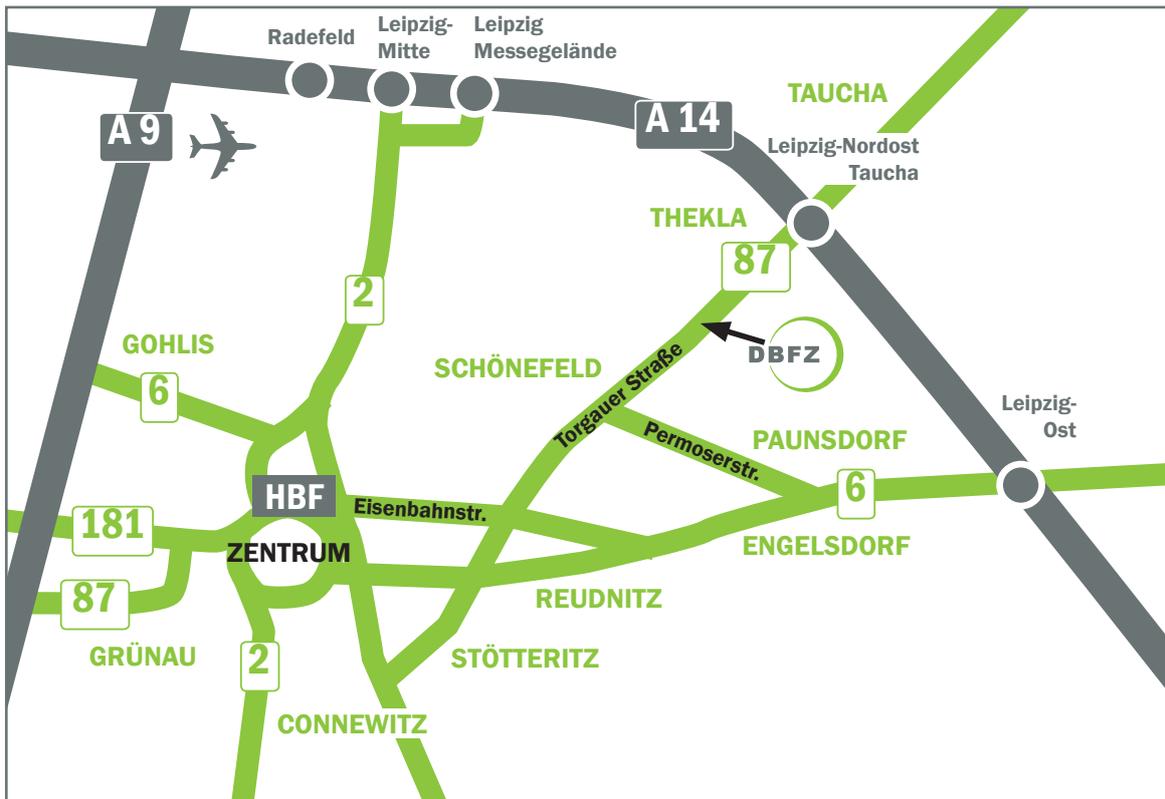


Abb. A 5-8: Treibhausgasemissionen für ökonomisch-ökologisch optimale Bereitstellungskonzepte von Waldrest- und Kurzumtriebsholz über den Verkehrsträger Binnenwasserstraße an Bio-SNG-Anlagen im Leistungsbereich von 200 MW_{BWL}



Anfahrt

... mit dem Zug:

Ankunft Leipzig Hauptbahnhof; Straßenbahn Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommerfeld) bis Haltestelle „Bautzner Straße“; Straße überqueren, Parkplatz rechts liegen lassen und geradeaus durch das Eingangstor Nr. 116, nach ca. 150 m links.

... mit dem Auto:

Über die Autobahn A 14; Abfahrt Leipzig Nord-Ost, Taucha; Richtung Leipzig; Richtung Zentrum, Innenstadt; nach Jet Tankstelle links einfahren (siehe „... mit dem Zug“).

... mit der Straßenbahn

Linie 3/3E Richtung Taucha/Sommerfeld bis zur Haltestelle „Bautzner Straße“ (siehe „... mit dem Zug“).

Impressum

Herausgeber

DBFZ Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig, mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Kontakt

DBFZ Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
D-04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
Fax: +49 (0)341 2434-133
info@dbfz.de
www.dbfz.de

Geschäftsführung

Prof. Dr.-Ing. Frank Scholwin
(wissenschaftlicher Geschäftsführer)
Daniel Mayer
(administrativer Geschäftsführer)

DBFZ Report Nr. 2

ISSN: 2190-7943

Bilder: Renet, www.renet.at, Pixelio

Druck: Fischer Druck

DBFZ, Leipzig 2010

© Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne die schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM.

