

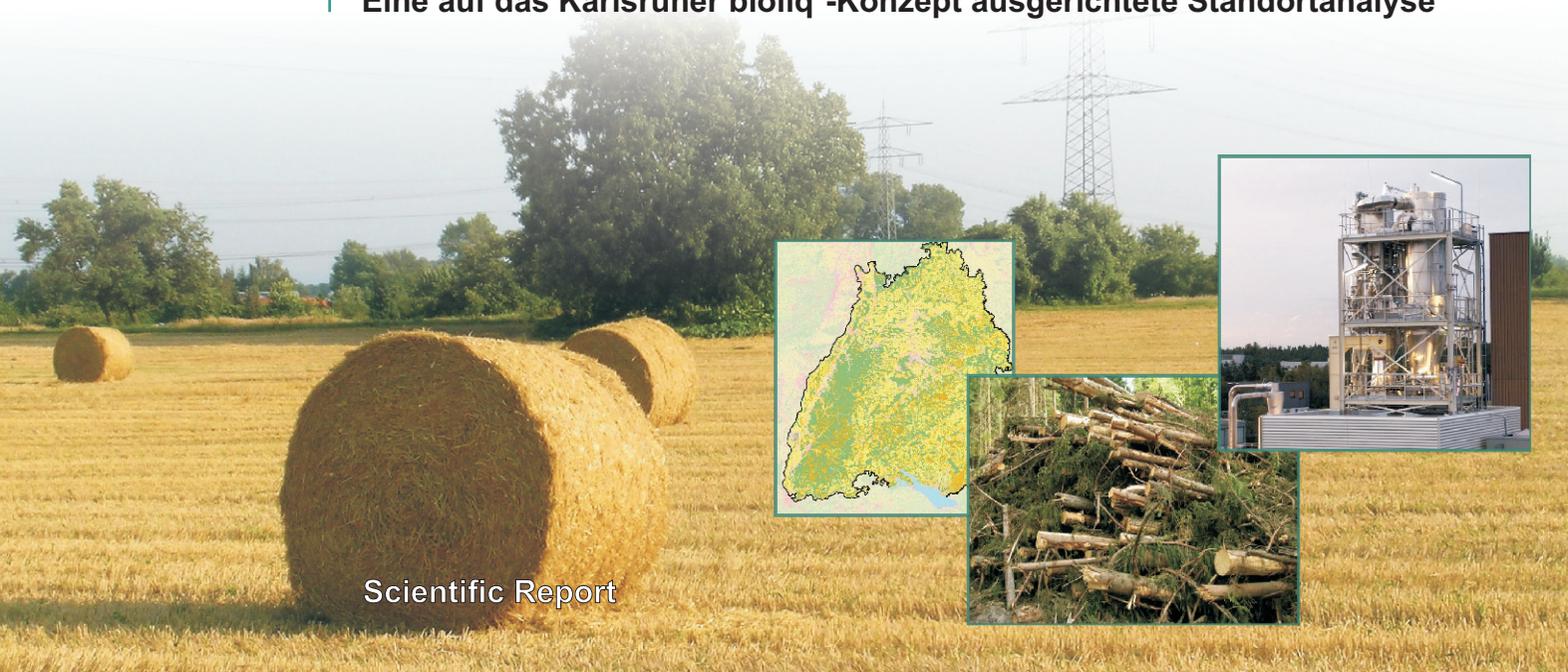


**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte  
FZKA 7416

## **Systemanalytische Untersuchung zum Aufkommen und zur Bereitstellung von energetisch nutzbarem Reststroh und Waldrestholz in Baden-Württemberg**

Eine auf das Karlsruher bioliq<sup>®</sup>-Konzept ausgerichtete Standortanalyse



Scientific Report



# **Forschungszentrum Karlsruhe**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7416

## **Systemanalytische Untersuchung zum Aufkommen und zur Bereitstellung von energetisch nutzbarem Reststroh und Waldrestholz in Baden-Württemberg**

**– Eine auf das Karlsruher bioliq<sup>®</sup>-Konzept  
ausgerichtete Standortanalyse –**

**Gunnar Oliver Kappler**

Institut für Technikfolgenabschätzung und  
Systemanalyse

Von der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2008

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-074167

## **Systemanalytische Untersuchung zum Aufkommen und zur Bereitstellung von energetisch nutzbarem Reststroh und Waldrestholz in Baden-Württemberg – eine auf das Karlsruher bioliq®-Konzept ausgerichtete Standortanalyse**

Mit Blick auf die Sicherstellung einer nachhaltigen Mobilität wird zunehmend auch die Notwendigkeit herausgehoben, innovative Verfahren zu entwickeln, um Bioenergieträger neben der Strom- und Wärmebereitstellung auch zur Erzeugung von biogenen Kraftstoffen verwenden zu können.

Aus diesem Grunde wird derzeit am Forschungszentrum Karlsruhe ein innovatives Konzept verfolgt, welches die Nutzung und Bereitstellung von Biomasse zur Kraftstofferzeugung sowohl technisch als auch logistisch erleichtern soll. Dieses sogenannte bioliq®-Konzept basiert auf einer Kombination von mehreren regional verteilten dezentralen Anlagen zur Schnellpyrolyse, in denen die Biomasse in eine Pyrolyseöl-Koks-Suspension (Slurry) konvertiert und in dieser konditionierten Form anschließend zu einer zentralen Vergasungsanlage transportiert wird.

Für die Gewinnung von Biokraftstoffen nach dem bioliq®-Konzept sind insbesondere die mengenmäßig bedeutsamen und bis dato weitestgehend ungenutzten Brennstoffe Waldrestholz und (Getreide-) Reststroh interessant, die als energetisch nutzbare Reststoffe bzw. Nebenprodukte in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion anfallen.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieser systemanalytischen Arbeit der Frage nachzugehen, an welchen Aufkommensorten welches Potenzial an (Getreide-) Reststroh und Waldrestholz (nur Baden-Württemberg) für die energetische Nutzung zur Verfügung steht und inwieweit dies durch das räumlich dezentral-zentral gekoppelte bioliq®-Konzept ökonomisch bereitgestellt werden kann. Darüber hinaus sollte in diesem Kontext auch analysiert werden, welche Gebiete (nur Baden-Württemberg), unter Berücksichtigung der vor Ort vorhandenen Infrastruktur, als Standort für eine Pyrolyseanlage geeignet erscheinen.

Die Potenzialabschätzung zum Reststroh, ergab für Baden-Württemberg und das Jahr 2003 ein Bruttostrohaufkommen von rund 2,9 Mio. Mg FM, was einem durchschnittlichen Ertrag von 6 Mg FM pro ha Getreideanbaufläche gleichkommt. Unter Einberechnung des Bedarfs für die Viehhaltung (rd. 0,9 Mio. Mg FM) und derjenigen Menge, die für den Erhalt der Humusbilanz (rd. 0,8 Mio. Mg FM) des Bodens abzuziehen ist, verbleiben schließlich rund 1,2 Mio. Mg FM bzw. 1,0 Mio. Mg TM Stroh, welches dauerhaft einer energetischen Nutzung zugeführt werden könnte.

Für Baden-Württemberg ergab sich ein theoretisch verfügbares Waldrestholzpotenzial von jährlich rund 3 Mio. m<sup>3</sup>, was annähernd 1,6 Mio. Mg TM entspricht. Unter Berücksichtigung weiterer Holzsortimente (z.B. Schwachholz/Industrieholz) könnte diese Menge auf bis zu 2,7 Mio. Mg TM erhöht werden. Bedingt durch restriktive Faktoren, wie z.B. Erschließungssituation und Besitzstruktur, dürfte hiervon allerdings lediglich ein Potenzial von ca. 1,2 Mio. Mg TM tatsächlich mobilisierbar sein.

Für die Erfassung und Bereitstellung von Stroh ergaben sich für die Verhältnisse von Baden-Württemberg in Abhängigkeit von Schlaggröße und Aufkommensdichte

geschätzte Erfassungskosten von ungefähr 40 bis 70 €/Mg TM (Durchschnittswert unter Beachtung ortsspezifischer Gegebenheiten: 63 €/Mg TM).

Für die Erfassung und Bereitstellung des Waldrestholzes in Form von Hackschnitzel resultiert eine Kostenspanne von 30 bis 180 €/Mg TM (Durchschnittswert unter Beachtung ortsspezifischer Gegebenheiten rund 80 €/Mg).

Da durch die Konversion der Biomasse zu Slurry höhere Energiedichten erreicht werden, sind die spezifischen Transportkosten im Vergleich zur unbehandelten Biomasse deutlich geringer. Unter Berücksichtigung der Slurry-Produktionskosten ergeben sich somit ab einer Transportstrecke von ca. 150 km Kostenvorteile zugunsten der Slurrybereitstellung.

Letztlich zeigte sich, dass besonders vorteilhafte Standorte für Pyrolyseanlagen ausschließlich in denjenigen Gebieten Baden-Württembergs zu finden sind, welche über eine überdurchschnittlich hohe Reststroh-Aufkommensdichte verfügen. In Anbetracht der gewonnenen Ergebnisse scheinen für Baden-Württemberg zum gegenwärtigen Zeitpunkt, insbesondere aufgrund hoher Bereitstellungskosten, nur einige wenige ( $n < 4$ ) Standorte für eine Pyrolyseanlage (100 MW<sub>in</sub>) geeignet zu sein.

Die Gestehungskosten für den „Biomass-to-Liquid“ (BtL)-Kraftstoff betragen unter den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen bei gemeinsamer Nutzung von Holz und Stroh rund 1 € pro Liter (exkl. Energie- und Mehrwertsteuer).

Wie die Analysen in dieser Arbeit zeigten, stehen in Baden-Württemberg theoretisch freie Potenziale der beiden mengenmäßig bedeutendsten Bioenergieträger Reststroh und Waldrestholz für eine energetische Nutzung zur Verfügung. Doch kann vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse eine umfassende Versorgung von BtL-Großanlagen mit ausreichenden Mengen an kostengünstiger Biomasse unter den gegenwärtigen Gegebenheiten aller Voraussicht nach kaum erreicht werden.

## **A system-analytical study on the emergence and supply of energetically usable remnant straw and forest residues in Baden-Württemberg - a location analysis related to the Karlsruhe bioliq®-concept**

In light of guaranteeing sustainable mobility, increased emphasis is being placed upon the necessity to develop innovative procedures through which the bioenergy carriers can be applied for the generation of biogenic fuels along with the supply of electricity and heat.

Therefore, an innovative BtL-concept, which aims to technically and logistically facilitate the use and supply of biomass for fuel generation, is presently being developed at the Karlsruhe Research Center. This so-called bioliq®-concept is based upon a combination of several regionally dispersed decentral plants for flash pyrolysis in which the biomass is converted into pyrolysis-oil-suspension (slurry) and, in this conditioned form, transported afterwards to a central gasification plant.

In order to produce biofuels according to the bioliq®-concept, the quantitatively significant and, to date, largely unused biomasses, namely forest wood residues and (grain-) remnant straw, which accumulate as energetically usable residues in agriculture and forestry, are of particular interest.

Against this background, it was the aim of this system-analytical dissertation to pursue the question in regard to which potential of (grain-) remnant straw and forest wood residues is available for energetic use in which sites of emergence and to what extent these can be economically supplied through the spatially coupled (decentral-central) bioliq®-concept. Furthermore, in this context, the question should be analysed in regard to which areas (only in the Federal State of Baden-Württemberg) are suitable as locations for a pyrolysis plant, thereby taking the existent infra-structure into consideration.

The potential estimation of remnant straw, revealed a gross remnant straw emergence of about 2.9 million Mg FM for Baden-Württemberg in 2003 which is equal to an average yield of 6 Mg FM per ha (area for the cultivation of grain). Calculating the need for livestock keeping (about 0.9 million Mg FM) and the amount to be deducted for the preservation of humus balance (about 0.8 million Mg FM), approximately 1.2 million Mg FM, or rather, 1.0 million Mg DM straw remain in the end, which could be permanently removed from the agricultural production process and supplied for energetic use.

Baden-Württemberg revealed a theoretically available amount of forest wood residue potential of annually 3 million m<sup>3</sup>, which corresponds to nearly 1.6 million Mg DM. Taking other assortments of wood (e.g., small dimensional wood and pulp wood) into consideration, this amount could be increased to as much as 2.7 million Mg DM.

Due to restrictive factors, i.e., developmental situation and property structure, a mere potential of approximately 1.2 million Mg DM may actually be mobilizable, whereby only half can be regarded as easily accessible.

For the collection and supply of straw in bale form - a common procedure -, the conditions in Baden-Württemberg, depending on the size of the removal area and emergence density, revealed estimated collection costs of approximately 40 to 70 €/Mg DM (average value with regard to specific local conditions: 63 €/Mg DM).

According to respective local conditions, different mechanized harvesting systems can be used for the collection and supply of forest wood residues in form of wood chips. This resulted in a cost span of 30 to 180 €/Mg DM (average value with regard to specific local conditions: 80 €/Mg DM).

Because higher energy density is achieved through the conversion of biomass to slurry, the specific transport costs are much less than those for unprocessed biomass. Considering slurry production costs, the supply of slurry shows cost advantages from a transport distance of approximately 150 km.

Ultimately, it became apparent that particularly advantageous locations for pyrolysis plants are exclusively to be found in those areas of Baden-Württemberg which have an above-average density of remnant straw emergence. In view of the findings, particularly due to the high supply costs, only a few locations ( $n < 4$ ) in Baden-Württemberg appear to be currently suitable as locations for a pyrolysis plant (100 MW<sub>in</sub>, powered by straw and forest wood residues).

Under the assumptions made in this dissertation regarding the combined use of wood and straw, the production costs for the "Biomass-to-Liquid"(BtL)-fuels amount to about 1 € per liter (excl. energy tax and VAT).

As the assessments in this dissertation have shown, there are theoretically sufficient free potentials of both of the most quantitatively significant bioenergy resources, namely remnant straw and forest wood residues, available in Baden-Württemberg for energetic use. However, against the background of the insights gained in this dissertation, an extensive supply of large BtL-plants with sufficient amounts of economical biomass can hardly be achieved under the present conditions.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Anhangsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>IX</b>
<b>Summary</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung .....	5
1.3 Aufbau der Arbeit .....	10
<b>2 Methodik</b> .....	<b>11</b>
2.1 Systemabgrenzung und Einschränkungen .....	11
2.2 Begriffserklärungen und Kennwerte zu Reststroh, Waldrestholz und Slurry .....	15
2.3 Aufkommen an Reststroh und Waldrestholz .....	17
2.3.1 Daten und Berechnungsmodell zur Analyse des Reststrohaufkommens .....	19
2.3.2 Daten und Berechnungsmodelle zur Analyse des Waldrestholzaufkommens .....	21
2.4 Bereitstellung .....	26
2.4.1 Empirische Untersuchung zu den mittleren Transportstrecken .....	26
2.4.2 Kosten für Erfassung und Transport .....	28
2.5 Standortanalyse, Standortauswahl und Standortbewertung .....	34
2.6 Gegenüberstellung von dezentralem und integriertem bioliq <sup>®</sup> - Konzept .....	38
<b>3 Ergebnisse</b> .....	<b>39</b>
3.1 Aufkommen an Reststroh und Waldrestholz .....	39
3.1.1 Landnutzung in Baden-Württemberg .....	39
3.1.2 Bedeutung biogener Reststoffe in Baden-Württemberg und Deutschland .....	41
3.1.3 Aufkommen an Reststroh .....	42
3.1.3.1 <i>Baden-Württemberg</i> .....	43
3.1.3.2 <i>Landkreise</i> .....	44
3.1.3.3 <i>Gemeinden</i> .....	46

3.1.4	Aufkommen an Waldrestholz .....	47
3.1.4.1	<i>Periode 1987 bis 2002</i> .....	49
3.1.4.2	<i>Periode 2002 bis 2017</i> .....	53
3.1.4.3	<i>Exkurs: Frei verfügbares (Wald-) Energieholzpotenzial in Abhängigkeit der Erfassungskosten</i> .....	59
3.2	Bereitstellung .....	61
3.2.1	Herleitung der Formeln zur Bestimmung von mittleren Transportstrecken .....	61
3.2.2	Empirische Untersuchung zu den Transportstrecken .....	63
3.2.3	Kosten für die Erfassung von Stroh und Waldrestholz.....	65
3.2.4	Kosten für den Transport von Strohbällen, Waldhackschnitzel und Slurry .....	70
3.3	Standortanalyse, Standortauswahl und -bewertung.....	77
3.3.1	Standortanalyse .....	77
3.3.1.1	<i>Dezentrales Konzept</i> .....	79
3.3.1.2	<i>Integriertes Konzept</i> .....	81
3.3.2	Standortauswahl .....	82
3.3.3	Standortbewertung.....	85
3.3.3.1	<i>Dezentrales Konzept</i> .....	86
3.3.3.2	<i>Integriertes Konzept</i> .....	90
3.4	Gegenüberstellung von dezentralem und integriertem bioliq <sup>®</sup> - Konzept.....	93
4	Fazit und Ausblick.....	99
4.1	Methodisches Fazit .....	99
4.2	Inhaltliches Fazit .....	104
4.3	Ausblick .....	109
5	Literaturverzeichnis .....	111
6	Anhang.....	119

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Gegenüberstellung der unterschiedlichen räumlichen Auslegungen (dezentral oder integriert) des bioliq <sup>®</sup> -Konzepts.....	7
Abbildung 2.1:	Definition des zugrunde gelegten Systemraums.....	11
Abbildung 2.2:	Darstellung der Transportketten für Stroh (Quaderballen), Waldrestholz (Hackschnitzel) und Slurry anhand exemplarisch ausgewählter Transportkombinationen bzw. -mittel .....	31
Abbildung 3.1:	Verteilung der Acker- und Waldflächen in den großräumigen Regionen Baden-Württembergs .....	40
Abbildung 3.2:	Aufkommen biogener Rest- und Abfallstoffe in Baden-Württemberg und Deutschland im Jahr 2002.....	41
Abbildung 3.3:	Strohaufkommen in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs im Jahr 2003.....	45
Abbildung 3.4:	Reststrohaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs im Jahr 2003.....	47
Abbildung 3.5:	Holzvorräte in den Gemeinden Baden-Württembergs im Jahr 2002 .....	49
Abbildung 3.6:	Ableitung des jährlichen Waldrestholzaufkommens in Baden-Württemberg (Periode 1987 - 2002).....	51
Abbildung 3.7:	Waldrestholzaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs (Periode 1987 - 2002).....	52
Abbildung 3.8:	Überblick über das geschätzte Aufkommen der potenziell nutzbaren (Wald-) Energieholzsortimente in Baden-Württemberg (Periode 2002 – 2017).....	55
Abbildung 3.9:	(Wald-) Energieholzaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs (Periode 2002 – 2017).....	58
Abbildung 3.10:	Freies (Wald-) Energieholzpotenzial in Baden-Württemberg in Abhängigkeit der Erfassungskosten (Hackschnitzel frei Waldstraße) .....	60
Abbildung 3.11:	Schematische Darstellung für kreisförmige Einzugsgebiete .....	61
Abbildung 3.12:	Schematische Darstellung für quadratische Einzugsgebiete .....	62
Abbildung 3.13:	Schematische Darstellung für rechteckige Einzugsgebiete .....	62
Abbildung 3.14:	Transportkosten ausgewählter Transportmittel – Kurzstrecke.....	75
Abbildung 3.15:	Transportkosten ausgewählter Transportmittel – Langstrecke .....	75
Abbildung 3.16:	Verkehrswegenetz in Baden-Württemberg .....	78
Abbildung 3.17:	Vorteilhafte Standorte und Einzugsgebiete für das dezentrale Konzept.....	80
Abbildung 3.18:	Vorteilhafte Erfassungsgebiete für das integrierte Konzept.....	81
Abbildung 3.19:	Darstellung der exemplarisch ausgewählten Standorte und deren Einzugsgebiete .....	83
Abbildung 3.20:	FT-Gestehungskosten in Abhängigkeit der Transportentfernung .....	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Stoffeigenschaften von (Rest-) Stroh, Waldrestholz und Slurry .....	17
Tabelle 2.2:	Kriterien und Merkmale zur Analyse der mittleren Transportstrecken für zwei exemplarisch ausgewählte Standorte.....	27
Tabelle 2.3:	Bewertung von Standortanforderungen für das dezentrale und integrierte Konzept.....	36
Tabelle 3.1:	Abschätzungen zum energetisch nutzbaren Strohaufkommen in Baden-Württemberg für die Jahre 1980 und 2003 .....	44
Tabelle 3.2:	Abschätzungen zum Waldrestholzaufkommen in Baden-Württemberg auf Basis der Forsteinrichtungsdaten (Bezugsjahr 2002).....	50
Tabelle 3.3:	Jährlich potenziell verfügbares Aufkommen an (Wald-) Energieholz für die Periode 2002 bis 2017; differenziert nach Nutzungsklassen und Szenarien .....	56
Tabelle 3.4:	Berechnung von mittleren Transportentfernungen mit Hilfe der Näherungsformeln .....	63
Tabelle 3.5:	Gegenüberstellung der empirisch ermittelten mittleren Transportstrecken mit den über die Formeln bestimmten Werten.....	64
Tabelle 3.6:	Kosten der Stroherfassung (frei Feldlager).....	66
Tabelle 3.7:	Kosten, Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen beim Transport von Strohballen und Waldhackschnitzel.....	72
Tabelle 3.8:	Kosten, Energieverbrauch und CO <sub>2</sub> -Emissionen beim Transport von Holzbündel und Slurry.....	73
Tabelle 3.9:	Flächen und Biomasseaufkommen der drei ausgewählten Pyrolyse-Anlagenstandorte des dezentralen Konzepts .....	87
Tabelle 3.10:	Erfassungs-, Transport- und Bereitstellungskosten der drei ausgewählten Pyrolyse-Anlagenstandorte des dezentrales Konzepts .....	89
Tabelle 3.11:	Flächen und Biomasseaufkommen für die Einzugsgebiete der zentralen Anlage .....	90
Tabelle 3.12:	Erfassungs-, Transport- und Bereitstellungskosten für die Einzugsgebiete der zentralen Anlage.....	92
Tabelle 3.13:	Kostenvergleich der FT-Kraftstoffbereitstellung nach dem dezentralen und integrierten Konzept – am Beispiel der ausgewählten Standorte.....	95

## Anhangsverzeichnis

Anhang 6.1:	Vereinfachte Darstellung von Bioenergie-Bereitstellungsketten .....	A-119
Anhang 6.2:	Beschreibung des am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten bioliq <sup>®</sup> -Verfahrens .....	A-120
Anhang 6.3:	Einzugsgebietsgröße in Abhängigkeit von der Anlagenleistung .....	A-122
Anhang 6.4:	Massen- und volumenspezifische Energiedichten ausgewählter Energieträger .....	A-122
Anhang 6.5:	Landnutzung im Landkreis Ortenau .....	A-123
Anhang 6.6:	Symbolik für die Berechnungsschemata .....	A-124
Anhang 6.7:	Schema zur Berechnung des Reststrohaufkommens .....	A-125
Anhang 6.8:	Schema zur Berechnung des Waldrestholzaufkommens auf Basis der Daten zur Forsteinrichtungsplanung (Modell 1) .....	A-126
Anhang 6.9:	Anmerkungen und Annahmen zu Modell 1 .....	A-127
Anhang 6.10:	Datentabelle zur Bundeswaldinventur .....	A-128
Anhang 6.11:	Zusammenstellung einiger Daten zur Bundeswaldinventur .....	A-130
Anhang 6.12:	Hangneigungs- und Nutzungsklassen der Waldflächen Baden-Württembergs .....	A-131
Anhang 6.13:	Vereinfachtes Schema zur Berechnung des Waldrestholzaufkommens auf Basis der Bundeswaldinventurdaten (Modell 2) .....	A-132
Anhang 6.14:	Anmerkungen und Annahmen zu Modell 2 .....	A-133
Anhang 6.15:	Verteilung des ausgeschiedenen Vorrates nach Holzart .....	A-134
Anhang 6.16:	Faktoren für die Verteilung des abgeleiteten Aufkommens auf die einzelnen Gemeinden .....	A-134
Anhang 6.17:	Schema zur Berechnung des Waldrestholzaufkommens für die Periode 1987 bis 2002 (Modell 2 – Variante 1) .....	A-135
Anhang 6.18:	Schema zur Berechnung des (Wald-) Energieholzaufkommens für die Periode 2002 bis 2017 (Modell 2 – Variante 2) .....	A-136
Anhang 6.19:	Schema zur Berechnung der zusätzlich nutzbaren (Wald-) Energieholzaufkommen .....	A-137
Anhang 6.20:	Berechnung der zusätzlichen Waldrestholzfraktionen „Nicht-verwerteter Abgang“ und „Schwachholz“ .....	A-138
Anhang 6.21:	Schema zur Bestimmung der räumlichen Verteilung des Holzvorrates 2002 (Modell 2 – Variante 3) .....	A-139
Anhang 6.22:	Darstellung zur empirischen Transportstreckenanalyse (Bereitstellung von Waldrestholz) .....	A-140
Anhang 6.23:	Darstellung zur empirischen Transportstreckenanalyse (Bereitstellung von Stroh) .....	A-141
Anhang 6.24:	Untersuchte Transportkombinationen .....	A-142
Anhang 6.25:	Technische Daten zu den Transportfahrzeugen/-behältnissen für den Strohballen- und Holzbündeltransport .....	A-143
Anhang 6.26:	Technische Daten zu den Transportfahrzeugen/-behältnissen für den Hackschnitzeltransport .....	A-144

Anhang 6.27:	Technische Daten zu den Transportfahrzeugen/-behältnissen für den Slurrytransport .....	A-145
Anhang 6.28:	Angenommene Beladungsschemata für den Transport von Strohballen und Holzbündeln .....	A-146
Anhang 6.29:	Parameter, Kenngrößen und Kostensätze für die Berechnung der Erfassungs- und Transportkosten.....	A-147
Anhang 6.30:	Kennwerte zu den treibhausrelevanten Emissionen .....	A-147
Anhang 6.31:	Unterstellte Maschinenstundensätze (auf Vollkostenbasis) .....	A-148
Anhang 6.32:	Kennzahlen (-bereiche) und Gewichtungsschema der Standortanalyse .....	A-149
Anhang 6.33:	Kriterien bzw. Faktoren für die Bildung gemeindespezifischer Kostensätze der Stroherfassung .....	A-150
Anhang 6.34:	Angenommene Erfassungskostensätze für die Bereitstellung von Hackschnitzel frei Waldstraße – differenziert nach Nutzungsklasse, Holzsortiment und Besitzstruktur .....	A-151
Anhang 6.35:	Gewichtungsschema der Standortanalyse – Pyrolyseanlagenstandorte .....	A-152
Anhang 6.36:	Gewichtungsschema der Standortanalyse – Einzugsgebiete für Pyrolyseanlagen .....	A-153
Anhang 6.37:	Gewichtungsschema der Standortanalyse – Erfassungsgebiete für das integrierte Konzept.....	A-154
Anhang 6.38:	Exemplarische Darstellung eines Einzugsgebietes .....	A-155
Anhang 6.39:	Reststrohaufkommen in den Landkreisen Baden-Württembergs 1980 und 2003 .....	A-156
Anhang 6.40:	Waldrestholzaufkommen in den Forstbezirken Baden-Württembergs im Jahr 2002 .....	A-157
Anhang 6.41:	(Wald-) Energieholzaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs.....	A-158
Anhang 6.42:	Erschließbares (Wald-) Energieholzaufkommen in Abhängigkeit vom Marktpreis .....	A-159
Anhang 6.43:	Kosten und CO <sub>2</sub> -Emissionen für die Erfassung von Waldrestholz .....	A-160
Anhang 6.44:	Erfassungskosten für Reststroh und Waldrestholz in den Gemeinden Baden-Württembergs.....	A-161
Anhang 6.45:	Darstellung einer Transportkalkulation am Beispiel des Strohtransportes mit dem Lkw-Gliederzug .....	A-162
Anhang 6.46:	Transportkosten für Stroh (Quaderballen).....	A-164
Anhang 6.47:	Transportkosten für Waldhackschnitzel (HS) und Holzbündel (HB).....	A-165
Anhang 6.48:	Transportkosten für Slurry .....	A-166
Anhang 6.49:	Vorteilhafte Einzugsgebiete für das dezentral Konzept – getrennt nach Reststroh und Waldrestholz.....	A-167
Anhang 6.50:	Einzugsgebiete für eine Großanlage nach dem integriertem Konzept (Standort Karlsruhe).....	A-168
Anhang 6.51:	Gestehungs- und CO <sub>2</sub> -Minderungskosten alternativer Verfahren .....	A-169

## Abkürzungsverzeichnis

	Abkürzung	Langfassung	Erläuterung
<b>A</b>	a	lat. anno = Jahr	
	ACTS	Abroll-Container-Transport-System	Transportsystem für den Umschlag von Containern im Rahmen des Kombinierten Verkehrs (Straße-Schiene)
	ATKIS	Amtlich Topographisch-Kartographisches Informationssystem	Hier als Sammelbegriff für die topographisch-kartographische Geodaten des Landesvermessungsamtes (Baden-Württemberg) verwendet.
<b>B</b>	BF	Bodenfläche	ha Bodenfläche; bezogen auf die räumliche Einheit Gemeinde oder Landkreis
	Bh	Betriebsstunden	
	BHD	Brusthöhendurchmesser	Stammdurchmesser in 1,30 m Höhe über Grund
	BtL	Biomass-to-Liquid	Umwandlung von Biomasse in einen flüssigen Kraftstoff; Bezeichnung für das Verfahren und/oder den nach einem solchen Verfahren gewonnenen Kraftstoff
	BW	Baden-Württemberg	
	BWI	Bundeswaldinventur	
<b>D</b>	dv.	davon	
<b>E</b>	Efm	Erntefestmeter	Maßeinheit für 1m <sup>3</sup> geerntetes (Derb-) Holz abzüglich des Ernteverlustes
<b>F</b>	FFH	Flora-Fauna-Habitat	
	FM	Frischmasse	Als Frischmasse wird die Substanz im frischen Zustand bezeichnet (inkl. Wasser)
	FT	Fischer-Tropsch	Syntheseverfahren zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe
	ft	Fuß (engl. foot)	Bezeichnung für ein Längenmaß; 1 ft = 30,48 cm
	FVA	Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg	
	FZK	Forschungszentrum Karlsruhe	
<b>G</b>	GIS	Geographisches Informationssystem	
	GISELa	Geographisches Informationssystem, Entwicklung Landwirtschaft	Hier als Sammelbegriff für die Geodaten der Landwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg verwendet.
	GVE	Großvieheinheit	Entspricht einem Tier mit 500 kg Lebendgewicht
	GW	Gigawatt	
<b>H</b>	ha	Hektar	= 10.000 m <sup>2</sup>
	HB	Holzbündel	
	HS	Hackschnitzel	
	H <sub>u</sub>	Heizwert (unterer)	Die bei vollständiger Verbrennung eines Brennstoffs freiwerdende Wärmemenge abzüglich der Verdampfungswärme des im Abgas enthaltenen Wassers.
<b>I</b>	ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse	Eines von insgesamt 22 Instituten des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK)
<b>J</b>	J	Joule	Maßeinheit für den Energiegehalt: 1 J = 1kg*m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> 1 MJ = 10 <sup>6</sup> Joule (Megajoule) 1 GJ = 10 <sup>9</sup> Joule (Gigajoule)
<b>K</b>	KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.	
	kW	Kilowatt	= 10 <sup>3</sup> Watt

	Abkürzung	Langfassung	Erläuterung
<b>L</b>	ldw.	Landwirtschaftlich	
	Lkw	Lastkraftwagen	
	LWF	(Bayerische) Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft	
	LK	Landkreis	
<b>M</b>	MJ	Megajoule	= $10^6$ J (siehe Joule)
	MLR	Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg	
	MWh	Megawattstunde	= $10^6$ Wh
	MW <sub>in</sub>	Megawatt (Input)	Brennstoffleistung Input, gemessen in H <sub>2</sub> ; 1 MW = $10^6$ W
<b>O</b>	oTS	organische Trockensubstanz	Organischer Anteil der Trockensubstanz, näherungsweise gleich dem Glühverlust
<b>P</b>	PEV	Primärenergieverbrauch	Verbrauch an primären Energieträgern (z.B. Kohle), gemessen in J (Joule)
	ppb	parts per billion	Konzentrationsangabe; 1 Teil auf 1 Milliarde Teile
<b>Q</b>	QB	Quaderballen	
<b>R</b>	RB	Rundballen	
<b>S</b>	s <sub>m</sub>	Mittlere Transportstrecke	
	S <sub>rm</sub>	Schüttraummeter	Maßeinheit für 1 m <sup>3</sup> geschüttetes Gut (Hackschnitzel)
<b>T</b>	t <sub>atro</sub>	tonnen (absolut trocken)	
	TM	Trockenmasse	Als Trockenmasse wird diejenige Substanz bezeichnet, welche nach Abzug des Wassers verbleibt.
<b>V</b>	V <sub>fm</sub>	Vorratsfestmeter	Maßeinheit für 1m <sup>3</sup> stehenden Holzvorrates im Wald (nur Derbholz; inkl. Rinde)

## Zusammenfassung

In Anbetracht der strukturellen Energieversorgungsschwächen der Europäischen Union, des Anstiegs der Energiepreise und der klimarelevanten Emissionen, sind die politischen Entscheidungsträger gefordert, den Ausbau erneuerbarer Energieträger weiter zu forcieren. Wie im Biomasseaktionsplan der Europäischen Union dargestellt, sind aufgrund des gegebenen Mengenpotenzials hierbei große Erwartungen mit einer energetischen Nutzung von Biomasse verbunden. Mit Blick auf die Sicherstellung einer nachhaltigen Mobilität wird dabei zunehmend auch die Notwendigkeit herausgehoben, innovative Verfahren zu entwickeln, durch die die Bioenergieträger neben der Strom- und Wärmebereitstellung auch zur Erzeugung von biogenen Kraftstoffen verwendet werden können.

Als besonders vielversprechend erscheinen die Biokraftstoffe der zweiten Generation und hierbei vor allem die BtL-(Biomass-to-Liquid)-Kraftstoffe. Da der verfahrenstechnische Aufwand zur Herstellung solcher synthetischer Biokraftstoffe sehr hoch ist, kann deren Erzeugung ausschließlich in Großanlagen sinnvoll vorgenommen werden. Allerdings ist die Versorgung dieser Großanlagen mit ausreichenden Mengen der räumlich weit verteilten Biomasse mit einem erheblichen logistischen Aufwand verbunden und unter den gegebenen Rahmenbedingungen in der Regel kaum wirtschaftlich zu bewerkstelligen.

Aus diesem Grunde wird derzeit am Forschungszentrum Karlsruhe ein innovatives Konzept verfolgt, welches die Nutzung und Bereitstellung von Biomasse zur Kraftstoffherstellung sowohl technisch als auch logistisch erleichtern soll. Dieses sogenannte **bioliq®-Konzept** (hinsichtlich seiner technischen Auslegung auch **bioliq®-Verfahren** genannt) basiert auf einer Kombination von mehreren regional verteilten dezentralen Anlagen zur Schnellpyrolyse, in denen die Biomasse in eine Pyrolyseöl-Koks-Suspension (Slurry) konvertiert und in dieser konditionierten Form anschließend zu einer zentralen Vergasungsanlage transportiert wird. Dort wird der Slurry nach einer Vergasung und FT-(Fischer-Tropsch)-Synthese schließlich zu einem Biokraftstoff aufbereitet. Dabei soll durch die Bereitstellung eines transportablen Sekundärenergieträgers (Slurry), welcher gegenüber der unbehandelten Biomasse eine bis zu 10-fach höhere volumetrische Energiedichte besitzt, eine sehr viel höhere Transporteffizienz und damit Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses erreicht werden.

Im Zusammenhang mit der Bewertung der für das bioliq®-Konzept spezifischen Bereitstellungsprozesse kommt der Kenntnis über das verfügbare Biomasseaufkommen und dessen räumlicher Verteilung eine besondere Bedeutung zu. Schließlich wird dadurch maßgeblich mitbestimmt, welche Orte als Anlagenstandorte von Pyrolyseanlagen potenziell geeignet erscheinen und welche Transportentfernungen für die Biomasseanlieferung und Bereitstellung des Slurry an der zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage tatsächlich zurückzulegen sind.

Für die Gewinnung von Biokraftstoffen nach dem bioliq®-Konzept sind insbesondere die mengenmäßig bedeutsamen und bis dato weitestgehend ungenutzten Brennstoffe Waldrestholz und (Getreide-) Reststroh interessant, die als energetisch nutzbare Rückstände bzw. Nebenprodukte in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion anfallen. Hierbei eröffnet das bioliq®-Verfahren in erster Linie für Stroh, welches aufgrund

seiner spezifischen Zusammensetzung bei der direkten thermischen Nutzung Schwierigkeiten bereitet, weitergehende Möglichkeiten einer energetischen Nutzung.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel dieser systemanalytischen Arbeit der Frage nachzugehen, an welchen Aufkommensorten welches Potenzial an (Getreide-) Reststroh und Waldrestholz für die energetische Nutzung zur Verfügung steht und inwieweit dies durch das räumlich dezentral-zentral gekoppelte bioliq®-Konzept ökonomisch bereitgestellt werden kann. Darüber hinaus sollte in diesem Kontext auch analysiert werden, welche Gebiete, unter Berücksichtigung der vor Ort vorhandenen Infrastruktur, als Standort für eine Pyrolyseanlage geeignet erscheinen. Aus Gründen der Vereinfachung wurden dabei jedoch alle in dieser Arbeit durchgeführten räumlichen Untersuchungen – diese erfolgten unter Einsatz eines geografischen Informationssystems – auf Baden-Württemberg beschränkt. Hinsichtlich der räumlichen Untersuchungen war es hierbei das Ziel, sämtliche in dieser Arbeit abgeleiteten Größen auf die Gemeinde als kleinste räumliche Einheit zu beziehen.

Ausgangspunkt für Abschätzungen zum Reststroh- und Waldrestholzaufkommen bilden im Allgemeinen die zur Verfügung stehenden (statistischen) Daten aus der Land- und Forstwirtschaft. Da diese Daten in der Regel nicht den gewünschten Raumbezug aufweisen, wurden durch einen Top-down-Ansatz, unter Berücksichtigung verschiedener Parameter bzw. Restriktionen, die zunächst auf Landkreisebene abgeleiteten Potenziale den einzelnen Gemeinden eines Landkreises zugeordnet.

Die Potenzialabschätzung zum Reststroh, welche insbesondere aus einer Reihe von agrarstatistischen Berichten ableitet wurde, ergab für Baden-Württemberg und das Jahr 2003 ein Bruttostrohaufkommen von rund 2,9 Mio. Mg FM, was einem durchschnittlichen Ertrag von 6 Mg FM pro ha Getreideanbaufläche gleichkommt. Unter Einberechnung des Bedarfs für die Viehhaltung (rd. 0,9 Mio. Mg FM) und derjenigen Menge, die für den Erhalt der Humusbilanz (rd. 0,8 Mio. Mg FM) des Bodens abzuziehen ist, verbleiben schließlich rund 1,2 Mio. Mg FM bzw. 1,0 Mio. Mg TM Stroh, welches dauerhaft dem landwirtschaftlichen Produktionsprozess entnommen und einer energetischen Nutzung zugeführt werden könnte. Die räumlichen Auswertungen ergaben sehr günstige Reststroh-Aufkommensdichten in erster Linie für viele Gemeinden im Bereich der Region Franken und Donau-Iller. Ein Blick auf die Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte zeigte, dass durch Ertragssteigerungen, insbesondere aber durch einen kontinuierlichen Abbau des Viehbestandes bei gleichzeitig geänderten Viehhaltungsverfahren, die Menge an Reststroh stetig zugenommen hat. Inwieweit sich diese Entwicklung in der Zukunft fortsetzen wird, ist in Hinblick auf die aktuelle EU-Agrarpolitik noch nicht genau abzuschätzen. Letztlich dürfte aber auch in naher Zukunft von fast unverändert hohen Aufkommen an Reststroh ausgegangen werden.

Als Grundlage zur Bestimmung der Waldrestholzaufkommen dienten die Daten der Forsteinrichtungsplanung (2002) und der Bundeswaldinventur aus dem Jahre 2002. Da für die Abschätzung auch auf Daten eines von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg entwickelten Holzaufkommensprognosemodells (Zeithorizont 2017) zurückgegriffen wurde, zeichnet sich die Abschätzung zum Waldrestholzaufkommen auch durch einen prognostischen Aspekt aus. Für Baden-Württemberg ergab sich ein theoretisch verfügbares Waldrestholzpotenzial von jährlich rund 3 Mio. m<sup>3</sup>, was annähernd 1,6 Mio. Mg TM entspricht. Unter Berücksichtigung weiterer Holzsortimente (z.B. Schwachholz/Industrieholz) könnte diese Menge auf bis zu 2,7 Mio. Mg

TM erhöht werden. Abzüglich einer geschätzten Waldrestholz-Menge von 0,5 Mio. Mg TM, die künftig als Brennholz genutzt werden dürfte, verbleibt ein theoretisch freies Potenzial von etwa 2,1 Mio. Mg TM. Bedingt durch restriktive Faktoren, wie z.B. Erschließungssituation und Besitzstruktur, dürfte hiervon allerdings lediglich ein Potenzial von ca. 1,2 Mio. Mg TM tatsächlich mobilisierbar sein, wovon wiederum nur die Hälfte als leicht verfügbar angesehen werden kann. Da diese Menge auch maßgeblich von der Entwicklung des (Waldhackschnitzel-) Marktpreises abhängt, wurde im Rahmen eines kurzen Exkurses versucht, eine Funktion abzuleiten, welche den Zusammenhang von erschließbarem Potenzial und Marktpreis wiedergibt. Entsprechend des preiselastischen Charakters dieser Funktion dürfte, ausgehend von den gegenwärtigen Gegebenheiten, ein Anstieg des Marktpreises um 10 bis 30 €/Mg TM (frei Waldstraße) zu einem starken Anstieg des mobilisierbaren Potenzials führen. Demnach könnten bei einem Marktpreis von schätzungsweise 70 bis 80 €/Mg TM die o.g. 1,2 Mio. Mg TM frei Waldstraße bereitgestellt werden. Mit Blick auf die im Rahmen der beiden vergangenen Bundeswaldinventuren dokumentierten positiven Vorratsentwicklungen, könnte darüber hinaus der Holzeinschlag noch deutlich erhöht werden, weshalb unter günstigen Rahmenbedingungen eine langfristige Versorgung mit ausreichenden Mengen an Waldrestholz theoretisch möglich erscheint. Angesichts der bestehenden Waldflächenverteilung befinden sich die aufkommensträchtigen Gemeinden im Bereich des Schwarzwaldes, wobei das Potenzial an vielen Orten aufgrund ungünstiger Geländeverhältnisse allerdings nur schwer zugänglich und daher gegenwärtig kaum wirtschaftlich zu erschließen ist.

Einen wesentlichen Schritt im Bereitstellungsprozess stellt die Erfassung dar, welche dazu dient, die Biomasse an ihrem Aufkommensort zu größeren Mengen zusammenzufassen und transportierbar bereitzustellen. Die mit der Erfassung von Waldrestholz verbundenen Kosten wurden nicht selbst abgeschätzt, sondern diesbezüglich auf die Angaben der einschlägigen Literatur zurückgegriffen. Für das Reststroh wurden die Erfassungskosten hingegen anhand eigener Kalkulationen abgeleitet. Da die Erfassungskosten maßgeblich von den vor Ort gegebenen Bedingungen (Erschließungssituation, Geländeverhältnisse, Betriebsstruktur, etc.) bestimmt werden, wurde versucht diese soweit möglich mit einzubeziehen.

Für die Erfassung und Bereitstellung von Stroh in Ballenform – ein in der Praxis gängiges Verfahren – ergaben sich für die Verhältnisse von Baden-Württemberg in Abhängigkeit von Schlaggröße und Aufkommensdichte geschätzte Erfassungskosten von ungefähr 40 bis 70 €/Mg TM (Durchschnittswert unter Beachtung ortsspezifischer Gegebenheiten: 63 €/Mg TM). Mit Blick auf eine kostenoptimierte Erfassung dürfte hierbei der Ausgestaltung einer effizienten Organisation (Bildung/Einbeziehung von Betriebsgemeinschaften bzw. Maschinenringen) besondere Bedeutung zukommen, weil diese u.a. den Einsatz schlagkräftiger (Großballen-) Pressen bei gleichzeitig optimaler Auslastung begünstigt.

Für die Erfassung und Bereitstellung des Waldrestholzes in Form von Hackschnitzel können je nach örtlichen Gegebenheiten unterschiedliche, mehr oder weniger stark mechanisierte Erntesysteme bzw. Erntetechniken zum Einsatz kommen. Hieraus resultiert eine Kostenspanne von 30 bis 180 €/Mg TM (frei Waldstraße bzw. walddahem Hackplatz). Unter Berücksichtigung unterschiedlicher ortsspezifischer Gegebenheiten dürfte der durchschnittliche Erfassungskostensatz für Baden-Württemberg bei rund 80 €/Mg TM (frei Waldstraße bzw. walddahem Hackplatz) anzusiedeln sein. So ist

insbesondere in vielen Bereichen des Schwarzwaldes, aufgrund der schwierigen Erschließungssituation, eine Entnahme von Waldrestholz derzeit technisch bzw. wirtschaftlich vielfach nicht sinnvoll, obwohl dort der Holzeinschlag und damit auch das Waldrestholzaufkommen im Vergleich zu anderen Gebieten in Baden-Württemberg am höchsten sind.

Ein Vergleich der Erfassungskosten von Waldrestholz und Reststroh zeigt für beide Reststoffe eine entsprechend große Bandbreite, welche aber für Reststroh weit weniger ausgeprägt ist und insgesamt niedrigere Kosten aufweist als für Waldrestholz. In Betracht dieser hohen Kosten-Bandbreiten verbleiben unter den gegenwärtigen Marktbedingungen (Energiepreisniveau) große Mengen des Potenzials im Bestand. Inwieweit und wann es gelingen wird, diese bisher weitestgehend ungenutzten Potenziale zu mobilisieren und einer Nutzung in Großanlagen zuzuführen, hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab. Einerseits von der Entwicklung der Energiepreise, und andererseits davon, inwieweit es gelingt durch organisatorische Maßnahmen überregional klare Marktverhältnisse zu schaffen.

Ein weiterer Schritt im Bereitstellungsprozess stellt der Transport dar. Für die Berechnung der Transportkosten wurden in Abhängigkeit des zu transportierenden Gutes (Strohballen, Hackschnitzel und Slurry) und der zurückzulegenden Transportstrecke unterschiedliche Transportmittel und -varianten untersucht. Bedingt durch die geringere (Massen-) Zuladung und die höheren Umschlagkosten, ist der Transport von Strohballen gemeinhin etwas teurer als der von Waldhackschnitzel. Allerdings werden unter Berücksichtigung des Aufwandes für die (Biomasse-) Trocknung an der Anlage, die für den Strohtransport höheren Kosten letztlich mehr als kompensiert. Da der Trockenmasseanteil insofern eine wichtige Größe darstellt, ist es unter ökonomischen Gesichtspunkten vorteilhaft, wenn auch das Waldrestholz in Form von vorgetrockneten Hackschnitzeln an der Pyrolyseanlage bereitgestellt werden kann.

Da durch die Konversion der Biomasse zu Slurry höhere Energiedichten erreicht werden, sind die spezifischen Transportkosten im Vergleich zur unbehandelten Biomasse deutlich geringer. Unter Berücksichtigung der Slurry-Produktionskosten ergeben sich letztlich ab einer Transportstrecke von ca. 150 km Kostenvorteile zugunsten der Slurrybereitstellung. Dementsprechend wird durch das bioliq<sup>®</sup>-Konzept ein relativ kostengünstiger Transport über große Strecken ermöglicht, der zur Versorgung einer Großanlage maßgeblich ist. Insgesamt stehen für den Transport mehrere Transportmittel zur Verfügung, wobei deren Auswahl auch von der vor Ort zur Verfügung stehenden Infrastruktur abhängt. Aufgrund seiner Kostenstruktur und Flexibilität stellt dabei der Lkw für alle hier diskutierten Transportgüter (Strohballen, Holz hackschnitzel, Slurry) in den meisten Fällen das geeignetste Transportmittel dar. Für den Transport von Waldhackschnitzel ab Entfernungen von 130 km und den Transport von Slurry ab 100 km lässt sich allerdings mit der Bahn ein im Vergleich zum Lkw günstigerer Transport realisieren.

Wie die Auswertungen zum Transport zeigten, ist der Einfluss der Transportentfernung auf die Transportkosten weniger bedeutend als dies gemeinhin angenommen wird, da die Transportkosten auch die Kosten für das Be-, Um- und Entladen beinhalten, und dies bei geringeren Transportentfernungen zu deutlich höheren spezifischen Transportkosten pro km führt als bei großen Transportentfernungen.

Die Bestimmung potenziell geeigneter Pyrolyse-Anlagenstandorte erfolgte anhand der zuvor abgeschätzten ortspezifischen Biomassepotenziale und Erfassungskosten, als auch unter Berücksichtigung der an einem bestimmten Ort vorhandenen Infrastruktur. Dazu wurden zunächst im Rahmen einer Standortanalyse gemeindespezifische Kennwerte abgeleitet, auf deren Basis es möglich war, verschiedene Standorte miteinander zu vergleichen. Durch das Hervorheben spezifischer Standortcharakteristika in Form von kartografischen Darstellungen wurde schließlich eine Entscheidungshilfe für die Standortsuche bezüglich Bioenergievorhaben geschaffen. Letztlich zeigte sich, dass besonders vorteilhafte Standorte für Pyrolyseanlagen ausschließlich in denjenigen Gebieten Baden-Württembergs zu finden sind, welche über eine überdurchschnittlich hohe Reststroh-Aufkommensdichte verfügen. In Anbetracht der gewonnenen Ergebnisse scheinen für Baden-Württemberg zum gegenwärtigen Zeitpunkt – bei einem ausschließlichen Einsatz der in dieser Arbeit betrachteten Brennstoffsortimente Stroh und Waldrestholz – insbesondere aufgrund hoher Bereitstellungskosten, nur einige wenige ( $n < 4$ ) Standorte für eine Pyrolyseanlage ( $100 \text{ MW}_{\text{in}}$ ) geeignet zu sein. Da zur Slurry-Versorgung einer zentralen Großanlage (Anlagenleistung von bspw.  $4.500 \text{ MW}_{\text{in}}$ ) die Anlagenkapazität von rund 56 dezentralen Pyrolyseanlagen (Anlagenleistung von jeweils  $100 \text{ MW}_{\text{in}}$ ) notwendig wäre, kann – ausgehend vom angenommenen Standort dieser zentralen Großanlage in Karlsruhe – eine ausreichende Versorgung nur durch Errichtung sehr vieler Pyrolyseanlagen in weit außerhalb Baden-Württembergs liegenden Gebieten bewerkstelligt werden. Dabei bleibt mit Blick auf konkurrierende Nutzungsoptionen fraglich, ob bzw. inwieweit es gelingt, ausreichend geeignete (Pyrolyseanlagen-) Standorte in anderen Regionen in dieser Anzahl zu finden.

In dieser Arbeit wurden auf Basis der bei der Standortanalyse gewonnenen Kennwerte exemplarisch drei unterschiedliche Standorte (Ehingen, Forbach, Schillingstadt; Einzugsgebietsradius  $< 25 \text{ km}$ ; Anlagenleistung  $< 100 \text{ MW}_{\text{in}}$ ) ausgewählt und einander gegenübergestellt. Demnach verfügen die beiden durch hohe Strohaufkommen charakterisierten Standorte Ehingen und Schillingstadt über eine Aufkommensdichte (Reststroh und Waldrestholz; bezogen auf die Bodenfläche) von insgesamt etwa  $0,9 \text{ Mg TM/ha}$  (Durchschnittswert Baden-Württemberg:  $0,6 \text{ Mg TM/ha}$ ). Für die Bereitstellung der Biomasse an diesen beiden Standorten entstehen Kosten frei Pyrolyseanlage von durchschnittlich rund  $75 \text{ €/Mg TM}$  (davon  $16 \text{ €/Mg TM}$  für Transport). Im Vergleich dazu erreicht der im nördlichen Schwarzwald gelegene, ausschließlich durch das Waldrestholzaufkommen dominierte Standort Forbach eine Aufkommensdichte (Reststroh und Waldrestholz) von lediglich  $0,5 \text{ Mg TM/ha}$ ; die Kosten für die Bereitstellung der Biomasse betragen dabei etwas über  $100 \text{ €/Mg TM}$  (davon  $12 \text{ €/Mg TM}$  für Transport). Insofern unterstreichen die Auswertungen abermals, welche Bedeutung strohdominierten Standorten zukommt. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass durch eine zunehmende Ausweitung des Einzugsgebietsradius zwar mehr Brennstoff zur Verfügung steht und damit höhere Anlagenleistungen mit entsprechenden Kostendegressionseffekten realisiert werden könnten. Allerdings liegen hierbei oftmals auch ungünstigere Aufkommensgebiete mit entsprechend teurerer Biomasse im Einzugsgebiet der Anlage. Da dadurch der durchschnittliche Bereitstellungspreis ansteigt, werden dann die durch die Leistungssteigerung induzierten Kostensenkungspotenziale vielfach wieder kompensiert.

Eine Auslegung des bioliq®-Konzepts, bei dem die Pyrolyse- und Vergasungs-/Syntheseanlage an einem Standort vereint sind und die Biomasse ohne vorherige

Umwandlung zu Slurry an der zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage bereitgestellt wird, kann nicht empfohlen werden – obwohl durch die unmittelbar räumliche Koppelung von Pyrolyse und Vergasung ein insgesamt höherer Gesamtwirkungsgrad und damit etwas geringere Gestehungskosten für den FT-Kraftstoff erreicht werden könnten. Eine Gegenüberstellung der beiden konzeptionellen Auslegungen – integriert oder dezentral – auf Basis einer Referenzanlage (4.500 MW<sub>in</sub>) zeigt, dass neben der sehr viel höheren Flexibilität hinsichtlich der räumlichen Auslegung eine Reihe weiterer Gründe für das dezentrale Konzept sprechen.

Die Gestehungskosten für den BtL-Kraftstoff betragen unter den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen bei gemeinsamer Nutzung von Holz und Stroh rund 1 € pro Liter (exkl. Energie- und Mehrwertsteuer), wobei davon bis zu 65 % durch die mit der Bereitstellung der Biomasse verbundenen Kosten verursacht werden. Da es vermutlich in den nächsten Jahren durch eine zunehmende Bioenergienutzung zu einer verschärften Marktsituation hinsichtlich kostengünstiger Biomassepotenziale kommen könnte, werden die dargelegten Gestehungskosten trotz technischer Weiterentwicklungen und Degressionseffekten kaum unterschritten werden können. In welchem Maße sich die Marktsituation und deren Auswirkungen auf die Bioenergieerzeugung tatsächlich entwickeln werden, ist jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum absehbar.

Wie die Analysen in dieser Arbeit zeigten, stehen in Baden-Württemberg theoretisch freie Potenziale der beiden mengenmäßig bedeutendsten Bioenergieträger Reststroh und Waldrestholz für eine energetische Nutzung zur Verfügung. Doch kann vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse eine umfassende Versorgung von BtL-Großanlagen mit ausreichenden Mengen an kostengünstiger Biomasse unter den gegenwärtigen Gegebenheiten aller Voraussicht nach kaum erreicht werden. Damit bleibt auch eine kurzfristige Realisierung des bioliq®-Konzepts in Baden-Württemberg bzw. Deutschland eher fraglich. Langfristig betrachtet könnte sich dies durch deutlich geänderte Rahmenbedingungen jedoch ändern, so dass auch der Aufbau und Betrieb einer oder mehrerer Pyrolyseanlagen in Baden-Württemberg durchaus möglich erscheint. Allerdings sollte die Diskussion zum bioliq®-Konzept in punkto Biomasse und potenzieller Anlagenstandorte sehr viel weiter gefasst werden und nicht nur auf das in Deutschland oder auch Europa Machbare beschränkt bleiben.

Auch wenn die (großindustrielle) Realisierung des Konzepts zum gegenwärtigen Zeitpunkt eher unwahrscheinlich ist, sollte unter Vorsorgeaspekten die Entwicklung dieser (bioliq®-) Technologie weiter voran getrieben werden, damit zu gegebener Zeit – falls erforderlich – auch erneuerbare, flüssige Kohlenstoffträger aus biogenen Rest- und Abfallstoffen bereitgestellt werden können. Dabei sollte das Augenmerk der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nicht nur auf die Ausgestaltung anlagentechnischer Prozesse, sondern vielmehr auch auf (Biomasse-) Bereitstellungstechniken und den Aufbau der mit der Bereitstellung verbundenen Mobilisierungs- bzw. Organisationsstrukturen gerichtet werden.

Summa summarum sind auf dem Weg zur industriellen Umsetzung des bioliq®-Konzepts noch eine Reihe technischer, ökonomischer und umweltrelevanter bzw. ökologischer Fragestellungen zu beantworten. Die vorliegende Arbeit sollte diesbezüglich mögliche Schwachstellen des Karlsruher bioliq®-Konzepts aufzeigen und dazu beitragen, die Diskussion über das äußerst komplexe Thema der Erzeugung von Biokraftstoffen zu versachlichen.

## Summary

In view of the structural energy supply weaknesses of the European Union and the increase of climatically relevant emissions, political authorities are required to continue to push the expansion of renewable energy carriers. As presented in the Biomass Action Plan of the European Union, great expectations are connected to the energetic use of biomass due to the given amount of potential. In light of guaranteeing sustainable mobility, increased emphasis is being placed upon the necessity to develop innovative procedures through which the bioenergy carriers can be applied for the generation of biogenic fuels along with the supply of electricity and heat.

The biofuels of the second generation appear to be especially promising, in particular the BtL-(biomass to liquid)-fuels. Since the procedural complexity for the production of such synthetic biofuels is very high, the production of these fuels can only take place effectively in large scale plants. However, supplying these large scale plants with a sufficient amount of spatially dispersed biomass involves substantial logistic complexity and can, in most cases, hardly be managed economically under the given conditions.

Therefore, an innovative BtL-concept, which aims to technically and logistically facilitate the use and supply of biomass for fuel generation, is presently being developed at the Karlsruhe Research Center. This so-called bioliq<sup>®</sup>-concept (in regard to its technical specification also called bioliq<sup>®</sup>-procedure) is based upon a combination of several regionally dispersed decentral plants for flash pyrolysis in which the biomass is converted into pyrolysis-oil-suspension (slurry) and, in this conditioned form, transported afterwards to a central gasification plant. There the slurry is converted into biofuel within the framework of a gasification and FT-(Fischer-Tropsch)-synthesis. Thereby, a much higher degree of transport efficiency and, subsequently, economicalness of the entire process should be achieved through the supply of a transportable secondary energy carrier (slurry), which possesses up to 10-times the volumetric energy density of the unprocessed biomass.

In connection with the evaluation of the specific supply processes for the bioliq<sup>®</sup>-concept, knowledge in regard to available biomass potential and its spatial dispersion takes on special significance. Ultimately, it is this knowledge that also decisively determines which spots are potentially suitable as locations for pyrolysis plants and which transport distances must actually be covered in order to deliver biomass and supply slurry to the central gasification/synthesis plant.

In order to produce biofuels according to the bioliq<sup>®</sup>-concept, the quantitatively significant and, to date, largely unused biomasses, namely forest wood residues and (grain-) remnant straw, which accumulate as energetically usable residues in agriculture and forestry, are of particular interest. Hereby, the bioliq<sup>®</sup>-procedure primarily opens up further options for the energetic use of straw which, due to its specific consistency, presents difficulties in the case of direct thermal use.

Against this background, it was the aim of this system-analytical dissertation to pursue the question in regard to which potential of (grain-) remnant straw and forest wood residues is available for energetic use in which sites of emergence and to what extent these can be economically supplied through the spatially coupled (decentral-central) bioliq<sup>®</sup>-concept. Furthermore, in this context, the question should be analysed in re-

gard to which areas are suitable as locations for a pyrolysis plant, thereby taking the existent infra-structure into consideration. For reasons of simplification, all the spatial analyses which were conducted in this dissertation – these took place under implementation of a geographical information system – were limited to the Federal State of Baden-Württemberg. In regard to the spatial analyses, it was the intention to apply all quantities deduced in this dissertation to the municipality as the smallest spatial unit.

The generally available statistical data from agriculture and forestry constitute the initial point for the estimation of remnant straw and forest wood residue emergence. Since these data do normally not show the desired spatial reference, the deduced potentials were attributed to individual municipalities in the same county by a top-down approach which took various parameters and restrictions into account.

The potential estimation of remnant straw, which was deduced from a series of agrarian statistical reports, revealed a gross remnant straw emergence of about 2.9 million Mg FM for Baden-Württemberg in 2003 which is equal to an average yield of 6 Mg FM per ha (area for the cultivation of grain). Calculating the need for livestock keeping (about 0.9 million Mg FM) and the amount to be deducted for the preservation of humus balance (about 0.8 million Mg FM), approximately 1.2 million Mg FM, or rather, 1.0 million Mg DM straw remain in the end, which could be permanently removed from the agricultural production process and supplied for energetic use. The spatial assessment revealed a very favorable remnant straw emergence density, primarily for many municipalities in the regions of Franconia and Danube-Iller. A glance at the development of the past years shows that the amount of straw has constantly grown through yield increases but, in particular, through a continual reduction of livestock along with a simultaneous change in the procedure of animal husbandry. It cannot yet be estimated to which extent this development will continue in the future. However, all things considered, it can be assumed that the high amount of remnant straw will remain almost unchanged within the next few years.

The data of the Forest Administration Planning and the National Forest Inventory from 2002 provided the basis for determining the emergence of forest wood residues. Because data from the wood emergence prognosis model (time horizon 2017), developed by the Forest Research Institute Baden-Württemberg, were reverted to, the estimation of forest wood residue potential is also distinguished by a prognostic aspect. Baden-Württemberg revealed a theoretically available amount of forest wood residue potential of annually 3 million m<sup>3</sup>, which corresponds to nearly 1.6 million Mg DM. Taking other sortiments of wood (e.g., small dimensional wood and pulp wood) into consideration, this amount could be increased to as much as 2.7 million Mg DM. Deducting an estimated forest wood residue amount of about 0.5 million Mg DM, which could be used as firewood in the future, a theoretically free potential of approximately 2.1 million Mg DM remains. Due to restrictive factors, i.e., developmental situation and property structure, a mere potential of approximately 1.2 million Mg DM may actually be mobilizable, whereby only half can be regarded as easily accessible. Since this amount greatly depends on the development of the (wood chips) market price, an attempt was made within the context of a short excursus to derive a function which reflects the connection between accessible potential and market price. Commensurate to the price-elastic character of this function, based upon present conditions, an increase in the market price of as much as 10 to 30 €/Mg DM could lead to a strong increase in mobilizable potential. Accordingly, at a market price of an estimated 70 to 80 €/Mg DM, the

above mentioned 1.2 million Mg DM (free forest road) could be supplied. In view of the positive supply developments, which were documented within the context of both of the previous National Forest Inventories, logging could substantially be increased. Therefore, under favorable conditions, a long-term supply with sufficient amounts of forest wood residues appears to be theoretically possible. In the face of existent forest area distribution, the municipalities with the heaviest emergence are located in the area of the Black Forest, whereby the potential is difficult to access because of unfavorable ground conditions and can, therefore, hardly be economically developed at the present time.

An essential step in the supply process is that of collection, which serves to combine the biomasses to larger amounts on their sites of emergence and prepare them for transport. The costs, which are entailed in the collection of forest wood residues, were not self-estimated, but rather based upon the details of relevant literature. On the other hand, the collection costs for remnant straw were derived from the author's own calculations. Because the collection costs are mainly defined by local conditions (developmental situation, ground conditions, operational structure, etc.), it was attempted to include these as much as possible.

For the collection and supply of straw in bale form – a common procedure –, the conditions in Baden-Württemberg, depending on the size of the removal area and emergence density, revealed estimated collection costs of approximately 40 to 70 €/Mg DM (average value with regard to specific local conditions: 63 €/Mg DM). In light of cost-optimization collection, special significance should be attributed to the arrangement of an efficient organization (formation and inclusion of farming collectives and machine syndicates) as this furthers the use of powerful (large bale-) presses in the event of simultaneous optimal utilization capacity.

According to respective local conditions, different mechanized harvesting systems can be used for the collection and supply of forest wood residues in form of wood chips. This resulted in a cost span of 30 to 180 €/Mg DM (free forest road, or rather, forest vicinity chopping location). Taking various local conditions into account, the average collection rate for Baden-Württemberg can be set at about 83 €/Mg DM (free forest road, or rather, forest vicinity chopping location). Therefore, in many cases, the removal of forest wood residues is neither economically nor technically sensible, particularly in several regions of the Black Forest due to the difficult developmental situation there. Such is the case although the logging and subsequent forest wood emergence are the highest in comparison to other regions of Baden-Württemberg.

A comparison between the collection costs for forest wood residues and those for remnant straw reveals a correspondingly wide range for both. However, this range is not nearly as pronounced and the collection costs are altogether lower for remnant straw than for forest wood residues. In view of these high ranges in cost, under the present market conditions (energy price level), a great amount of potential remains unused. To what extent and when it will be possible to mobilize this mostly unused potential for utilization in large scale plants depends primarily on two factors: on the one hand, the development of energy prices and, on the other hand, the extent to which it is possible to create clear national market conditions through organized measures.

Transport represents a further step in the supply process. For the calculation of transport costs, different means and variations of transport were analysed, depending on the goods (straw bales, wood chips, slurry) and the transport distance. Due to lower mass loading and higher transport costs, the transport of straw bales is generally more expensive than that of forest wood chips. However, considering the complexity of the biomass drying process at the plant, the higher costs for the transport of straw are more than compensated. Since the share of dry matter constitutes an important quantity, it is economically advantageous if the forest wood residues can, in the form of pre-dried wood chips, also be supplied at the pyrolysis plant.

Because higher energy density is achieved through the conversion of biomass to slurry, the specific transport costs are much less than those for unprocessed biomass. Considering slurry production costs, the supply of slurry shows cost advantages from a transport distance of approximately 150 km. Correspondingly, the relatively economical long-distance transport, which is decisive for the supply of a large plant, is made possible through the bioliq®-concept. Altogether, several means of transport are available, whereby the selection of which also depends upon the local infra-structure. Due to its cost structure and flexibility, in the majority of cases the truck constitutes the most suitable means of transport for the goods discussed here (straw bales, wood chips, slurry). For the transport of wood chips from distances of 130 km and that of slurry from 100 km, transport by train does, however, prove to be more economical than by truck.

As the transport analyses have shown, the influence of transport distance upon transport costs is less significant than is commonly assumed, since transport also include the expenses for loading, reloading and unloading and this leads to distinctly higher specific transport costs per km than in the case of long transport distances.

The determination of potentially suitable pyrolysis plant locations occurred on the basis of previously estimated potential and estimation costs, thereby taking the existing infra-structure into account. In order to do so, characteristic values of the municipalities were derived within the context of a location analysis, on the basis of which it was possible to compare different locations with one another. By emphasizing specific location characteristics in the form of cartographic presentations, a decision-making aid was created in the search for a location in regard to bioenergy projects. Ultimately, it became apparent that particularly advantageous locations for pyrolysis plants are exclusively to be found in those areas of Baden-Württemberg which have an above-average density of remnant straw emergence. In view of the findings, particularly due to the high supply costs, only a few locations ( $n < 4$ ) in Baden-Württemberg appear to be currently suitable as locations for a pyrolysis plant (100 MW<sub>in</sub>, powered by straw and forest wood residues). Because the plant capacity of about 56 decentral pyrolysis plants (plant capacity respectively 100 MW<sub>in</sub>) would be necessary for the slurry supply of a central large scale plant (plant capacity e.g., 4.500 MW<sub>in</sub>), a sufficient supply can – based upon an assumed location of this central large plant in Karlsruhe – only be accomplished by installing several pyrolysis plants in areas outside of Baden-Württemberg. Thereby, in light of competitive utilization options, it remains questionable as to what extent it will be possible to find sufficient suitable pyrolysis plant locations in other regions.

On the basis of the characteristic values attained by means of the locations analysis, three different exemplary locations (Ehingen, Forbach, Schillingstadt; catchment area < 25 km; plant capacity < 100 MW<sub>in</sub>) were selected and contrasted within the context of this dissertation. According to this, both locations Ehingen and Schillingstadt, which are characterized by high straw emergence, have an emergence density (remnant straw and forest wood residues; pertaining to ground area) of a total of 0.9 Mg DM/ha (average rate for Baden-Württemberg: 0.6 Mg DM/ha). For the supply of biomass on both of these locations, costs arise (free pyrolysis plant) of an average of about 75 €/Mg DM (thereof 16 €/Mg for transport). In comparison, Forbach, which is located in the northern Black Forest and is exclusively dominated by the emergence of forest wood residues, achieves a total emergence density (remnant straw and forest wood residues) of merely 0.5 Mg DM/ha; the costs for the supply of biomass thereby amounting to slightly over 100 €/Mg DM (thereof 12 €/Mg DM for transport). In this respect, the assessment once again emphasizes the significance which is attributed to straw-dominated locations. Moreover, it has been shown that more biofuel would be available through increased expansion of the catchment area and, hence, higher power plant capacity with corresponding cost degression effects could be realized. However, more unfavorable emergence areas, whose biomass is correspondingly more expensive, are often located within the catchment area of the plant. Because the average supply price thus rises, the cost reduction potentials, induced by an increase in plant performance, are greatly compensated.

An implementation of the bioliq®-concept, by which the pyrolysis and gasification/synthesis are combined at one location and the biomass is supplied at the central gasification/synthesis plant without previous conversion to slurry, cannot be recommended. Such is the case, although through the direct spatial coupling of pyrolysis and gasification, a higher net efficiency and, thereby, slightly lower production costs for the BtL-fuel can be achieved. A comparison of both concepts – integrated or decentral – showed, on the basis of a reference plant, that, beside the very high spatial flexibility, a number of further reasons also speak in favor of the decentralized concept.

Under the assumptions made in this dissertation regarding the combined use of wood and straw, the production costs for the BtL-fuels amount to about 1 € per liter (excl. energy tax and VAT), whereby up to 65 % are caused by the costs connected to supplying biomass. Given that increased bioenergy use could lead within the next few years to a tightened market situation regarding economical biomass potential, the defined production costs will hardly be possible to undercut, despite further technical developments, learning and degression effects. However, at present, it is difficult to predict how the market situation and its effects upon bioenergy will actually develop.

As the assessments in this dissertation have shown, there are theoretically sufficient free potentials of both of the most quantitatively significant bioenergy resources, namely remnant straw and forest wood residues, available in Baden-Württemberg for energetic use. However, against the background of the insights gained in this dissertation, an extensive supply of large BtL-plants with sufficient amounts of economical biomass can hardly be achieved under the present conditions. For this reason, a short term realization of the bioliq®-concept in Germany or Baden-Württemberg remains rather doubtful. On a long-term basis, altered framework conditions could indeed change this situation substantially, so that the establishment and operation of one or more pyrolysis plants in Baden-Württemberg could be quite feasible. However, the

discussion of the bioliq®-concept in regard to biomass and suitable locations should be much more extensively conducted and not merely limited to that which is feasible in Germany or Europe.

Even if the (industrial) realization of this concept is rather improbable at present, the development of this technology should be further pursued so that, at a given time, if necessary, renewable liquid carbon carriers can be supplied from biogenic remnants and wastes. Thereby, the attention of research and development projects should not only be directed toward the design of plant technical processes, but rather toward supply techniques and the establishment of mobilization and organizational structures connected with supply.

Summa summarum an array of questions of technical, economical and ecological relevance need to be answered on the road to the industrial application of the bioliq®-concept . The dissertation at hand, however, has aimed to disclose potential weaknesses of the Karlsruhe bioliq®-concept and contribute toward objectifying the discussion in regard to the extremely complex issue of the generation of biofuels.

# 1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Die Gestaltung und Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung bilden die Voraussetzung für die Existenz- und Entwicklungsmöglichkeit einer modernen Volkswirtschaft und bleiben demnach nach wie vor eines der wichtigsten politischen Handlungsfelder unserer Zeit.

Da die Energieressourcen der Europäischen Union stark begrenzt sind, ist die Union ganz erheblich von Energieimporten abhängig (Stand 2005: 56 %; Eurostat, 2006) und diese werden unter den gegebenen Umständen voraussichtlich bis zum Jahre 2020 auf rund 70 % ansteigen (Europäische Kommission, 2000). Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass durch das Voranschreiten der wirtschaftlichen Entwicklung in vielen Regionen der Welt der Energieverbrauch weiter zunehmen wird, weshalb eine weitere Verknappung und Verteuerung fossiler Energieträger unvermeidlich scheint. Die Europäische Union verfügt hierbei nicht über ausreichende Möglichkeiten, auf diese Entwicklungen am Weltmarkt Einfluss zu nehmen. Demzufolge haben sich durch die Ölpreisentwicklung der jüngsten Zeit auf dramatische Weise die strukturellen Energieversorgungsschwächen der Europäischen Union und die Notwendigkeit energiepolitischer Innovationen offenbart.

Neben Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit stellt die Umweltverträglichkeit ein weiteres maßgebliches Handlungsfeld in diesem energiepolitischen Zielpolygon dar. Vor diesem Hintergrund hat die Europäische Union im Rahmen eines Energie-wendeszenarios sowohl die Steigerung der Energieeffizienz (Europäische Kommission, 2005a) als auch einen fortgesetzten Ausbau des Anteils regenerativer Energien an der Energieversorgung „proklamiert“.

Aus Sicht der Europäischen Kommission bietet die Nutzung von Biomasse gegenüber konventionellen und auch anderen erneuerbaren Energien einige wesentliche Vorteile, und wird insbesondere aufgrund des gegebenen Mengenpotenzials und der leicht realisierbaren Erschließungsmöglichkeiten als derjenige erneuerbare Energieträger angesehen, welcher – sowohl auf europäischer als auch nationaler Ebene – künftig den größten Beitrag zur Energieversorgung leisten könnte. Deshalb hat die Kommission im Aktionsplan für Biomasse (Europäische Kommission, 2005b) Maßnahmen zur Förderung einer verstärkten Biomassenutzung vorgestellt. Demzufolge sollen schon in naher Zukunft, neben der klassischen Bereitstellung von Wärme und Strom, für die es hinsichtlich der Erzeugungstechniken bereits vielfältige Nutzungsmöglichkeiten gibt, verschiedenartige Biomasseträger verstärkt auch für die Kraftstofferzeugung verwendet werden (Europäische Kommission, 2006).

In Deutschland besitzt die energetische Biomassenutzung bis dato keinen allzu bedeutsamen Stellenwert, schließlich beträgt deren Anteil am Gesamtprimärenergiebedarf derzeit lediglich 4,3 %. Allerdings stellt die Bioenergie, bezogen auf die gesamte erzeugte regenerative Primärenergie, mit einem Anteil von 71 % die derzeit bedeutsamste erneuerbare Energiequelle dar – ähnliche Verhältnisse finden sich auch in anderen europäischen Mitgliedsländern (BMU, 2007).

Aktuellen Schätzungen zufolge könnte für Deutschland der Anteil der Bioenergie am gesamten Primärenergieverbrauch auf bis zu 10 % erhöht werden, wenn es gelänge,

das bisher weitestgehend ungenutzte Aufkommen (vgl. Abbildung 3.2, S. 41) an Biomasse einer energetischen Nutzung zuzuführen (Leible et al., 2006).

Dieses Aufkommen verschiedenartiger Biomasse wird dabei gegenwärtig wie auch voraussichtlich künftig vorwiegend von den halm- und holzartigen Festbrennstoffen dominiert, welche im Zuge eines Hauptnutzungspfades als energetisch nutzbare Rückstände bzw. Nebenprodukte in der Land- und Forstwirtschaft anfallen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um das bei der Getreideerzeugung in großen Mengen anfallende Reststroh<sup>1</sup>, sowie das bei der Waldbewirtschaftung neben dem stofflich genutzten Stamm- bzw. Industrieholz anfallende und bisher kaum verwertete Waldrestholz<sup>1</sup>. Dabei lässt ein Blick auf die statistisch dokumentierten Entwicklungen<sup>2</sup> der Land- und Forstwirtschaft vermuten, dass das Aufkommen bzw. Potenzial in der Zukunft – sofern sich der bisher beobachtbare Trend weiterhin in dieser Weise fortsetzt – tendenziell sogar noch weiter ansteigen wird.

Die Gründe, weshalb diese großen und relativ leicht zugänglichen Potenziale bisher nur unzureichend genutzt werden, sind mannigfaltiger Art. Im Allgemeinen fehlen für diese halm- bzw. holzartigen Nebenprodukte profitable Verwertungsmöglichkeiten, weshalb diese oft am Ort der Entstehung verbleiben. Im Hinblick auf eine verstärkt energetische Nutzung wird eine Mobilisierung des Potenzials aber auch behindert, da in vielen Fällen die Nutzung im Vergleich zu fossilen Energieträgern mit Wettbewerbsnachteilen<sup>3</sup> und technischen Problemen verbunden ist (BMU, 2004). Zwar forcieren aktuelle politische Rahmenbedingungen die energetische Nutzung von Stroh und Holz – hierdurch hat sich deren Wettbewerbsfähigkeit auch merklich verbessert –, doch ist eine wirtschaftliche Nutzung in großem Umfang, insbesondere im Falle des Waldrestholzes, aufgrund der relativ hohen Brennstoffbereitstellungskosten nach wie vor als problematisch anzusehen.

Aus technologischer Sicht bieten sich für die in dieser Arbeit ausgewählten Bioenergieträger Waldrestholz und Reststroh grundsätzlich mehrere Konversionspfade<sup>4</sup> einer energetischen Nutzung an. Die Bandbreite reicht hierbei von der Wärme-/Stromerzeugung über die Herstellung von festen, flüssigen oder gasförmigen Sekundärenergieträgern/Brennstoffen bis hin zur Herstellung von Kraftstoffen (vgl. Anhang 6.1, S. A-119). Doch in Anbetracht der eingangs erwähnten energie- und umweltpolitischen Zielsetzungen, vor allem aber im Hinblick auf die Sicherstellung einer nachhaltigen Mobilität, richtet sich aktuell das Augenmerk auf die Herstellung bzw. den weiteren Ausbau der Verwendung von biogenen Kraftstoffen (Specht et al., 2003).

Auf europäischer Ebene wurde dem Ziel, den Anteil erneuerbarer Kraftstoffe zu erhöhen, bereits im Jahr 2003 mit Einführung der Biokraftstoff-Richtlinie (Europäisches Parlament, 2003) Rechnung getragen; folglich soll bis zum Jahr 2010 der Absatz von Biokraftstoffen auf einen Anteil von 5,75 % des gesamten Kraftstoffmarktes ansteigen. Da Biokraftstoffe als Pioniere auf dem Kraftstoffmarkt gelten, wurden von der Europäischen Union flankierende Maßnahmen veranlasst, mit der die Markteinführung ent-

---

<sup>1</sup> Eine genaue Erklärung zu diesen Begrifflichkeiten erfolgt in Kapitel 2.2.

<sup>2</sup> Einige wesentliche, aktuelle Entwicklungen der Land- und Forstwirtschaft, werden in Kapitel 3.1 näher erläutert.

<sup>3</sup> Es gibt bereits Bioenergieanlagen, die insbesondere wegen der Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG, 2006), die Wettbewerbsfähigkeit erreicht haben (vgl. Anhang 6.51, S. A-169).

<sup>4</sup> Es sind nicht alle Biomassearten gleichermaßen für alle Konversionsverfahren geeignet, da sich die einzelnen biogenen Energieträger in ihrer Art bzw. Zusammensetzung zum Teil erheblich voneinander unterscheiden.

sprechend erleichtert werden soll. Hierzu gehört u.a. die Energiesteuerrichtlinie (Europäischer Rat, 2003), die es den Mitgliedsstaaten erlaubt, Biokraftstoffe von der Mineralölsteuer zu befreien; dies gilt gleichermaßen für Reinkraftstoffe wie auch anteilig für die Beimischung biogener Komponenten zu den fossilen Kraftstoffen.

In Deutschland wurden biogene Reinkraftstoffe bereits in den 1990er Jahren von der Mineralölsteuer befreit und diese Steuerbefreiung im Jahr 2004 durch eine Änderung des Mineralölsteuergesetzes (MinöStG, 1992) anteilig auch auf Beimischungen erweitert. Doch wurde ab dem Jahr 2006 die bisher gültige Mineralölsteuerbefreiung auf Biokraftstoffe durch das neue Energiesteuergesetz (EnergieSTG, 2006) teilweise wieder aufgehoben und entsprechend des ab Januar 2007 geltenden Biokraftstoffquotengesetzes (BioKraftQuG, 2006) durch eine Beimischungspflicht ersetzt. Demzufolge müssen die dem fossilen Kraftstoff beigemischten Biokraftstoffanteile voll versteuert werden. Der Mineralölsteuerverzicht für Biokraftstoffe außerhalb der Quote wird nun stufenweise reduziert und dürfte langfristig gänzlich auslaufen. Allerdings wird für die derzeit noch in Entwicklung befindlichen Biokraftstoffe der zweiten Generation eine Steuerbegünstigung voraussichtlich noch bis zum Jahr 2015 erhalten bleiben (HKH, 2006; Benkwitz, 2006).

Momentan werden in Deutschland jährlich insgesamt ca. 52 Mio. Mg Benzin und Dieselmotorkraftstoff verbraucht<sup>5</sup>, wobei die genutzten Kraftstoffe fast ausschließlich auf Erdöl basieren, welches zu mehr als 96 % aus Importen stammt (MWV, 2007). Da in Deutschland im Kraftstoffsektor gegenwärtig fast ein Drittel der Endenergie eingesetzt wird, steht der Straßenverkehr als CO<sub>2</sub>-Verursacher damit ganz oben in der Statistik und bildet mit rund 164 Mio. Mg/a einen Anteil von ca. 21 % an den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen (BMU, 2007).

Bei den heute in relevanten Mengen erzeugten regenerativen Kraftstoffen handelt es sich hauptsächlich um Ethanol und die Pflanzenöle bzw. Pflanzenölester – in erster Linie als Rapsölmethylester („Biodiesel“) (BMVEL, 2005a). Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2006 durch biogene Kraftstoffe bereits ca. 6 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs abgedeckt (BEE, 2007) und damit die Zielvorgaben der Europäischen Union deutlich übertroffen. Da allerdings mit den vorhandenen bzw. geplanten Produktionskapazitäten das aus Fruchtfolge- und Umweltschutzgründen begrenzte, inländische Biodieselerzeugungspotenzial nahezu ausgeschöpft ist, kann der für das Jahr 2020 festgelegte Referenzwert von 20 % (vgl. BMVEL, 2005a) nur erreicht werden, wenn weitere biogene Kraftstoffe am Markt zur Verfügung stehen.

Erhebliche Erwartungen werden deshalb an die bereits erwähnten „Biokraftstoffe der zweiten Generation“ und hierbei vor allem an die Erzeugung und Verwendung von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse (BtL-Kraftstoffe) geknüpft, obgleich diese noch nicht marktreif verfügbar sind und deren technische Machbarkeit erst noch demonstriert werden muss (Bundesregierung, 2004).

Nach ersten Schätzungen übertrifft deren Potenzial das anderer Biokraftstoffe bei weitem, da für die Herstellung von synthetischen Biokraftstoffen einerseits auf das große und bisher weitestgehend ungenutzte Aufkommen an verschiedensten biogenen Rest- und Abfallstoffen zurückgegriffen werden kann und andererseits eine effizientere

---

<sup>5</sup> Nach Schätzungen des Mineralölwirtschaftverbandes dürfte dieser Bedarf in den nächsten Jahrzehnten tendenziell deutlich rückläufig sein (MWV, 2007a).

Verwendung (Ganzpflanzennutzung) von gezielt angebauten Energiepflanzen<sup>6</sup> möglich wäre. Demnach gehen Experten davon aus, dass bis zum Jahr 2020 allein durch synthetische Biokraftstoffe ca. 25 % des Kraftstoffverbrauchs substituiert werden könnte (Schütte, 2006).

Im Gegensatz zur Strom- und Wärmebereitstellung, zu der sich viele Verfahren mittlerweile in der Praxis etabliert und bewährt haben, befindet sich die Bereitstellung von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse noch weitgehend im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Aus diesem Grund hat auch die gegenwärtige Regierungskoalition beschlossen, die Markteinführung synthetischer Biokraftstoffe gemeinsam mit Wissenschaft und Wirtschaft – durch die Errichtung und den Betrieb von Anlagen im industriellen Maßstab – zu forcieren (CDU/CSU und SPD, 2004).

Vor diesem Hintergrund wird am Forschungszentrum Karlsruhe gegenwärtig ein Verfahrenskonzept<sup>7</sup> verfolgt, mit dem die Nutzung von Biomasse<sup>8</sup> zur Kraftstoffherzeugung sowohl technisch als auch logistisch und wirtschaftlich erleichtert werden soll. Es handelt sich hierbei um ein in dieser Form neuartiges BtL-(Biomass-to-Liquid)-Verfahren, welches eine effiziente thermochemische Umwandlung von Stroh und Holz in Synthesegas, als Ausgangsstoff für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen oder organischen Chemikalien, ermöglicht (Henrich und Dinjus, 2004).

Dieses sogenannte bioliq<sup>®</sup>-Konzept (hinsichtlich seiner technischen Auslegung auch bioliq<sup>®</sup>-Verfahren genannt) basiert auf einer Kombination von regional verteilten dezentralen Anlagen zur Schnellpyrolyse (50 - 100 MW<sub>in</sub>) und der anschließenden Vergasung der produzierten Pyrolyseöl-Koks-Suspension (Slurry<sup>9</sup>) in einer zentral gelegenen großen Vergasungs- und Syntheseanlage (500 - 5000 MW<sub>in</sub>) gekoppelt mit einer Kraftstoffsynthesierung und -aufbereitung.

Eine genauere, überwiegend technische Beschreibung zu diesem Verfahren und die Erläuterung einiger Charakteristika finden sich in Anhang 6.2 (S. A-120).

---

<sup>6</sup> Für den Anbau von Energiepflanzen könnten Schätzungen zufolge im Jahr 2020 eine Fläche von bis zu 3,45 Mio. ha zur Verfügung stehen; hierbei handelt es sich insbesondere um landwirtschaftliche Brachflächen (FNR, 2005a).

<sup>7</sup> Auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe wird derzeit eine Pilotanlage (2 MW) errichtet.

<sup>8</sup> Neben Stroh und Holz eignen sich für dieses Verfahren u.a. auch Heu, Papier, Pappe sowie eine Reihe weiterer ligninhaltiger und trockener Stoffe.

<sup>9</sup> Dieser Begriff wird in Kapitel 2.2 näher erläutert.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Im Gegensatz zu der bekannten „klassischen“ energetischen Nutzung von Stroh und Holz, sind die Rand- und Rahmenbedingungen bei der Herstellung synthetischer Biokraftstoffe wesentlich weiter zu fassen. Bezogen auf den Massenmarkt Verkehr betrifft dies insbesondere auch die Energienachfrageseite. So entscheiden schließlich die Art und Menge der nachgefragten Energie über Konzipierung und (Leistungs-) Auslegung des Versorgungssystems – hierin bestehen somit wesentliche Unterschiede zwischen der Kraftstoffherzeugung mit Anlagenleistungen von einigen GW und der klassischen Biomassenutzung mit Anlagenleistungen von einigen KW bis hin zu einigen MW.

Der verfahrenstechnische Aufwand zur Erzeugung von biogenen, synthetischen Kraftstoffen ist sowohl im Vergleich zu klassischen Nutzungskonzepten, als auch im Vergleich zu anderen Konversionspfaden zur Erzeugung erneuerbarer Kraftstoffe (z.B. Biodieselherstellung) am höchsten und begründet sich in der sehr kostenintensiven Stufe der Gasreinigung/-aufbereitung, der Synthese und raffinieretechnischen Zubereitung. Daher ergeben sich hinsichtlich der Kostendegression und der Möglichkeiten einer effizienteren Ausgestaltung des Konversionsprozesses (Wirkungsgradverbesserung durch geschlossene Energiekreisläufe) klare ökonomische Präferenzen für eine Großanlage. Besondere Vorteile ergeben sich hierbei auch durch die Integration in einen Anlagenverbund der Chemieindustrie oder einer Mineralölraffinerie im sogenannten Annexbetrieb. Demnach wird bzw. muss unter ökonomischen Gesichtspunkten das Verfahren zur Herstellung eines biogenen synthetischen Kraftstoffes in einem Leistungsbereich von einigen Gigawatt angesiedelt sein.

Dementsprechend sind zur Brennstoffversorgung einer solchen Anlage – im Vergleich zur Strom- und Wärmeproduktion (vgl. Anhang 6.3, S. A-122) – sehr viel größere Biomasse-Einzugsgebiete erforderlich, weshalb für die Kraftstoffherstellung in solchen Großanlagen ein wesentliches Problem in der Brennstofflogistik, d.h. in der zuverlässigen Bereitstellung hinreichend großer Mengen an kostengünstiger Biomasse, besteht. Unter Berücksichtigung der gegebenen Biomasse-Aufkommensverhältnisse werden demzufolge in der Regel Transportstrecken von deutlich über 100 km zurückzulegen sein, was aus ökonomischer Sicht unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen einen neuralgischen Punkt<sup>10</sup> darstellt.

Ersten Schätzungen zufolge werden bei der Herstellung synthetischer Biokraftstoffe in Großanlagen rund 50 - 60 % der Produktionskosten allein durch die Bereitstellung der Biomasse bestimmt (Leible et. al., 2007). Aus diesem Grund richtet sich der Focus auf eine wirtschaftliche Mobilisierung des Potenzials und die Ausgestaltung der Sammel- und Transportlogistik; diese wird zur Schlüsselfrage bei der Erzeugung synthetischer Biokraftstoffe.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob das am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte bioliq<sup>®</sup>- bzw. BtL-Verfahren aufgrund seiner spezifisch räumlich-konzeptionellen Auslegung den Erwartungen gerecht wird, das große und zugleich räumlich

---

<sup>10</sup> Der Grund, weshalb der Transport von biogenen Festbrennstoffen über größere Distanzen ein Problem darstellt, ist u.a. auf den im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen wesentlich geringeren volumetrischen Energiegehalt zurückzuführen (vgl. Anhang 6.4, S. A-122). Deshalb ist in den meisten Fällen der Einsatz von biogenen Festbrennstoffen vorzugsweise nur in Anlagen kleinerer und mittlerer Leistung bis hin zu einer oberen thermischen Leistungsgrenze von ca. 60 - 100 MW technisch, wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll (Schröder et al., 2005).

weit verteilte und bis dato weitestgehend ungenutzte Aufkommen an Biomasse wirtschaftlich für eine energetische Nutzung zu erschließen.

Obwohl für das bioliq®-Verfahren theoretisch verschiedenste Bioenergieträger verwendet werden könnten, wird in dieser Arbeit ausschließlich das bereits in Kapitel 1.1 erwähnte Reststroh und Waldrestholz betrachtet, weil diese Bioenergieträger nicht nur für dieses Verfahren besonders geeignet sind, sondern auch leicht zugängliche und mengenmäßig interessante Brennstoffe darstellen. Hinzu kommt, dass der Brennstoff Stroh aufgrund seiner im Vergleich zu anderen biogenen Brennstoffen hohen Asche-, Stickstoff- und Chlorgehalte bei der herkömmlichen Nutzung durch Verbrennung große Schwierigkeiten bereitet (Hartmann, 2001; Brökeland, 2005).

Im Rahmen dieser Arbeit richtet sich das Augenmerk allerdings weniger auf die verfahrenstechnische als vielmehr auf die räumlich-konzeptionelle Auslegung des bioliq®-Verfahrens, da in Hinblick auf die Produktionskosten der Logistik der Biomassebereitstellung, wie bereits erwähnt, eine maßgebliche Bedeutung zukommt.

Bezüglich der räumlichen Auslegung wird beim Karlsruher bioliq®-Verfahren zwischen den beiden in Abbildung 1.1 (S. 7) dargestellten Konzepten unterschieden. Bei dem *dezentralen* Konzept erfolgt zunächst der Biomassetransport zu den räumlich verteilten (dezentralen) Pyrolyseanlagen; daran schließt sich der Transport des in diesen Anlagen produzierten Slurry<sup>11</sup> zu einer zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage an. Dagegen erfolgt beim *integrierten* Konzept der Biomassetransport direkt zu einem zentralen Anlagenstandort, an dem sowohl die Pyrolyse als auch die Vergasung und Kraftstoffsynthese räumlich vereint sind. Wie in Abbildung 1.1 beschrieben, sind ohne Berücksichtigung der konversionstechnischen Komponenten die hier dargestellten Biomassebereitstellungsprozesse auch auf herkömmliche Anlagenkonzepte (z.B. Co-Verbrennung im Steinkohlekraftwerk) übertragbar.

Entsprechend den zwischen diesen beiden Konzepten bestehenden Unterschieden im Bereitstellungs- bzw. Transportprozess stellt sich die Frage, inwieweit bei der dezentralen Auslegung des Verfahrens das bereits angesprochene Problem des Transportes über große Entfernungen überwunden werden kann. Schließlich steht mit dem Zwischenprodukt Slurry ein transportabler Bioenergieträger zur Verfügung, welcher gegenüber der unbehandelten Biomasse eine deutliche höhere volumetrische Energiedichte (vgl. Anhang 6.4, S. A-122) besitzt und daher bezüglich des Transportes klare ökonomische Präferenzen aufweist.

In diesem Kontext rückt die Frage nach den Anlagenstandorten der dezentralen Pyrolyseanlagen in den Mittelpunkt der Betrachtung, schließlich können konkrete Aussagen zur Logistik nur abgeleitet werden, sofern diese bekannt bzw. festgelegt sind. Da die Anlagenstandorte idealerweise in möglichst enger räumlicher Nähe zum Ort des Anfalls der Biomassen stehen sollten, gewinnt das Aufkommen und die räumliche Verteilung der Biomasse ein besonderes Augenmerk. Dementsprechend richtet sich die Frage nicht nur nach dem „wieviel“ Reststroh und Waldrestholz tatsächlich für eine energetische Nutzung bereitgestellt werden kann, sondern vielmehr auf das „wo-wieviel“.

---

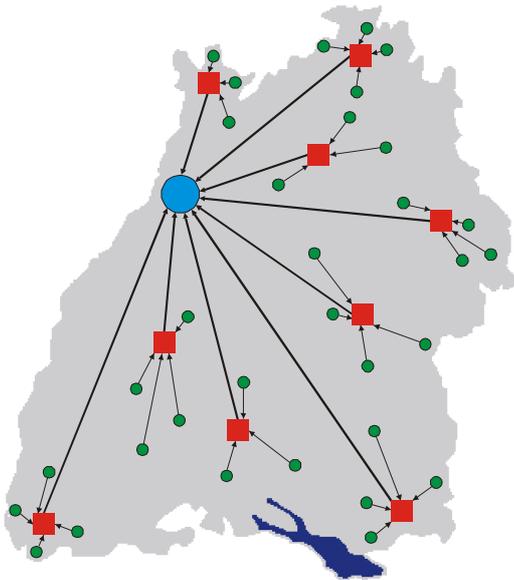
<sup>11</sup> Zur Begriffserläuterung siehe Kapitel 2.2

### Dezentrales Konzept

Dezentrale Pyrolyseanlagen liefern einer zentralen (Groß-) Anlage Slurry (zur Vergasung mit anschließender Kraftstoffsynthese).

#### Anmerkungen:

- Bei der Großanlage kann es sich auch um eine Raffinerie handeln, wobei der Slurry als Input für den Kraftstoffherstellungsprozess dient.
- Ohne Berücksichtigung der zentralen Anlage entspricht der Logistikprozess der regional verteilten dezentralen Anlagen den herkömmlichen Verfahren der Biomassenutzung (z.B. Biomasseheizwerk).

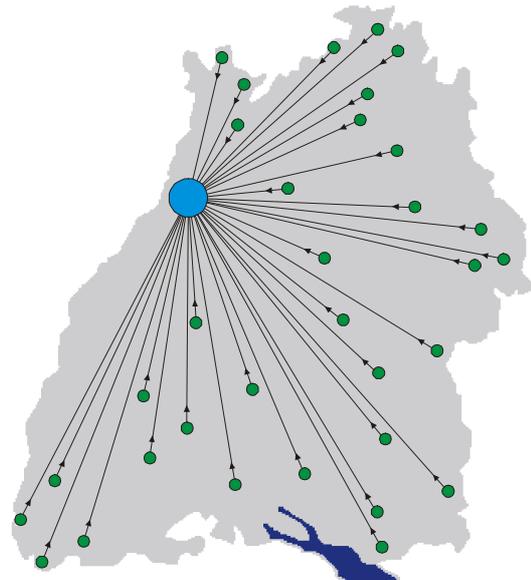


### Integriertes Konzept

Bereitstellung der Biomasse direkt an einer zentralen (Groß-) Anlage (an der Pyrolyse, Vergasung und Kraftstoffsynthese vereint sind).

#### Anmerkung:

- Bei der Großanlage kann es sich auch um ein (Kohle-) Kraftwerk handeln, in dem eine Co-Verbrennung der Biomasse erfolgt.



#### Anmerkungen:

- Theoretisch könnten beide Konzepte auch dahingehend kombiniert werden, dass beim integrierten Konzept die Anlage zusätzlich mit Slurry beliefert wird, welches in weit entfernten Anlagen ( $s > 500$  km) gewonnen wurde. Dies ist aber nicht Gegenstand der Untersuchung dieser Arbeit und wird daher auch nicht weiter berücksichtigt.
- In Anlehnung an die bereits genannten Vorteile eines Annexbetriebs wurde, wie in der Abbildung dargestellt, der Standort der großen zentralen Anlage auf Karlsruhe (Standort der Mineralöl-Raffinerie MIRO) festgelegt.
- Anders als hier vereinfacht dargestellt, erstreckt sich das Einzugsgebiet einer solchen zentralen Anlage weit über die Landesgrenzen von Baden-Württemberg hinaus.

**Abbildung 1.1: Gegenüberstellung der unterschiedlichen räumlichen Auslegungen (dezentral oder integriert) des bioliq®-Konzepts**

Es sei hierbei allerdings schon auf die Einschränkung hingewiesen, dass aufgrund der bestehenden Datenlage und des begrenzten Umfangs dieser Arbeit der zu untersuchende Systemraum (vgl. Kapitel 2.1) auf das Bundesland Baden-Württemberg beschränkt bleiben musste, obwohl dies im Hinblick auf die Realisierung einer Großanlage zunächst nicht gerechtfertigt erscheint. In Anbetracht der Vorteile, die sich durch die Integration des bioliq®-Verfahrens in einen Anlagenverbund ergeben, wurde der Standort der zentralen Anlage auf Karlsruhe festgelegt (vgl. Abbildung 1.1), da hier eine Anbindung an eine Mineralölraffinerie besteht. Insofern beziehen sich die im

Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Standortanalysen bzw. -bewertungen ausschließlich auf potenzielle Standorte von Pyrolyseanlagen.

Im Entscheidungsprozess zur Auswahl von potenziell geeigneten Anlagenstandorten bilden neben den ortsspezifischen Aufkommensdichten auch topografische Gegebenheiten, Art und Grad der Erschließung der Aufkommensflächen, Entfernung zur energetischen Konversionsanlage und daraus resultierende Auswirkungen auf das einsetzbare Transport- bzw. Logistiksystem weitere maßgebliche Standortbewertungskriterien.

Entsprechend der Neuartigkeit des bioliq®-Verfahrens gibt es aber bis dato keine Studien, in denen ein räumlich gekoppeltes Konzept zur Biomassenutzung (mit Blick auf die Kraftstoffherstellung) unter Berücksichtigung solcher räumlich differenzierter Aspekte untersucht wurde. Die einzige Studie zu diesem Thema, die ansatzweise auch solche Fragestellungen mit einbezieht, ist die von Leible et al. (2007), an der der Autor dieser Arbeit maßgeblich mitgewirkt hat.

Was dagegen die eigentlichen Biomasse-Potenzialabschätzungen betrifft, so sind diese in großer Anzahl verfügbar. Allerdings beziehen sich viele dieser Abschätzungen je nach zugrunde gelegter Datenbasis ausschließlich auf großräumige Flächeneinheiten (Bund, Land) und sind daher oftmals nur bedingt geeignet, um konkretere raumbezogene Aussagen abzuleiten. Einige wichtige Beispiele von Abschätzungen, aus denen auch für Baden-Württemberg Potenzialangaben zu Reststroh und/oder Waldrestholz entnommen bzw. abgeleitet werden können, zeigen Wiese und Kaltschmitt (1993), Fischer (1995), Haschke (1998), Meinhardt (2000), Dieter et al. (2001), Hemme-Seifert (2003), Leible et al. (2003) und Beckmann (2006).

Darüber hinaus gibt es für Baden-Württemberg einige räumlich stark differenzierte Potenzialabschätzungen, die sich auf eine exemplarisch ausgewählte und relativ kleine regionale Einheit (Region/Landkreis) beziehen, welche dann aber mit hoher Genauigkeit analysiert wurde. Für das grundlegende Verständnis, um Mittel und Wege einer effizienteren Biomassenutzung zu finden, sind solche Ansätze, auch im Hinblick auf die dargelegte Methodik, sehr wertvoll. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn für die Planung von Bioenergievorhaben ausschließlich Nutzungskonzepte in Betracht kommen (z.B. Heizkraftwerke), welche durch ein relativ überschaubares und „kleines“ Einzugsgebiet charakterisiert sind. Beispiele solcher Studien zur Abschätzung des Waldrestholzpotenzials in hoher regionaler Differenzierung für ausgewählte Standorte zeigen Hepperle (2005) und Heisig et al. (2004).

Eine großräumige Potenzialabschätzung (Systemgrenze Baden-Württemberg) bei gleichzeitig starker regionaler Differenzierung, wie sie für die systemanalytische Untersuchung zur dezentralen Variante des Karlsruher bioliq®-Verfahrens erforderlich ist, zeigt ausschließlich die Studie von Sigmund und Frommherz (2000). Hierbei wurde das Waldrestholzaufkommen für Baden-Württemberg auf Basis der Forsteinrichtungsplanung hergeleitet und auf die Forstamtsgrenzen bezogen. Da infolge der Forststrukturreform diese Bezugseinheiten künftig so nicht mehr gelten und die Daten der Forsteinrichtungsplanung nur bedingt die großräumigen Waldverhältnisse widerspiegeln, erlaubt auch diese Abschätzung nur bedingt eine Aussage zur künftigen Aufkommenssituation von Waldrestholz in Baden-Württemberg.

Hinsichtlich des Strohaufkommens in Baden-Württemberg sind bis dato keine Potenzialanalysen verfügbar, die den Anforderungen dieser hier durchgeführten Analyse gerecht werden.

Vor dem geschilderten Hintergrund ist es Ziel dieser Arbeit, im Rahmen einer systemanalytischen Untersuchung einen Beitrag zur Beantwortung der oben genannten Fragenstellungen zu leisten. Dabei steht insbesondere die Frage im Mittelpunkt, welches Aufkommen bzw. Potenzial an (Getreide-) Reststroh und Waldrestholz für die energetische Nutzung (Kraftstoffherstellung) zur Verfügung steht und inwieweit dies durch das räumlich dezentral gekoppelte bioliq®-Konzept des Forschungszentrums Karlsruhe ökonomisch bereitgestellt werden kann.

Hieraus ergeben sich für diese Arbeit folgende Leitfragen:

- Wie stellt sich die räumlich differenzierte Verteilung des Aufkommens von (Getreide-) Reststroh und Waldrestholz unter Berücksichtigung diverser Restriktionen sowie aktueller land- und forstwirtschaftlicher Nutzungsstrukturen in Baden-Württemberg dar?
- Wie stellt sich die Erfassung von Reststroh und Waldrestholz unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten dar? Welche spezifischen Kosten entstehen für den Transport von Reststroh, Waldrestholz und Slurry in Abhängigkeit unterschiedlicher Transportmittel und Transportentfernungen?
- Wo liegen potenziell geeignete Anlagenstandorte für dezentrale Pyrolyseanlagen in Baden-Württemberg? Welches Reststroh- und Waldrestholzaufkommen steht an diesen Standorten zur Verfügung, und welche durchschnittlichen Kosten ergeben für die Bereitstellung der Biomasse?
- Welche Unterschiede ergeben sich unter ökonomischen Aspekten zwischen dem dezentralen und integriertem bioliq®-Konzept hinsichtlich der Bereitstellung eines FT-(Fischer-Tropsch)-Kraftstoffes?

Letztendlich soll diese Arbeit, veranschaulicht am Beispiel des Karlsruher bioliq®-Verfahrens, dazu beitragen, ein deutlich besseres Verständnis der Möglichkeiten und Grenzen einer kostengünstigen Bioenergiebereitstellung und -nutzung im Hinblick auf die Herstellung von synthetischen Biokraftstoffen zu bekommen. Insofern wird mit dieser Arbeit nicht zuletzt auch der Versuch unternommen, einen Beitrag zur Versachlichung der Diskussion über das äußerst komplexe Thema der Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse zu leisten, wobei der Aspekt der Biomassebereitstellung im Vordergrund steht.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Im folgenden **Kapitel 2** wird die methodische Vorgehensweise dargelegt. Hierbei werden zunächst einige wesentliche Einschränkungen vorgenommen und die in dieser Arbeit betrachteten Bioenergieträger – Reststroh, Waldrestholz und Slurry – näher definiert. Anschließend wird die methodische Vorgehensweise zu den im Ergebnisteil durchgeführten Analysen und die hierfür zugrunde gelegte Datenbasis ausführlich beschrieben.

In **Kapitel 3** werden die Ergebnisse vorgestellt; entsprechend der in Kapitel 1.2 formulierten Fragestellungen ist dieses Kapitel in vier Teilbereiche gegliedert.

Im *ersten Teil* werden nach einer kurzen Darstellung zur Landnutzung und zum Aufkommen biogener Reststoffe in Baden-Württemberg, die Ergebnisse zu den räumlich differenzierten Potenzialanalysen für Reststroh und Waldrestholz vorgestellt.

Anschließend werden im *zweiten Teil* zunächst Formeln zur Bestimmung von mittleren Transportentfernungen hergeleitet und untersucht, bevor dann auf die Erfassungs- und Transportkosten der hier dargelegten Bioenergieträgern näher eingegangen wird.

Im *dritten Teil* werden im Rahmen einer Standortanalyse exemplarisch drei (Pyrolyse-) Anlagenstandorte ausgewählt, anhand verschiedener Kennzahlen gegenübergestellt und schließlich deren Eignung als Anlagenstandort bewertet.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet der *vierte Teil*, bei dem auf Grundlage der zuvor dargelegten Ergebnisse die beiden konzeptionellen Auslegungen des bioliq®-Verfahrens – dezentral bzw. integriert – unter ökonomischen Aspekten verglichen werden.

In **Kapitel 4** erfolgt zunächst eine Diskussion zur Methodik und zu den Ergebnissen, bevor diese Arbeit mit einem Ausblick schließt.

## 2 Methodik

### 2.1 Systemabgrenzung und Einschränkungen

In diesem Kapitel und dem darauf folgenden Kapitel 2.2 werden zunächst diejenigen methodischen Elemente beschrieben, die übergreifend für alle Kapitel gleichermaßen von Relevanz sind. Eine Darlegung von spezifischen, auf die jeweiligen Fragestellungen bezogenen, methodischen Annahmen bzw. Einschränkungen erfolgt dagegen in den Methodenkapiteln 2.3 bis 2.6.

Die in dieser Arbeit<sup>12</sup> durchgeführte systemanalytische Untersuchung bezog sich ausschließlich<sup>13</sup> auf das bereits im vorigen Kapitel 1.1 vorgestellte bioliq®-Verfahren<sup>14</sup> des Forschungszentrums Karlsruhe. Wie die schematische Darstellung des Systemraums aus Abbildung 2.1 verdeutlicht, standen dabei neben dem Aufkommen an Reststroh und Waldrestholz in erster Linie auch die logistischen Komponenten der Bereitstellung im Vordergrund – hierbei war zwischen dem dezentralen und dem integrierten Konzept zu unterscheiden.

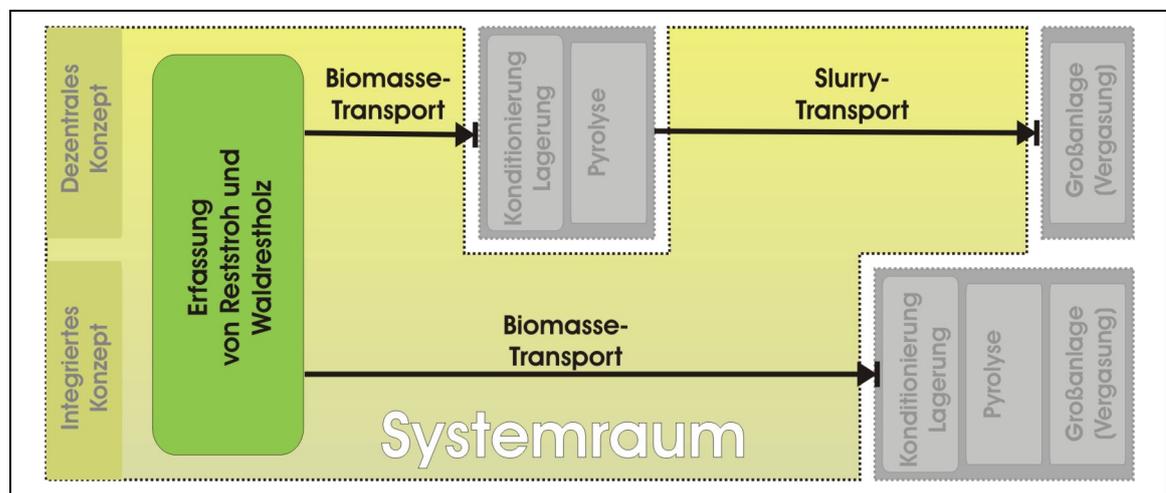


Abbildung 2.1: Definition des zugrunde gelegten Systemraums

Die zu untersuchenden (logistischen) Prozessketten bestehen im Wesentlichen aus der Erfassung von Reststroh und Waldrestholz am Aufkommensort, sowie deren Transport zu einer dezentralen Pyrolyse- bzw. zentralen Vergasungsanlage. Weiterer Untersuchungsgegenstand war darüber hinaus der Transport des Pyrolyse-Endproduktes Slurry von den einzelnen regional verteilten (dezentralen) Pyrolyseanlagen zur zentral gelegenen Vergasungs- und Kraftstoffsyntheseanlage.

Konditionierung, Lagerung und die eigentliche technische Konversion der bereitgestellten Bioenergieträger, sowie die damit in Verbindung stehenden Stoff- und Energie-

<sup>12</sup> Diese Dissertation ist im Rahmen eines vom Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (MLR) geförderten Forschungsprojekts entstanden. An diesem Projekt waren mehrere Institute (Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Institut für Kern- und Energietechnik, Institut für Technische Chemie) des Forschungszentrums Karlsruhe beteiligt.

<sup>13</sup> Dennoch können einige der hier gewonnenen Ergebnisse auch auf die Biomasseversorgung von Heiz(kraft)werken bzw. Kraftwerken übertragen werden, insbesondere aber auf die Co-Verbrennung von Biomasse, z.B. in Kohlekraftwerken.

<sup>14</sup> Dabei wird nur der Prozess der Herstellung von FT-Kraftstoffen betrachtet, obwohl auch andere Verwendungsmöglichkeiten für das Synthesegas gegeben sind.

ströme innerhalb der Anlagen bzw. der Produktionsprozesse blieben zunächst unberücksichtigt. Da allerdings eine abschließende Gesamtbewertung und Gegenüberstellung von dezentralem und integriertem Konzept nur unter Berücksichtigung der Gesamtkosten erfolgen kann, wurde für die in Kapitel 3.4 dargelegten ökonomischen Analysen der Systemraum um die in Abbildung 2.1 abgeblendeten Verfahrenskomponenten erweitert.

Aus Gründen der Vereinfachung wurde die geographische Ausdehnung des betrachteten Systemraumes hierbei auf das Land Baden-Württemberg beschränkt, obwohl Anlagenkonzepte zur Herstellung von synthetischen Biokraftstoffen wirtschaftlich nur als Großanlage zu betreiben sind und demnach über Einzugsgebiete verfügen, welche sich in der Praxis in jedem Falle deutlich über die Landesgrenzen von Baden-Württemberg hinaus erstrecken würden.

Wie bereits erwähnt, wurde als Standort der zentralen Großanlage Karlsruhe ausgewählt (vgl. Abbildung 1.1, S. 7), auch wenn diese Lokation nicht im Zentrum Baden-Württembergs liegt und daher unter räumlichen Gesichtspunkten zunächst nicht plausibel erscheint. Diese Auswahl begründete sich in dem Vorhandensein einer großen Mineralölraffinerie<sup>15</sup> und der damit verbundenen Möglichkeit, die Synthesegasproduktion und -aufbereitung in deren raffinerietechnische Aufbereitungskette stofflich bzw. energetisch zu integrieren.

Entsprechend der räumlichen Auslegung des bioliq®-Konzepts, war es für diese Arbeit notwendig, die Analysen hinsichtlich Biomasseaufkommen und potenziell geeigneter (Pyrolyse-) Anlagenstandorte mit einem gewissen Raumbezug zu verbinden. Eine bloße Zusammenstellung von Sachdaten hätte nicht ausgereicht, da die Frage nach dem Aufkommen bzw. den Anlagenstandorten zwangsläufig die Frage nach dem „wo“ impliziert<sup>16</sup>.

Dementsprechend wurden für die in dieser Arbeit durchgeführten räumlichen Auswertungen und Darstellungen die einzelnen Gemeinden Baden-Württembergs als kleinste Flächenbezugsgröße gewählt. Auch wenn ein Gemeindebezug mit methodischen Schwierigkeiten bzw. Unsicherheiten verbunden ist, erschien dieser mit Blick auf die durchzuführenden Potenzial- und Standortanalysen auch dahingehend notwendig, da die Verteilung von aufkommensrelevanten Agrar- und Waldflächen innerhalb der jeweiligen Landkreise bzw. deren Gemeinden sehr inhomogen ist. In Anhang 6.5 (S. A-123) ist dieser Umstand exemplarisch für den Landkreis Ortenau anhand einer Landnutzungskarte veranschaulicht.

---

<sup>15</sup> Die am Rheinhafen Karlsruhe gelegene Mineralölraffinerie Oberrhein (MIRO) verfügt über eine Rohölestillationskapazität von ca. 16 Mio. Mg/a und ist damit Deutschlands größte Kraftstoffraffinerie (MIRO, 2007).

<sup>16</sup> Aus diesem Grund wurde für die Bearbeitung der Fragen ein geografisches Informationssystem (GIS) eingesetzt. Zum Einsatz kam die Standardversion des handelsüblichen Software-Produktes ARCVIEW 9.0 der Firma ESRI-Geoinformatik, wobei keine der für dieses Produkt typischen Software-Erweiterungen zur Verfügung standen. Das geografische Informationssystem wurde in erster Linie dazu verwendet, die vielfältigen Analysen im Bereich der Potenziale und der Infrastruktur durchzuführen, und die damit gewonnenen Ergebnisse in Form von kartografischen Darstellungen zu visualisieren. Anzahl und Umfang der bei diesen Darstellungen gewählten Klassen wurden so gewählt, dass sich ein möglichst aussagekräftiges Bild ergibt.

Eine tiefer gehende bzw. flächenscharfe Abbildung<sup>17</sup> (z.B. nach Flurstücken) der Aufkommensverhältnisse für ganz Baden-Württemberg hätte nicht nur den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit bei weitem gesprengt, sondern erschien im Hinblick auf die bearbeitete Fragestellungen und der zudem unsicheren Datenlage wenig sinnvoll.

Aufgrund des sehr umfassenden Themenbereichs und der begrenzten Bearbeitungskapazität ließ es sich nicht vermeiden, in dieser Arbeit einige generelle Einschränkungen vorzunehmen. Insofern war es nicht möglich, eine zum Thema bioliq®-Verfahren geschlossene Darstellung zu geben und auf alle im Kontext zur Fragestellung stehenden Themenbereiche in der gleichen Ausführlichkeit einzugehen.

Zudem sei darauf hingewiesen, dass sich das Karlsruher bioliq®-Verfahren noch im Entwicklungsstadium befindet. Sämtliche Annahmen, Analysen sowie daraus abgeleitete Aussagen (zur großtechnischen Umsetzung) beruhen deshalb auf einem Modellansatz und besitzen daher einen mehr oder weniger stark ausgeprägten hypothetischen Charakter.

Die in dieser Arbeit berücksichtigten Umweltauswirkungen beschränkten sich auf eine quantitative Darstellung des Primärenergie- bzw. Stromverbrauchs sowie der damit korrespondierenden treibhausrelevanten Emissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) für die Erfassung und den Transport. Insofern erfolgte keine umfassende Bilanzierung der gesamten Bereitstellungskette von BtL-Kraftstoffen. Weitergehende Auswirkungen auf den Naturhaushalt und die Umwelt (Landschaftszerschneidung, Flächenverbrauch, Lärm) sind für eine Gesamtbeurteilung zwar von Bedeutung, konnten im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt werden.

Ebenfalls ohne Berücksichtigung blieben anlagentechnische Aspekte, da sich in diesem Zusammenhang das Augenmerk auf die Analyse und Bewertung der Transport- bzw. Bereitstellungslogistik richtet. Damit entfällt auch die Diskussion von Problemen, die sich aus dem Betrieb der Anlage ergeben, wie beispielsweise: Schwankungen der Brennstoffqualität, Probleme bei Lagerung und Konditionierung, brennstoffbedingte Korrosion und Versinterung von Anlagenteilen, Einhaltung der Emissionsgrenzwerte, Entsorgung von Rückständen.

Auch hinsichtlich der durchgeführten ökonomischen Analysen und Bewertungen sind einige wesentliche Einschränkungen unabdingbar. So darf diese Arbeit im streng betriebswirtschaftlichen Sinne weder als Projektskizze, Wirtschaftlichkeitsanalyse noch als Machbarkeitsstudie zu diesem am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Konzept verstanden werden. Denn eine exakte betriebswirtschaftliche Standort- bzw. Wirtschaftlichkeitsanalyse, die für die Ableitung der tatsächlichen Realisierungschancen dieses Konzepts notwendig wäre, verlangt, neben den in dieser Arbeit betrachteten Kriterien, die Berücksichtigung einer Reihe von rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (z.B. genehmigungsrechtliche Aspekte, Ausgestaltung der Organisation, Finanzierungs- bzw. Fördermöglichkeiten, Steuerstruktur). Unberücksichtigt blieb in diesem Kontext auch die mit der Realisierung des bioliq®-Konzepts verbundene Entwicklung ländlicher Räume (durch Beschäftigungseffekte), obwohl diese bei der politischen Argumentation von besonderer Bedeutung ist.

---

<sup>17</sup> Da das Einzugsgebiet einer (Pyrolyse-) Anlage eine Vielzahl von Gemeinden und damit auch deren gesamtes Aufkommen umfasst (vgl. Anhang 6.38, S. A-155), war es unter methodischen Aspekten nicht notwendig, die aufkommensrelevanten Flächen innerhalb einer einzelnen Gemeinde weiter zu differenzieren.

Eine wichtige Einschränkung ergab sich aus der Vernachlässigung einer umfassenden Betrachtung der Konkurrenzbeziehungen<sup>18</sup> zur stofflichen oder anderweitig energetischen Nutzung von Stroh und Waldrestholz in Baden-Württemberg. Obwohl die zur Verfügung stehenden Ressourcen gegenwärtig nur unzureichend genutzt werden, wird mit steigenden Energiepreisen<sup>19</sup> und neuartigen Markteinführungsstrategien für Bioenergien, eine zunehmend größere Menge dieses Potenzials mobilisiert werden und sich damit zwangsläufig eine Potenzialaufteilung zwischen Kraftstoff-, Strom- und Wärmeerzeugung einstellen.

Das Aufstellen eines (raumbezogenen) Modells zur Analyse dieser Konkurrenzbeziehungen in Baden-Württemberg wäre zwar zu begrüßen, hätte aber nicht zuletzt wegen der Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter und der lückenhaften Datenlage große Probleme bereitet.

Außer Acht gelassen wurde auch eine Erörterung der vielfach diskutierten Flächenkonkurrenz im Kontext der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe aus gezielt angebaute Energiepflanzen, wie z.B. Ganzpflanzengetreide, Pappeln u.a.

Die künftige Entwicklung des biogenen Brennstoffaufkommens wird auch durch agrar-, forst- und energiepolitische Rahmenbedingungen bestimmt, auf die in dieser Arbeit allenfalls nur am Rande eingegangen wurde. Aussagen und Prognosen zu dieser Thematik sind mit großen Unsicherheiten behaftet, da sich die Rahmenbedingungen der Land- und Forstwirtschaft durch eine Reihe aktueller Strukturreformen im Umbruch befinden und noch nicht genau abzusehen ist, welche Konsequenzen sich daraus ergeben werden. Außerhalb der Betrachtung blieben somit auch spezifische Probleme der Biomassemobilisierung und deren Lösungsansätze.

Vor diesem Hintergrund erhebt die Arbeit weder den Anspruch auf Vollständigkeit, noch kann sie konsistent alle Daten und Fakten zum Stand bzw. den Entwicklungen der betrachteten Themenfelder zusammenfassen. In Anbetracht der Tatsache, dass viele der in dieser Arbeit verwendeten und abgeleiteten Daten nicht nur sehr lückenhaft sondern auch modellhaft sind, können Aussagen, soweit sie sich auf diese Daten beziehen, nur unter dem genannten Vorbehalt getroffen werden. Insofern können die mit dieser Arbeit ermittelten Werte nur eine Orientierung für die in der Praxis tatsächlich zu erwartenden Werte darstellen.

---

<sup>18</sup> In der Annahme, dass die Brennstoffversorgung der Pyrolyseanlagen aus dem bis dato weitestgehend ungenutzten Aufkommen an Reststroh und Waldrestholz erfolgt, konnte deshalb auch die Brennstoffversorgung bestehender Heizkraftwerke unberücksichtigt bleiben.

<sup>19</sup> Der Ölpreisanstieg wird in besonderer Weise die Struktur der Wärmebereitstellung verändern, da es für die Erzeugung von Strom eine Reihe anderer Möglichkeiten gibt.

## 2.2 Begriffserklärungen und Kennwerte zu Reststroh, Waldrestholz und Slurry

Obgleich für das bioliq®-Verfahren eine Reihe verschiedener Biomasseträger eingesetzt werden könnten, wurden im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Reststroh und Waldrestholz in Betracht gezogen. Im Allgemeinen handelt es sich hierbei um energetisch nutzbare Ernterückstände bzw. Nebenprodukte, die in der land- und forstwirtschaftlichen Produktion in großen Mengen anfallen.

Unter Stroh wird ein halmgutartiger Ernterückstand verstanden, welcher bei der landwirtschaftlichen Produktion von körnerliefernden, mähdruschtauglichen und annuellen Kulturen anfällt. Entsprechend dieser Definition ist wiederum zwischen verschiedenen strohliefernden Kulturarten zu unterscheiden. In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff ausschließlich auf das bei der Getreideproduktion anfallende Getreidestroh, d.h. das Aufkommen und die Betrachtung der energetischen Nutzungsmöglichkeiten von Ölsaaten-, Mais- und Körnerleguminosenstroh blieben unberücksichtigt. Da ein Teil des Getreidestrohs bereits stofflich genutzt wird, insbesondere als Einstreu und Futter für die Haltung von Nutz- und Freizeittieren, steht nicht das gesamte Aufkommen an einer energetischen Nutzung zur Verfügung. Darüber hinaus muss ein Teil des Strohaufkommens auf der Anbaufläche verbleiben, um dem Erhalt der Humusbilanz des Bodens Rechnung zu tragen – insbesondere dann, wenn eine Einstreunutzung mit anschließender Mistausbringung (unter Schließung der Nährstoffkreisläufe) nicht vorgesehen ist. Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen verbleibt letztlich das *Reststroh*-Aufkommen, welches potenziell für eine energetische Nutzung zur Verfügung steht.

Unter den energetisch nutzbaren Ernterückständen bzw. Nebenprodukten der forstwirtschaftlichen Nutzung werden im Kontext dieser Arbeit folgende Holzsortimente verstanden:

- *Waldrestholz*, welches als erntetechnisch bedingter Rückstand beim Einschlag von Stammholz bzw. Industrieholz anfällt und derzeit in der Regel größtenteils im Bestand (Wald) verbleibt. Dieses oft auch als Schlagabraum/Schlagrücklass bezeichnete Holzaufkommen besteht aus einer Reihe unterschiedlicher Baumbestandteile<sup>20</sup> (inkl. Rinde) – hauptsächlich sind dies das Kronenderbholz<sup>21</sup>, kurze Stammabschnitte (X-Holz) sowie das Reisholz<sup>22</sup>.
- *Schwachholz*, welches im Zuge von Durchforstungsmaßnahmen bzw. der Bestandspflege anfällt. Diese pflegerischen Maßnahmen werden durchgeführt, um den Holzzuwachs auf wüchsige und qualitativ hochwertige Bäume auszurichten. Der Brusthöhendurchmesser dieses Schwachholzes liegt in der Regel zwischen 7 und 20 cm (Kaltschmitt und Hartmann, 2001).

---

<sup>20</sup> Nicht mit einbezogen sind dabei Baumbestandteile wie Laub, Blüten und Fruchtstände. In der Regel fallen diese Baumbestandteile jahreszeitlich bedingt zum Zeitpunkt der Nutzung nicht an und sollten aus ökologischen Gründen ohnehin im Bestand verbleiben. Bei den Abschätzungen zum energetisch nutzbaren Holzaufkommen wurden jedoch die Nadeln mit einbezogen, da diese beispielsweise beim Kronenhacken anfallen.

<sup>21</sup> Gemessen vom Trennschnitt bis zu einem Schaftdurchmesser von 7 cm.

<sup>22</sup> Alle oberirdisch verholzten Teile mit einem Durchmesser von weniger als 7 cm.

Aus Gründen der besseren Verständlichkeit werden diese beiden Sortimente im weiteren Verlauf der Arbeit pauschal als *Waldrestholz*<sup>23</sup> bezeichnet. Sollte es allerdings für das Verständnis erforderlich sein, wird der Begriff an entsprechender Stelle näher spezifiziert.

Im Rahmen von Kapitel 3.1.4 wird auch Stamm- bzw. Starkholz als weiteres Holzsortiment mit in die Betrachtung einbezogen; in der Annahme, dass davon künftig ein bestimmter Anteil auch einer energetischen Nutzung zugeführt werden könnte. Sofern dieser Holzanteil bei den Diskussionen oder Darstellungen mit Berücksichtigung findet, wird das insgesamt energetische nutzbare Sortiment an entsprechender Stelle dann als (*Wald-*) *Energieholz* bezeichnet.

Obwohl auch die Rinde des aufgearbeiteten Holzes und das Stockholz<sup>24</sup> dem Begriff des Waldrestholzes zugeordnet werden können, blieben diese Baumbestandteile in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt, da in der Regel eine Entrindung im Wald heutzutage kaum mehr stattfindet und die Nutzung von Stockholz aus ökologischen Gründen und den technischen Schwierigkeiten bei dessen Verfügbarmachung eine energetische Nutzung ausschließen.

Die Untersuchung und Bewertung der Logistik-Prozessketten zum *bioliq*<sup>®</sup>-Verfahren machte es erforderlich, einen weiteren Bioenergieträger – obgleich es sich hierbei nicht um einen Bioenergieträger im klassischen Sinne handelt – zu berücksichtigen, den *Slurry*. Darunter wird das pump- und lagerfähige Endprodukt der thermochemischen Umsetzung von Reststroh und Waldrestholz durch die Pyrolyse verstanden. Hierbei handelt es sich um eine Mischung aus kondensiertem Pyrolyseöl<sup>25</sup> (ein schwarzbraunes, rauchig riechendes, organisch viskoses Kondensat) und sprödem Pyrolysekoks.

In Hinblick auf die in dieser Arbeit durchgeführten Kalkulationen bzw. Analysen war es notwendig, für die o.g. Bioenergieträger von einer einheitlichen Datenbasis auszugehen. In Tabelle 2.1 (S. 17) sind deshalb die wichtigsten stoffspezifischen Kenngrößen von Reststroh, Waldrestholz und *Slurry* aufgelistet, wobei bezüglich des Reststrohs und Waldrestholzes zwischen unterschiedlich vorkonditionierter Formen differenziert wurde.

Im Sinne einer besseren Vergleichbarkeit war es darüber hinaus erforderlich, eine einheitliche Bezugsgröße einzuführen. Dementsprechend wurden alle in der Arbeit abgeleiteten Werte bzw. Kenngrößen auf eine Tonne Trockenmasse (Mg TM) oder aber auf den Heizwert (MJ bzw. GJ) bezogen.

Für die unterschiedlichen Kalkulationen in dieser Arbeit wurden eine Reihe weiterer Parameter, Eingangsdaten, Bezugsgrößen sowie verschiedene Umrechnungsfaktoren berücksichtigt. Deren Darstellung und Erläuterung erfolgt in den jeweiligen Ergebniskapiteln bzw. ist in den jeweiligen Berechnungstabellen angegeben.

---

<sup>23</sup> Unter diesem Begriff wird auch das in Kapitel 3.1.4.2 vorgestellte Sortiment des „nicht-verwerteten Abgangs“ (hier auch als NV-Holz benannt) subsumiert.

<sup>24</sup> Unterirdische Holzteile einschließlich des oberirdischen Stammstückes bis zum Fallschnitt.

<sup>25</sup> Pyrolyseöle bestehen hauptsächlich aus organischen Kondensaten der Pyrolysedämpfe mit einer speiseölähnlichen Viskosität und einem Heizwert zwischen 15 bis 20 MJ/kg. Der Rest stellt ein Vielstoffgemisch aus organischen, sauerstoffhaltigen Verbindungen (Carbonsäuren, Pyrolyselignin, Aldehyde, Ketone, Alkohole, Phenole, u.a.) dar. Pyrolyseöle sind mit Wasser, nicht aber mit Heizöl mischbar. Ihr typischer Wassergehalt liegt je nach Ausgangsmaterial und Herstellbedingungen zwischen 15 % und 30 %. (Malcher et al., 2004).

**Tabelle 2.1: Stoffeigenschaften von (Rest-) Stroh, Waldrestholz und Slurry**

Bioenergieträger	Form/Zustand	TM-Gehalt (% FM)	Press-/Schüttdichte (Mg FM/m <sup>3</sup> )	Heizwert H <sub>u</sub> (MJ/kg FM)
<b>(Rest-) Stroh</b> <sup>a)</sup>	Quaderballen	86	0,15	14,5
	Rundballen	86	0,12	14,5
<b>Waldrestholz</b> <sup>b)</sup>	Hackschnitzel, <i>waldfrisch</i>	50	0,4	7,4
	Hackschnitzel, <i>abgelagert</i>	65	0,3	10,4
	Holz Bündel, <i>waldfrisch</i>	50	0,4	7,4
	Holz Bündel, <i>abgelagert</i>	65	0,2	10,4
<b>Slurry</b> <sup>c)</sup>	Flüssigkeit/Suspension	-	1,25	17,9

Anmerkungen: a) Bei den in Kapitel 3.2 durchgeführten Kalkulationen zur Erfassung und dem Transport wurden unterschiedlich große Quader- bzw. Rundballen mit einbezogen.

b) Bei den in der Tabelle angegebenen Schüttdichten und Heizwerten für Hackschnitzel wurde nicht zwischen Nadelhackschnitzel und Laubholz hackschnitzel unterschieden, obwohl diese bei den Laubholz hackschnitzeln höher liegen.

c) Werte zum Trockenmassengehalt von Slurry lagen (noch) nicht vor.

Quellen: Zusammenstellung in Anlehnung an FNR, 2005b; Kanzian, 2005; KTBL, 2005; Marutzky und Seeger, 1999; Malcher et al., 2004

## 2.3 Aufkommen an Reststroh und Waldrestholz

In dieser Arbeit werden die Begriffe *Aufkommen* und *Potenzial* synonym verwendet und bezeichnen, soweit nicht anderes angegeben, das theoretische Potenzial bzw. technische Potenzial, wobei sich letzteres unter Berücksichtigung verschiedenster technischer Restriktionen ergibt. Grundsätzlich sind die unterschiedlichen Potenzialbegriffe<sup>26</sup> nicht immer eindeutig voneinander abgrenzbar und hängen ganz wesentlich von den aktuell vorherrschenden technischen wie auch wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab.

Die Art bzw. Methodik der Potenzialabschätzung richtet sich prinzipiell nach den primär zur Verfügung stehenden Quellen. Und wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, besteht hierbei das Problem, dass bei Verwendung dieser statistischen Daten der gewünschte Raumbezug in der Regel nicht bzw. nur eingeschränkt gegeben ist. Dementsprechend wurden bei den in dieser Arbeit durchgeführten Potenzialanalysen zunächst die überwiegend auf Stadt- bzw. Landkreisebene zur Verfügung stehenden Daten ausgewertet und anschließend in einem Top-down-Ansatz durch Anwendung verschiedenster komplexer Verteilungsalgorithmen den jeweiligen Gemeinden als kleinste räumliche Bezugseinheit<sup>27</sup> zugeordnet. Ein Blick auf die in Anhang 6.5 (S. A-123) exemplarisch dargestellte Landnutzungsverteilung des Landkreises Ortenau, macht diese Vorgehensweise plausibel.

<sup>26</sup> Zur Definition und Einteilung des Potenzialbegriffes sei auf Kaltschmitt (2001) hingewiesen.

<sup>27</sup> Im Falle der Ermittlung des Waldrestholzaufkommens auf Basis der Daten der Forsteinrichtungsplanung wurde diese Verteilung ausgehend von den Flächen der Forstamtsbezirke durchgeführt.

Des Weiteren ergibt sich in diesem Kontext das Problem der Berücksichtigung und Darstellung der räumlichen und zeitlichen Variation des Aufkommens, welche durch eine Vielzahl unterschiedlichster Faktoren (z.B. wirtschaftliche/energiepolitische Rahmenbedingungen, klimatische Bedingungen, Änderung der Besitzverhältnisse, Ausweisung von Schutzgebieten, Flächenstilllegungen) nicht nur das Aufkommen, sondern auch dessen Verfügbarkeit maßgeblich beeinflussen. So ist insbesondere im Agrarbereich durch die alljährliche Änderung der Fruchtfolgen eine eindeutige Zuweisung von Strohaufkommen auf eine klar definierte Ackerfläche kaum möglich<sup>28</sup>. Aber auch die Waldflächen stellen keine statischen Gebilde dar, sondern sind in ihrem strukturellen Aufbau und hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit dynamisch, d.h. einem kontinuierlichen Wandel unterworfen (Hepperle, 2005). Da es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, die räumlichen bzw. zeitlichen Variationen ausreichend mit einzubeziehen, stellen die hier ausgeführten Potenzialanalysen mehr oder weniger eine „Momentaufnahme“ dar. Allerdings wurde bei der Auswertung des Waldrestholzpotenzials auf Daten zurückgegriffen, welche die Holznutzung nach Art und Umfang für einen Zeitraum von bis zu 15 Jahren festlegen und somit eine bestimmte Variation bereits enthalten.

Für die Potenzialanalysen wurden zwar eine Reihe gemeindespezifischer Gegebenheiten und Restriktionen – die eine Nutzung der genannten Energieträger entweder vollständig oder teilweise ausschließen – mit berücksichtigt, aufgrund der Unkenntnis über diverse technische, strukturelle, wirtschaftliche und ökologische Beschränkungen können die hier abgeleiteten Potenzialangaben allerdings erheblich von den in der Praxis an einem bestimmtem Ort tatsächlich zur Verfügung stehenden Mengen abweichen.

Bei allen hier vorgestellten Berechnungsmodellen wurden eine Vielzahl von Parameter als Eingangsgrößen verwendet, die in plausiblen Rahmen verändert werden können und daher eine Abbildung verschiedenster Szenarien erlaubten.

Im Kontext der räumlichen Analyse stellt die Angabe eines absoluten Biomasseaufkommens keine primäre und für einen Vergleich geeignete Größe dar, weshalb stets flächenbezogene Aufkommensdichten und Kennzahlen abgeleitet wurden. Bezugsgröße hierbei war, soweit nicht anders genannt, die gesamte Bodenfläche (BF in ha) der jeweils betrachteten räumlichen Einheit (Land, Landkreis, Gemeinde).

Da eine Erläuterung zur methodischen Vorgehensweise dieser Analysen recht komplex ist, wäre eine ausführliche textliche Beschreibung sehr umständlich. Deshalb sei hier ausdrücklich auf die umfangreiche Dokumentation im Anhang verwiesen. Dort finden sich nicht nur wesentliche Anmerkungen und Annahmen zu den Berechnungsmodellen, sondern insbesondere auch eine Reihe von Flussdiagrammen, welche die Berechnungsmethodik veranschaulichen.

---

<sup>28</sup> Mit den neuerdings zur Verfügung stehenden (nicht öffentlich zugänglichen) GISELa-Daten wäre künftig auch eine Berücksichtigung solcher Flächenänderungen möglich.

### 2.3.1 Daten und Berechnungsmodell zur Analyse des Reststrohaufkommens

Das jährlich anfallende Aufkommen an Reststroh, welches theoretisch für eine energetische Nutzung zur Verfügung stünde, leitet sich unter Berücksichtigung diverser Restriktionen hauptsächlich aus dem Umfang der mit Getreide bebauten Ackerfläche ab. Die Restriktionen ergeben sich in erster Linie aus dem Strohbedarf in Zusammenhang mit der Viehhaltung und derjenigen Strohmenge, die zur Erhaltung der Humusbilanz auf dem Feld verbleiben sollte (vgl. Anhang 6.7, S. A-125).

Das landkreisspezifische Bruttoaufkommen an (Getreide-) Stroh wurde anhand der landkreis- und feldfruchtspezifischen Anbauflächen und Kornerträgen, unter Berücksichtigung des fruchtspezifischen Korn-/Strohverhältnisses, ermittelt. Davon wurden in Abhängigkeit der landkreisspezifischen Anzahl an Großvieheinheiten (GVE) Abzüge für Einstreu und Verfütterung vorgenommen. Um dem Erhalt der Humusbilanz Rechnung zu tragen, wurde davon ausgegangen, dass von dieser Differenz<sup>29</sup> (Bruttostrohaufkommen abzüglich Bedarf für Einstreu und Verfütterung) lediglich rund 60 % vom Feld abgefahren werden kann. Damit ergab sich schließlich nach Umrechnung in die Trockenmasse (TM), das einer energetischen Nutzung zur Verfügung stehende Reststrohaufkommen der einzelnen Stadt- und Landkreise.

Die Datengrundlage zur Analyse dieses Strohaufkommens bildeten vorwiegend die vom Statistischen Landesamt zur Verfügung gestellten statistischen Berichte.

Für die Auswertung wurde das Bezugsjahr 2003 gewählt, da in diesem Jahr neben der herkömmlichen Bodennutzungshaupterhebung auch eine sogenannte Agrarstruktur-erhebung<sup>30</sup> durchgeführt wurde, bei der die landkreisspezifische Anbaufläche auf die einzelnen Feldfruchtarten bezogen wird. Die Ergebnisse dieser Erhebung finden sich im statistischen Bericht zur Bodennutzung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 2003 (StaLa, 2004a).

Hinsichtlich der Hektarerträge zur Getreideernte in den Stadt- und Landkreisen wurden die statistischen Berichte (StaLa, 2000 bis 2005) aus den Jahren 1999 bis 2003 ausgewertet, um die aufgrund klimatischer Bedingungen stark schwankenden jährlichen Hektarerträge zu mitteln.

Die Mittelwertbildung wurde ebenfalls angewendet, um Datenlücken zu schließen, welche durch Geheimhaltungsfälle<sup>31</sup> und Inkonsistenzen bedingt waren. Andererseits wurden für einige Landkreise Hektarerträge zu Sommer- und Wintermenggetreide dargestellt, ohne Angaben zu den entsprechenden Anbauflächen. In diesem Fall wurden die Flächenangaben zur Agrarstruktur-erhebung aus dem Jahre 1999 (StaLa, 2000) herangezogen.

Die feldfruchtspezifischen Korn-/Strohverhältnisse wurden in Anlehnung an Hydro Agri Dülmen (1993) angesetzt.

---

<sup>29</sup> Folglich werden bei Gemeinden mit geringeren Viehbeständen höhere Abzüge vorgenommen, da weniger Stroh in Form von Mist auf die Felder zurückgeführt wird.

<sup>30</sup> Die Agrarstruktur-erhebung wird im Rahmen der allgemeinen Bodennutzungshaupterhebung in einem Intervall von 4 Jahren durchgeführt. Aktuelle Ergebnisse der gegenwärtig durchgeführten Erhebung werden voraussichtlich ab Dezember 2007 in Form eines statistischen Berichtes vorliegen (StaLa, 2007a).

<sup>31</sup> Geheimhaltungsfälle waren insbesondere hinsichtlich feldfrucht- und landkreisspezifischen Anbauflächen gegeben.

Grundlage zur Abschätzung des Strohbedarfs für die Viehhaltung bildete der Bericht zu den Viehbeständen und -haltern in Baden-Württemberg 2003 (StaLa, 2004b). Die Menge an verfüttertem Stroh wurde vom BMVEL (2001) abgeschätzt und lag demnach im Jahr 1999 bei rund 1,87 Mio. Mg FM. Bezogen auf die hierfür relevanten Viehbestände ergab sich daraus eine mittlere verfütterte Menge von 0,13 Mg FM pro Großvieheinheit (GVE).

Die Umrechnung des tierartenspezifischen Viehbestandes in Großvieheinheiten erfolgte entsprechend den im statistischen Bericht (StaLa, 2002a) angegebenen Umrechnungsfaktoren. Der Bestand an Geflügel wurde generell herausgerechnet, da bei dieser Viehart nicht von einer Strohverfütterung auszugehen ist.

Wesentlich schwieriger war die Abschätzung derjenigen Strohmenge, welche als Einstreu in der Viehhaltung Verwendung findet. Im Rahmen einer eigenen Abschätzung, angelehnt an die Ruhr-Stickstoff AG (1988) und BML (2000), leitet sich diese aus dem Viehbestand und dem Wirtschaftsdüngeraufkommen ab. Dabei wurde angenommen, dass die Menge an Einstreu von der Viehart und dem Haltungsverfahren (Gülle- bzw. Festmistwirtschaft) bestimmt wird. Unterstellt wurde bei Schafen und Pferden eine 100 %ige Festmistwirtschaft mit einer jährlichen Stroheinstreumenge von 2,2 Mg FM/GVE; bei Rindern und Schweinen eine 75 %ige Güllewirtschaft mit einem jährlichen Strohbedarf von 0,55 Mg FM/GVE.

Um die Entwicklung<sup>32</sup> des Strohaufkommens der vergangenen Jahrzehnte vor Augen zu führen, wurde nach o.g. Methodik auch eine vergleichende Strohanalyse<sup>33</sup> für das Jahr 1980 durchgeführt. Datengrundlage hierfür bildeten der Bericht zur Bodennutzung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 1979 (StaLa, 1980), der Bericht zu den Viehbeständen und -halter in Baden-Württemberg 1980 (StaLa, 1981a) sowie der Bericht zur Ernte der Hauptfeldfrüchte 1980 (StaLa, 1981b). Alle weiteren Daten bzw. Parameter wurden o.g. Berechnung zum Jahr 2003 entnommen, wobei hinsichtlich der Einstreumengen bei Rindern und Schweinen von einer 50 %igen Güllewirtschaft ausgegangen wurde.

Die Berechnung des energetisch nutzbaren Strohaufkommens auf Gemeindeebene erfolgte, indem das für die Landkreise ermittelte Bruttostrohaufkommen in Abhängigkeit der gemeindespezifischen Getreideanbaufläche<sup>34</sup> (ohne Körnermais) und Viehbestände verteilt wurde. In gleicher Weise wurden auch hier hinsichtlich der Humusbilanz Abschläge vorgenommen (vgl. Anhang 6.7, S. A-125).

---

<sup>32</sup> Da es unter methodischen Aspekten für die Beurteilung des zeitlichen Verlaufes einer Entwicklung notwendig ist, mehr als zwei unterschiedliche Jahre zu betrachten, wurde zudem eine Zeitreihenanalyse (auf deren Darstellung wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet) durchgeführt. Es zeigte sich, dass das Strohaufkommen zwischen den beiden betrachteten Jahren 1980 bzw. 2003 einen nahezu linearen Verlauf zeigt.

<sup>33</sup> Im Rahmen einer Novellierung (1998) des Agrarstatistikgesetzes (AgrStatG, 2006) wurden die Erfassungsgrenzen für landwirtschaftliche Betriebe angehoben und vereinheitlicht. Deshalb sind die Ergebnisse der beiden Strohanalysen nur eingeschränkt miteinander vergleichbar.

<sup>34</sup> Da die agrarstatistischen Daten zu den Gemeinden größtenteils nicht frei verfügbar bzw. zugänglich sind, wurde deren Zusammenstellung dem Statistischen Landesamt in Auftrag gegeben.

Anders als bei der Herleitung des Waldrestholzaufkommens wurde bei der Analyse des Strohaufkommens eine Berücksichtigung von Hangneigungen nicht vorgenommen, weil die Getreideflächen ausschließlich auf flachem Terrain liegen und somit eine maschinelle Zugänglichkeit diesbezüglich keinen Einschränkungen unterworfen ist.

### 2.3.2 Daten und Berechnungsmodelle zur Analyse des Waldrestholzaufkommens

Die Abschätzungen zum Aufkommen an Waldrestholz erfolgten anhand zweier verschiedener Modellansätze mit jeweils unterschiedlicher Datenbasis. Dabei ergaben sich entsprechend der gewählten Datenbasis erhebliche Unterschiede bezüglich des abgeschätzten Waldrestholzaufkommens.

Während aus dem ersten Modellansatz insbesondere Aussagen zu den bisher genutzten Waldrestholzmengen abgeleitet wurden, diente der zweite Modellansatz aufgrund seines prognostischen Charakters, seines Abbilds der Gesamtwaldsituation und deren Klassifizierung in Abhängigkeit der Hangneigungen, als Grundstein für die in dieser Arbeit durchgeführten Standortanalysen.

Im *Modell 1* wurde zur Ermittlung des Aufkommens auf die von der Landesforstverwaltung im forststatistischen Jahresbericht (MLR, 2003) dokumentierten Einschlagzahlen für das Forstwirtschaftsjahr 2002<sup>35</sup> zurückgegriffen. Diesem Bericht wurden die Kennzahlen über Waldflächen, Waldbesitzverhältnisse sowie über den Holzeinschlag im Staatsforstbetrieb und dem Körperschaftswald für die einzelnen Forsteinrichtungen bzw. Forstbezirke entnommen.

Die geografische Flächenbezugsgröße in diesem *Modell 1* war durch die flächenhafte Ausdehnung der einzelnen Forstamtsbezirke (Grenzfestlegung von 1998) vorgegeben. Ausgangspunkt der Berechnung waren die im Bericht zu den jeweiligen Forstbezirken umgesetzten Einschlagszahlen für den Staats- und Körperschaftswald im Forstwirtschaftsjahr 2002 – getrennt nach Laub- und Nadelholz. Die methodische Vorgehensweise zur Abschätzung des Waldrestholzaufkommens (vgl. Anhang 6.8, S. A-126 und Anhang 6.9, S. A-127) auf Basis der Forsteinrichtungsplanung orientierte sich an der Studie von Sigmund und Frommherz (2000). Dementsprechend richtete sich die Höhe der mittleren prozentualen Anteile<sup>36</sup>, mit denen die Menge einzelner unterschiedlicher Restholzfraktionen aus der geernteten Derbholzmenge (Einschlagszahlen) abgeleitet werden konnten, größtenteils an den in dieser Studie vorgeschlagenen Werten<sup>37</sup>.

Das Berechnungsschema in Form eines Flussdiagramms aus Anhang 6.8 (S. A-126) zeigt, dass zunächst für den Staats- und Körperschaftswald anhand der für die jeweiligen Forsteinrichtungen ausgewiesenen Derbholzeinschläge – jeweils getrennt nach Laub- und Nadelholz – der Anteil des hierbei anfallenden und in der Regel im Bestand verbleibenden Derb- und Reisholzes abgeschätzt wurde. Hiervon wurde eine bestimmte, von Selbstwerbern aufgearbeitete Menge (Brennholz) abgezogen. Unter Berücksich-

---

<sup>35</sup> Das Bezugsjahr 2002 ist für einen Vergleich gut geeignet, da es auch das Stichjahr für die zweite Bundeswaldinventur war.

<sup>36</sup> Diese mittleren prozentualen Anteile wurden für diese Studie im Rahmen eines Expertenworkshops festgelegt. Dabei wurden entsprechende Restriktionen hinsichtlich des Nährstoffentzugs mit berücksichtigt. Eine Darstellung zu den verwendeten Zuschlagssätzen findet sich im Berechnungsschema von Anhang 6.8 (S. A-126).

<sup>37</sup> Weitere solcher Werte wurden Wittkopf (2005a) entnommen.

tigung eines Zuschlages für die Rinde, ergab sich als Ergebnis schließlich die Summe des frei verfügbaren Aufkommens.

Da die Daten für den Privatwald in dem forststatistischen Jahresbericht nur stark aggregiert vorlagen und zudem unvollständig bzw. inkonsistent sind, wurden für die Berechnung des Privatwald-Potenzials die flächenbezogenen und gewichteten Kennzahlen aus der Berechnung zum Staats- und Körperschaftswald herangezogen. Dabei wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass der Einschlag im Privatwald deutlich unter dem des Staats- und Körperschaftswaldes liegt und sich dort die Mobilisierung des Waldrestholzes im Allgemeinen schwieriger gestaltet.

Das wesentlich aufwändigere *Modell 2* zur Berechnung des Waldrestholzaufkommens stützt sich auf die Daten der Bundes- bzw. Landeswaldinventuren<sup>38</sup> aus den Jahren 1987 und 2002, welche von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) sowie der Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg (BFH) zur Verfügung gestellt wurden. Von der FVA wurden hierbei die Daten zur Landeswaldinventur (für Baden-Württemberg) soweit aufbereitet, dass diese auf Landkreisebene aufgegliedert vorlagen (vgl. Anhang 6.10, S. A-128f). Darüber hinaus wurden Daten zur Verfügung gestellt, die, basierend auf einem eigens von der FVA entwickelten Holzaufkommens-Prognosemodells (WEHAM)<sup>39</sup>, die Vorratsentwicklung und Nutzungssituation bis zum Jahr 2017<sup>40</sup> abbilden. Ebenfalls von der FVA wurden GIS-Daten zur Besitzstruktur des Waldes (Stand 1998) und zu den Sturmwurfflächen in Baden-Württemberg ausgehändigt (Bayer, 2007).

Ausgangsbasis für die Berechnung des Waldrestholzaufkommens bzw. der Vorräte auf Gemeindeebene bildete im Wesentlichen die im Anhang 6.10 (S. A-128f) dargestellte Datentabelle, wobei die landkreisspezifischen Daten für unterschiedliche BWI-Stichjahre und für die jeweiligen Perioden (1987 bis 2002; 2002 bis 2017) in teilweise kumulierter Form dargestellt sind. Unter Berücksichtigung der in der Datentabelle angegebenen mittleren Periodenlänge lassen sich hieraus dann jährliche Durchschnittswerte ableiten.

Da sich die zur Verfügung stehende Datenbasis auf unterschiedliche zeitliche Perioden erstreckt und auch der Vorratsentwicklung eine Bedeutung zukommt, wurde bei *Modell 2* zwischen *drei Varianten* differenziert. Es sei hier nochmals erwähnt, dass die ausführliche Darstellung dieser Berechnungsvarianten in Form von Flussdiagrammen im Anhang 6.17 (S. A-135), Anhang 6.18 (S. A-136), Anhang 6.19 (S. A-137) und Anhang 6.21 (S. A-139) zu sehen ist, wobei Anhang 6.13 (S. A-132) nicht nur eine vereinfachte Darstellung des Berechnungsschemas, sondern auch die der Berechnung zugrunde gelegten prozentualen Anteile zeigt, mit denen die einzelnen Restholzfraktionen aus

---

<sup>38</sup> Durch die Bundes-/Landeswaldinventur (im weiteren Verlauf der Arbeit einheitlich als Bundeswaldinventur benannt) wird ein Überblick über die großräumigen Waldverhältnisse und forstlichen Produktionsmöglichkeiten geschaffen. Dabei erfolgt eine Erfassung und Darlegung des aktuellen Waldzustandes, der Waldentwicklungsdynamik, der Vorratsentwicklung sowie der Holznutzung. Eine aggregierte Zusammen- bzw. Gegenüberstellung einiger wesentlicher Bundeswaldinventur-Daten für die beiden Stichjahre 1987 und 2002 ist in Anhang 6.11 (S. A-130) dargelegt.

<sup>39</sup> WEHAM: Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung. Dieses Modell wurde von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg im Auftrag des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft entwickelt.

<sup>40</sup> Dieses Stichjahr wurde in Anlehnung an die bisherige Periode (1987 bzw. 2002) zwischen den beiden Bundeswaldinventuren angenommen. Allerdings wurde durch die jüngst verabschiedete Dritte Bundeswaldinventur-Verordnung (2007) das Stichjahr für die nächste Bundeswaldinventur auf das Jahr 2012 festgelegt.

der Holznutzung abgeleitet wurden. Wesentliche Einschränkungen bzw. Annahmen sind darüber hinaus in Anhang 6.14 (S. A-133) wiedergegeben.

Die Berechnung des Aufkommens aus den in der Datentabelle (Anhang 6.10, S. A-128f) aufgelisteten landkreisbezogenen Daten und deren Zuordnung auf die jeweiligen Gemeinden erfolgte durch Anwendung einer Reihe unterschiedlicher (veränderbarer) Kriterien bzw. Algorithmen. Die primäre Schlüsselgröße hierbei stellten die gemeindespezifischen Waldflächen (getrennt nach Laub- und Nadelfläche) dar, die wie nachfolgend beschrieben unterschiedlich modifiziert bzw. modelliert wurden:

- Die (gemeindespezifischen) Waldflächen<sup>41</sup> wurden mit dem Höhenmodell Baden-Württembergs (DHM BW) durch eine GIS-Auswertung<sup>42</sup> in 18 verschiedene Hangneigungsklassen eingeteilt und den jeweiligen Gemeinden zugeordnet. Diese Hangneigungsklassen wurden wiederum in Abhängigkeit der Nutzungsmöglichkeit zu fünf unterschiedlichen Nutzungsklassen<sup>43</sup> zusammengefasst bzw. gruppiert. Eine entsprechende Darstellung hierzu findet sich im Anhang 6.12 (S. A-131).
- Waldflächen<sup>44</sup>, die unter Naturschutz stehen und somit von einer Nutzung in der Regel ausgeschlossen sind, wurden im Rahmen einer GIS-Auswertung auf die jeweiligen Gemeinden übertragen. Demnach wurde die nutzbare gemeindespezifische Waldfläche, welche als Schlüsselgröße dient, entsprechend reduziert.
- Mit Hilfe einer GIS-Auswertung wurden die gemeindespezifischen Waldflächen entsprechend ihrer Eigentumsverhältnisse in Abhängigkeit der angenommenen Nutzungsintensität zu zwei Klassen gruppiert. In einer Klasse wurde der Staats-/Kommunal- und Großprivatwald zum *Öffentlichen Wald* und in einer weiteren Klasse der mittlere Privatwald und Kleinprivatwald zum *Privatwald* zusammengefasst.
- Ebenfalls mithilfe des GIS wurden die Wurfflächen des Sturmereignisses „Lothar“ ausgewertet und den jeweiligen Gemeinden zugeordnet.

Mit *Variante 1* (vgl. Anhang 6.17, S. A-135) wurde das gemeindespezifische, durchschnittliche Waldrestholzaufkommen für die Periode 1987 bis 2002 bestimmt. Dabei wurde durch die festgelegten prozentualen Anteile (vgl. Anhang 6.13, S. A-132) aus dem während der Periode 1987 bis 2002 ausgeschiedenen Vorrat die jeweils im Bestand verbleibende Menge an Derbholz und Nicht-Derbholz (Reisholz) einschließlich Nadeln ermittelt.

Die Zuordnung des ausgeschiedenen Vorrates auf die Fraktionen Nadel- bzw. Laubholz erfolgte hierbei nicht nur anhand der gemeindespezifischen Nadel-/Laubwald-

---

<sup>41</sup> Datenbasis bildeten die georeferenzierten ATKIS-Waldflächen (ATKIS, 2005).

<sup>42</sup> Diese Modellierung wurde in Zusammenarbeit mit der FVA-Freiburg durchgeführt. Es wurde eine Verschneidung der Landeswaldfläche (ATKIS, 2005) mit dem Digitalen Höhenmodell von Baden-Württemberg (DHM BW) und einer anschließend durchgeführten Nachbarschaftsanalyse zur Bestimmung der gemeindespezifischen Waldflächen-Hangneigungen, vorgenommen.

<sup>43</sup> Von den in Anhang 6.12 (S. A-131) vorgestellten Klassen wurden ausschließlich die Nutzungsklassen „leicht“, „möglich“ und „schwer“ berücksichtigt, da diese bereits ca. 98 % der Waldflächen umfassen.

<sup>44</sup> Diese Flächen wurden dem Räumlichen Informations- und Planungssystem BW (RIPS, 2005) entnommen.

fläche, sondern auch unter Berücksichtigung des Verhältnisses von Nadel- und Laubholzeinschlag (vgl. Anhang 6.15, S. A-134).

In Anlehnung an die o.g. allgemeingültigen Flächenspezifizierungen wurden für die Zuordnung der Aufkommen auf die jeweiligen Gemeinden bei Variante 1 folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Gemeinden mit Sturmwurfflächen wurde mehr Waldrestholzaufkommen zugewiesen, in der Annahme, dass auf den Wurfflächen ein nahezu vollständiger Vorratsabgang stattfand (eigene Annahme: 90 %) Vorratsabgang stattfand.
- Gemeinden mit einem höheren prozentualen Anteil an Waldflächen der Nutzungsklassen 3 (schwer) bis 5 (unmöglich) (vgl. Anhang 6.12, S. A-131) bekamen weniger Aufkommen zugeordnet als Gemeinden der Nutzungsklasse 1 (leicht) bis 2 (möglich); verbunden damit ist die Annahme, dass der Vorratsabgang in dieser Periode überwiegend in zugänglicheren Waldflächen stattfand (vgl. Anhang 6.16, S. A-134).
- Gemeinden mit einem höheren Anteil an Privatwald (mittlerer Privatwald und Kleinprivatwald) bekamen weniger Aufkommen zugeordnet als der Öffentliche Wald, da im Privatwald die Nutzung deutlich geringer war (vgl. Anhang 6.16, S. A-134).

Mit *Variante 2* (vgl. Anhang 6.18, S. A-136 und Anhang 6.19, S. A-137) wurde der Versuch unternommen, das derzeitige bzw. für die nächsten Jahre zu erwartende jährliche Waldrestholzaufkommen auf Gemeindeebene abzubilden. Entsprechend der gewählten Daten (Periode 2002 bis 2017) hat diese Auswertung einen prognostischen Charakter und bildete damit ein wichtiges Element für die in dieser Arbeit durchgeführten Standortanalysen. Im Gegensatz zu Variante 1 wurden für die Berechnung des Waldrestholzaufkommens weitere Waldrestholzfraktionen mit einbezogen. Dies waren der „nicht-verwertete Abgang“, das „Schwachholz“ (vgl. Anhang 6.20, S. 138) und der „zusätzlich nutzbare Vorrat“. Bei Letzterem wurde davon ausgegangen, dass die bisherigen und auch künftig weiterhin zu erwartenden Vorratszunahmen anstatt einer stofflichen, alternativ auch einer energetischen Nutzung zugeführt werden könnten. Entsprechend wurde die auf Landkreisebene dokumentierte und für die Periode bis 2017 geschätzte Vorratsentnahme um diesen zusätzlich nutzbaren Vorrat erweitert. Eine zusätzliche Vorratsentnahme war hierbei nur bei den Landkreisen vorgesehen, bei denen der Vorrat gegenüber dem Jahr 1987 bzw. 2002 voraussichtlich weiterhin ansteigen wird. Dabei wurde der zusätzlich nutzbare Vorrat in seiner Gesamtheit als energetisch nutzbar betrachtet.

Die eigentliche Bestimmung der Aufkommen erfolgte analog zu Variante 1, wobei die dort erwähnten methodischen Ansätze wie folgt geändert bzw. ergänzt wurden:

- Die gemeindespezifischen Sturmwurfflächen wurden auf unterschiedliche Weise mit berücksichtigt. Einerseits wurde bei der Berechnung des Aufkommens davon ausgegangen, dass auf diesen Flächen, aufgrund des sturmbedingten Vorratsabgangs, bis 2017 keine nennenswerten Einschlüge mehr stattfinden werden. Andererseits wurde im Falle der Berechnung des Schwachholzaufkommens denjenigen Gemeinden mit einem hohen Anteil an Sturmwurfflächen mehr Schwachholzaufkommen zugewiesen, da auf diesen Flächen eine Verjün-

gung im Gange ist. Hierbei wurde auch die landkreisspezifische Holzstärkengliederung mit einbezogen.

- Bei der Zuordnung des ausgeschiedenen Vorrates auf die Fraktionen Nadel- bzw. Laubholz wurde davon ausgegangen, dass sich die Vorratsentnahme (Nutzung) etwas zugunsten des Laubholzes verschiebt (vgl. Anhang 6.15, S. A-134).
- Im Vergleich zu Variante 1 wurde Gemeinden mit Waldflächen in Steillagen etwas mehr Aufkommen zugewiesen, in der Annahme, dass eine künftige Vorratsentnahme zunehmend auch auf steileren Flächen erfolgt (vgl. Anhang 6.16, S. A-134).
- Im Vergleich zu Variante 1 wurde Gemeinden mit einem höheren Anteil an Privatwald (mittlerer Privatwald und Kleinprivatwald) etwas mehr Aufkommen zugeordnet, in der Annahme, dass sich eine künftige Vorratsentnahme etwas zugunsten des Privatwaldes verschiebt (vgl. Anhang 6.16, S. A-134).

Mit *Variante 3* (vgl. Anhang 6.21, S. A-139) wurden die aus der Bundeswaldinventur 2 abgeleiteten landkreisspezifischen Vorräte für das Jahr 2002 auf Gemeindeebene dargestellt. Diese Vorräte sind zwar kein Abbild des Waldrestholzaufkommens im eigentlichen Sinne, doch lassen sich aus der Vorratssituation Rückschlüsse ableiten, in welchen Gegenden künftig verstärkt Holz eingeschlagen werden könnte.

Für diese Variante wurden die bisherigen Annahmen wie folgt geändert bzw. ergänzt:

- Bei Gemeinden mit einem hohen Anteil an Sturmwurfflächen wurde von einem nahezu vollständigen Vorratsabgang (eigene Annahme: 90 %) ausgegangen; dementsprechend wurde die als Bezugsgröße verwendete Waldfläche reduziert.
- Der auf den Naturschutzgebieten stehende Holzvorrat wurde geschätzt; dementsprechend wurde der gemeindespezifisch nutzbare Vorrat reduziert.
- Die Zuweisung von Vorräten erfolgte auch hier in Abhängigkeit der Hangneigung und der Besitzstruktur. Hierbei wurde angenommen, dass die Vorräte insbesondere in den steileren Hanglagen und im Privatwald höher sind.

Die Ergebnisse dieser doch recht unterschiedlichen Modellrechnungen zum energetisch nutzbaren Waldrestholzpotenzial sind nicht unmittelbar und uneingeschränkt vergleichbar. Doch lassen sich aus den unterschiedlichen Ansätzen in erster Linie Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung des Aufkommens ziehen.

Grundlage für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargelegten Analysen bildeten vor allem die aus dem Modell 2-Variante 2 abgeleiteten Ergebnisse.

## 2.4 Bereitstellung

Die Prozesskette zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in Großanlagen nach dem bioliq®-Verfahren ist neben dem technischen mehrstufigen Wandlungsprozess auch durch seine besondere logistische Konzeption und deren Variabilität charakterisiert. Dabei bedingt die räumliche Trennung zwischen den Aufkommensorten der Biomasse und den jeweiligen energetischen Verwertungseinheiten (Bioenergieanlagen) einen komplexen und umfangreichen Logistikprozess, wobei es hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von maßgeblicher Bedeutung ist, welche Art der Erfassungs- und Transporttechnik eingesetzt wird und inwieweit die zeitliche und räumliche Distanz effizient überbrückt werden kann.

In diesem Kapitel wird die methodische Vorgehensweise erläutert, mit der die Bereitstellungskosten der Biomasse frei Verwertungsanlage hergeleitet wurden. Da in diesem Zusammenhang auch die zurückzulegenden Transportentfernungen eine zentrale Größe darstellen, wird im folgenden Kapitel zunächst die Methode vorgestellt, mit der die in Kapitel 3.2.1 hergeleiteten Näherungsformeln zur Bestimmung von mittleren Transportstrecken verifiziert wurden.

### 2.4.1 Empirische Untersuchung zu den mittleren Transportstrecken

Der jährliche Brennstoffbedarf einer Bioenergie-Anlage wird im Wesentlichen durch deren Leistung und realisierte jährliche Betriebsstundenzahl bestimmt. Dementsprechend ergibt sich für eine Anlage ein Einzugsgebiet, dessen Flächengröße von der Biomasse-Aufkommensdichte und dem Grad der möglichen Erfassung bzw. dem Brennstoffangebot (Konkurrenzbeziehungen) abhängt.

Aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität dieser Einflussgrößen (bzw. der Inhomogenität der geographischen Gegebenheiten) ist die Form eines solchen Erfassungsgebietes in der Regel nicht exakt abbildbar. Aus diesem Grund wurde bei der Modellbildung und Analyse in dieser Arbeit vereinfacht von kreisförmigen und rechteckigen Einzugsgebieten ausgegangen, in deren Zentrum sich der Standort der Anlage befindet.

Untrennbar verbunden mit dieser räumlichen Ausdehnung des Einzugsgebietes ist somit auch die Länge der Strecken<sup>45</sup>, welche für den Transport der Biomasse von den einzelnen Aufkommensorten bis zur Anlage zurückgelegt werden müssen. Vereinfacht können für ein spezifisches Einzugsgebiet all diese Strecken zu einer Größe zusammengefasst werden – der *mittleren Transportentfernung*. Die Abschätzung solch mittlerer Transportentfernungen für kreisförmige und rechteckige bzw. quadratische Einzugsgebiete erfolgte, wie bereits erwähnt, durch die in Kapitel 3.2.1 hergeleiteten Näherungsformeln, die zugleich eine wichtige Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Analysen zum Transportprozess bildeten.

Die Gültigkeit dieser Formeln wurde anhand einer Streckenanalyse für zwei exemplarisch ausgewählte Standorte (siehe Tabelle 2.2) durch den Einsatz des GIS verifiziert. Dazu wurde für jeden dieser beiden Standorte ein kreisförmiges Einzugsgebiet ( $R = 10$  km) definiert und dieses mit einer topografischen Karte hinterlegt.

---

<sup>45</sup> Die tatsächlich zurückzulegenden Strecken hängen auch von der in diesem Einzugsgebiet zur Verfügung stehenden Verkehrsinfrastruktur und von der Wahl des Transportmittels ab.

**Tabelle 2.2: Kriterien und Merkmale zur Analyse der mittleren Transportstrecken für zwei exemplarisch ausgewählte Standorte**

	<b>Standort 1</b> (Bereitstellung von Waldrestholz)	<b>Standort 2</b> (Bereitstellung von Reststroh)
<b>Name des Anlagenstandortes</b>	Freudenstadt (Landkreis Freudenstadt)	Eppingen (Landkreis Heilbronn)
<b>Auswahlkriterium</b>	Hoher Anteil an Waldflächen	Hoher Anteil an Ackerflächen
<b>Flächenauswahl <sup>a)</sup></b>	Alle Waldflächen im definierten Einzugsbereich	Einzelne, zufällig ausgewählte Agrarflächen im definierten Einzugsbereich
<b>Durchschnittliche Größe der spezifischen Flächenelemente</b>	6 ha <sup>b)</sup>	2 ha <sup>c)</sup>
<b>Geometrie der definierten und untersuchten Einzugsgebiete</b>	Kreisförmig: R = 6, 7, 8 und 10 km Rechteckig: a = 8,9 km, b = 17,9 km	Kreisförmig: R = 10 km
<b>Grundlage für die Digitalisierung und Bestimmung der Transportstrecke <sup>1)</sup></b>	TOPO 50 (Topografische Karte, Maßstab 1:50.000)	TOPO 50 (Topografische Karte, Maßstab 1:50.000)
<b>Verwendetes Wegenetz <sup>d)</sup></b>	Bundes-/Land-/Kreisstraßen und befestigte Forstwege	Bundes-/Land-/Kreisstraßen und Wirtschaftswege

Anmerkungen: a) Die im praktischen Falle mit der Erfassung auf den jeweiligen Flächensegmenten verbundenen Restriktionen (Hangneigung, Besitzstruktur, Altersklasse, Aufkommensdichte, Schutzgebiete, etc.) wurden nicht berücksichtigt. Darüber hinaus war es auch nicht Ziel, die Höhe des im Bereich dieser Einzugsgebiete vorliegenden Biomassepotenzials zu ermitteln.

b) Diese für eine Lkw-Fuhre definierte Flächengröße ergab sich unter Annahme einer durchschnittlichen Waldrestholz-Aufkommensdichte für die Region Nordschwarzwald von 1,62 Mg TM pro ha Wald (vgl. Dieter et al., 2001) und unter Berücksichtigung einer max. Hackschnitzel-Zuladung von 20 Mg FM pro Lkw, bei einem unterstellten Holz-Trockenmassegehalt von 50 %.

c) Die Festlegung der Flächenelementgröße erfolgte analog zu b). Hierbei wurde von einer Stroh-Aufkommensdichte von 6,0 Mg FM pro ha Getreidefläche ausgegangen und einer max. Quaderballen-Zuladung von 96 m<sup>3</sup> pro Lkw.

d) Die Wegenetzdichte der untersuchten Standorte bzw. Einzugsgebiete war für die Auswahl der Standorte nicht relevant, obwohl die Wegenetzdichte sicherlich (geringfügige) Auswirkungen auf die Transportentfernung hat.

Quellen: 1) ATKIS (2005).

Anschließend wurden für den *Standort 1* alle im Einzugsgebiet liegenden Waldflächen in jeweils 6 ha (vgl. Erläuterungen zu Tabelle 2.2) große Flächenstücke eingeteilt und digitalisiert (vgl. Anhang 6.22, S. A-140). In gleicher Weise wurde dies für den *Standort 2* für vereinzelt 2 ha (vgl. Erläuterungen zu Tabelle 2.2) große Ackerflächen<sup>46</sup> (vgl. Anhang 6.23, S. A-141) durchgeführt.

Die Bestimmung der tatsächlichen Transportstrecken erfolgte, indem von jedem einzelnen Flächensegment mit Hilfe der topografischen Karte derjenige Transportweg bestimmt wurde, welcher tatsächlich zum Abtransport einer Lkw-Ladung Biomasse von den betreffenden Flächensegmenten zurückzulegen wäre. Dabei wurde das in diesem Einzugsgebiet zur Verfügung stehende Straßen-/Wegenetz zugrunde gelegt, wobei die Strecke über die befestigten Wirtschaftswege, hin zu einer nahe gelegenen Land-/Kreisstraße bzw. Bundesstraße und von dort weiter zum im Zentrum des Ein-

<sup>46</sup> Da nicht bekannt ist, inwieweit welche Ackerflächen in diesem Einzugsgebiet tatsächlich mit Getreide bebaut werden, wurden die Flächenelemente willkürlich ausgewählt bzw. digitalisiert.

zugsgebietes gelegenen Anlagenstandorts mit Hilfe des GIS gemessen<sup>47</sup> wurde. Nach Auswertung aller im Einzugsgebiet vorliegenden Flächensegmente ergab sich schließlich aus der Summe dieser (in einer Richtung) gefahrenen Kilometer unter Mittelwertbildung die empirisch bestimmte mittlere Transportentfernung als Vergleichsgröße zum über die Näherungsformel bestimmten Wert.

Aus den in der Datenbank hinterlegten flächensegmentspezifischen Transportstrecken ließ sich dann auch relativ einfach die mittlere Transportstrecke für kreisförmige Einzugsgebiete herleiten, deren Radius kleiner 10 km ist. Dementsprechend wurde die mittlere Transportstrecke für das rechteckige Einzugsgebiet ermittelt, indem ein Rechteck (Seitenlängenverhältnis  $a/b = 2$ ) definiert wurde, dessen Umkreis das kreisförmige Einzugsgebiet ( $R = 10$  km) darstellt.

Aufgrund des zeitlich begrenzten Rahmens dieser Arbeit war es hierbei nicht möglich, die arbeitsintensiven Auswertungen für weitere, insbesondere auch größere Einzugsgebiete durchzuführen, obwohl dies unter statistischen Gesichtspunkten sicherlich notwendig wäre, um die Gültigkeit der Näherungsformeln weitergehend zu stützen.

## 2.4.2 Kosten für Erfassung und Transport

Die Bereitstellung von Reststroh und Waldrestholz an einer Bioenergieanlage, erfolgt durch einen aufwändigen Prozess der im Wesentlichen aus folgenden Teilschritten besteht: Erfassung und Konditionierung am Aufkommensort (Ballen pressen; Restholz häckseln/bündeln), Zwischenlagerung (z.B. Feldmiete) und Transport vom Aufkommensort bzw. Lagerort zur energetischen Verwertungseinheit. Dabei werden die für diesen Bereitstellungsprozess entstehenden Kosten, wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, maßgeblich durch die Erfassung und den Transport<sup>48</sup> bestimmt.

Im Allgemeinen ist der Prozess der Erfassung von der Art der Biomasse abhängig und dient dazu, die Reststoffe an ihrem Aufkommensort zu größeren Mengen zusammenzufassen und transportierbar bereitzustellen. Im Falle des Stroh stellt die Erfassung bzw. Bergung ein in der Praxis ebenso gängiges wie bewährtes Verfahren dar, welches sich aus zwei Arbeitsschritten zusammensetzt (Hartmann, 2005). Erstens das Kompriemieren des im Schwad lose auf dem Feld liegenden Stroh mit Hilfe von Ballenpressen zu quaderförmigen bzw. runden Ballen, wobei die Arbeitsbreite des Mähdreschers als so groß angenommen wurde, dass ein zusätzliches Schwaden des abgelegten Stroh vor dem Einsatz von Großpressen nicht erforderlich ist. Zweitens das Einsammeln und Stapeln der nach dem Pressvorgang einzeln auf dem Feld verteilten Ballen am Feldrand unter Verwendung eines Schleppers mit Frontlader und Ballenzange.

Die Berechnung der Erfassungskosten wurde für unterschiedliche Schlaggrößen (2,5 und 5 ha), Ertragsniveaus<sup>49</sup> (5,5 und 6,5 Mg TM/ha) und Ballengeometrien durchgeführt. Zur Ermittlung der spezifischen Maschinen- und Personalkosten im Bereich der Landwirtschaft wurde auf die technischen bzw. ökonomischen Standardsätze des KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.) zurückge-

---

<sup>47</sup> Inwieweit diese Strecken in der Praxis tatsächlich für den Abtransport der Biomasse gefahren werden, hängt von einer Reihe von Faktoren (bspw. Befahrbarkeitszustand) ab, welche hier nicht berücksichtigt wurden.

<sup>48</sup> Hierbei ist auch der Transport des Zwischenproduktes Slurry von den dezentralen Pyrolyseanlagen zur zentralen Vergasungsanlage zu diesem Bereitstellungsprozess mit einbezogen (vgl. Abbildung 2.1, S. 11).

<sup>49</sup> Die hierbei angesetzten Ertragsniveaus leiten sich aus den Ergebnissen von Kapitel 3.1.3 ab.

riffen. Fehlende oder wenig plausible Angaben wurden durch eigene Annahmen ergänzt und die hieraus abgeleiteten Kostensätze mit den Standardverrechnungssätzen für den überbetrieblichen Maschineneinsatz (Lohnunternehmer bzw. Maschinenring) abgeglichen. Wichtige, dieser Rechnung zugrunde gelegte (kalkulatorische) Kenngrößen zur Stroherfassung, finden sich in Anhang 6.29 (S. A-147) und Anhang 6.31 (S. A-148).

Da es sich beim Stroh um ein Nebenprodukt der Getreideproduktion handelt, wurden die Gemeinkosten (z.B. Pachtzins), Anbaukosten und die eigentlichen Erntekosten nicht dem Stroh, sondern dem Getreide als Hauptfrucht angelastet. Dagegen wurden für die entzogenen Nährstoffe Düngekosten in Höhe von 11,6 €/Mg TM (vgl. Leible et al., 2005) in Anrechnung gebracht, in der Annahme, dass die entnommenen Nährstoffe nur bedingt wieder zurückgeführt werden.

Die Bereitstellung von Waldrestholz frei Waldstraße bzw. Sammelplatz in Form von Hackschnitzeln und/oder Holzbündeln umfasst eine Reihe von Teilschritten, wobei je nach Grad der Mechanisierung zwischen motormanuellen, teilmechanisierten und vollmechanisierten Verfahren unterschieden werden kann. Dabei können die einzelnen Teilschritte durch einen jeweils unterschiedlichen Mechanisierungsgrad gekennzeichnet oder so eng miteinander verknüpft sein, dass sie einen gemeinsamen Arbeitsgang darstellen und somit nicht eindeutig einem Verfahren zugeordnet werden können. Da die realitätsnahe Abbildung der Erfassungsprozesse/-kosten von Waldrestholz mit besonderen methodischen Schwierigkeiten verbunden ist und deren Abschätzung den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte, wurden diesbezüglich keine eigenen Abschätzungen durchgeführt, sondern vielmehr auf verschiedene Literaturangaben zurückgegriffen. Hierbei zeigte sich allerdings, dass es zur Bereitstellung von Waldrestholz (entsprechend der Definition aus Kapitel 2.2) frei Waldstraße bzw. Sammelplatz in Form von Hackschnitzeln und/oder Holzbündeln nur sehr wenige Aussagen in Hinblick auf die Erfassungskosten gibt und sich die hierzu durchgeführten Auswertungen ausschließlich auf Testläufe bzw. Versuchskampagnen stützen. Wie in der Literatur diskutiert, ist es hierbei besonders problematisch, die Maschinendaten bzw. Arbeitskosten mit der Erfassungsleistung und den tatsächlichen Durchsatzmengen zu korrelieren, weil diese Größen von vielen – nur wenig spezifizierbaren – technischen, individuellen und lokalen Bedingungen abhängig sind. Insofern können die aus der Literatur entnommenen Kostensätze folglich nur eine Orientierung für die in der Praxis tatsächlich zu erwartenden Werte darstellen.

Im Rahmen der Bereitstellungskette erfolgt nach der Erfassung ggf. auch eine Zwischenlagerung am Aufkommensort. Diese scheint erforderlich, um die Vorgaben hinsichtlich der Mindesttransportmengen zu erfüllen und die saisonale Aufkommens- und Nachfrageschwankungen der Energieträger zu überbrücken. Die Zwischenlagerung von Strohballen erfolgt in Form einer Freilagerung. Um eine zu starke Befeuchtung der Ballen zu verhindern, ist hierfür eine Abdeckung der Ballen mit einer Silofolie notwendig, die jährlich ersetzt werden muss. Die hierfür anfallenden Arbeitskosten für das Abdecken und Befestigen der Folie wurden mit 2 €/Mg TM (vgl. Raab et al., 2005) angenommen.

Die offene Zwischenlagerung von Waldrestholz in Form von ungehacktem Holz bzw. Holzbündeln im Bestand, an der Rückegasse, an der Waldstraße oder auf dem Sammelplatz wurde als kostenneutral angesehen. Bei Waldrestholz, welches im Arbeits-

gang der Erfassung am Aufkommensort gleich gehackt wird, wurde davon ausgegangen, dass diese Hackschnitzel ohne Zwischenlagerung zur energetischen Verwertungseinheit gefahren und dort zum Zwecke der Trocknung auf dem Gelände (ggf. in einer belüfteten Lagerhalle) der Anlage gelagert werden.

Alle am Ort der Anlage entstehenden Kosten für Lagerung und Konditionierung (bspw. Trocknung) wurden der Anlage zugerechnet und sind, wie in Kapitel 2.6 beschrieben, bei den Herstell-/Produktionskosten subsumiert.

Eine monetäre Bewertung der Lagerverluste, die durch Veratmung, Abbauprozesse oder durch Fraß entstehen, wurde nicht berücksichtigt. Unter der Annahme, dass durch gleichzeitige Trocknungsprozesse der Heizwert des Brennstoffs ansteigt, sind hinsichtlich der Lagerung die energetischen Verluste geringer als die Trockenmasseverluste (Raab et al., 2005). Darüber hinaus wurden die Lagerverluste nicht mit einberechnet, da die Brennstoffkosten frei Anlage ohnehin in Bezug zur angelieferten Menge stehen.

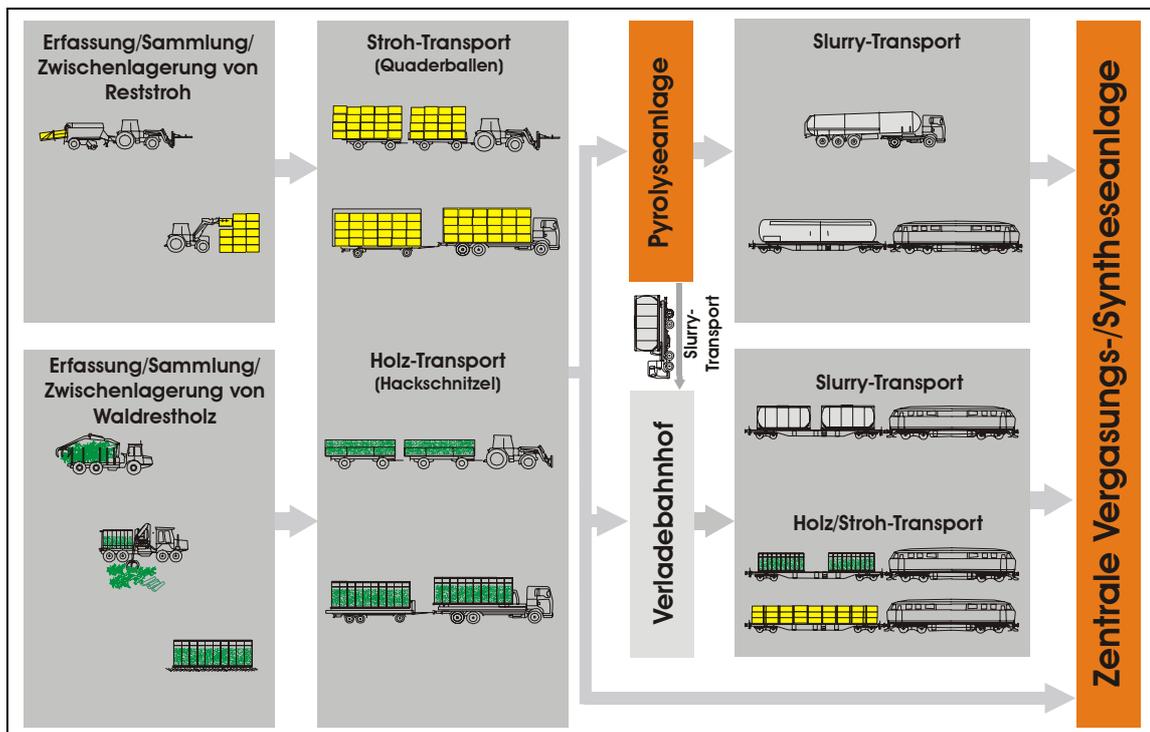
Nach der Erfassung der Biomasse erfolgt als weiterer Schritt im Bereitstellungsprozess der eigentliche Transport, in dessen Verlauf durch eine Kombination verschiedener Transportfahrzeuge bzw. -behältnisse diverse Be-, Um- und Entladevorgänge durchgeführt werden. Die hierbei entstehenden Kosten wurden im Rahmen einer Transportkostenkalkulation ermittelt.

Das Beladen der Transportfahrzeuge am Aufkommensort mit Strohballen wird mit Hilfe eines Schleppers (einschl. Frontlader und Ballenzange) durchgeführt. Im Falle der Hackschnitzel werden die Transportfahrzeuge (an der Waldstraße oder dem zentralen Hackplatz) über bereitgestellte und bereits direkt durch den Häcksler befüllte Transportbehältnisse beladen, d.h. beim Lkw-Transport werden die Hackschnitzel in Container, beim landwirtschaftlichen Transport in Kippanhänger überladen. Bei den Holzbündeln wurde von einer Verladung mit einem Forwarder ausgegangen. Für die am Aufkommensort bereitgestellten Transportbehältnisse wurden keine separaten Kosten (z.B. Containermiete) mit einberechnet.

Für den eigentlichen Transport der Biomasse bzw. des Slurry gibt es entsprechend der konzeptionellen Auslegung des bioliq®-Verfahrens und unter Berücksichtigung verschiedener Transportmittel bzw. Transportmittelkombinationen eine Reihe möglicher Transportalternativen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Transportmittel<sup>50</sup> und deren Kombinationen sind in Anhang 6.24 (S. A-142) aufgeführt. Dementsprechend wurden in Abhängigkeit des unterschiedlichen bzw. unterschiedlich vorkonditionierten Transportgutes insgesamt 40 verschiedenartige Varianten analysiert. Eine Darstellung von Transportketten (bezogen auf das bioliq®-Konzept) für einige ausgewählte Transportkonzepte zeigt Abbildung 2.2.

---

<sup>50</sup> Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten technischen Daten zu den Transportmitteln orientieren sich am derzeitigen technischen Standard und an den in der Praxis tatsächlich eingesetzten Technologien; Sonderfahrzeuge wurden nicht berücksichtigt.



**Abbildung 2.2:** Darstellung der Transportketten für Stroh (Quaderballen), Waldrestholz (Hackenschnitzel) und Slurry anhand exemplarisch ausgewählter Transportkombinationen bzw. -mittel

Wie Abbildung 2.2 verdeutlicht, wurde hinsichtlich der betrachteten Verkehrssysteme zwischen Straße und Schiene differenziert. Das Binnenschiff als weiteres Verkehrssystem wurde nicht berücksichtigt, da die in dieser Arbeit betrachteten (Biomasse-) Aufkommens- und Verwertungsorte durch Wasserstraßen<sup>51</sup> nur sehr begrenzt miteinander verbunden sind und die geringe Anzahl von Verladehäfen in Baden-Württemberg (vgl. Abbildung 3.16, S. 78) einen Lkw-Vorlauf über zu weite Entfernungen erfordern würde.

Bei der Kostenermittlung für den Lkw wurden die für das Transportgewerbe veröffentlichten Preise<sup>52</sup> für Transportdienstleistungen nicht berücksichtigt, da durch Inkrafttreten des Tarifaufhebungsgesetzes (TAufhG, 1993) im Jahre 1994 die obligatorischen Güterverkehrsstarife aufgehoben wurden und somit eine freie Preisbildung am Markt vollzogen werden kann. Insofern wurden die Kostenabschätzungen für den Transport mit Lkw eigenständig durchgeführt und mit bei Speditionen angefragten Richtpreisangeboten für konkrete Transportdienstleistungen sowie mit Kostenrichtsätzen des Speditionsgewerbes verglichen (KGS, 2005).

Die Transportpreise für den Schienenverkehr stützen sich auf Angaben der DB-Cargo (2003). In der Regel gliedert sich der Schienentransport in die Bereiche Vor-, Haupt- und Nachlauf<sup>53</sup>. Da in diesem Falle davon ausgegangen wurde, dass an einem ent-

<sup>51</sup> Beim Transport von Biomasse oder Slurry über sehr große Entfernungen ist die Verwendung der Wasserstraßensysteme sicherlich sinnvoll.

<sup>52</sup> Hierbei handelt es sich um die kostenorientierten unverbindlichen Richtsatz-Tabellen (BDG, 1999) des deutschen Güterkraftverkehrs.

<sup>53</sup> Der Vorlauf dient dazu, die Einzelwaggons von der Güterverkehrsstelle zum nahe gelegenen Knoten- oder Rangierbahnhof zu fahren, an dem diese Waggons für den Hauptlauf zu einem Ganzzug zusammengestellt werden. Der Großteil der Transportstrecke (Hauptlauf) erfolgt dann im Ganzzug zu einem dem Zielort nahe gelegenen Rangier- bzw. Knotenbahnhof, von dem aus die Waggons zur Güterverkehrsstelle am Zielort (Nachlauf) gefahren werden.

sprechenden Verladebahnhof ein Ganzzug bereitsteht, dieser dort vollständig beladen und nach dem Transport direkt an der zentralen Vergasungsanlage<sup>54</sup> entladen wird, entfällt somit der Vor- und Nachlauf mit der Bahn. Wie Abbildung 2.2 verdeutlicht, ist für den Bahntransport allerdings ein Straßen-Vorlauf durch landwirtschaftliche Züge bzw. Lkws<sup>55</sup> erforderlich. Im Falle des Slurrytransportes mit der Bahn kann dieser Straßenvorlauf entfallen, sofern die Pyrolyseanlage über einen eigenen Bahnanschluss verfügt. Die Länge dieser Straßen-Vorlaufdistanzen variiert in Abhängigkeit der Aufkommensorte, Anlagenstandorte und Verladebahnhofstandorte und wurde für die einzelnen Gemeinden im Rahmen von Kapitel 3.3 ermittelt.

Für die jeweiligen Transportvorgänge wurde angenommen, dass die Transportmittel entsprechend den ordnungsrechtlichen Vorgaben maximal beladen werden. Mögliche transportbedingte Verdichtungseffekte wurden nicht mit berücksichtigt. Hinsichtlich des Straßentransports werden diese ordnungsrechtlichen Grenzen in Deutschland durch die Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO, 2007) bzw. die Straßenverkehrsordnung (StVO, 2006) geregelt. Dort werden die zulässigen maximalen Gewichte und Außenmaße verbindlich vorgeschrieben. Gleiches wird für den Schienenverkehr durch die Eisenbahnbau- und -betriebsordnung (EBO, 1967) vorgegeben. Insofern ist jeder Transport in Abhängigkeit der spezifischen Schüttdichte des transportierten Gutes entweder massen- oder volumenlimitiert. Dabei werden die realisierbaren Zuladungen auch entscheidend vom Volumen bzw. dem Eigengewicht der eingesetzten Ladungsträger (Abrollcontainer, Aufbauten) beeinflusst. Die für die Zuladung relevanten technischen Daten für die in dieser Arbeit betrachteten Transportmittel sind in Anhang 6.25 (S. A-143) bis Anhang 6.27 (S. A-145) dargelegt. Darüber hinaus finden sich in Anhang 6.28 (S. A-146) die für die Beladung mit Strohhallen bzw. Holzbündel unterstellten fahrzeugspezifischen Beladungsschemata.

Die Gesamtkosten für den Transport ergeben sich letztlich durch eine Kombination verschiedener fahrzeugspezifischer Kostenfunktionen (vgl. Gleichung 2.1) und errechnen sich aus dem für den Prozess benötigten Zeitbedarf (Anfahrt, Rüsten, Laden, Warten, Transportieren etc.) in Verbindung mit den spezifischen Personal- und Maschinenstundensätzen für alle am Prozess beteiligten Fahrzeuge (inkl. Personal). Die Kalkulationen zu den gesamten Transportkosten wurden für die bereits genannten 40 untersuchten Transportvarianten in Abhängigkeit der Transportentfernungen durchgeführt. Allerdings wurden für die im Rahmen von Kapitel 3.2.4 geführten Diskussionen zur Kostensituation, aus diesen Varianten nur die ökonomisch bzw. technisch plausibelsten ausgewählt.

---

<sup>54</sup> Es wurde angenommen, dass die zentrale Vergasungsanlage über eine eigene Bahnentladestelle verfügt.

<sup>55</sup> Bei den Schienentransporten wurde neben dem Warenfrachtverkehr der so genannte Kombinierte Verkehr betrachtet. Dieser bezieht sich insbesondere auf den Transport von Abrollcontainern (ACTS-System), ISO-Containern bzw. ISO-Tankcontainern, welche durch den Lkw an der Güterverkehrsstelle bereitgestellt werden.

Wie die vereinfachte Gleichung 2.1 zur Berechnung der Transportkosten verdeutlicht, besteht die Kostenfunktion aus einem entfernungsunabhängigen und einem entfernungsabhängigen Kostenblock, wobei für den entfernungsabhängigen Teil die Transportstrecke in Zusammenhang mit der tatsächlich realisierbaren Durchschnittsgeschwindigkeit<sup>56</sup> von großer Bedeutung ist. Als Transportstrecke  $s$  gilt die zurückgelegte doppelte Entfernung, da neben der Hinfahrt auch die Rückfahrt berücksichtigt wurde; diese Rückfahrten wurden im Allgemeinen als Leerfahrten<sup>57</sup> angenommen.

$$K = \left[ k_F * \frac{S}{v} \right] + \left[ k_W * (t_{Laden} + t_{Rüsten}) \right]$$

Anmerkungen: K = Kosten für den Transport (€)

k = Fahrzeugspezifischer Stundensatz (€/h; einschl. Personal) für die Hinfahrt /Rückfahrt ( $k_F$ ) und das Warten ( $k_W$ )

s = Transportstrecke (km) für Hin- und Rückfahrt

v = Realisierte mittlere Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h) für Hin- und Rückfahrt

t = Zeiten (in h) für Be- und Entladen ( $t_{Laden}$ ); Zeiten fürs Rüsten ( $t_{Rüsten}$ )

#### **Gleichung 2.1: Vereinfachte Darstellung der Transportkosten-Funktion**

Im Hinblick auf die in dieser Arbeit durchgeführten Kostenrechnungen sei allerdings explizit erwähnt, dass diese auf einem Vollkostenansatz basieren und die Berechnung der Stundensätze als statisches Verfahren durchgeführt wurde, bei dem der zeitliche Unterschied von Anfall der Kosten und Erträge unberücksichtigt bleibt. Es wurde somit von zeitlich annähernd konstanten Zahlungsströmen ausgegangen. Auf die Berechnung und Berücksichtigung eines inflationsbedingten erhöhten Wiederbeschaffungswertes wurde verzichtet. Ebenfalls nicht mit einkalkuliert wurde eine potenzielle (Gewinn-) Marge, welcher für den Landwirt, Waldbesitzer und Fuhrunternehmer durch die Bereitstellung von Holz- und/oder Stroh ggf. angerechnet werden könnte.

In Anhang 6.29 (S. A-147) und Anhang 6.31 (S. A-148) finden sich neben einigen wesentlichen, diesen Kalkulationen zugrunde gelegten, ökonomischen und technischen Rahmendaten auch die errechneten Stundensätze. Auf eine Veranschaulichung der angewandten Methodik zur Berechnung der spezifischen Fahrzeug- bzw. Maschinenstundensätze wurde verzichtet. Darüber hinaus sind in Anhang 6.30 (S. A-147) auch die CO<sub>2</sub>-Äquivalenzfaktoren wiedergegeben, mit denen die mit dem Energieverbrauch (Laden und Transportieren) korrespondierenden Treibhausgasemissionen berechnet wurden.

<sup>56</sup> Die Durchschnittsgeschwindigkeit resultiert aus den Durchschnittsgeschwindigkeiten für einzelne Streckenabschnitte. Insofern ist die Funktion der Durchschnittsgeschwindigkeit nicht linear, sondern zeigt in Abhängigkeit der Transportentfernung einen degressiven Verlauf. Die hierbei für den Lkw-Transport getroffenen Annahmen sind dem in Anhang 6.45 (S. A-162) exemplarisch dargestellten Kalkulationschema zu entnehmen.

<sup>57</sup> Bei großen Transportentfernungen (> 200 km) müsste diese Annahme sicherlich revidiert und eine Rückfracht unterstellt werden.

## 2.5 Standortanalyse, Standortauswahl und Standortbewertung

Die Bewertung und Auswahl von günstigen Standorten für dezentrale Pyrolyseanlagen wurden unter Berücksichtigung einer Reihe unterschiedlicher Kriterien vorgenommen. Dazu wurden auf Basis der in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 hergeleiteten Ergebnisse verschiedene gemeindespezifische Kenngrößen zusammengestellt und im Rahmen einer *Standortanalyse*<sup>58</sup> zu einer einzigen (dimensionslosen) Kennzahl aggregiert, durch die es möglich war, die einzelnen Gemeinden Baden-Württembergs hinsichtlich ihrer Standortwertigkeit/-eignung untereinander zu vergleichen. Damit wurde letztlich das Ziel verfolgt, Ergebniskarten zu generieren, aus denen sich potenziell geeignete (Pyrolyse-) Anlagenstandorte ableiten lassen.

Die Bildung der für die jeweiligen Gemeinden spezifischen Kenngrößen<sup>59</sup> erfolgte für unterschiedliche Bereiche. Einen Überblick hierzu gibt die Darstellung in Anhang 6.32 (S. A-149), aus der ersichtlich wird, welche unterschiedlichen Kenngrößen gebildet und nach welcher Methodik diese Kenngrößen zu einer gemeindespezifischen Bewertungskennzahl zusammengefasst wurden. Die Kostenkenngrößen stützen sich dabei ausschließlich auf die Erfassung und Bereitstellung von Waldrestholz und Stroh frei Feld- bzw. Waldlager, d.h. die mit dem Transport (zur Anlage) verbundenen Kosten wurden hierbei nicht berücksichtigt, weil diese erst zum Tragen kommen, wenn der eigentliche Anlagenstandort definitiv festgelegt wurde.

Beim Stroh wurde diese gemeinde- und erfassungsspezifische Kostengröße gebildet, indem die abgeschätzten, als Bandbreite<sup>60</sup> ermittelten Erfassungskosten (vgl. Kapitel 2.4) in Abhängigkeit gemeindespezifischer Faktoren durch unterschiedliche Gewichtung den jeweiligen Gemeinden zugeordnet wurden (siehe Anhang 6.33, S. A-150). Dementsprechend wurde der „ungünstigsten“ Gemeinde der höchstmögliche Kostensatz und umgekehrt der „günstigsten“ Gemeinde der niedrigste Kostensatz zugeteilt.

Beim Waldrestholz wurde diese gemeinde- und erfassungsspezifische Kostengröße gebildet, indem für die verschiedenen Restholzfraktionen spezifische Kostensätze (aufgeteilt nach Nutzungsklasse und Besitzart) angegeben (siehe Anhang 6.34, S. A-151) und diese mit den für die jeweilige Gemeinde korrespondierenden unterschiedlichen Restholzsortimenten verrechnet wurden. Bei dieser Berechnung war es auch möglich, einen so genannten „Zielkostensatz“<sup>61</sup> vorzugeben, so dass eine spezifische Waldrestholzfraktion (in Abhängigkeit von Nutzungsklasse und Besitzart) überhaupt nur dann in die Berechnung mit einbezogen wird, sofern die in Anhang 6.34 (S. A-151) dargelegten Kostensätze kleiner bzw. gleich dem vorgegebenen Zielkostensatz sind. Dementsprechend ergab sich aus den gemeindespezifischen Merkmalen (Zusammensetzung des Aufkommens, Nutzungsklasse, Besitzstruktur) nicht nur das von den Kosten abhängige Gesamtaufkommen einer einzelnen Gemeinde, sondern in der Summe

---

<sup>58</sup> Methodisch orientiert sich die Bildung dieser aggregierten Kennzahl an der Nutzwertanalyse, die bspw. in der Betriebswirtschaft häufig zur Entscheidungsvorbereitung verwendet wird.

<sup>59</sup> Da bei Bildung einzelner Kenngrößen teilweise dieselbe Datenbasis (z.B. Flächengrößen) zugrunde gelegt wurde, sind Redundanzen innerhalb dieser Kenngrößen unvermeidbar. Durch die Wahl der Gewichtung kann diese Wechselwirkung mehr oder weniger abgedämpft werden.

<sup>60</sup> Die Erfassungskosten hängen von einer Vielzahl von Faktoren (z.B. Schlaggröße, eingesetzte Technik, Betriebsstruktur) ab und wurden deshalb nicht für alle Gemeinden in der gleichen Höhe angesetzt.

<sup>61</sup> Unter dem Zielkostensatz wird derjenige Preis (frei Waldstraße) verstanden, der am Markt für Wald-Hackschnitzel maximal durchsetzbar wäre.

auch das Gesamtaufkommen für Baden-Württemberg. Das heißt dieser Zielkostensatz bestimmt letztlich das tatsächlich bzw. wirtschaftlich zur Verfügung stehende Aufkommen. Damit verbunden ist somit auch die Möglichkeit, durch stufenweise Anhebung des Zielkostensatzes eine kostenorientierte Potenzialauswertung durchzuführen und daraus eine Angebotsfunktion abzuleiten, die das zur Verfügung stehende Waldrestholzpotezial in Abhängigkeit des Nachfragepreises (vgl. Zielkostensatz) abbildet.

Für die Bildung der Kennzahlen zum dritten Bereich (vgl. Anhang 6.32, S. A-149; Kennzahlenbereich Wege- und Straßennetzdichte) wurde zunächst mit Hilfe des GIS das in den jeweiligen Gemeinden Baden-Württembergs zur Verfügung stehende (befahrbare) Wegenetz bestimmt. Dazu wurde auf Basis der ATKIS (2005) Geodaten für jede einzelne Gemeinde die Summe der Streckenlänge für die in Anhang 6.32 (S. A-149; Kennzahlenbereich Wege- und Straßennetzdichte) vorgestellten Straßen-/Wegeklassifizierungen ermittelt. Aufgrund der besonderen Bedeutung des Wald-Wegenetzes für die Erfassung des Waldrestholzes, wurde diese Analyse darüber hinaus noch gesondert für die Waldstraßen<sup>62</sup> durchgeführt. Für Feldstraßen/-wege wurde eine solche zusätzliche Analyse nicht vorgenommen, da von einer problemlosen Befahrbarkeit der Getreideflächen ausgegangen werden kann.

Im vierten Bereich der Kennzahlenbildung (vgl. Anhang 6.32, S. A-149; Kennzahlenbereich Transportentfernungen) wurde mit Hilfe des GIS die Luftlinienentfernung der einzelnen Gemeinden zu jeweils folgenden Punkten bestimmt:

- Standort der zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage (Karlsruhe)
- Nächstgelegener Autobahnanschluss
- Nächstgelegener Verladebahnhof<sup>63</sup>

Dazu wurde auf Basis der Gauß-Krüger-Koordinaten (Zone 3) der Betrag des Entfernungsvektors vom Flächenschwerpunkt der einzelnen Gemeinden zu den oben aufgeführten Punkten bestimmt.

Wie bereits erwähnt, erfolgte im Rahmen der *Standortanalyse* die Zusammenführung der mehr oder weniger isoliert auf unterschiedliche Bereiche bezogenen und normierten Kenngrößen. Dazu wurden die einzelnen Kenngrößen nach einer Gewichtung zunächst zu „Bereichskennzahlen“ (vgl. Anhang 6.32, S. A-149) zusammengefasst, aus denen sich schließlich nach einer weiteren Gewichtung die gemeindespezifische Bewertungskennzahl ergab. So ist diesbezüglich eine Gemeinde als (Pyrolyse-) Anlagenstandort umso aussichtsreicher zu bewerten, je größer der Wert dieser zusammengefassten Bewertungskennzahl ist.

Wie die folgenden Ausführungen erläutern, war es im Rahmen der eigentlichen *Standortauswahl* notwendig, die den einzelnen Kennzahlbereichen zugrunde gelegten Gewichtungsfaktoren entsprechend zu differenzieren.

Der Standort einer dezentralen Pyrolyseanlage ist untrennbar mit einem Biomasse-Einzugsgebiet verbunden, welches in der Regel weit über die Grenzen einer einzelnen Gemeinde hinaus reicht (vgl. Anhang 6.38, S. A-155). Aus diesem Grund wird die

---

<sup>62</sup> Die im Wald gelegenen Straßen konnten nur ermittelt werden, sofern sich die ATKIS-Waldflächen mit den Straßen/Wegen überschneiden. Da dies nicht immer gegeben war, wurden einige Straßen nicht als Waldstraßen erkannt, obwohl diese im oder in unmittelbarer Nähe zum Wald liegen. Hieraus ergab sich ein kleiner methodischer Fehler bei der Auswertung.

<sup>63</sup> Datengrundlage für die Lage der Verladebahnhöfe bildeten die Angaben der Deutschen Bahn AG (2006).

Standortvorteilhaftigkeit maßgeblich von der Wertigkeit der im Einzugsbereich liegenden Gemeinden mitbestimmt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Vorteilhaftigkeit des eigentlichen Anlagenstandortes vor allem durch die vorhandene Verkehrsinfrastruktur (Autobahnanschluss, Verladebahnhof, u.a.) bestimmt wird, insbesondere dann, wenn – wie im Falle einer Pyrolyseanlage – zudem ein Transport des Slurry zu einer zentralen Vergasungsanlage erfolgen muss. Insofern könnte der eigentliche Anlagenstandort an verkehrsgünstiger Stelle theoretisch inmitten eines Stadtgebietes angesiedelt sein, obgleich dort die Biomasse-Aufkommensdichte gering ist. Dagegen sollten möglichst viele der im Einzugsbereich des Anlagenstandortes liegenden Gemeinden ein hohes Aufkommen an Biomasse bei gleichzeitig günstiger Bereitstellungsstruktur aufweisen. Zudem ist ein Anlagenstandort umso günstiger zu bewerten, je näher die jeweiligen Gemeinden mit hoher Biomasse-Aufkommensdichte am eigentlichen Standort liegen (kurze Transportentfernungen).

**Tabelle 2.3: Bewertung von Standortanforderungen für das dezentrale und integrierte Konzept**

Standortanforderung	Dezentrales Konzept		Integriertes Konzept
	Anlagenstandort	Einzugsgebiet	
Potenzial, Aufkommensdichte	o	++	++
Erfassungskosten	o	+	+
Wege-/Straßennetzdichte	o	+	+
Bahn- bzw. Autobahnanschluss	++	-	++
Transportentfernung nach Karlsruhe	+	-	++

Anmerkungen: Die in der Tabelle angegebene Bewertung erfolgte als eigene Annahme.  
 Symbolik: sehr bedeutsam (++), bedeutsam (+), mittelmäßig bedeutsam (o), weniger bedeutsam (-)

Eine Darstellung dieser spezifischen Standortanforderungen, die sich auf die zuvor definierten gemeindespezifischen Kenngrößen beziehen, zeigt Tabelle 2.3 – differenziert nach konzeptioneller Auslegung des bioliq®-Verfahrens. Entsprechend dieser unterschiedlichen Anforderungen wurden hinsichtlich des dezentralen Konzepts nach der bereits dargelegten Methodik jeweils separate Analysen für Anlagenstandorte und Einzugsgebiete durchgeführt, wobei die Gewichtungsfaktoren<sup>64</sup> entsprechend der spezifischen Anforderungen angepasst wurden (siehe Anhang 6.35, S. A-152 und Anhang 6.36, S. A-153). Hieraus ergaben sich schließlich unterschiedliche kartografische Darstellungen, auf deren Basis im Rahmen einer *Standortauswahl* exemplarisch drei potenziell geeignete Standorte bzw. Einzugsgebiete abgeleitet und näher untersucht wurden.

<sup>64</sup> Die hierbei angesetzten Gewichtungsfaktoren beruhen auf eigenen Annahmen bzw. wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kapitel 3 festgelegt.

Bei den hier definierten Einzugsgebieten wurde vereinfacht von einer kreisförmigen Geometrie ( $R = 15$  und  $25$  km)<sup>65</sup> ausgegangen, da solche Einzugsgebiete in der Regel durch verhältnismäßig günstige Transportentfernungen charakterisiert sind und die in Kapitel 3.2.1 hergeleitete Formel für die Abschätzung der Transportstrecken herangezogen werden konnte.

Schließlich wurde auf Basis der bisher abgeleiteten Ergebnisse bzw. Kenngrößen im Rahmen einer *Standortbewertung*, die Potenzial-, Kosten- bzw. Logistiksituation der drei exemplarisch ausgewählten dezentralen (Pyrolyse-) Anlagenstandorte und deren Einzugsgebiete ausgewertet und einander gegenübergestellt. Dazu wurden die einzelnen Attribute der im Einzugsbereich eines Standortes liegenden Gemeinden aufsummiert (bspw. die Potenziale), teilweise durch Quotientenbildung miteinander kombiniert oder aber unter Mittelwertbildung (bspw. die Kosten) zusammengefasst.

In gleicher Weise wurde unter Berücksichtigung der in der Tabelle 2.3 dargelegten Standortanforderungen auch hinsichtlich des integrierten Konzepts eine entsprechende *Standortanalyse und Standortbewertung* durchgeführt. Eine *Standortauswahl* erfolgte nicht, da der Standort der zentralen Vergasungsanlage bereits auf Karlsruhe festgelegt wurde (vgl. Kapitel 2.1). Demnach wurde im Rahmen einer *Standortbewertung* die Potenzial-, Kosten- bzw. Logistiksituation eines um Karlsruhe gelegenen kreisförmigen Einzugsgebietes ( $R = 50, 100$  und  $150$  km)<sup>66</sup> für dieses Konzept genauer betrachtet. Da jedoch bei Einzugsgebieten dieser Größe die räumliche Verteilung des Aufkommens und der Kosten im Allgemeinen inhomogen ist, wird sich in der Praxis die Erfassung auf einige Gebiete innerhalb eines Einzugsgebietes konzentrieren – solche werden in dieser Arbeit als *Erfassungsgebiete* bezeichnet. Entsprechend der Definition des Systemraums (vgl. Kapitel 2.1), wurden die außerhalb von Baden-Württemberg liegenden Flächenanteile bzw. Gemeinden nicht mit in die Bewertung einbezogen. Insofern sind die daraus abgeleiteten Aussagen nur bedingt aussagekräftig.

Zu einem Einzugsgebiet wurden nur all jene Gemeinden hinzugerechnet, deren Flächenschwerpunkte innerhalb der geometrisch definierten Kreisfläche lagen (vgl. Anhang 6.38, S. A-155). Insofern entschied die Lage des Flächenschwerpunktes dann auch, ob die an bzw. auf der Grenzlinie liegenden Gemeinden noch einem Einzugsbereich zugeordnet wurden oder nicht. War dies gegeben, so wurde beispielsweise das Biomasseaufkommen einer Gemeinde vollständig zum Einzugsgebiet hinzugerechnet, auch wenn Teile der Gemeinde nicht mehr innerhalb dessen liegen. Diese Vorgehensweise scheint insofern auch berechtigt, da die Darstellung eines geometrisch exakt definierten Einzugsgebietes per se eine Vereinfachung darstellt und sich die durch die Grenzlinie berücksichtigten bzw. nicht berücksichtigten Flächenteile nahezu ausgleichen dürften.

---

<sup>65</sup> Durch das Biomasseaufkommen in Einzugsgebieten dieser Größe lassen sich Anlagenleistungen von ca. 40 bis 120 MW<sub>in</sub> realisieren. Geringere Anlagenleistungen sind aufgrund der gegebenen Kostenstruktur für Pyrolyseanlagen wenig sinnvoll.

<sup>66</sup> Bei Definition eines kreisförmigen Einzugsgebietes mit einem Radius von maximal 150 km werden, ausgehend vom Standort Karlsruhe, die gesamte Landesfläche und damit alle Gemeinden Baden-Württembergs vollständig erfasst (vgl. Definition der Systemgrenze, Kapitel 2.1).

## 2.6 Gegenüberstellung von dezentralem und integriertem bioliq<sup>®</sup>-Konzept

Im letzten Teil dieser Arbeit steht insbesondere die Frage im Mittelpunkt, welche Unterschiede in Hinblick auf die Ökonomie zwischen den beiden räumlich konzeptionellen Auslegungen (dezentral oder integriert) des bioliq<sup>®</sup>-Verfahrens bestehen.

Da sich die im Rahmen von Kapitel 3.3.3 durchgeführten ökonomischen Auswertungen und Gegenüberstellungen nur auf den Bereitstellungsprozess richteten, kann eine unmissverständliche Gegenüberstellung und Bewertung der unterschiedlichen Konzepte nur erfolgen, sofern alle Kostenkomponenten der gesamten Prozesskette gleichermaßen mit einbezogen werden.

Demnach bilden die Gestehungskosten<sup>67</sup> – diese ergeben sich aus den Kosten für Biomasseerfassung/-transport und der eigentlichen Produktion (Konditionierung, Lagerung, Pyrolyse, Vergasung, Synthese, u.a.) – die Grundlage dieser Gegenüberstellung. Da im Rahmen dieser Arbeit gemäß der in Kapitel 2.1 dargelegten Einschränkungen nur die Kosten für die Biomasseerfassung und den Transport im Mittelpunkt der Betrachtung standen, wurde hinsichtlich der Produktionskosten auf die hierzu im FZK-Bericht 7170 (Leible et al., 2007) durchgeführten Kalkulationen zurückgegriffen.

Der eigentliche Vergleich der beiden Konzepte erfolgt zunächst, indem die Ergebnisse der Standortbewertung (vgl. Kapitel 2.5) zum integrierten Konzept mit den Ergebnissen für die drei exemplarisch ausgewählten Pyrolyse-Anlagenstandorte bzw. Einzugsgebiete gegenübergestellt werden. Da aber sowohl der Standort (inkl. Einzugsgebiet) von Pyrolyseanlagen als auch das Einzugsgebiet einer integrierten Anlage (mit Standort Karlsruhe) nicht auf Baden-Württemberg beschränkt sind, erfolgt eine abschließende Gegenüberstellung von dezentralem und integriertem Konzept anhand von Referenzanlagen (4.500 MW<sub>in</sub>)<sup>68</sup>.

Dazu werden die Gestehungskosten für beide Anlagenkonzepte (dezentral bzw. integriert) in Abhängigkeit von der Transportentfernung in Form einer Kostenfunktion dargestellt und ermittelt, bei welcher Entfernung diese Funktionen einen Schnittpunkt aufweisen.

Um die Gestehungskosten dieser Form der Biomassenutzung besser einordnen zu können, werden diese auch den Gestehungskosten der Wärme- und Strombereitstellung gegenübergestellt. Entsprechende Ergebnisse sind dem bereits erwähnten FZK-Bericht (Leible et al., 2007) entnommen, an dessen Erstellung der Autor dieser Arbeit maßgeblich mit beteiligt war.

---

<sup>67</sup> Die Gestehungskosten beziehen sich ausschließlich auf die Bereitstellung eines Fischer-Tropsch-Kraftstoffes (frei Vergasungs-/Syntheseanlage).

<sup>68</sup> Diese Inputleistung (bezogen auf den eingesetzten Brennstoff) wurde gewählt, da BtL-Anlagen in diesem Leistungsbereich kostenoptimal zu betreiben sein dürften.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Aufkommen an Reststroh und Waldrestholz

Die Frage nach den Möglichkeiten und dem Umfang einer energetischen Nutzung von Biomasse ist immer untrennbar mit der Frage nach den verfügbaren Ressourcen sowie deren Aufkommensort verbunden und bildet insofern eine wesentliche Ausgangsbasis im Planungs- bzw. Analyseprozess einer auf Biomasse gestützten Energieerzeugungskette.

In den folgenden Ausführungen wird eine Darstellung über die Höhe des energetisch nutzbaren Aufkommens von Reststroh und Waldrestholz und dessen räumliche Verteilung in Baden-Württemberg gegeben, wobei einige wesentliche Restriktionen, die eine Nutzung der genannten Energieträger entweder vollständig oder teilweise ausschließen, mit berücksichtigt wurden.

Zunächst wird in diesem Kapitel kurz auf die Landnutzung in Baden-Württemberg eingegangen, da diese in engem Zusammenhang mit der Frage nach den Aufkommensorten steht. Um die im weiteren Verlauf dieses Kapitels vorgestellten und diskutierten Potenziale hinsichtlich ihrer mengenmäßigen bzw. energiewirtschaftlichen Bedeutung besser einordnen zu können, wird zudem ein Überblick zum Aufkommen weiterer biogener Reststoffe gegeben.

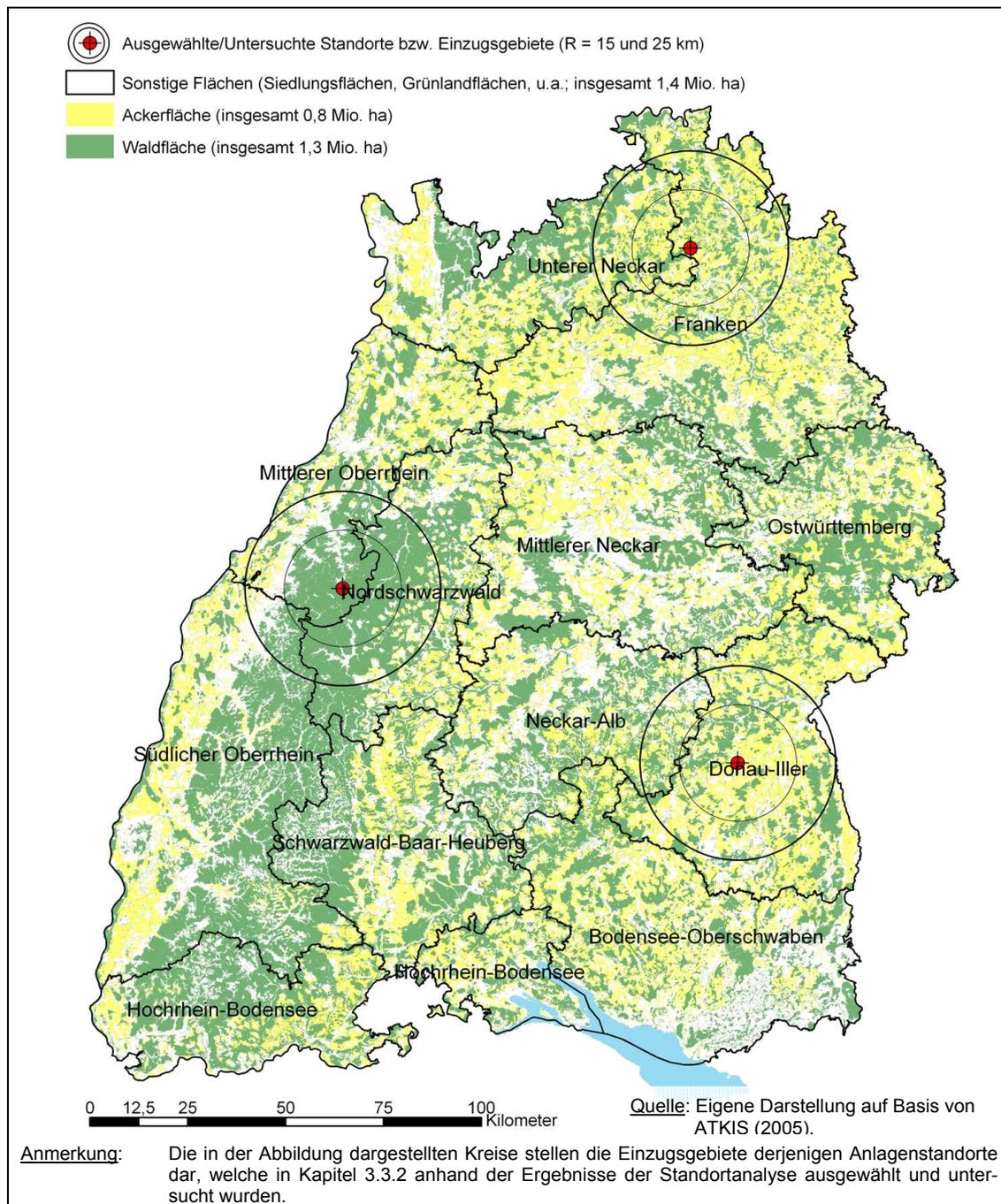
#### 3.1.1 Landnutzung in Baden-Württemberg

Die an einem bestimmten Aufkommensort theoretisch nutzbare Menge an (Rest-) Stroh und (Waldrest-) Holz steht in enger Beziehung zu Umfang und Lage der an diesem Ort vorhandenen und bewirtschafteten Wald- und Ackerflächen. Da diese Flächen eine wesentliche Bezugsgröße zur räumlichen Darstellung des Potenzials bilden, lassen sich hieraus erste günstige Aufkommensgebiete/Standorte ableiten. Wie Abbildung 3.1 (S. 40) zeigt, sind diese Flächen innerhalb Baden-Württembergs keinesfalls homogen verteilt, weshalb auch das Aufkommen durch sehr große regionale Unterschiede<sup>69</sup> gekennzeichnet ist.

Das Land Baden-Württemberg verfügt über eine bewaldete Fläche von ca. 1,3 Mio. Hektar; davon sind rund 57 % mit Nadelwald und rund 43 % mit Laubwald bedeckt (FVA, 2005). Wie die Ergebnisse der letzten Landeswaldinventur zeigen, blieb der Umfang dieser Waldfläche in den letzten 15 Jahren nahezu unverändert. Dabei sind die Waldflächen vorzugsweise in Gebieten mit einer verstärkt hügeligen Topografie (Schwarzwald, Schwäbische Alb) vorzufinden, welche für andere Landnutzungsformen eher ungeeignet sind. Insgesamt ist ein großer Teil dieser statistisch ausgewiesenen Waldflächen aufgrund ihrer erschwerten Zugänglichkeit, aber auch aufgrund gesetzlicher Bestimmungen (insbesondere Naturschutzgebiete; Anteil: 3,5 %) nicht oder nur sehr eingeschränkt nutzbar. So stehen nach eigener Abschätzung nur etwa 80 % der Waldfläche für eine Nutzung tatsächlich zur Verfügung.

---

<sup>69</sup> Solche regionalen Unterschiede ergeben sich allerdings nicht nur durch die eigentliche Flächenverteilung, sondern auch durch verschiedenartige standortspezifische Gegebenheiten (klimatische Bedingungen, Bodenertrag, Nutzungsstruktur) und Restriktionen.



**Abbildung 3.1: Verteilung der Acker- und Waldflächen in den großräumigen Regionen Baden-Württembergs**

Die Ackerflächen in Baden-Württemberg waren durch eine Änderung des Bewirtschaftungsumfangs in den letzten Jahren einigen Schwankungen unterworfen. So verzeichnete z.B. durch Auflagen der Agrarpolitik – insbesondere zur Stützung der Erzeugerpreise für landwirtschaftliche Produkte – der Umfang der stillgelegten Ackerflächen in den beiden letzten Jahrzehnten einen deutlichen Zuwachs<sup>70</sup>. Nach aktuellen Schätzungen des Statistischen Landesamtes beträgt der Umfang der Ackerflächen in Baden-Württemberg gegenwärtig (2007) rund 833.000 ha; hiervon dienen mehr als die Hälfte (480.000 ha) ausschließlich der Getreideerzeugung (StaLa, 2007b).

<sup>70</sup> Im Jahr 1979 betrug der Umfang der stillgelegten Flächen in Baden-Württemberg rund 2.600 ha; bis zum Jahr 2006 war diese Fläche bereits auf 41.000 ha angewachsen (StaLa, 2002b und 2007b). Auf solchen stillgelegten Flächen könnten künftig gezielt biogene Energieträger angebaut und diese beispielsweise auch für die Kraftstoffherstellung eingesetzt werden.

### 3.1.2 Bedeutung biogener Reststoffe in Baden-Württemberg und Deutschland

Die in dieser Arbeit näher betrachteten Bioenergieträger Stroh und Holz lassen sich hinsichtlich ihres Aufkommens am besten einordnen, wenn sie biogenen Rest- und Abfallstoffen gegenübergestellt werden, die ebenfalls für eine energetische Nutzung in Frage kommen. Das Aufkommen dieser biogenen Energieträger für Baden-Württemberg und zum Vergleich auch für Deutschland zeigt Abbildung 3.2. Demnach beträgt das jährlich verfügbare Aufkommen an biogenen Rest- und Abfallstoffen, welches hinsichtlich der Menge insbesondere durch die Land- und Forstwirtschaft geprägt wird, für Baden-Württemberg rd. 8 Mio. Mg oTS (Leible et al., 2006).

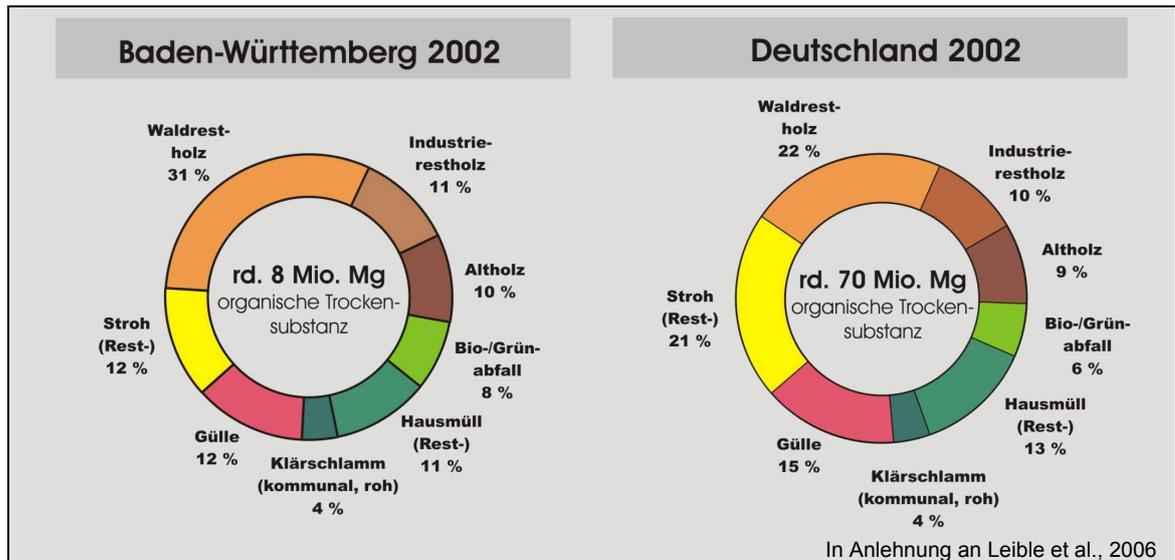


Abbildung 3.2: Aufkommen<sup>71</sup> biogener Rest- und Abfallstoffe in Baden-Württemberg und Deutschland im Jahr 2002

Das in der Abbildung 3.2 summarisch angeführte Aufkommen biogener Rest- und Abfallstoffe entspricht einem jährlichen Pro-Kopf-Aufkommen von rund 0,8 Mg oTS bzw. einem Heizwert von rd. 420 Liter Heizöl und damit insgesamt ca. 9 % des Primärenergiebedarfs<sup>72</sup> von Baden-Württemberg. Damit ist das angeführte Potenzial an biogenen Rest- und Abfallstoffen im Hinblick auf eine energiewirtschaftliche bzw. energiepolitische Bedeutung keinesfalls als gering einzustufen.

Während die energetische Nutzung von (Waldrest-, Industrie-) Holz gängige Praxis ist, kann davon ausgegangen werden, dass die energetische Nutzung von Getreidestroh in Deutschland wie auch in Baden-Württemberg bis dato so gut wie keine Rolle spielt. So wurden bisher lediglich einige Forschungs- und Demonstrationsvorhaben durchgeführt, bei denen vielmehr die Entwicklung schadstoffarmer Verbrennungstechnologien und weniger die eigentliche energetische Nutzung von Stroh im Mittelpunkt stand

<sup>71</sup> Die in der Abbildung dargestellte Zahl für Waldrestholz basiert auf der Abschätzung von Dieter et al. (2001). Das Aufkommen von Landschaftspflegegut jedweder Art wurde in die Darstellung nicht mit einbezogen. In gleicher Weise ist – mit Ausnahme des Industriestholzes – nicht berücksichtigt, in welchem Umfang biogene Rest- und Abfallstoffe aus dem produzierenden Gewerbe energetisch genutzt werden könnten.

<sup>72</sup> Abschätzungen zufolge deckten Biomasse und biogene Rest- und Abfallstoffe in Baden-Württemberg im Jahr 2005 rund 3,8 % des Primärenergiebedarfs. Insgesamt betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergiebedarf rund 5,1 % (Umweltministerium BW, 2006).

(Thrän und Kaltschmitt, 2001; Brökeland, 2005). Dabei stellt Stroh oftmals in denjenigen Gebieten, in denen der klassische Brennstoff Holz nicht, oder nur in geringen Mengen als Energieträger zur Verfügung steht, einen aufkommensreichen und kostengünstigen Brennstoff dar.

### 3.1.3 Aufkommen an Reststroh

Das Aufkommen an (Getreide-) Reststroh ist einer großen zeitlichen wie auch räumlichen Variation unterworfen, da sich in der Landwirtschaft die Wahl der Anbaupflanzen von Jahr zu Jahr unterscheidet und sich zudem auch der Anbau von Getreide mit der Fruchtfolge über die jeweils zur Verfügung stehende Ackerflächen unterschiedlich verteilt.

Aus diesem Grund ist, anders als in Kapitel 3.1.1 vereinfacht erläutert, in vielen Fällen eine eindeutige Korrelation von Ackerfläche und Strohaufkommen nur eingeschränkt gegeben. Darüber hinaus beeinflussen meteorologische Gegebenheiten, sowie verschiedenartige Bodenverhältnisse und Bewirtschaftungsweisen den Ertrag, weshalb sich hinsichtlich des Reststrohaufkommens sowohl saisonale als auch regionale Schwankungen bzw. Unterschiede ergeben.

Wie bereits in Kapitel 2.3 angedeutet, steht nicht das gesamte Strohaufkommen einer energetischen Nutzung zur Verfügung, weil ein Teil des Aufkommens hauptsächlich in den Erzeugerbetrieben<sup>73</sup> einer stofflichen Nutzung zugeführt wird.

Um dem Erhalt der Wirtschaftsgrundlage der Landwirte Rechnung zu tragen, muss über einen langen Zeitraum die Sicherstellung und Stabilisierung der Bodenqualität gewährleistet sein. Deshalb verbleibt in der Regel ein Teil des Strohaufkommens auf der Anbaufläche. Werden in den Erzeugerbetrieben zudem Nutz- und Freizeittiere gehalten, wird das Stroh (je nach Haltungsverfahren) als Einstreu und in geringerem Ausmaße auch für die Verfütterung genutzt. In der Regel wird dieses Stroh dann in Form von Mist wieder auf den Ackerflächen ausgebracht und so die Humusbilanz gestützt.

Vor diesem Hintergrund wird nun im Folgenden auf Basis der in Kapitel 2.3.1 vorgestellten methodischen Vorgehensweise dargelegt, welche Strohmenge unter Berücksichtigung von regional- bzw. betriebspezifischen Besonderheiten den landwirtschaftlichen Stoffkreisläufen ausgeschleust und einer energetischen Nutzung zugeführt werden könnten.

---

<sup>73</sup> Auch außerhalb des landwirtschaftlichen Betriebes ist für Stroh ein bestimmtes Nachfragepotenzial durch Pferdepensionen/Reitställe, Gärtnereien, Kleintierzüchter, u.a. gegeben. Darüber hinaus findet ein Strohexport ins benachbarte Ausland statt. Kaltschmitt (1993) bezifferten diese gehandelte Menge zusammen auf rund 5 % der gesamt produzierten Menge. Da dieses Marktvolumen statistisch nicht erfasst wird, diese gehandelte Menge regional nicht abbildbar ist und die in der Praxis tatsächlich erzeugte Reststrohmenge deutlich über der hier abgeschätzten Menge liegen dürfte, wurde dieses Marktvolumen für die Abschätzungen in dieser Arbeit vernachlässigt.

### 3.1.3.1 Baden-Württemberg

Die Ergebnisse zur Berechnung des Reststrohaufkommens in Baden-Württemberg für das Jahr 2003 sind in Tabelle 3.1 (S. 44) dargelegt. Um die Entwicklung<sup>74</sup> im Bereich des Strohaufkommens der beiden letzten Jahrzehnte zu verdeutlichen, sind zudem auch die Ergebnisse einer Potenzialanalyse für das Jahr 1980 wiedergegeben. Eine entsprechende Gegenüberstellung der Ergebnisse auf Landkreisebene für die beiden verglichenen Jahre zeigt die kartografische Darstellung aus Anhang 6.39 (S. A-156).

Wie Tabelle 3.1 zu entnehmen ist, ergibt sich für das Jahr 2003 ein (Brutto-) Strohaufkommen<sup>75</sup> in Höhe von rund 2,85 Mio. Mg FM (86 % TM), was einem durchschnittlichen Ertrag von annähernd 6 Mg FM/ha Getreideanbaufläche gleichkommt.

Unter Berücksichtigung des Bedarfs für Einstreu und Verfütterung (rd. 900.000 Mg FM/a) sowie des Bedarfs zum Erhalt der Humusbilanz (rund 780.000 Mg), verbleiben letztlich ungefähr 1,2 Mio. Mg FM bzw. 1,0 Mio. Mg TM Stroh, welches in Baden-Württemberg über einen längeren Zeitraum dem landwirtschaftlichen Produktionsprozess entnommen und einer energetischen Verwertung zugeführt werden könnte.

Eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen zur Auswertung für das Jahr 1980 zeigt, dass das (Brutto-) Strohaufkommen trotz einer etwas geringeren Getreideanbaufläche gegenüber 1980 im Jahr 2003 um rund 20 % höher liegt. Wie eine Auswertung der statistischen Daten aus den Jahren 1980 bis 2003 zeigt, ist dies hauptsächlich auf eine kontinuierliche Steigerung der Erträge im Verlauf der beiden letzten Jahrzehnte zurückzuführen. Erhebliche Unterschiede zwischen den beiden gegenübergestellten Jahren offenbaren sich insbesondere bei einem Blick auf die Höhe des abgeschätzten Reststrohaufkommens. Diese Unterschiede sind in erster Linie durch einen merklichen Rückgang des Viehbestandes bei gleichzeitig geänderten Viehhaltungsverfahren bedingt. Demnach ist mit der zunehmenden Bedeutung der Viehhaltung in Großbeständen und einer Veränderung der Haltungsverfahren von der Festmist- hin zur (einstreulosen) Güllewirtschaft, der Bedarf an Stroh als Einstreu stark zurückgegangen.

Wie sich diese Strohaufkommen in der Zukunft darstellen, ist gerade in Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen in der EU-Agrarpolitik nur schwer abzuschätzen. Wird der bisher zu beobachtende Trend fortgeschrieben, kann auch weiterhin von leicht ansteigenden Erträgen, bei gleichzeitiger Reduktion der bewirtschafteten Flächen ausgegangen werden (BMELV, 2007). Da hinsichtlich der Viehhaltungsverfahren keine gravierenden Änderungen zu erwarten sind, die Höhe des Viehbestandes aber weiterhin rückläufig sein dürfte (Arndt, 2004; BMVEL, 2005b), kann in der nahen Zukunft letztlich von einem nahezu gleichbleibenden oder sogar weiterhin steigenden Strohangebot ausgegangen werden.

---

<sup>74</sup> Die Diskussion der Entwicklung ausschließlich anhand der beiden ausgewählten Jahre (1980 und 2003) ist methodisch dahingehend gerechtfertigt, da sich durch eine Zeitreihenanalyse gezeigt hat, dass die Entwicklung zwischen den beiden verglichenen Jahren tendenziell lineare Verläufe aufweist.

<sup>75</sup> Der größte Anteil wird hierbei von dem bei der Weizen- und Gerstenproduktion anfallenden Stroh gebildet.

**Tabelle 3.1: Abschätzungen zum energetisch nutzbaren Strohaufkommen in Baden-Württemberg für die Jahre 1980 und 2003**

	Einheit	1980	2003	Veränderung 1980 bis 2003
<b>Ackerfläche</b> <i>dv. Getreideanbaufläche (ohne Mais)</i>	1000 ha	831 549	837 480	+ 0,7% - 13 %
<b>Hektarertrag (Korn)</b>	Mg FM/ha	4,2	5,5 <sup>a)</sup>	+ 31 %
<b>(Brutto-) Strohaufkommen</b>	1000 Mg FM	<b>2.363</b>	<b>2.845</b>	+ 20%
<i>bezogen auf die Getreideanbaufläche</i>	Mg FM/ha	4,3	5,9	+ 38 %
<i>bezogen auf die Landesfläche BW</i>		0,7	0,8	+ 20 %
<b>Großvieheinheiten (GVE) <sup>b)</sup></b>	1000 GVE	1.595	1.141	- 28 %
<b>Bedarf für:</b> <b>Einstreu <sup>c)</sup></b>	1000 Mg FM	1.823	754	- 59 %
<b>Verfütterung</b>	1000 Mg FM	206	147	- 29 %
<b>Humuserhalt <sup>d)</sup></b>	1000 Mg FM	134	778	+ 482 %
<b>Reststroh-Aufkommen</b> <b>(energetisch nutzbar) <sup>e)</sup></b>	1000 Mg FM	<b>200</b>	<b>1.166</b>	+ 482 %
	1000 Mg TM	<b>172</b>	<b>1.003</b>	
<i>bezogen auf die Getreideanbaufläche</i>	Mg TM/ha	0,3	2,1	+ 566 %
<i>bezogen auf die Landesfläche BW</i>		0,05	0,28	+ 482 %

Anmerkungen: a) Mittelwert der Hektarerträge aus den Jahren 1999 bis 2003. Hierbei war insbesondere das „Dürrejahr“ 2003 durch erhebliche Ertragseinbußen (-12 % gegenüber dem Vorjahr) charakterisiert.

b) 1 GVE entspricht 500 kg Lebendgewicht; tierartspezifischer Umrechnungsschlüssel siehe StaLA (2002a).

c) Hierbei wurde davon ausgegangen, dass Rinder und Schweine im Jahr 1980 zu 50 % und im Jahr 2003 zu 25 % auf Einstreu standen.

d) Annahme: Aus der Differenz von (Brutto-) Strohaufkommen abzüglich des Bedarfs für Einstreu und Verfütterung, werden 40 % für den Erhalt der Humusbilanz verwendet. Damit könnten 60 % dieser Differenz entnommen und einer energetischen Nutzung zugeführt werden. Im Jahr 1980 war der Strohbedarf für Humus geringer, da erheblich mehr Stroh in Form von Mist wieder auf die Fläche ausgebracht wurde.

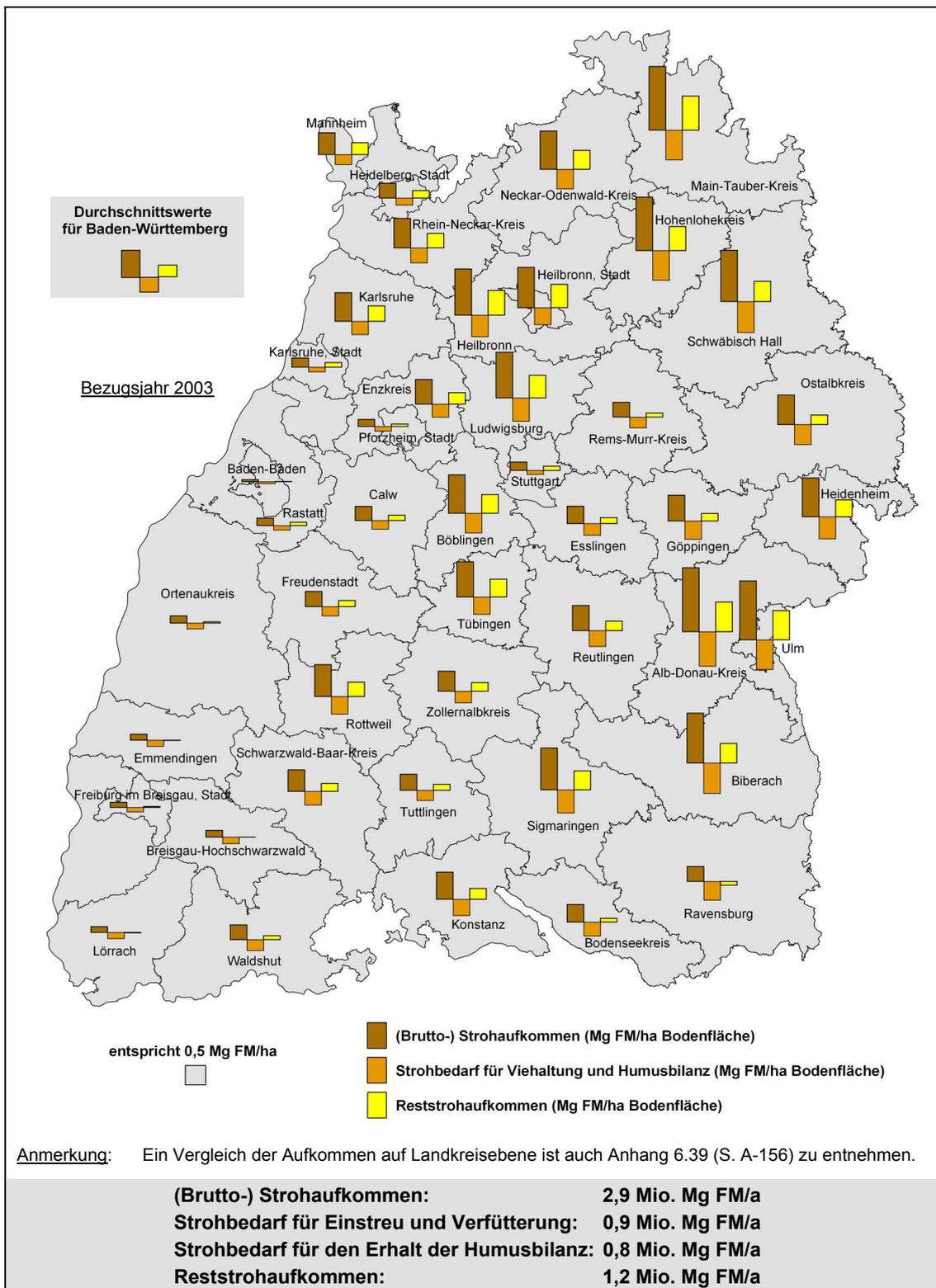
e) Bei der Umrechnung auf TM wurde ein Trockensubstanzgehalt von 86 % unterstellt.

Quellen: Eigene Abschätzung auf Basis der statistischen Berichte des StaLa (verschiedene Jahre).

### 3.1.3.2 Landkreise

Bei Betrachtung der Aufkommenssituation auf Landkreisebene (vgl. Abbildung 3.3) wird deutlich, dass sich aufgrund von regional- und betriebsspezifischen Gegebenheiten im Vergleich zu den in Tabelle 3.1 vorgestellten aggregierten Summen- bzw. Durchschnittswerten (für ganz Baden-Württemberg), für die jeweiligen Landkreise zum Teil erhebliche Unterschiede ergeben.

Wie die Analysen zeigten, verfügen die Landkreise Alb-Donau (242.000 Mg FM) und Schwäbisch-Hall (211.000 Mg FM) über die größten Getreidestrohaufkommen. Dagegen verfügen die Stadtkreise im Hinblick auf die Größe der Anbauflächen erwartungsgemäß über die geringsten Aufkommen – z.B. Baden-Baden mit 806 Mg FM. Wird das Aufkommen in Bezug zur Getreideanbaufläche gesetzt, zeichnen sich die Landkreise Alb-Donau und Biberach mit ca. 6,3 bzw. 6,4 Mg FM/ha durch die höchsten Stroherträge aus.



**Abbildung 3.3: Strohaufkommen in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs im Jahr 2003**

Von größerer Bedeutung ist allerdings die Auswertung hinsichtlich des Reststrohaufkommens, welches sich unter Berücksichtigung des bestehenden Bedarfs für die Viehhaltung und der Humusbilanz ergibt. Da die Landkreise Emmendingen, Lörrach und Ravensburg einen im Verhältnis zur Getreideproduktion überproportional hohen Viehbestand aufweisen, ergibt sich bei diesen drei Landkreisen letztlich ein negatives Reststrohaufkommen von insgesamt rund 40.000 Mg FM. Anders hingegen die Land-

kreise Main-Tauber und Alb-Donau; bei diesen fallen trotz Berücksichtigung des Strohbedarfs für die Viehhaltung und Humusbilanz zusammen noch rund 250.000 Mg Reststroh an, was rund einem Fünftel des gesamten Aufkommens Baden-Württembergs entspricht.

Da ein Vergleich der Aufkommens- und Bedarfssituation unterschiedlicher Landkreise auf Basis von absoluten Angaben nur bedingt geeignet ist, sind in Abbildung 3.3 die Ergebnisse auf die landkreisspezifische Bodenfläche bezogen. Mit einer Aufkommensdichte von ca. 1,0 Mg FM/ha (Durchschnittswert Baden-Württemberg: 0,3 Mg FM/ha) liegen auch hier die bereits erwähnten Landkreise Main-Tauber und Alb-Donau an erster Stelle.

### 3.1.3.3 *Gemeinden*

Wie bereits in Kapitel 2.1 ausgeführt, reicht es im Zusammenhang mit der Planung von Anlagenstandorten nicht aus, die Aufkommen ausschließlich auf Landkreisebene auszuwerten und darzustellen, weil nicht nur die landwirtschaftlichen Nutzflächen sondern insbesondere auch der (viehhaltungsbedingte) Eigenbedarf und damit das Reststrohaufkommen innerhalb eines Landkreises sehr inhomogen verteilt sind.

Dementsprechend ergibt die Auswertung und Visualisierung (vgl. Abbildung 3.4) des Reststrohaufkommens auf Gemeindeebene ein sehr viel differenzierteres Bild. Es zeigt sich, dass es eine Reihe von Gemeinden gibt, die keine statistisch erfassten Getreideanbauflächen und daher auch kein (Brutto-) Getreidestrohaufkommen aufweisen. Demzufolge ist in diesen Gemeinden das Reststrohaufkommen, in Abhängigkeit des Bedarfs für die Viehhaltung, kleiner gleich null. Solcherlei Gemeinden sind in erster Linie im Bereich des Schwarzwaldes zu finden.

Andere Gemeinden wiederum verfügen zwar über ein (Brutto-) Strohaufkommen, welches aber insbesondere infolge des hohen Viehbesatzes mehr als aufgebraucht wird; d.h. das Reststrohaufkommen ist negativ. Besonders ausgeprägt ist dieser Umstand bei den Gemeinden der bereits erwähnten Landkreise Emmendingen, Lörrach und Ravensburg.

Wie die Auswertung<sup>76</sup> auf Landkreisebene ergeben hat, ist bei den drei genannten Landkreisen das Aufkommen derart defizitär, dass die weiteren Gemeinden dieser Landkreise trotz positiven Aufkommens dieses Defizit nicht kompensieren können und insofern die Landkreise insgesamt ein negatives Aufkommen aufweisen<sup>77</sup>. Vor diesem Hintergrund sind, wie Abbildung 3.4 zeigt, günstige Aufkommensgebiete insbesondere im Bereich der Regionen<sup>78</sup> Franken und Donau-Iller zu finden.

---

<sup>76</sup> Eine Standortentscheidung erfordert deshalb den Abgleich der Ergebnisse auf Landkreis- wie auch Gemeindeebene, da die Gemeinden mit negativem Strohaufkommen diese Defizite durch Importe von angrenzenden Gebieten ausgleichen dürften und diese dann ebenfalls keine energetisch verfügbaren Aufkommen mehr aufweisen.

<sup>77</sup> In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass überständiges Heu mit strohähnlichen Eigenschaften in grünlandreichen Gemeinden im Sinne von Stroh Verwendung in der Viehhaltung findet.

<sup>78</sup> Die Darstellung der großräumigen Regionsgrenzen ist Abbildung 3.1 (S. 40) zu entnehmen.

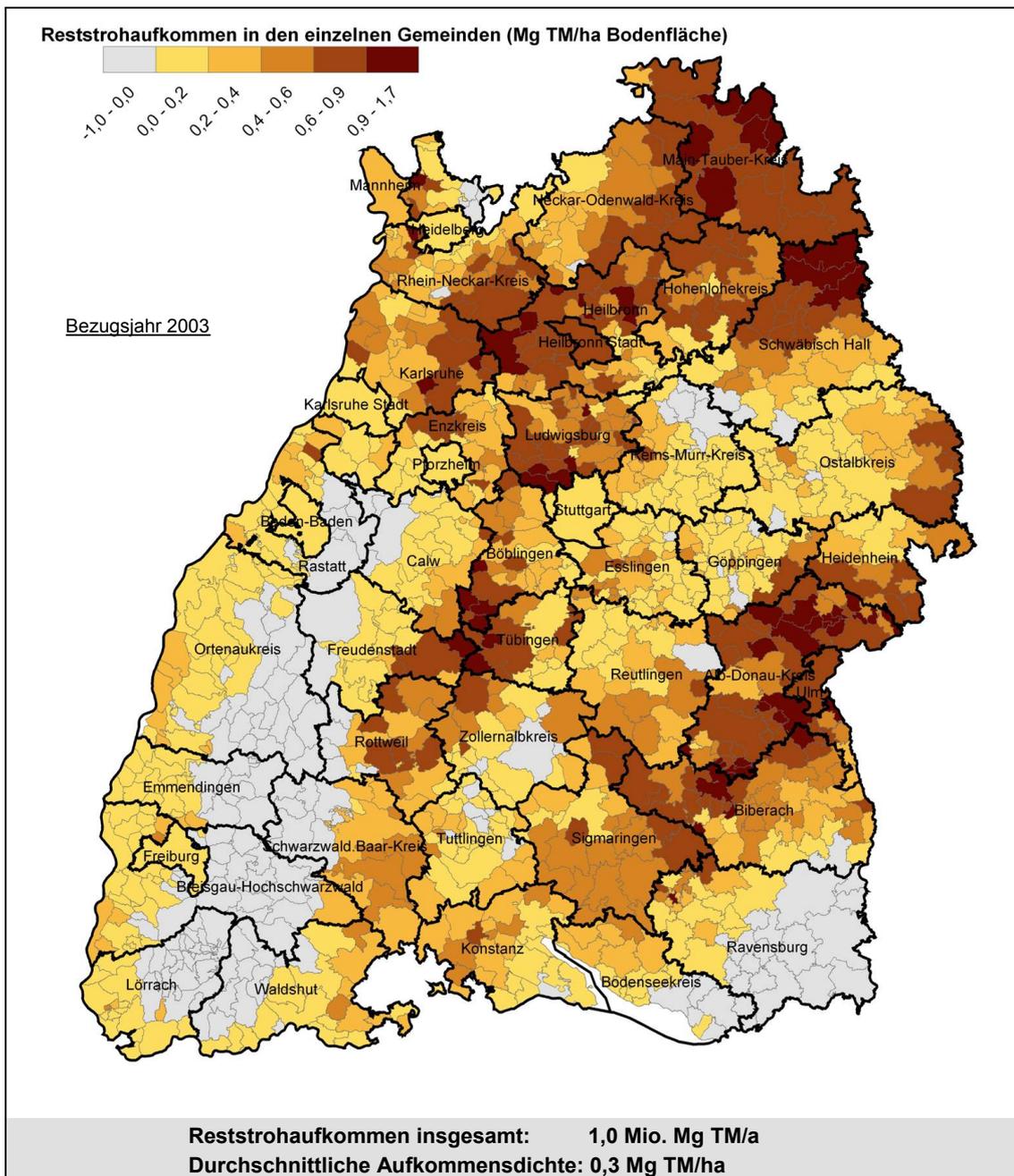


Abbildung 3.4: Reststrohaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs im Jahr 2003

### 3.1.4 Aufkommen an Waldrestholz

Wie bereits angedeutet, steht das Aufkommen an Waldrestholz im Wesentlichen in einem direkten Zusammenhang zum Umfang der an einem bestimmten Ort bewirtschafteten bzw. vorhandenen Waldfläche. Die Holznutzung wird jedoch nicht nur durch die Fläche, sondern auch durch den auf diesen Flächen stehenden bzw. verfügbaren Holzvorrat bestimmt, welcher von der Bestandsdichte, der Bestandszusammensetzung und dem Bestandsalter beeinflusst wird. Das Volumen der stehenden Holzvorräte ergibt sich aus dem Zuwachs – welcher wiederum von Klima- und Bodeneigenschaften beeinflusst wird – und der Vorratsentnahme (Holzeinschlag).

Im Hinblick auf die Waldentwicklung Baden-Württembergs zeigen die Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur (Stichjahr 2002), dass die Holzvorräte in der Periode seit der Erstinventur (Stichjahr 1987) trotz der Sturmkatastrophen von 1990 („Wiebke“)

und 1999 („Lothar“) sowie diverser Käferkalamitäten und einer daraus resultierenden verstärkten Nutzung zugenommen haben (siehe Anhang 6.10, S. A-128f und Anhang 6.11, S. A-130). Diese Vorratszunahme dürfte sich mittelfristig in ähnlicher Weise fortsetzen, sofern es nicht gelingt, über verbesserte Absatzmöglichkeiten des Holzes für die werkstoffliche Nutzung, den Holzeinschlag vornehmlich im kleinen und mittleren Privatwald merklich zu erhöhen (Kändler, 2005). Weil das Aufkommen an Waldrestholz direkt mit dem Umfang des Holzeinschlags gekoppelt ist, hätte dementsprechend eine Steigerung der Nutzungsintensität auch eine Erhöhung des Aufkommens an Waldrestholz zur Folge.

Da sich das Waldrestholzaufkommen im Rahmen der herkömmlichen Holznutzung ergibt, lassen sich aus der Kenntnis zur räumlichen Verteilung der Holzvorräte auch Rückschlüsse auf die künftige Waldnutzung und damit auf potenziell vorteilhafte Aufkommensgebiete ziehen. Deshalb wurde eine Auswertung (vgl. Kapitel 2.3.2; Modell 2/Variante 3) durchgeführt, bei der die gemeindespezifische Vorratssituation für das Jahr 2002 auf Basis der Bundeswaldinventurdaten ermittelt wurde. Auch hierbei wurden verschiedene Parameter und Algorithmen zugrunde gelegt, um die auf Landkreisebene dokumentierten Vorräte (vgl. Anhang 6.10, S. A-128f) auf die jeweiligen Gemeinden zu verteilen. Dabei wurde angenommen, dass insbesondere in Hanglagen und im Privatwald größere Vorratsdichten gegeben sind; der Vorratsabgang durch Sturmwurf<sup>79</sup> und der Nutzungsausschluss in Naturschutzgebieten<sup>80</sup> wurden ebenfalls mit berücksichtigt. Das Ergebnis dieser Auswertung zeigt Abbildung 3.5.

Aus der Kenntnis zur räumlichen Verteilung des Vorrates können allerdings nur bedingt Rückschlüsse auf günstige Aufkommensgebiete gezogen werden, da in vielen „vorratsstarken“ Gebieten aufgrund ungünstiger topografischer Gegebenheiten eine Holznutzung oftmals nicht erfolgt. Vor diesem Hintergrund hat die Darlegung der räumlichen Verteilung des Vorrates aus Abbildung 3.5 in erster Linie einen informellen Charakter und ist für die weiteren Ausführungen in dieser Arbeit nicht von Bedeutung.

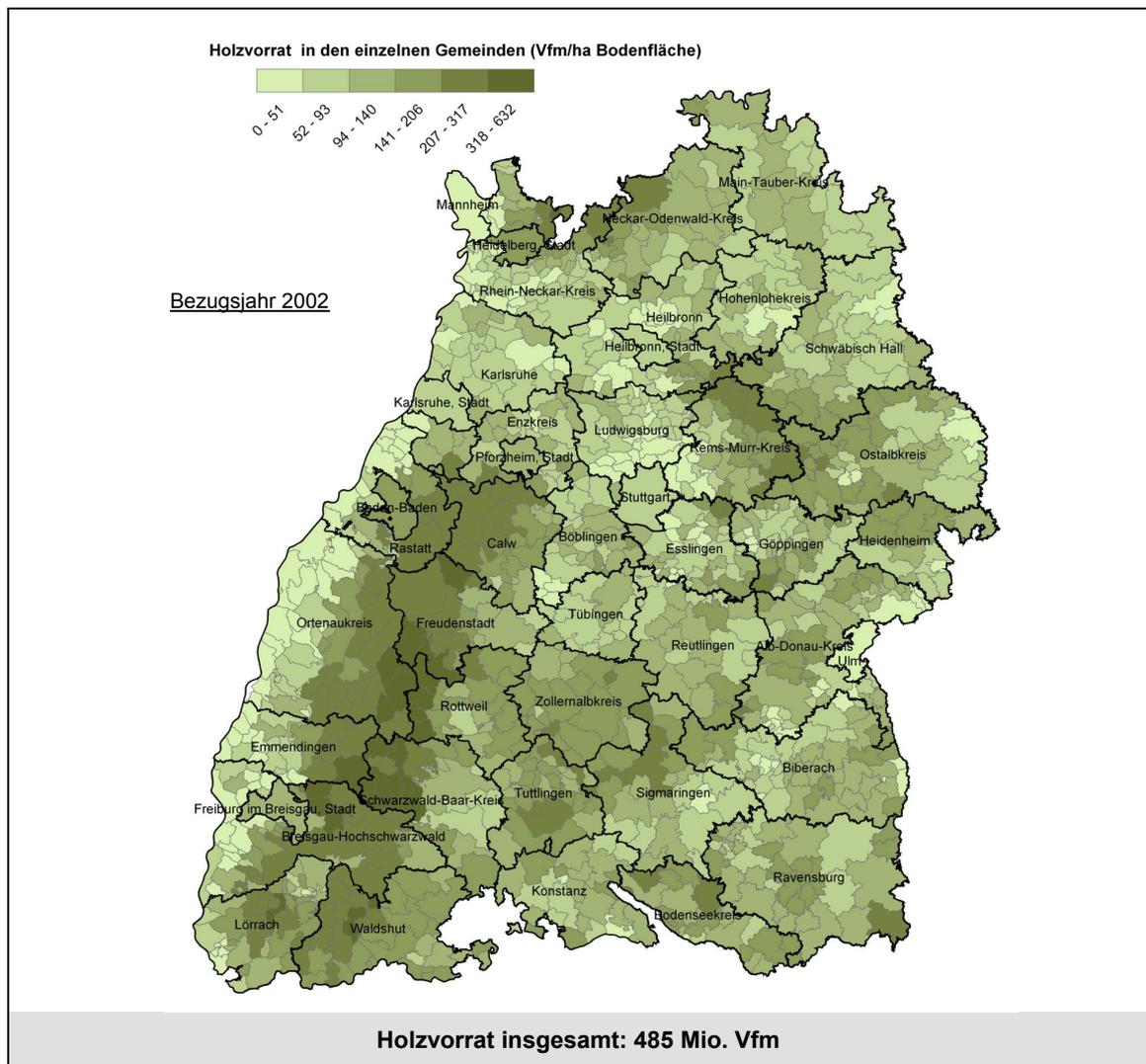
Die tatsächliche Holznutzung und in diesem Kontext auch die Erschließung (Mobilisierbarkeit) des Aufkommens von Waldrestholz kann in den meisten Fällen nur dort erfolgen, wo dies wirtschaftlich gegeben und nicht durch rechtliche, technische und ökologische Restriktionen eingeschränkt ist. Wo diese Grenze der Wirtschaftlichkeit liegt, hängt stark von der Erntetechnik und verschiedenen strukturellen Gegebenheiten (z.B. Hangneigung, Bestandsstruktur) ab. Dabei ist eine wirtschaftliche Holzernte im klassischen Sinne nicht mit einer wirtschaftlichen Erfassung bzw. Verfügbarmachung von Waldrestholz gleichzusetzen.

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, wurden bei der Herleitung des Waldrestholzaufkommens (auf Basis der tatsächlich ausgeschiedenen Holzmenge) einige dieser Restriktionen mit einbezogen.

---

<sup>79</sup> Insgesamt ergab eine GIS-Auswertung auf Basis des Räumlichen Informations- und Planungssystems BW (RIPS, 2005; Datenbasis Landsat TM) einen Umfang an Sturmwurfflächen von rund 30.000 ha.

<sup>80</sup> Im Rahmen einer GIS-Auswertung wurde der Umfang dieser unter Naturschutz stehenden Waldflächen auf rund 46.000 ha geschätzt. FFH-Gebiete sind darin nicht enthalten, obwohl auch dort die Nutzung teilweise eingeschränkt ist.



**Abbildung 3.5: Holzvorräte in den Gemeinden Baden-Württembergs im Jahr 2002**

### 3.1.4.1 Periode 1987 bis 2002

Die Abschätzung zur Aufkommenssituation (vgl. Kapitel 2.3.2 ; Modell 1) erfolgte zunächst in Anlehnung an die Studie<sup>81</sup> von Sigmund und Frommherz (2000) auf Basis der in der Forsteinrichtungsplanung<sup>82</sup> (Bezugsjahr 2002) für die jeweiligen Forstbezirke dokumentierten Einschlags- bzw. Hiebszahlen. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Tabelle 3.2 (S. 50) wiedergegeben. Demnach ergibt sich für Baden-Württemberg ein durchschnittliches Waldrestholzaufkommen von circa 0,9 Mio. Mg TM pro Jahr, wobei in dieser Menge noch rund 0,2 Mio. Mg TM an Waldrestholz enthalten sind, welche gegenwärtig dem Wald als Brennholz entnommen werden und somit einer anderweitigen energetischen Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen.

<sup>81</sup> Die Autoren geben ein durchschnittlich verfügbares Gesamtaufkommen von rund 1,12 Mio. Mg TM/a an, aus dem sich unter Berücksichtigung diverser Restriktionen ein leicht verfügbares Aufkommen von 0,87 Mio. Mg TM/a ergibt. Diese Werte sind mit den in Tabelle 3.2 angeführten Werten nicht vergleichbar, da die Autoren bei ihrer Abschätzung noch Stammholzsorimentsumschichtungen sowie Brennholz hinzuzählen, welches eigens für die energetische Nutzung eingeschlagen wird, aber kein Restholz im eigentlichen Sinne darstellt.

<sup>82</sup> Als Bezug wurde das Jahr 2002 gewählt, da damit ein Vergleich mit den aus der Bundeswaldinventur 2 (Stichjahr 2002) abgeleiteten Abschätzungen ermöglicht wird.

Da sich das Augenmerk dieser Arbeit auf die räumliche Verteilung des Waldrestholzaufkommens richtet, sind die Ergebnisse anhand einer kartografischen Darstellung – gegliedert nach den Forsteinrichtungsbezirken – in Anhang 6.40 (S. A-157) wiedergegeben. Auf eine Interpretation soll an dieser Stelle verzichtet werden, weil diese Ergebnisse aufgrund ihres Vergangenheitsbezuges für die weiteren Betrachtungen dieser Arbeit keine Berücksichtigung finden.

**Tabelle 3.2: Abschätzungen zum Waldrestholzaufkommen in Baden-Württemberg auf Basis der Forsteinrichtungsdaten (Bezugsjahr 2002)**

Bezugsjahr 2002	Einheit	Staatswald <sup>a)</sup>	Körperschaftswald	Privatwald	Summe
<b>Waldfläche</b>	1000 ha <sup>b)</sup>	316	496	490	1.302
<b>Einschlag <sup>c)</sup></b>	1000 Efm	2.279	3.696	1.506	7.481
<b>Waldrestholzaufkommen</b>	1000 m <sup>3</sup>	<b>502</b>	<b>855</b>	<b>401</b>	<b>1.758</b>
	1000 Mg TM				<b>879</b>
<i>davon bisher genutzt</i>	1000 m <sup>3</sup>	<i>102</i>	<i>202</i>	<i>174</i>	<i>478</i>
<b>Freies nutzbares Aufkommen</b>	1000 m <sup>3</sup>	<b>400</b>	<b>653</b>	<b>227</b>	<b>1280</b>
	1000 Mg TM				<b>640</b>

Anmerkungen: a) Einschließlich Bundeswaldfläche von ca. 8.000 ha.

b) Holzbodenflächen regelmäßiger Bewirtschaftung.

c) Eigene Herleitung in Anlehnung an die dokumentierten forsteinrichtungsspezifischen Hiebssätze.

Grundlage einer weiteren Aufkommensberechnung (vgl. Kapitel 2.3.2; Modell 2/Variante 1) bildeten die Daten der zweiten Bundeswaldinventur. Demnach wurden in der 15 Jahre umfassenden Periode von 1987 bis 2002 im Gesamtwald Baden-Württembergs rund 241 Mio. Vfm an Derbholz ausgeschieden, von denen ungefähr 181 Mio. Vfm vorwiegend stofflich genutzt wurden (vgl. Anhang 6.10, S. A-128f). Wie Abbildung 3.6 veranschaulicht, lag dabei der durchschnittliche Anteil an ausgeschiedenem Nadelholz (16 Mio. m<sup>3</sup>/a) deutlich über der Menge des ausgeschiedenen Laubholzes (4 Mio. m<sup>3</sup>/a). Unter Berücksichtigung der für die Berechnung festgelegten Methodik ergibt sich hieraus ein durchschnittliches Jahresaufkommen an Waldrestholz von rund 3 Mio. m<sup>3</sup>, was annähernd 1,5 Mio. Mg TM entspricht. Hieraus leitet sich für Baden-Württemberg eine durchschnittliche Aufkommensdichte von 0,4 Mg TM/ha Bodenfläche bzw. 1,2 Mg TM/ha Waldfläche ab. Wird dieses Aufkommen unter Berücksichtigung der Besitzstrukturen auf die definierten Nutzungsklassen (vgl. Anhang 6.12, S. A-131) verteilt, beträgt das „leicht“ zugängliche Aufkommen rund 1,9 Mio. Mg TM/a und entspricht damit annähernd zwei Drittel<sup>83</sup> des abgeschätzten Gesamtaufkommens.

In der vergleichbaren Potenzialstudie von Dieter et al. (2001), welche auf den Ergebnissen der Bundeswaldinventur 1 basiert, weisen die Autoren ein jährlich verfügbares Aufkommen für Baden-Württemberg in Höhe von 2,5 Mio. Mg TM aus; hierbei sind allerdings noch annähernd 1 Mio. Mg TM an Schwachholz mit eingerechnet. Mit Blick

<sup>83</sup> Bezogen auf die Gesamtmenge ist das leicht verfügbare Aufkommen am größten, da bei der Abschätzung davon ausgegangen wurde, dass die Vorratsentnahme vorwiegend im öffentlichen Wald (72 % der Gesamtwaldfläche) und überwiegend auf Waldflächen von bis zu 13 % Hangneigung (45 % der Gesamtwaldfläche) stattfand.

auf die Entwicklungen zwischen den beiden Bundeswaldinventuren sind somit die hier abgeschätzten 1,5 Mio. Mg TM/a keinesfalls als überzogen einzustufen.

Zur Interpretation der Ergebnisse aus Abbildung 3.6 sollte noch angemerkt werden, dass diese Aufkommen, insbesondere in Abhängigkeit der Besitzstruktur, nur bedingt mobilisierbar sind und die angegebene Menge noch um den Anteil der derzeit genutzten Menge zu reduzieren wäre. Zudem beinhalten die angegebenen durchschnittlichen Aufkommen auch diejenige Menge an Waldrestholz, welche durch die Aufarbeitung außergewöhnlich großer Mengen an Sturmholz angefallen ist. Da mit Blick auf die Ergebnisse der Bundeswaldinventur der Umfang der Nutzung auf diesem Niveau gehalten werden könnte, kann deshalb, sofern von theoretischen Potenzialen gesprochen wird, durchaus von o.g. Aufkommen ausgegangen werden.

Verglichen mit den Ergebnissen aus Tabelle 3.2 (S. 50) zeigt das auf Basis der Bundeswaldinventur abgeschätzte Waldrestholzaufkommen einen um den Faktor 1,7 höheren Wert. Dieser Unterschied ist in erster Linie auf die Tatsache zurückzuführen, dass in der Bundeswaldinventur ein durchschnittlicher Einschlag pro Jahr von 12,7 Mio. Efm dokumentiert wurde, bei den Forsteinrichtungsdaten hingegen für den Gesamtwald hierfür lediglich rund 7,5 Mio. Efm; aus dieser Differenz ergibt sich ein Faktor von 1,7. Unter Berücksichtigung dieses Faktors liegen somit die Ergebnisse beider Berechnungsmodelle nahezu auf gleicher Ebene. Da allerdings die Werte der Forsteinrichtungsplanung gemeinhin den Vorratsabgang deutlich unterschätzen, insbesondere aufgrund der Unkenntnis über die Situation im Privatwald, werden die in Abbildung 3.6 dargestellten Aufkommen als plausibel angesehen.

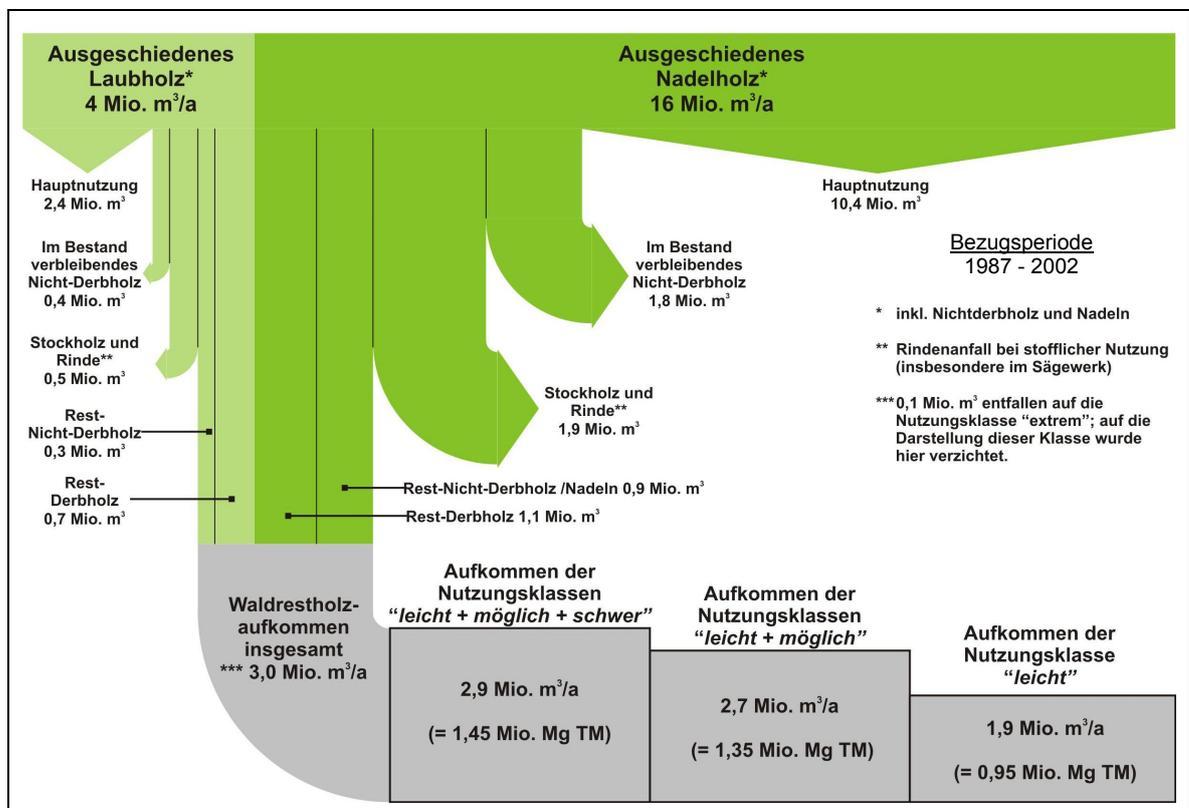
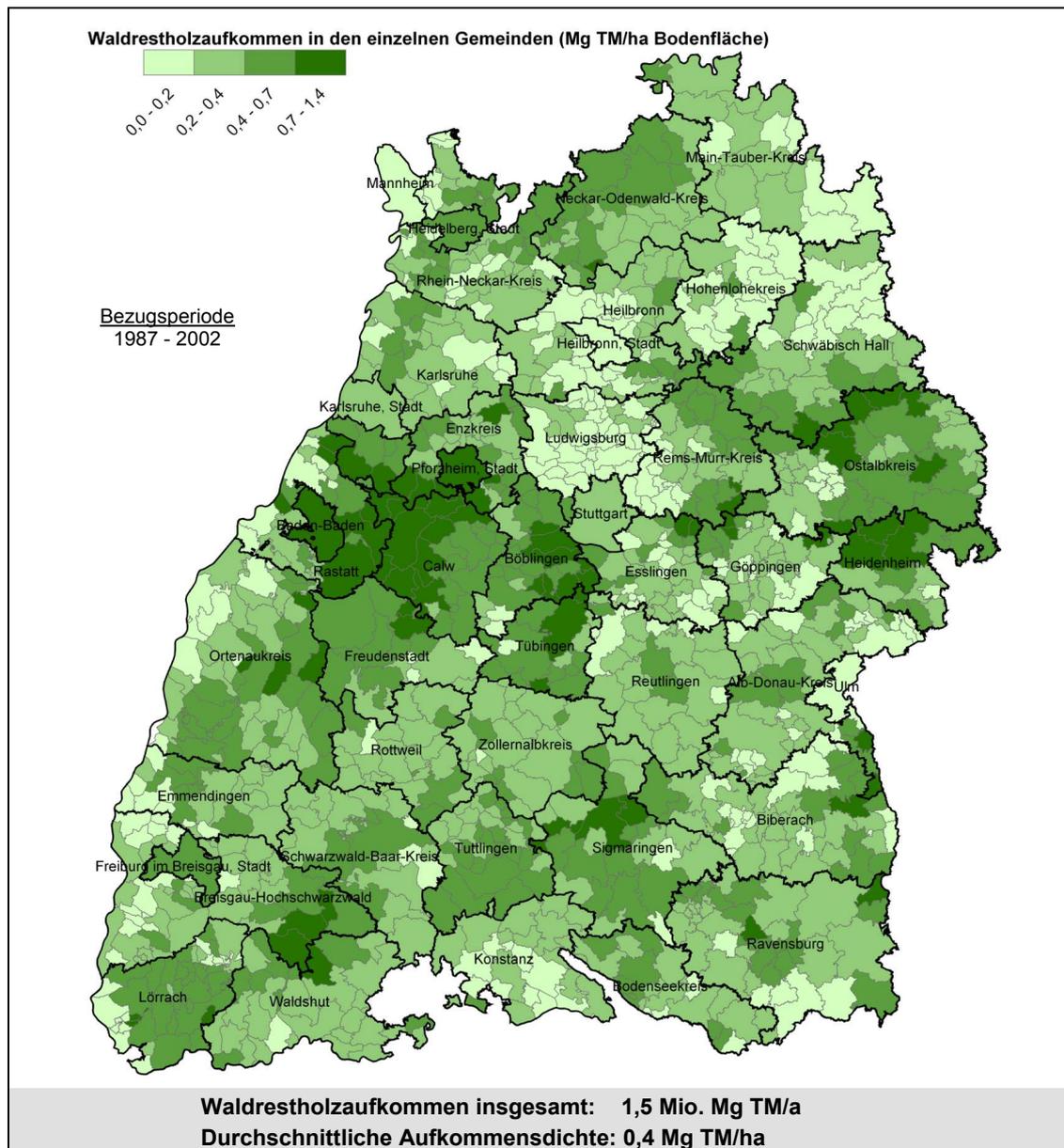


Abbildung 3.6: Ableitung des jährlichen Waldrestholzaufkommens in Baden-Württemberg (Periode 1987 - 2002)

Mit der in Anhang 6.40 (S. A-157) wiedergegebenen kartografischen Darstellung des Waldrestholzaufkommens auf Forstbezirksebene wurde eine erste räumliche Differenzierung vorgenommen. Doch ergibt sich aus der Darstellung der Ergebnisse (aus Modell 2) auf Gemeindeebene ein sehr viel differenzierteres Bild über die räumliche Verteilung des Waldrestholzaufkommens (vgl. Abbildung 3.7). Dies insbesondere auch deshalb, da der ausgeschiedene Vorrat und das damit korrelierte Waldrestholzaufkommen durch eine Vielzahl von Parametern und Verteilungsalgorithmen auf die jeweiligen Gemeinden zugeordnet wurden, wobei räumlich bezogene Faktoren wie Naturschutzflächen, Hangneigungen, Besitzstruktur und Sturmwurfflächen Berücksichtigung fanden.



**Abbildung 3.7: Waldrestholzaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs (Periode 1987 - 2002)**

Auf eine Diskussion bzw. Erläuterung zu der in Abbildung 3.7 dargestellten Aufkommensverteilung soll an dieser Stelle verzichtet werden, da hierbei die Vorratsentnahme bzw. Nutzung der Periode 1987 bis 2002 zugrunde gelegt wurde; für die Planung von Bioenergievorhaben dagegen vielmehr die künftige Situation von Bedeutung ist. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil des ungenutzten und im Wald verbliebenen Restholzes dieser Periode, aufgrund von biologischen Abbauprozessen, ohnehin nicht mehr in sinnvoller Weise einer energetischen Nutzung zuzuführen ist.

Die bisher dargelegten Analysen waren für eine erste Abschätzung des gesamten Aufkommens hilfreich; im Zusammenhang mit der Planung und Festlegung von Anlagenstandorten stellt sich jedoch die Frage, wie sich das Aufkommen an Waldrestholz und dessen räumliche Verteilung in naher Zukunft darstellen werden. Hierauf wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

#### 3.1.4.2 Periode 2002 bis 2017

Wie in der methodischen Vorgehensweise (vgl. Kapitel 2.3.2) beschrieben, erfolgte die Analyse des künftig zu erwartenden Waldrestholzaufkommens für die Periode von 2002 bis 2017 anhand der Daten eines von der FVA entwickelten Prognosemodells, bei dem die landkreisspezifische Vorratsentwicklung und Vorratsentnahme für diesen Zeitraum modelliert wurden. Diese Prognose geht davon aus, dass in Anbetracht der bestehenden Waldentwicklungsdynamik wie in der vergangenen Periode (1987 – 2002) auch künftig eine jährliche Vorratsentnahme in nahezu derselben Größenordnung (12,7 Mio. Efm/a) erfolgen wird bzw. kann, ohne dabei die bestehenden Holzvorräte nennenswert zu reduzieren. Dementsprechend ergibt die Abschätzung (Modell 2 – Variante 2) für die Periode 2002 bis 2017 ein jährliches Aufkommen an Waldrestholz für Baden-Württemberg in Höhe von ca. 1,6 Mio. Mg TM<sup>84</sup>. Allerdings zeigten sich gegenüber den Ergebnissen zur ersten Periode (1987 bis 2002), bedingt durch räumliche Variationen der Vorratsentnahme bzw. Nutzungsintensität, einige Änderungen hinsichtlich der räumlichen Verteilung dieses Aufkommens. Bei dieser Berechnungsvariante wurde davon ausgegangen, dass sich das Einschlagsverhältnis von Öffentlichem Wald zu Privatwald etwas zugunsten des Privatwaldes verschieben wird und die künftige Vorratsentnahme verstärkt auch in steileren Hanglagen<sup>85</sup> erfolgen könnte (vgl. Anhang 6.16, S. A-134).

Darüber hinaus können auch weitere Holzsortimente, die in der bisherigen Betrachtung unberücksichtigt blieben, einer energetischen Nutzung zugeführt werden. In erster Linie bezieht sich dies auf das nicht zu vernachlässigende potenzielle Aufkommen an Schwachholz, welches auf eine jährliche Menge von ca. 0,5 Mio. Mg TM festgelegt wurde (vgl. Anhang 6.20, S. A-138).

Mit der Durchführung der zweiten Bundeswaldinventur konnten durch den Bezug zur Erstinventur erstmals auch Daten geschaffen werden, die bisher noch nicht zur Verfügung standen. So wurden neben dem „klassischen“ Vorratsabgang eine Reihe weiterer

---

<sup>84</sup> Auf der Energieholztagung in Karlsruhe (Sept. 2006) wurde das Energieholzkonzept der Stadt Laichingen vorgestellt, welches insbesondere auf einer energetischen Nutzung von Kronen- bzw. Kronenrestmaterial beruht. Entsprechend den dort gemachten Untersuchungen fallen im Schnitt 0,8 Srm/Efm an Waldrestholz an (Daiber, 2006). Bezogen auf den Einschlag von Baden-Württemberg (12,7 Mio. Efm/a) ergäbe sich grob geschätzt ein Aufkommen von 1,7 Mio. Mg TM/a.

<sup>85</sup> Es ist davon auszugehen, dass sich eine bedeutende Menge des Vorrates insbesondere in steileren Hanglagen akkumuliert hat.

Fraktionen dokumentiert, die teilweise einer energetischen Nutzung zugeführt werden könnten. Hierbei handelt es sich insbesondere um den so genannten nicht-verwerteten Abgang<sup>86</sup> (NV-Holz), dessen verfügbarer Anteil für Baden-Württemberg auf 0,3 Mio. Mg TM/a geschätzt wurde (vgl. Anhang 6.20, S. A-138).

Gestützt auf einen rein hypothetischen Ansatz, könnte künftig auch eine bestimmte Menge an Stammholz – insbesondere auch Starkholz – zur Verfügung stehen, welche eigens im Hinblick auf eine energetische Nutzung dem Bestand entnommen wird. Unter der Annahme, dass der für das Jahr 2017 zu erwartende Gesamtvorrat von 485 Mio. Vfm durch diese zusätzliche Entnahme auf 465 Mio. Vfm<sup>87</sup> reduziert werden würde, könnte das energetisch nutzbare Aufkommen um weitere 0,3 Mio. Mg TM/a<sup>88</sup> erhöht werden. Die Nutzung dieses Sortiments ist immer auch im Kontext mit der tatsächlichen Holzentnahmesituation zu sehen.

Sollten für die Periode 2002 bis 2017 keine außergewöhnlichen Vorratsabgänge (z.B. durch Sturmereignisse) zu verzeichnen sein, ist es fraglich, ob dem Wald wie angenommen durchschnittlich 12,7 Mio. Efm pro Jahr entnommen werden. Sollte dies nicht der Fall sein, ist von einer weiteren Vorratszunahme auszugehen, weshalb die energetische Nutzung von Holzsortimenten<sup>89</sup>, die bisher vorwiegend der stofflichen Nutzung vorbehalten sind, als weitere Nutzungsoption durchaus in Betracht gezogen werden könnte.

Besonders interessant im Zusammenhang mit der Nutzung von Stammholz bzw. Industrieholz erscheint auch das von der FVA bzw. Universität Freiburg entwickelte und favorisierte Stammholz-Plus-Konzept. Hierbei wird auf eine Aushaltung von Industrieholz verzichtet und stattdessen neben dem Stammholz als weiteres Hauptsortiment Energieholz mit einem relativ günstigen Stück-Masse-Verhältnis unter Nutzung der Kronen bereitgestellt (Lechner et al., 2004). Würde dieses Konzept in der Praxis Anwendung finden, würde sich hieraus theoretisch ein weiteres erhebliches Energieholzaufkommen<sup>90</sup> ergeben; dies wurde in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht mit berücksichtigt.

---

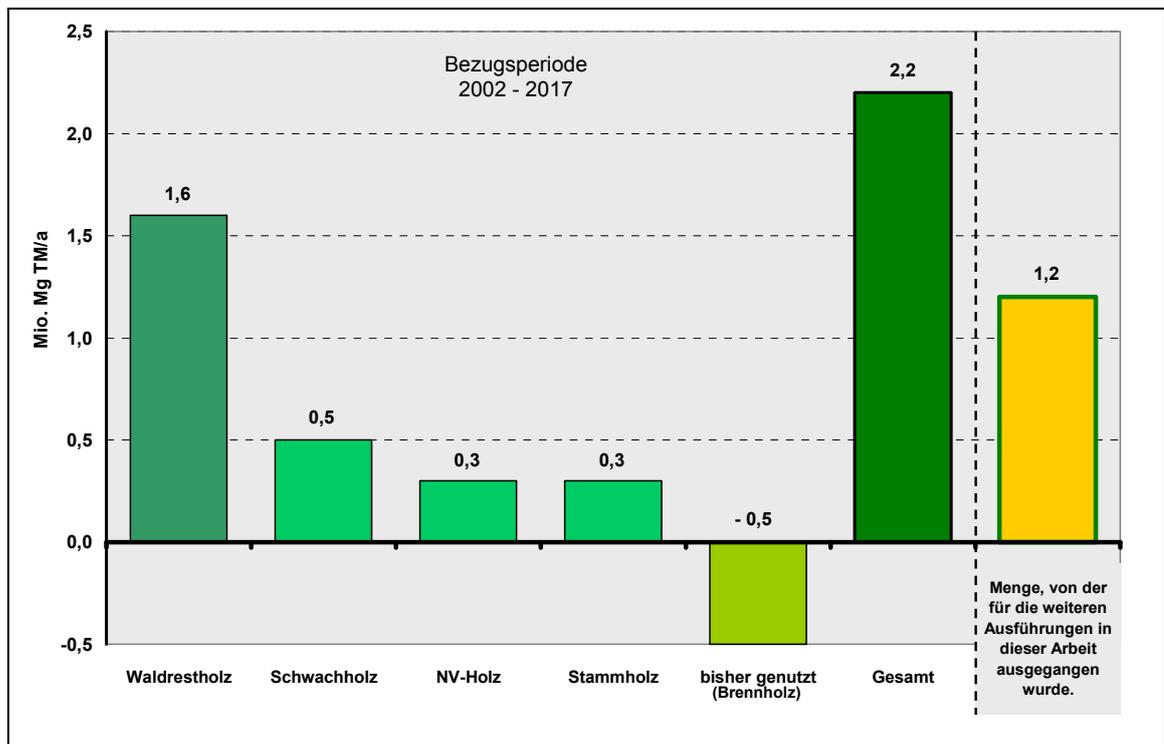
<sup>86</sup> Darunter wird Folgendes verstanden: Totholz; abgesägte Bäume, die ungenutzt im Bestand verbleiben.

<sup>87</sup> Nach den Auswertungen der Bundeswaldinventur 1 betrug dieser Wert für das Jahr 1987 rund 463 Mio. Vfm.

<sup>88</sup> Tatsächlich läge diese Menge bei 0,6 Mio. Mg TM. Da allerdings eine vollständige (energetische) Nutzung dieses Holzsortiments unter den gegenwärtig gegebenen Rahmenbedingungen nur bedingt plausibel erscheint und eine Entnahme in dieser Höhe hinsichtlich der Bestandssicherung langfristig nicht nachhaltig wäre, wurde diese energetisch nutzbare Menge um 50 % reduziert.

<sup>89</sup> Bei Überlegungen zu einem Energieszenario der Zukunft erscheint ein solcher Ansatz, in Anbetracht der gegenwärtigen wie auch künftig zu erwartenden Energie- bzw. Ölpreisentwicklung und einer damit verbundenen weiter steigenden Nachfrage nach klimaneutralen Energieträgern, nicht abwegig.

<sup>90</sup> Basierend auf den von Textor (2006) dargelegten Zahlen, ergibt eine eigene grobe Abschätzung bei Änderung von einer Standardaushaltung auf eine Stammholz-Plus-Aushaltung ein zusätzlich jährliches Aufkommen von rund 1,6 Mio. Mg TM. Dies wäre allerdings als die absolute Obergrenze anzusehen, da hierbei auf eine Industrieholzaushaltung ganz verzichtet würde. Anwendungsbereiche für dieses Stammholz-Plus-Konzept werden nach Textor (2006) insbesondere in Verbindung mit der Starkholznutzung gesehen, dessen Vorrat in Baden-Württemberg deutlich zugenommen hat.



**Abbildung 3.8: Überblick über das geschätzte Aufkommen der potenziell nutzbaren (Wald-) Energieholzsortimente in Baden-Württemberg (Periode 2002 – 2017)**

Insgesamt ergibt sich – wie Abbildung 3.8 veranschaulicht – unter Berücksichtigung dieser zusätzlich nutzbaren Fraktionen für Baden-Württemberg schließlich ein potenzielles Aufkommen von insgesamt annähernd 2,7 Mio. Mg TM/a, das einer energetischen Nutzung theoretisch zur Verfügung stünde. Wird hierbei der Anteil des Waldrestholzes abgezogen, welches vorwiegend als Brennholz genutzt werden wird – dies sind eigenen Abschätzungen zufolge rund 0,5 Mio. Mg TM<sup>91</sup> pro Jahr – verbleiben als energetisch nutzbare und frei verfügbare Menge noch 2,2 Mio. Mg TM/a. Diese Menge dürfte allerdings die Obergrenze des theoretisch verfügbaren Aufkommens darstellen, da in der Praxis nicht alle der genannten Holzsortimente tatsächlich und in vollem Umfang nutz- bzw. mobilisierbar sind.

Aus diesem Grund wurden in einem weiteren Schritt unterschiedliche Mobilisierungsfaktoren (vgl. Tabelle 3.3, S. 56) mit in die Berechnungen einbezogen. Diese Faktoren wurden in Abhängigkeit der zu erwartenden Marktsituation für die einzelnen Nutzungsklassen (getrennt nach Besitzart) differenziert. Das Ergebnis dieser Berechnung wird anhand verschiedener Szenarien in Tabelle 3.3 vorgestellt. Dabei ist im oberen Teil der Tabelle (Ausgangsbasis) die Verteilung des bereits genannten potenziellen Aufkommens von 2,2 Mio. Mg TM/a auf die unterschiedlichen Nutzungsklassen bei einer 100 %igen Mobilisierung dargelegt.

<sup>91</sup> Ausgehend von der in Tabelle 3.2 (S. 50) dargestellten, bisher genutzten Waldrestholzmenge von 0,2 Mio. Mg TM und dem noch zu berücksichtigenden Faktor (1,7; vgl. Kapitel 3.1.4.1), ist mit der angegebenen Menge von 0,5 Mio. Mg TM auch dem Umstand Rechnung getragen, dass die Nachfrage an Brennholz wie in den vergangenen Jahren auch künftig weiter ansteigen wird. Die abgeschätzte Menge des jährlich genutzten Potenzials von 0,5 Mio. Mg TM deckt sich damit mit aktuellen Angaben des MLR (2007). Allerdings sind bei dieser Angabe auch Brennholzsortimente mit einberechnet, die eigens für diesen Zweck eingeschlagen wurden und daher kein eigentliches Waldrestholz darstellen.

**Tabelle 3.3: Jährlich potenziell verfügbares Aufkommen an (Wald-) Energieholz für die Periode 2002 bis 2017; differenziert nach Nutzungsklassen und Szenarien**

	Nutzungsklasse <i>leicht</i>		Nutzungsklasse <i>möglich</i>		Nutzungsklasse <i>schwer</i>		Summe
	ÖW	PW	ÖW	PW	PW	ÖW	
ÖW = Öffentlicher Wald PW = Privatwald							
<b>Ausgangsbasis <sup>a)</sup></b>							
<b>Mobilisierungsrate (%) <sup>b)</sup></b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	
<b>Frei verfügbares Aufkommen (1000 Mg TM/a)</b>	824	237	581	216	228	108	<b>2.194</b>
	1061		797		336		
<b>Anteil am Gesamtaufkommen (%)</b>	38	11	26	10	10	5	<b>100</b>
<b>Aufkommensdichte <sup>c)</sup> (Mg TM/ha)</b>	49		36		15		
	0,30		0,22		0,09		<b>0,61</b>
<b>Szenario – sehr günstig <sup>d)</sup></b>							
<b>Mobilisierungsrate (%) <sup>b)</sup></b>	<b>90</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	
<b>Frei verfügbares Aufkommen (1000 Mg TM/a)</b>	742	189	463	150	148	70	<b>1.762</b>
	931		613		218		
<b>Anteil am Gesamtaufkommen (%)</b>	42	11	26	9	8	4	<b>100</b>
<b>Aufkommensdichte (Mg TM/ha) <sup>c)</sup></b>	53		35		12		
	0,26		0,17		0,06		<b>0,49</b>
<b>Szenario – erwartbar <sup>e)</sup></b>							
<b>Mobilisierungsrate (%) <sup>b)</sup></b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>45</b>	
<b>Frei verfügbares Aufkommen (1000 Mg TM/a)</b>	531	112	328	85	102	38	<b>1.195</b>
	643		413		140		
<b>Anteil am Gesamtaufkommen (%)</b>	45	9	27	7	9	3	<b>100</b>
<b>Aufkommensdichte (Mg TM/ha) <sup>c)</sup></b>	54		34		12		
	0,18		0,12		0,04		<b>0,34</b>
<b>Szenario – ungünstig <sup>f)</sup></b>							
<b>Mobilisierungsrate (%) <sup>b)</sup></b>	<b>50</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	
<b>Frei verfügbares Aufkommen (1000 Mg TM/a)</b>	39	7	22	4	2	1	<b>75</b>
	46		26		3		
<b>Anteil am Gesamtaufkommen (%)</b>	52	9	30	5	3	1	<b>100</b>
<b>Aufkommensdichte (Mg TM/ha) <sup>c)</sup></b>	61		35		4		
	0,01		< 0,01		< 0,01		<b>&lt; 0,03</b>

Anmerkungen: a) **Ausgangsbasis:** Bei diesem Aufkommen wurden alle in diesem Kapitel hergeleiteten (Rest-) Holzsortimente (1,6 Mio. Mg TM Waldrestholz; 0,5 Mio. Mg TM Schwachholz; 0,3 Mio. Mg TM NV-Holz; 0,3 Mio. Mg TM Stammholz; abzüglich 0,5 Mio. Mg bereits energetisch genutzte Menge) mit einbezogen.

b) Die hier angegebenen Mobilisierungsraten wurden nach eigenem Ermessen gewählt.

c) Die Bezugsfläche ist die Bodenfläche des Landes Baden-Württemberg (ca. 3,5 Mio. ha).

d) **Szenario - sehr günstig:** Bei diesem Szenario wurden die unter Anmerkung a) dargelegten Holzsortimente mit einbezogen. Dieses Szenario geht von einem stark steigenden Energiepreis bei gleichzeitig hoher Nachfrage nach Energieholz in den kommenden zehn Jahren aus, so dass die hergeleiteten Holzsortimente nahezu vollständig nachgefragt und aufgrund optimaler (technischer wie auch organisatorischer) Bereitstellungsstrukturen mobilisiert werden.

e) **Szenario - erwartbar:** Bei diesem Szenario wurden die unter Anmerkung a) dargelegten Holzsortimente mit einbezogen, allerdings ohne das energetisch nutzbare Stammholz. Gegenüber dem Szenario „sehr günstig“ wurden die Mobilisierungsraten weiter reduziert, da hierbei davon ausgegangen wurde, dass die Energiepreise stetig aber langsam und damit korrespondierend auch die Nachfrage nach Holz nur mäßig ansteigen wird. Angenommen wurde hierbei eine gegenüber dem gegenwärtigen Stand deutlich verbesserte (technische wie auch organisatorische) Bereitstellungsstruktur, die allerdings nicht den optimalen Marktbedingungen entspricht.

**Die Annahmen zu diesem Szenario dienten als Grundlage für die ab Kapitel 3.3 dargelegten Auswertungen.**

f) **Szenario - ungünstig:** Bei diesem Szenario wurden die unter Anmerkung a) dargelegten Holzsortimenten mit einbezogen, allerdings ohne Schwachholz, NV-Holz und Stammholz. Durch die Wahl der Mobilisierungsraten wird hierbei mehr oder weniger exakt die gegenwärtige Situation abgebildet, wobei bei den gegenwärtigen technischen, organisatorischen wie auch ökonomischen Rahmenbedingungen eine weitere Mobilisierung der Aufkommen nur bedingt zu erwarten ist.

Für alle Szenarien zeigt sich, dass rund die Hälfte des Gesamtpotenzials durch das Aufkommen der Nutzungsklasse „leicht“ und hierbei insbesondere im öffentlichen Wald bereitgestellt wird. Schließlich erfolgt der in der Praxis realisierte Holzeinschlag vorzugsweise in flacherem Terrain, wobei der öffentliche Wald (72 % der Gesamtwaldfläche) nicht nur einen im Vergleich zum Privatwald deutlich höheren Flächenumfang, sondern auch eine deutlich höhere Nutzungsintensität (vgl. Anhang 6.16, S. A-134) aufweist.

Für das Szenario „sehr günstig“ ergibt sich unter Anwendung der hierbei zugrunde gelegten Mobilisierungsfaktoren und unter Abzug der bereits energetisch genutzten Waldrestholzmenge von rund 0,5 Mio. Mg TM/a ein frei verfügbares Aufkommen von rund 1,8 Mio. Mg TM/a. Demgegenüber weist die Darstellung des ungünstigen Szenarios ein frei verfügbares Aufkommen von lediglich 75.000 Mg TM/a auf. Im Vorgriff auf die Berechnungen zu Kapitel 3.1.4.3 sei angemerkt, dass dieses Aufkommen mit einem Marktpreis für Hackschnitzel (frei Waldstraße) von 30 bis 40 €/Mg korrespondiert und daher mehr oder weniger genau die augenblickliche Situation wiedergibt.

Dagegen könnte das beim Szenario „erwartbar“ dargelegte Aufkommen von rund 1,2 Mio. Mg TM/a bei einem geschätzten Marktpreis von 70 bis 80 €/Mg TM verfügbar gemacht werden. Da dieses Aufkommen entsprechend der aktuellen bzw. zu erwartenden Tendenzen in der Energiepreisentwicklung als realistisch angesehen wird, bildete es die Basis für die im weiteren Verlauf der Arbeit durchgeführten Auswertungen und Darstellungen. Dies bezieht sich in erster Linie auf die in Kapitel 3.3 dargelegten Standortanalysen und Standortauswertungen.

Da in Hinblick auf die Fragestellungen der Arbeit eine kartografische Darstellung der Ergebnisse von besonderem Interesse ist, zeigt Abbildung 3.9 (S. 58) die geschätzten Aufkommensdichten von Waldrestholz (nach Szenario „erwartbar“; 1,2 Mio. Mg TM/a) in den Gemeinden Baden-Württembergs – getrennt nach den Nutzungsklassen „leicht“ bzw. „leicht+möglich“. Eine kartografische Darstellung zur räumlichen Verteilung dieses Aufkommens an Waldrestholz für die Nutzungsklassen „leicht+möglich+schwer“ ist in der linken Abbildung von Anhang 6.41 (S. A-158) wiedergegeben. Zum Vergleich zeigt die rechte Abbildung aus Anhang 6.41 das in Abbildung 3.8 (S. 55) veranschaulichte Aufkommen an (Wald-) Energieholz in Höhe von 2,2 Mio. Mg TM/a.

Ein Blick auf Abbildung 3.9 (S. 58) veranschaulicht, dass es eine Reihe einzelner Gemeinden gibt, die eine günstige Situation hinsichtlich des leicht verfügbaren Aufkommens aufweisen. Größere zusammenhängende Gebiete, die für einen geeigneten Standort einer Pyrolyseanlage von Vorteil wären, sind mit Ausnahme einiger Landkreise (z.B. Sigmaringen, Ravensburg und Biberach) eher rar.

Auch unter Berücksichtigung des Aufkommens der Nutzungsklasse „möglich“, sind noch keine großen und zusammenhängenden Gebiete ersichtlich. Wie ein Blick auf die Karten aus Anhang 6.41 (S. A-158) zeigt, sind solche Gebiete erst gegeben, wenn auch die schwer nutzbaren Aufkommen mit einbezogen werden; erst dann werden die im Bereich des Schwarzwaldes liegenden, „aufkommensstarken“ Gebiete erkennbar. Wie allerdings die Ausführungen zu Kapitel 3.3 noch zeigen werden, sind Standorte in diesen Gebieten, insbesondere im Hinblick auf die mit dieser Topografie verbundenen Erfassungskosten, unter den gegenwärtigen ökonomischen Rahmenbedingungen für Pyrolyseanlagen eher ungeeignet.

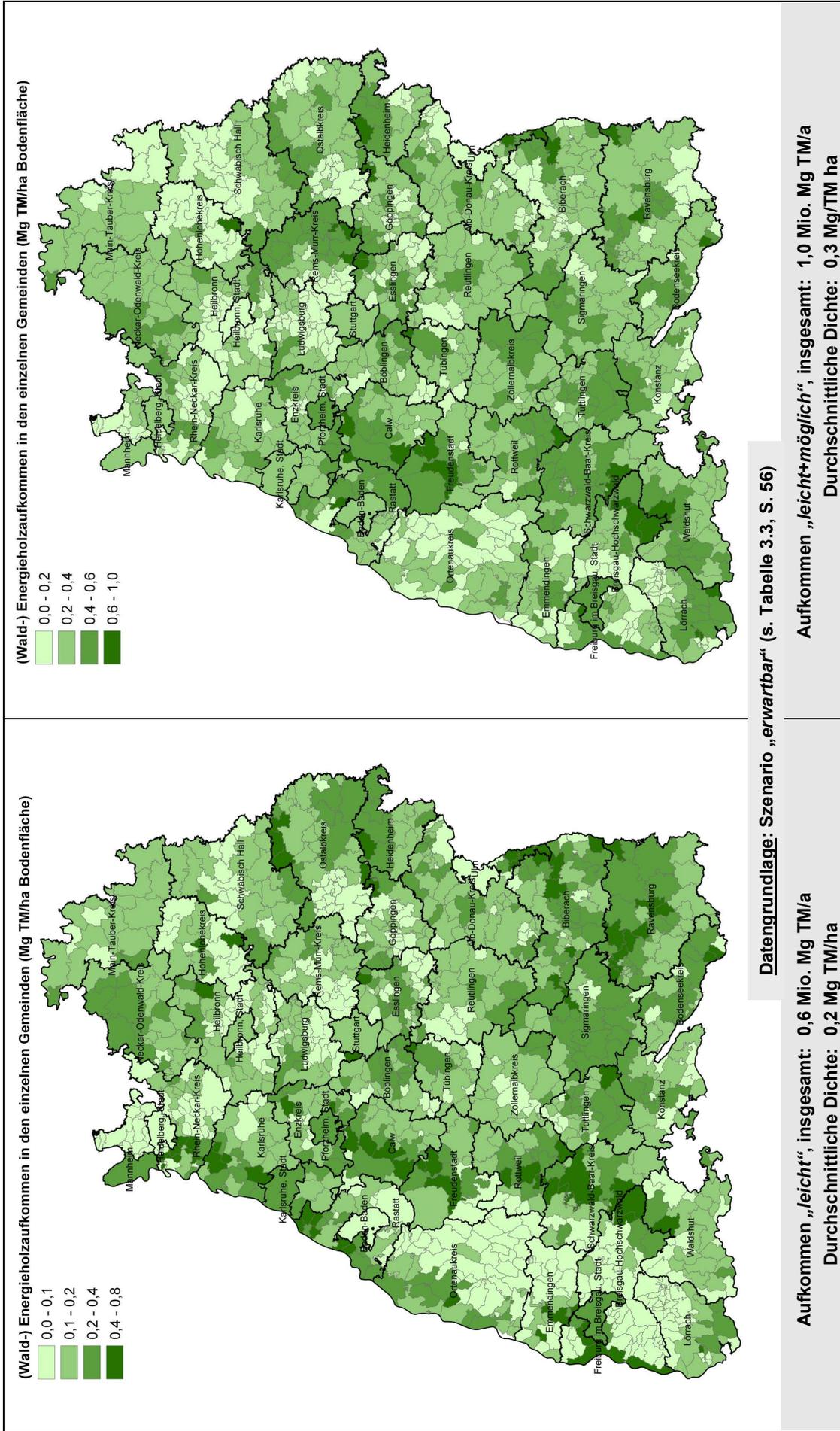


Abbildung 3.9: (Wald-) Energieholzaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs (Periode 2002 – 2017)

### 3.1.4.3 Exkurs: Frei verfügbares (Wald-) Energieholzpotenzial in Abhängigkeit der Erfassungskosten

Diejenige Menge an Waldrestholz, welche dem Wald tatsächlich entnommen und einer energetischen Nutzung zugeführt werden kann, wird vorwiegend durch wirtschaftliche Rahmenbedingungen bestimmt. Eine wesentliche Größe stellen hierbei die Erfassungskosten dar, die über entsprechende Marktpreise von den Abnehmern von Waldhackschnitzel gedeckt werden müssen.

Abbildung 3.10 (S. 60) zeigt das Ergebnis der in Kapitel 3.1.4.2 (vgl. Tabelle 3.3, S 56; Ausgangsbasis) durchgeführten Potenzialabschätzung in Abhängigkeit des Marktpreises (Erfassungskosten) für Hackschnitzel frei Waldstraße. Wie die Ausführungen in Kapitel 3.2.3 zeigen, hängen diese Erfassungskosten von einer Vielzahl von Faktoren ab, weshalb es sich bei den dieser Auswertung zugrunde gelegten Kostensätze (vgl. Anhang 6.34, S. A-151) nur um grobe Richtwerte handeln kann. So ist die dargestellte Potenzialfunktion nicht zuletzt auch aufgrund verschiedener methodischer Unsicherheiten lediglich als „best guess“ zu verstehen.

Wie Abbildung 3.10 veranschaulicht, können bei einem Preis von unter 20 €/Mg TM nahezu keine Hackschnitzel frei Waldstraße bereitgestellt bzw. erworben werden. Entsprechend dem s-förmigen Verlauf der Kurve ist für das Potenzial im Bereich von 60 bis 80 €/Mg TM eine hohe Preiselastizität gegeben, was bedeutet, dass relativ geringe Preissteigerungen ein entsprechend größeres Angebot zur Folge haben. In grober Näherung können in diesem preiselastischen Bereich rund 60 % des Potenzials<sup>92</sup> bereitgestellt werden, wobei dann allerdings das Potenzial der Nutzungsklasse „leicht“ gänzlich ausgeschöpft wird.

Nach einer von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) im Jahr 2004 durchgeführten Umfrage bei bayerischen Biomasseheizwerken (Neugebauer et al., 2005), bewegte sich das Preisniveau für Waldhackschnitzel im Mittel bei 65 €/Mg TM frei Anlage; bei Großabnehmern (Anlagenleistung über 5 MW) lag dieser Preis bei durchschnittlich rund 50 €/Mg TM<sup>93</sup>. Abzüglich der in diesem Preis enthaltenen Transportkosten von ca. 10 €/Mg TM<sup>94</sup> ergibt sich schließlich ein Kostensatz von 40 bis 55 €/Mg TM. Aufgrund der geringeren Qualität werden die Preise für Hackschnitzel aus (Fichten-) Kronenholz sicherlich unter dieser angegebenen Preisspanne liegen, doch empfiehlt Wittkopf (2005a), den Preis frei Anlage nicht unter 50 €/Mg TM anzusetzen. Wird die in dieser Umfrage dargestellte Marktsituation auf die in Abbildung 3.10 dargelegte Abschätzung übertragen, könnte für Baden-Württemberg die (insbesondere als Brennholz) bereits genutzte Menge von rund 0,5 Mio. Mg TM um weitere 0,5 Mio. Mg TM erweitert werden.

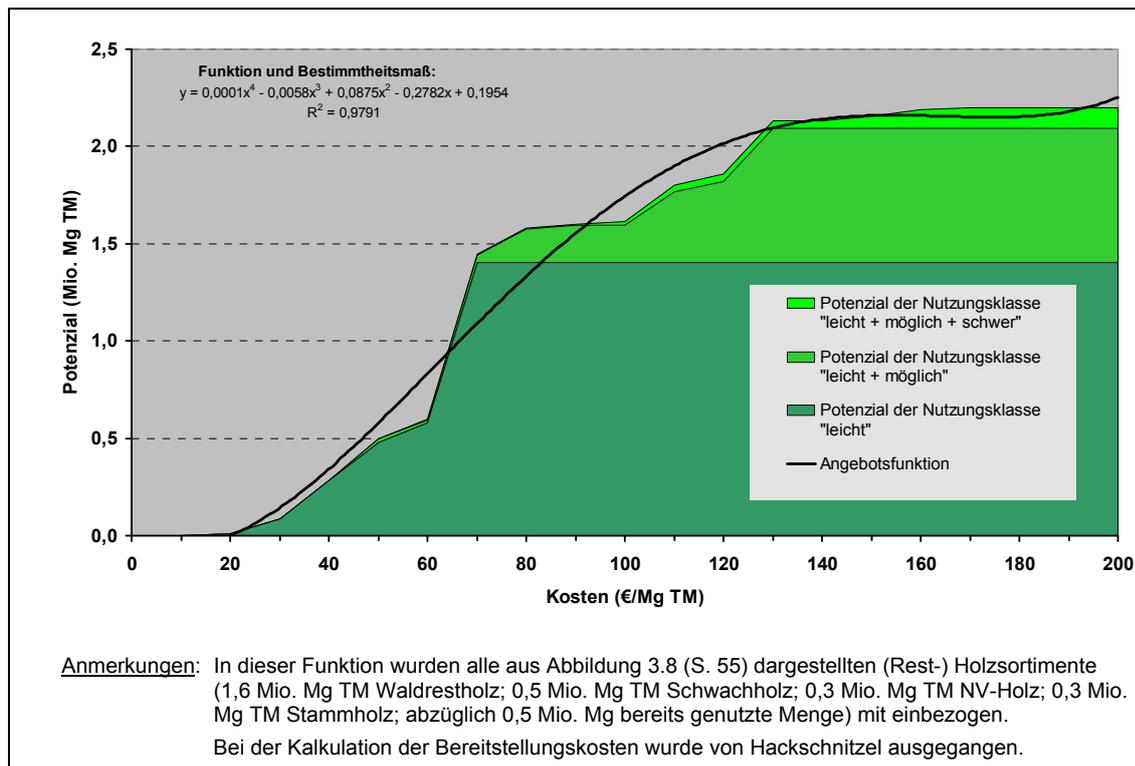
In welcher Weise sich das in Verbindung mit dem Marktpreis korrespondierende (wirtschaftliche) Potenzial über die Gemeinden Baden-Württembergs verteilt, zeigt die Darstellung aus Anhang 6.42 (S. A-159). Hierbei ist die räumliche Verteilung des erschließbaren Potenzials für Marktpreise von 60 und 90 €/Mg TM zu sehen.

---

<sup>92</sup> Vergleichbare Ergebnisse zeigt auch die Studie von Dieter et al. (2001). Ausgehend von einem Preis von ca. 65 €/Mg TM (hierbei wurden 15 €/Mg TM für Transport bereits herausgerechnet) wurde eine Potenzialausschöpfung von nahezu 50 % abgeschätzt.

<sup>93</sup> Ähnliche Angaben gibt beispielsweise auch der „Waldservice vorderes Kinzigtal“; 50 bis 60 €/Mg TM frei Anlage in Abhängigkeit der Menge und Vertragslaufzeit.

<sup>94</sup> Eigene Abschätzung, vgl. Kapitel 3.2.4.



**Abbildung 3.10: Freies (Wald-) Energieholzpotenzial in Baden-Württemberg in Abhängigkeit der Erfassungskosten (Hackschnitzel frei Waldstraße)**

Steigt das zu beobachtende gegenwärtige Energiepreisniveau und die damit korrespondierende Nachfrage nach „Energieholz“ weiter an, wird sich zwangsläufig auch der Marktpreis für Waldhackschnitzel erhöhen. Übertragen auf die in Abbildung 3.10 veranschaulichte Potenzialfunktion ergäbe bereits ein Anstieg des Marktpreises um 10 bis 20 €/Mg TM (frei Waldstraße) eine sprunghafte Zunahme des mobilisier- bzw. verfügbaren Potenzials. Im Kanon dieser Preissteigerungen könnten zudem noch weitere Holzsortimente<sup>95</sup> zur Verfügung stehen, für die es bisher nur eingeschränkte Absatzmöglichkeiten gibt, oder die ausschließlich einer stofflichen Nutzung vorbehalten waren. Hierbei werden sicherlich auch neuartige Nutzungs- bzw. Erfassungskonzepte der Waldbewirtschaftung, wie beispielsweise das bereits erwähnte Freiburger Stammholz-Plus-Konzept, zunehmend an Bedeutung gewinnen und dazu beitragen, weitere Energieholzpotenziale zu mobilisieren und bereitzustellen.

<sup>95</sup> Darüber hinaus könnte auch die Bereitstellung von Holz aus Schnellwuchsplantagen zunehmend interessanter werden.

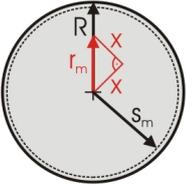
## 3.2 Bereitstellung

### 3.2.1 Herleitung der Formeln zur Bestimmung von mittleren Transportstrecken

Die Transportstrecken, die hinsichtlich der Biomasseversorgung einer Anlage zurückzulegen sind, bilden in nicht wenigen Fällen das ausschlaggebende Kriterium für die Planung bzw. Umsetzung eines Bioenergievorhabens und die Auswahl eines Standortes. Wie bereits in Kapitel 2.4.1 beschrieben, steht die mittlere Transportstrecke, als aggregierte Größe vieler Einzelstrecken, in einem untrennbaren Zusammenhang mit Faktoren wie z.B. Aufkommensdichte, Brennstoffbedarf und räumlicher Ausdehnung bzw. Form des Einzugsgebietes. Die mittlere Transportstrecke bildet eine wesentliche Größe der in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Kostenfunktion und beeinflusst darüber hinaus den mit dem Transport verbundenen Energieeinsatz sowie die damit bedingten treibhausrelevanten Emissionen.

Im Folgenden werden die Formeln zur näherungsweise Bestimmung der mittleren Transportstrecken (einfache Richtung) von kreisförmigen, quadratischen sowie rechteckigen Einzugsgebieten hergeleitet. Aus Gründen der Vereinfachung wird hierbei davon ausgegangen, dass sich der fiktive Anlagenstandort exakt im Zentrum der Fläche befindet und somit alle Transporte hin zu diesem Mittelpunkt erfolgen.

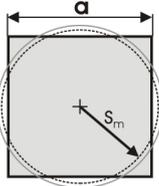
Ausgangspunkt zur Berechnung der mittleren Transportstrecke für alle Formen von Einzugsgebieten bildet die kreisförmige Geometrie. Für ein näherungsweise kreisförmiges Einzugsgebiet mit dem Radius  $R$  ergibt sich die mittlere Transportstrecke  $s_m$  (vgl. Gl. 3.3) aus der allgemein gültigen Formel für den mittleren Kreisabstand  $r_m$  (Gl. 3.1) unter Berücksichtigung eines Verlängerungsfaktors. Dieser Faktor ist erforderlich, da in der Realität die Straßen und Wege in den allermeisten Fällen nicht entlang der Luftlinienstrecke zum Mittelpunkt führen. Unter Annahme einer rechtwinklig verlaufenden Zick-Zack-Linie ergibt sich dieser Faktor als  $\sqrt{2}$  (vgl. Gl. 3.2).

	Mittlerer Kreisabstand: $r_m = \frac{2}{3} R$	<b>Gl. 3.1</b>
	$s_m = x + x = 2x \Rightarrow x = \frac{r_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow s_m = 2 \cdot \frac{r_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \cdot r_m$	<b>Gl. 3.2</b>
<b>Abbildung 3.11: Schematische Darstellung für kreisförmige Einzugsgebiete</b>	$s_m = \frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot R$ bzw. $s_m = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sqrt{F}$	<b>Gl. 3.3</b>

**Anmerkung:** Die schematische Zeichnung illustriert das Einzugsgebiet mit seinen entsprechenden geometrischen Größen. Die gepunktete Kreislinie zeigt den Abstand der errechneten mittleren Transportstrecke vom Mittelpunkt.

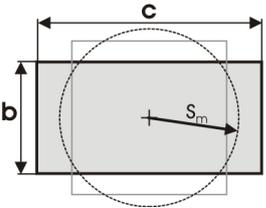
Da Gleichung 3.3 auch die Basis zur Herleitung der Formeln für quadratische und rechteckige Einzugsgebiete bildet, gilt für alle Fälle, dass die mittlere Transportstrecke  $s_m$  mit der Quadratwurzel aus der Fläche  $F$  des Einzugsgebietes wächst.

Bei der Herleitung der mittleren Transportstrecke  $s_m$  für ein quadratisches Einzugsgebiet mit der Seitenlänge  $a$  wird davon ausgegangen, dass die Transportstrecke mit einem im Vergleich dazu flächengleichen kreisförmigen Einzugsgebiet identisch ist. Insofern lässt sich die Formel für die mittlere Transportstrecke (vgl. Gl. 3.5) aus der Gleichung 3.3 ableiten, indem die Fläche  $F$  entsprechend substituiert wird.

	<p>Mit <math>F = a^2</math> folgt aus Gleichung 3.3:</p>	<p><b>Gl. 3.4</b></p>
<p><b>Abbildung 3.12: Schematische Darstellung für quadratische Einzugsgebiete</b></p>	$s_m = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot a$	<p><b>Gl. 3.5</b></p>

Anmerkung: In der schematischen Zeichnung ist neben dem quadratischen Einzugsgebiet und dem Lösungskreis (gepunktete Linie) hier noch zum Vergleich das kreisförmige Einzugsgebiet aus Abbildung 3.11 dargestellt (Haarlinie).

Eine etwas realistischere Form<sup>96</sup> stellt diejenige eines rechteckigen Einzugsgebietes dar. Die entsprechende Formel leitet sich aus derjenigen für das quadratische Einzugsgebiet ab. In der Annahme, dass die Diagonale des Rechtecks ein wesentlicher Einflussfaktor für die Bestimmung der mittleren Transportstrecke ist, wird über die Gleichung zur Diagonalen eines Quadrates (vgl. Gl. 3.6) und der Diagonalen eines Rechtecks eine fiktive Seitenlänge  $a$  gebildet (vgl. Gl. 3.7). Eingesetzt in Gleichung 3.5 ergibt sich somit die Formel zur Bestimmung der mittleren Transportstrecken  $s_m$  für rechteckige Einzugsgebiete (vgl. Gl. 3.8).

	<p>Diagonale eines Quadrates: <math>d_{\text{Quadrat}} = \sqrt{2} \cdot a</math></p>	<p><b>Gl. 3.6</b></p>
	<p><math>a = \frac{d_{\text{Rechteck}}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{b^2 + c^2}}{\sqrt{2}}</math> eingesetzt in Gleichung 3.5</p>	<p><b>Gl. 3.7</b></p>
<p><b>Abbildung 3.13: Schematische Darstellung für rechteckige Einzugsgebiete</b></p>	$s_m = \frac{2}{3 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{b^2 + c^2}$	<p><b>Gl. 3.8</b></p>

Anmerkung: Neben dem rechteckigen ist hier noch schematisch das quadratische Einzugsgebiet (vgl. Abbildung 3.12) dargestellt (Haarlinie). Das kreisförmige Einzugsgebiet aus Abbildung 3.11 deckt sich mit dem Lösungskreis.

Wurde aus Gründen der Vereinfachung bisher davon ausgegangen, dass der Anlagenstandort im Mittelpunkt des Einzugsgebietes liegt, so behalten die oben dargestellten Formeln auch ihre Gültigkeit, wenn die Einzugsgebiete entlang ihrer Symmetrielinie (horizontal oder vertikal) halbiert werden. In diesem Fall liegt der Anlagenstandort in der Mitte dieser Schnittlinie und somit am Rande des Einzugsgebiets. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird diese Art von Einzugsgebiet jedoch nicht weiter betrachtet.

<sup>96</sup> Einzugsgebiete, die sich entlang des Schwarzwaldes oder der Rheinebene erstrecken, hätten eine überwiegend rechteckige Form.

**Tabelle 3.4: Berechnung von mittleren Transportentfernungen mit Hilfe der Näherungsformeln**

	Kreisförmiges Einzugsgebiet	Quadratisches Einzugsgebiet	Rechteckiges Einzugsgebiet			
			Seitenverhältnis c/b=2		Seitenverhältnis c/b=4	
Radius bzw. Seitenlänge (km) <sup>a)</sup>	R = 30	a = 53	b = 75	c = 37	b = 106	c = 26
Max. Entfernung der äußeren Randlinie vom Mittelpunkt (km)	30	38	42		54	
Mittlere Transportentfernung (km)	28	28	31		41	
Fläche (km <sup>2</sup> )	2.827	2.827				

Anmerkung: a) Die Seitenlängen und deren Benennung sind den zuvor dargestellten Abbildungen zu entnehmen. Da die hier dargelegten Werte der Seitenlängen gerundet sind, ergibt sich bei Berechnung der Fläche mit diesen Werten eine geringe Abweichung zu dem vorgegebenen Flächenwert (2.827 km<sup>2</sup>).

Das Ergebnis für eine Berechnung dieser mittleren Transportstrecken mit Hilfe der hergeleiteten Formeln ist Tabelle 3.4 zu entnehmen, wobei ein kreisförmiges Einzugsgebiet mit dem Radius R = 30 km (Fläche F = 2.827 km<sup>2</sup>) als Referenz diente.

Erwartungsgemäß ergeben sich für das kreisförmige und quadratische Einzugsgebiet dieselben mittleren Transportentfernungen. Beim rechteckigen Einzugsgebiet ist diese Strecke etwas größer und steigt mit zunehmendem Verhältnis der Seitenlänge b zu c weiter an.

### 3.2.2 Empirische Untersuchung zu den Transportstrecken

Die Verifizierung der im vorigen Kapitel hergeleiteten Formeln zur Bestimmung der mittleren Transportstrecken erfolgte anhand einer empirischen Analyse zu den beiden in Kapitel 2.4.1 definierten Standorten bzw. Einzugsgebieten; das Ergebnis<sup>97</sup> hierzu ist in Tabelle 3.5 (S. 64) wiedergegeben. Hierbei ist der über die Formel berechnete Wert zur mittleren Transportentfernung dem empirisch hergeleiteten Wert gegenübergestellt. Demnach beträgt die Differenz der mittleren Transportstrecken für alle hier dargestellten Fälle maximal rund 2 km. Anhand der für *Standort 1* für verschiedene Radien ermittelten Werte zeigt sich, dass diese Differenz in prozentualer Hinsicht ungefähr 20 % beträgt und mit zunehmendem Radius tendenziell kleiner wird.

Für den *Standort 2* ist die Differenz zwischen dem über die Formel und dem empirisch bestimmten Wert zur mittleren Transportstrecke überraschenderweise minimal. Der Vergleich mit den Ergebnissen von *Standort 1* (für R = 10 km) zeigt hingegen einen deutlichen Unterschied. Dieser dürfte einerseits auf die standortspezifischen Charakteristika hinsichtlich der Landnutzung (Wald/Ackerbau) und auf die spezifischen topografischen Gegebenheiten des *Standortes 1* zurückzuführen sein.

<sup>97</sup> Auf eine Darlegung der sehr umfangreichen Ergebnistabellen zu dieser Auswertung wurde verzichtet.

**Tabelle 3.5: Gegenüberstellung der empirisch ermittelten mittleren Transportstrecken mit den über die Formeln bestimmten Werten**

	Standort 1 - Freudensstadt (Bereitstellung von Waldrestholz)					Standort 2 - Eppingen (Bereitstellung von Reststroh)
	Kreisförmiges Einzugsgebiet; Radius (km)				Rechteckiges Einzugsgebiet; Seitenlänge <sup>a)</sup> (km)	Kreisförmiges Einzugsgebiet; Radius (km)
	R =					
	6	7	8	10	c = 8,9 d = 17,9	R = 10
Empirisch ermittelter Wert für $S_m$ (km)	7,5	8,5	9,6	11,5	9,9	9,2
$S_m$ nach Formel (km)	5,7	6,6	7,5	9,4	8,2	9,4
Differenz (km)	1,8	1,9	2,1	2,1	1,7	-0,2
Fehler (%) <sup>b)</sup>	25	22	22	18	17	-3
Anzahl der ausgewerteten Flächenelemente	1.133	1.579	2.108	3.176	1.649	1.006
Summe der einfach gefahrenen Strecke (km)	8.507	13.415	20.266	36.361	16.388	9.215
Fläche des untersuchten Einzugsgebietes (km <sup>2</sup> )	113	154	201	314	159	314

Anmerkungen: a) Die Seitenlängen wurden so gewählt, dass das Verhältnis d/c gleich 2 ist und ein Kreis mit dem Radius R = 10 km ein Umkreis dieses Rechtecks darstellt.

b) Der Fehler ergibt sich aus dem Quotienten von Differenz und dem empirischen Wert für  $s_m$

Da die den *Standort 1* umgebende Siedlungsfläche erheblich über der des *Standortes 2* liegt und es auf diesen Siedlungsflächen aber kein Biomasseaufkommen gibt, befinden sich bei *Standort 1* die nächstgelegenen und aufkommensrelevanten Flächenelemente in einem größeren Abstand zur Anlage als dies bei *Standort 2* der Fall ist. Dementsprechend ergibt sich eine im Mittel größere Transportstrecke für den *Standort 1*. Dieser Einfluss wird bei zunehmenden Radien geringer und erklärt damit auch die in Tabelle 3.5 dargestellte Entwicklung der prozentualen Abweichung (Fehler) bei *Standort 1*.

Ein weiterer Grund für die abweichenden Ergebnisse zur ermittelten mittleren Transportstrecke von *Standort 1* zu *Standort 2* dürfte auch im Unterschied des an den jeweiligen Standorten bzw. Einzugsgebieten zur Verfügung stehenden Straßen-/Wegenetzes zu suchen sein. Zwar verfügen in der Regel die agrardominierten Gebiete nicht unbedingt über ein dichteres Wegenetz, aber die für den direkten Transport zum Anlagenstandort relevanten Strecken/Straßen zeigen bei dem durch Wald und eine „hügelige“ Topografie charakterisierten *Standort 1* eine deutlich ausgeprägtere Zick-Zack-Struktur, wodurch sich die tatsächlich zuzulegenden Transportstrecken verlängern.

Vereinfacht könnten die im Falle des *Standortes 1* in Tabelle 3.5 dargestellten Differenzen zwischen der empirisch und der über die Formel bestimmten Transportstrecke dadurch korrigiert werden, indem die zugrunde gelegte Formel zur Berechnung der mittleren Transportstrecke um den konstanten Wert 2 erweitert würde. Dennoch wurden die in Kapitel 3.2.1 hergeleiteten Gleichungen für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargelegten Berechnungen unverändert übernommen, da in Anbetracht des geringen Stichprobenumfangs die Aussagen diesbezüglich ohnehin unsicher sind. Zu-

dem sind die zu untersuchenden Einzugsgebiete (vgl. Kapitel 3.3.2) hinsichtlich ihrer – die mittlere Transportstrecke beeinflussenden – Charakteristika (Topografie, verfügbare Flächen, Infrastruktur, u.a.) nicht exakt voneinander abgrenzbar und daher auch nicht eindeutig einem der beiden untersuchten Standorte zuzuordnen.

Für eine Anwendung der Formeln spricht auch die Tatsache, dass geringe Abweichungen hinsichtlich der mittleren Transportentfernungen kaum Auswirkungen auf die Transportkosten haben, da diese – wie sich in Kapitel 3.2.4 noch zeigen wird – vorwiegend durch die entfernungsunabhängigen Kosten (für Warten, Rüsten, Laden) bestimmt werden.

### **3.2.3 Kosten für die Erfassung von Stroh und Waldrestholz**

Die Erfassung/Bergung von Reststroh und Waldrestholz bildet den Anfang der Bereitstellungskette und dient dazu, die Biomasse am Aufkommensort verfügbar zu machen und transportierbar bereitzustellen. Unter ökonomischen Gesichtspunkten wird hierbei üblicherweise eine bestimmte Ernteform verlangt bzw. favorisiert, die in Abhängigkeit der spezifischen Biomasseeigenschaften und der Erschließungssituation vor Ort den Einsatz von spezieller Erfassungstechnologie erfordert.

Wie bereits in Kapitel 2.4.2 erläutert, leiten sich die Kosten für die Erfassung aus dem benötigten Zeitaufwand, in Zusammenhang mit den spezifischen Verrechnungssätzen für Maschinen und Personal ab.

In Tabelle 3.6 (S. 66) sind die Ergebnisse der Kalkulation zur Stroherfassung dargestellt, wobei zwischen einem ungünstigen Fall (kleine Schlaggröße, geringe Aufkommensdichte, geringe Pressleistung) und einem günstigen Fall (größere Schlaggröße, höhere Aufkommensdichte, hohe Pressleistung) unterschieden und somit eine Bandbreite an Kosten ermittelt wurde. Die dieser Kalkulation zugrunde liegenden Verrechnungssätze für die unterschiedlichen Pressen und die an der Erfassung beteiligten Fahrzeuge sind Anhang 6.29 (S. A-147) und Anhang 6.31 (S. A-148) zu entnehmen.

Demnach ergeben sich für den günstigen Fall der Stroherfassung Gesamtkosten von rund 35 €/Mg TM und für den ungünstigen Fall rund 54 €/Mg TM. Bezogen auf den Heizwert des Stroh liegen die Kosten dabei zwischen 2 und 3 €/GJ. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.4.2 erwähnten zusätzlichen Kosten für Düngung (11,6 €/Mg TM) und Folienabdeckung (2 €/Mg TM), erhöhen sich die kalkulierten Erfassungskostensätze<sup>98</sup> auf rund 49 bzw. 68 €/Mg TM.

---

<sup>98</sup> Zum Vergleich: Nach Angaben des Landhandels in Süddeutschland wurden 2004 für die Abnahme von Stroh (Weizen- und Gestenstroh) frei Feld bzw. Hof (Großballen, Lkw verladene Ware) zwischen 40 und 90 €/Mg TM bezahlt (LWBW, 2004). Dabei werden in den Winter- und Frühjahrsmonaten die höchsten Preise erzielt. Bei diesen Kostensätzen sind allerdings die Verladekosten (8 - 10 €/Mg TM) bereits enthalten, so dass diese vor einem Vergleich abgezogen werden müssen. Kalies et al. (2006) beziffern die Strohbereitstellungskosten für Ballenstroh auf 40 bis 64 €/Mg TM.

Tabelle 3.6: Kosten der Stroherfassung (frei Feldlager)

		Ungünstiger Fall		Günstiger Fall	
Schlaggröße	ha	2,5		5	
Ertragsniveau <sup>a)</sup>	Mg FM/ha	5,5		6,5	
Eingesetztes Personal und eingesetzte Technik		2 Mann; Schlepper (90 kW) mit Presse; Schlepper (59 kW) zum Sammeln und Stapeln			
Ballenform (RB: Rundballen; QB: Quaderballen)		RB <sub>klein</sub>	QB <sub>klein</sub>	RB <sub>groß</sub>	QB <sub>groß</sub>
D x H bzw. L x B x H <sup>b)</sup>	m	1,2 x 1,2	2,0 x 0,8 x 0,9	1,5 x 1,2	2,4 x 1,2 x 0,7
Ballenvolumen	m <sup>3</sup>	1,44	1,44	2,12	2,00
Ballendichte	Mg FM/ m <sup>3</sup>	0,11	0,13	0,12	0,15
Ballenmasse	Mg FM	0,16	0,18	0,25	0,30
Durchsatzleistung der Ballenpresse	Ballen/h	19	36	15	25
	Mg TM/h	2,6	5,6	3,3	6,5
Erfasstes Aufkommen (in Abhängigkeit von Schlaggröße und Ertragsniveau)					
Aufkommen	Mg FM	13,8		32,5	
Aufkommen	Mg TM	11,8		28	
Ballenzahl	Stk.	87	76	128	108
Zeiten					
Gesamtzeit <sup>c)</sup>	h	8,4	5,7	14,0	9,2
	h/Mg TM	0,71	0,48	0,5	0,33
davon Rüstzeit	h	1,5		1,5	
	h/Mg TM	0,13		0,05	
davon Presszeit	h	4,6	2,1	8,5	4,3
	h/Mg TM	0,39	0,18	0,3	0,16
davon Sammel-/Stapelzeit	h	2,4	2,1	4,0	3,4
	h/Mg TM	0,2	0,18	0,14	0,12
Kosten <sup>d)</sup>					
Insgesamt	€	617	640	1.000	1.072
bezogen auf die Fläche	€/ha	247	256	200	214
bezogen auf den Heizwert H <sub>u</sub>	€/GJ	3,0	3,2	2,1	2,3
bezogen auf die Anzahl der Ballen	€/Ballen	7,1	8,4	7,8	9,9
<b>bezogen auf die Trockenmasse</b>	€/Mg TM	<b>52</b>	<b>54</b>	<b>35</b>	<b>38</b>
davon Energiekosten	€/Mg TM	5,5	3,1	3,6	2,2
davon Personalkosten	€/Mg TM	9,6	6,5	6,8	4,5
davon Kapitalkosten	€/Mg TM	20,9	24,9	14,3	18,7
davon Sonstige Kosten <sup>e)</sup>	€/Mg TM	16,1	19,6	11,2	13,0
Energie und Emissionen					
Energieverbrauch	MJ	2.901	1.629	4.509	2.807
	MJ/Mg TM	245	138	161	100
CO <sub>2</sub> -Emissionen (CO <sub>2</sub> -Äquivalente)	kg	247	138	383	239
	kg/Mg TM	21	12	14	9

- Anmerkungen:
- a) Das hier angesetzte Ertragsniveau leitet sich aus den in Kapitel 3.1.3 gewonnenen Ergebnissen ab.
  - b) Abkürzungen für die Längenangaben der Strohballen: Durchmesser (D), Höhe (H), Länge (L), Breite (B).
  - c) Den hier angegebenen Erfassungszeiten liegt eine aufwändige Abschätzung zugrunde, auf deren Darstellung verzichtet wurde.
  - d) Die hierbei unterstellten Stundensätze für Fahrzeuge sind Anhang 6.31 (S. A-148) zu entnehmen.
  - e) Unter den Sonstigen Kosten werden in erster Linie die Kosten für Wartung, Instandhaltung und diverse Betriebsstoffe verstanden.

Eine genauere Betrachtung der einzelnen Kostenbestandteile aus Tabelle 3.6 verdeutlicht, dass für den Prozess der Stroherfassung sehr kapitalintensive Maschinen eingesetzt werden und entsprechend der hohen Automatisierung die anteiligen Personalkosten im Vergleich dazu eher gering sind.

Wie die Kalkulation zeigt, werden die auf die erfasste Trockenmasse bezogenen Gesamtkosten maßgeblich durch den für die Bergung erforderlichen Zeitbedarf geprägt. Und dieser wiederum hängt ganz wesentlich von der Durchsatzleistung der eingesetzten Presse ab. Demnach werden bei Verwendung von leistungsstarken Großpressen (zur Erzeugung von Großballen), trotz der im Vergleich zu leistungsschwächeren Pressen deutlich höheren Stundensätze, die Gesamtkosten geringer.

Die in Abhängigkeit der eingesetzten Presse charakteristischen Balleneigenschaften (Volumen, Dichte und Masse) beeinflussen hingegen die Zeit, die für das Sammeln und Stapeln notwendig ist. Mit Einzelballenmassen von bis zu 0,3 Mg FM zeigen auch hier Großpressen (Großballen) deutliche Vorteile, die insbesondere bei großen Schlaggrößen bzw. hohen Aufkommensdichten zum Tragen kommen.

Ausgedehnte Schlaggrößen und hohe Aufkommensdichten beeinflussen auch dahingehend die Höhe der Gesamtkosten, dass die durch die Rüstzeit entstehenden konstanten Kosten auf ein größeres Aufkommen verteilt werden und sich dadurch eine Kostendegression ergibt.

Letztlich verdeutlicht die Kalkulation, dass die in der Praxis tatsächlich entstehenden Kosten von einer Vielzahl von Faktoren abhängen, die Erfassungskosten im Wesentlichen aber von der für die Bergung eingesetzten Technik bestimmt werden. Einen wesentlichen Eckpunkt einer kostengünstigen Bereitstellung stellt hierbei der Einsatz leistungsstarker Pressen dar, wobei die in der Praxis tatsächlich realisierbare Auslastung der Maschinen von entscheidender Bedeutung ist. Insofern sollten die leistungsstarken, aber kapitalintensiven Pressen in verstärktem Maße überregional in Maschinenringen zum Einsatz kommen.

Obwohl die in dieser Kalkulation betrachtete Rundballenpresse ( $RB_{\text{groß}}$ ) hinsichtlich der Gesamtkosten etwas besser abschneidet als die Quaderballenpresse ( $QB_{\text{groß}}$ ), spricht die geringere Flächenleistung, gepaart mit einer ungünstigen Ballenform und -dichte, gegen den Einsatz dieser Rundballenpresse. Zwar kann für beide Ballenarten eine vollmechanisierte Felldräumung gleichermaßen gut durchgeführt werden, aufgrund des rechteckigen Ballenquerschnitts, der einstellbaren Ballenlänge und der im Vergleich zu Rundballen höheren Dichte, lässt sich mit Quaderballen das verfügbare Transport- und Lagervolumen besser ausnutzen (Harms, 1995). So hat sich bei den Kalkulationen zu den Transportkosten (vgl. Kapitel 3.2.4) bestätigt, dass die großen Quaderballen deutlich wirtschaftlicher transportiert werden können und somit der (geringe) erfassungsspezifische Kostenvorteil der Rundballen offensichtlich verloren geht.

Im Vergleich zur Stroherfassung gibt es für die Erfassung von Waldrestholz sehr viel mehr Varianten. Hinsichtlich des Grades ihrer Mechanisierung werden diese in motormanuelle, teilmechanisierte und vollmechanisierte Verfahren unterschieden. Erfahrungsgemäß steigt die Leistung der Erfassung mit zunehmender Mechanisierung des Verfahrens an. Doch sind für den Einsatz von höher mechanisierten Verfahren eine hohe Auslastung (große Hiebsmengen bei günstigem Stück-Masse-Verhältnis) der kapitalintensiven Maschinen und eine gute Organisation (geringe Stillstandszeiten) der

einzelnen Ablaufschritte maßgeblich. Geringer mechanisierte Verfahren sind zwar weniger leistungsstark, schneiden aber aufgrund der geringeren Systemkosten unter ökonomischen Aspekten vielfach besser ab. Insbesondere dann, wenn wie oftmals im Privatwald der Fall, der Waldeigentümer einen hohen Grad an Eigenleistung (geringe Personalkosten) erbringt und für die Bereitstellung eigene oder über einen Maschinenring günstig beziehbare Technik einsetzt (Eltrop et al., 2006).

Welches Verfahren in der Praxis tatsächlich eingesetzt wird, muss von Fall zu Fall entschieden werden und hängt von Faktoren wie beispielsweise der Erschließungssituation, der Hiebsmenge, der Art der Leistungserbringung (Maschinenring, Unternehmereinsatz, Eigenleistung), den topografischen und örtlichen Gegebenheiten, der Verfügbarkeit der Technologie, den Mengenerfordernissen, dem Energieholzpotenzial, der Qualitätsanforderung, den Transport- und Lagermöglichkeiten und nicht zuletzt auch von ökologischen Gesichtspunkten ab (Kanzian et al., 2006a).

Viele der in der Literatur beschriebenen Verfahren beziehen sich auf die Bereitstellung von Hackgut aus Schwachholz. Doch gewinnen im Zusammenhang mit der Nutzung von Waldrestholz insbesondere auch Verfahren an Bedeutung, deren Fokus auf die Erzeugung von Hackschnitzel aus Schlagabraum gerichtet ist; schließlich bildet dieser Schlagabraum einen großen Teil des gesamten (Wald-) Energieholzpotenzials.

So scheint sich hinsichtlich der Bereitstellung von Hackschnitzel aus Schlagabraum bzw. Kronenmaterial ein teilweise in der Praxis bereits angewendetes teil- bzw. vollmechanisiertes Verfahren als Standard herauszubilden, bei dem nicht nur Schwachholz, sondern auch Schlagabraum sowie Baumkronen auf einem nahe des Aufkommensortes gelegenen Sammel- bzw. Hackplatz<sup>99</sup> vorkonzentriert und anschließend gehackt werden. Besondere Vorteile bestehen darin, dass bei diesem Verfahren das Vorrücken und Hacken nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich entkoppelt ist, womit eine gute Auslastung des teuren Hackaggregates<sup>100</sup> gewährleistet ist und der Transport zur Anlage an die Hackerleistung angepasst werden kann (Daiber, 2006). Ein weiterer Vorteil<sup>101</sup> für das Hacken an einem zentralen Aufarbeitungsplatz besteht in der Möglichkeit, das Hackmaterial vorzutrocknen<sup>102</sup>. Da außerdem durch die zusätzliche Rückung von Fichtenkronen potenzieller Brutraum für Käfer aus dem Bestand entfernt werden kann, ist dieses Verfahren mit einer Kostenreduktion im Bereich des Waldschutzes verbunden (Wittkopf et al., 2003a).

Mit Blick auf eine Steigerung der Transporteffizienz werden heute auch Verfahren diskutiert, bei denen der Schlagabraum in Form von Holzbündeln an der Waldstraße bereitgestellt wird. Doch liegen nach Wittkopf (2005b) die Kosten für die Bereitstellung

---

<sup>99</sup> Bei Versuchen, die von der FVA-Freiburg begleitet wurden, zeigte sich, dass die Mobilhackung der Hiebsreste im Bestand deutlich höhere Ausbeuten (95 %) gegenüber der Hackung auf der Waldstraße oder dem Hackplatz (60 %) bringt (Textor, 2006).

Sofern nicht der ganze Schlagabraum dem Bestand entnommen wird, bringt das Vorteile für die Wirtschaftlichkeit (Stück-Masse-Gesetz) und den Nährstoffhaushalt (Wittkopf et al., 2003a).

<sup>100</sup> Die Entwicklung hinsichtlich Hackaggregaten geht in Richtung Großmaschinen, die auf einen Lkw montiert sind und über Einzugsbreiten von bis zu einem Meter verfügen. Besondere Vorteile bestehen hierbei durch die Möglichkeit der Selbstüberstellung durch den Lkw (Wittkopf, 2005a).

<sup>101</sup> Weitere Vorteile sind das große Platzangebot und die Möglichkeit, Waldrestholz aus schwierigem Gelände bereitzustellen (Lechner et al., 2004).

<sup>102</sup> Heizwerke bezahlen nach dem Heizwert des Holzes, der wiederum von der Trockenmasse abhängt. Wie im folgenden Kapitel 3.2.4 dargelegt, bestehen auch hinsichtlich der Transporteffizienz klare Vorteile für das bereits am Hackplatz vorgetrocknete Material.

(frei Waldstraße) von Bündeln über denen der Hackschnitzel. Zudem ist das Bündeln mit einer Reihe von Problemen (Verunreinigung der Bündel, Probleme beim Transport durch lösende Teile, Platzprobleme, hohe Systemkosten, Betriebsunterbrechungen durch Überstellung der Maschine, u.a.) verbunden (Kanzian, 2005). Untersuchungen zu diesem Verfahren zeigten auch, dass sowohl die Kosten für die eigentliche Bereitstellung der Bündel (frei Waldstraße) als auch die Kosten für den Transport deutlich über denen der Hackschnitzelbereitstellung liegen (vgl. Kapitel 3.2.4). Da zudem für das Hacken der Bündel an der Bioenergieanlage weitere Kosten entstehen, ist die Bereitstellung von Bündeln derzeit wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig (Wittkopf, 2005a).

Auf eine weiter- bzw. tiefergehende Beschreibung und Diskussion der einzelnen Bereitstellungsvarianten soll an dieser Stelle verzichtet werden; es sei hierzu vielmehr auf die einschlägige Literatur verwiesen, die im Zusammenhang mit der Abschätzung der Bereitstellungskosten von Waldrest- bzw. Schwachholz verwendet wurde. Das Ergebnis dieser Literaturobwertung ist in Anhang 6.43<sup>103</sup> (S. A-160) zu finden. Demnach ergibt sich für die Bereitstellung von Waldhackschnitzel frei Waldstraße bzw. Hackplatz eine Kostenspanne von 27 bis 176 €/Mg TM, womit sich zeigt, dass Waldrestholz verglichen mit Stroh einen relativ teuren Brennstoff darstellt.

Die Kosten zur Bereitstellung von Hackschnitzel aus Schwachholz liegen erwartungsgemäß unter den Kosten der Bereitstellung aus Kronenholz bzw. Schlagabraum. Hierbei ist jedoch maßgeblich, inwieweit die Hackschnitzel aus Schlagabraum als Koppelprodukt der stofflichen Nutzung angesehen und die Kosten für Fällung und Rückung dem Hauptnutzungspfad angelastet werden können. Dies trifft in besonderer Weise für das Ganzbaum-Verfahren zu, welches oftmals in schwierigem Gelände zum Einsatz kommt.

Wie bereits erwähnt, sind die Kosten für die Waldrestholzerfassung von einer (von den Autoren unterschiedlich angenommen) Vielzahl von Faktoren/Rahmenbedingungen abhängig, die sich von Fall zu Fall stark unterscheiden. Vor diesem Hintergrund ist es nahezu unmöglich, einen allgemeingültigen Kostensatz anzugeben. Allerdings zeigt sich, ausgehend von dem bereits genannten durchschnittlichen Kostensatz (vgl. Kapitel 3.1.4.3) von etwa 50 €/Mg TM<sup>104</sup> (frei Anlage), der von bayerischen Biomasseheizwerken (Großabnehmer) bezahlt wird (Neugebauer et al., 2005), welcher geringer Spielraum sich hinsichtlich der (erfassungsspezifischen) Rahmenbedingungen für eine wirtschaftliche Bereitstellung ergibt. Doch könnte, wie bereits in Kapitel 3.1.4.3 erwähnt, die zu erwartende Energiepreisentwicklung in den nächsten Jahren zu einer Steigerung der Nachfrage nach Restholz/Energieholz und somit auch zu einer Steigerung des Marktpreises führen. Im Kontext dieser energiepreisbedingten Nachfragesteigerung wird allerdings dann auch eine Rationalisierung der Bereitstellungsverfahren und weitere Mobilisierung von Potenzialen erwartet (Kalies et al., 2006), so dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum abzusehen ist, wie sich die Marktsituation tatsächlich entwickeln wird.

---

<sup>103</sup> Dort sind auch die mit der Erfassung verbundenen treibhausrelevanten Emissionen wiedergegeben.

<sup>104</sup> Hierbei sind die Kosten für einen Transport von etwa 15 km mit enthalten. Nach eigener Kalkulation (vgl. Kapitel 3.2.4) betragen diese Transportkosten ca. 10 €/Mg TM, womit für die Bereitstellung frei Waldstraße bzw. Hackplatz 40 €/Mg TM verbleiben.

Da im Rahmen dieser Arbeit auch die Darstellung der Ergebnisse auf räumlicher Ebene im Mittelpunkt steht, sind die in diesem Kapitel hergeleiteten Erfassungskosten für Reststroh und Waldrest-/Schwachholz in Abhängigkeit ortsspezifischer Gegebenheiten differenziert und für die einzelnen Gemeinden getrennt dargestellt (vgl. Kapitel 2.5); eine kartografische Darstellung des Ergebnisses ist in Anhang 6.44 (S. A-161) wiedergegeben.

Aus der dieser räumlichen Verteilung zugrunde gelegten Berechnung lassen sich schließlich auch die durchschnittlichen Erfassungskostensätze für Baden-Württemberg gewinnen. Demnach betragen die durchschnittlichen Stroh-Erfassungskosten 63 €/Mg TM (frei Feld) und die durchschnittlichen Waldrestholz-Erfassungskosten 83 €/Mg TM (frei Waldstraße). Zusammengenommen ergibt sich für Baden-Württemberg damit ein durchschnittlicher Erfassungskostensatz<sup>105</sup> für die Bereitstellung der Biomasse (Stroh und Waldrestholz) frei Aufkommensort von rund 74 €/Mg TM. Doch haben diese Kostensätze eher einen informellen Wert, da für die Realisierung eines Bioenergievorhabens die tatsächlich vor Ort gegebene Kostensituation von Bedeutung ist.

### **3.2.4 Kosten für den Transport von Strohballen, Waldhackschnitzel und Slurry**

Die Kalkulationen<sup>106</sup> zu den Transportkosten wurden, wie bereits in Kapitel 2.4.2 dargelegt, für verschiedene Transportmittel bzw. Fahrzeugkombinationen durchgeführt (vgl. Anhang 6.24, S. A-142). Dementsprechend ergibt die Auswertung der insgesamt 40 verschiedenen Varianten, dass unter wirtschaftlichen und umweltrelevanten Gesichtspunkten zwischen den jeweiligen Transportmitteln zum Teil erhebliche Unterschiede bestehen. Diese sind in erster Linie auf die transportmittelspezifische Kostenstruktur, die unterschiedlichen massen- bzw. volumenspezifischen Limitierungen der Transportbehältnisse und auf die Beschaffenheit des unterschiedlich vorkonditionierten Transportgutes zurückzuführen. Aus diesem Grund werden für die folgenden Ausführungen nur diejenigen Transportvarianten ausgewählt und diskutiert, welche unter technischen wie auch wirtschaftlichen Aspekten sinnvoll erscheinen.

Eine Zusammenstellung von Ergebnissen zum Transport von Strohballen, Waldhackschnitzel, Holzbündel und Slurry mit unterschiedlichen Transportmitteln zeigen Tabelle 3.7 (S. 72) und Tabelle 3.8 (S. 73). Hierbei werden neben den Auswertungen zu den eigentlichen Transportkosten auch Angaben zum Energieverbrauch und den treibhausrelevanten Emissionen gemacht. Die Ergebnisse sind allerdings nicht in allen Fällen unmittelbar miteinander vergleichbar, da die Kennwerte bei den einzelnen Transportmitteln für typische Transportentfernungen angegeben sind.

Beim Transport von Hackschnitzel (50 % TM) werden im Gegensatz zum Strohballen-transport sehr viel höhere Transportmassen erreicht und dadurch die Transportfahrzeuge bezüglich der zulässigen Nutzlast in vielen Fällen sehr viel mehr ausgelastet. Aufgrund des damit verbundenen hohen Energieverbrauchs liegen die Kosten für den eigentlichen Transport über denen des Strohballentransportes. Allerdings zeigt sich bei genauerer Betrachtung der Kostenzusammensetzung, dass die Kosten für Rüsten, Warten und Laden beim Strohballentransport um mehr als das Doppelte über denen des

---

<sup>105</sup> Die Bildung dieses aggregierten Kostensatzes erfolgte aus den beiden zuvor genannten Kostensätzen unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufkommen.

<sup>106</sup> In Anhang 6.45 (S. A-162f) ist das Kalkulationsschema, exemplarisch für den Strohballentransport mit dem Lkw, veranschaulicht.

Hackschnitzeltransportes liegen und somit der Strohballentransport mit Lkw und Bahn trotz des höheren Trockenmasseanteils (86 % TM) in der Regel teurer ist als der Hackschnitzeltransport. Beim Bahntransport sind hierbei noch Kosten für die Bereitstellung frei Verladebahnhof zu berücksichtigen, die aus einem unterstellten Lkw-Vorlauf<sup>107</sup> von 20 km resultieren.

Da allerdings die Pyrolyse und Vergasung zur Gewährleistung hoher Gasqualitäten auf einen trockenen Brennstoff von über 90 % TM angewiesen sind, ist insbesondere beim Einsatz von Waldrestholz eine aufwändige Trocknung erforderlich, womit sich die ökonomische Bilanz des Waldrestholzes verschlechtert. Aus diesem Grund bringt eine Zwischenlagerung des Waldrestholzes zur Trocknung auf 65 % TS neben Vorteilen für die energetische Verwertung auch Vorteile für den Transport.

Demnach gestaltet sich der Transport von Hackschnitzel mit dem höheren Trockenmassegehalt (65 % TM; ohne Berücksichtigung von Lager-/Trockenmasseverlusten durch Abbauprozesse) hinsichtlich der Transportkosten im Vergleich zu den waldfrischen Hackschnitzel (50 % TM) etwas günstiger. Zwar verfügen die vorgetrockneten Hackschnitzel über eine etwas geringere Schüttdichte, doch kann bei dem trockeneren und leichteren Holz ein höheres Zuladevolumen realisiert werden.

Hinsichtlich der Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Effizienz bestehen zwischen dem Strohballen- und Hackschnitzeltransport nur unwesentliche Unterschiede. Der höhere Energieverbrauch für den Transport der Hackschnitzel wird durch den Energieverbrauch für die Beladung des Transportfahrzeuges mit Strohballen nahezu ausgeglichen; allerdings verschiebt sich dieses Gleichgewicht mit zunehmender Transportentfernung zugunsten des Strohballentransportes. Unter den gegebenen Annahmen stellt sich der Lkw-Transport energetisch effizienter dar als der Schleppertransport, da hier deutlich höhere Transportvolumina erreicht werden. Im Hinblick auf einen umweltverträglichen Transport ist allerdings die Bahn als besonders günstig anzusehen.

Das Problem der hohen Kosten für die Beladung der Fahrzeuge ergibt sich wie beim Strohballentransport in gleicher Weise auch für den Transport von Holzbündeln. Deshalb ist der Transport von Holzbündeln (65 % TM) im Falle des Lkw- und Bahntransportes im Vergleich zum Hackschnitzeltransport (65 % TM) deutlich teurer. In Anbetracht der ohnehin schon sehr hohen Erfassungskosten, stellen die Holzbündel hinsichtlich des Transports damit keine ökonomische Alternative zum Hackschnitzeltransport dar.

Die Gesamtkosten für den Slurrytransport mit dem Lkw sind deutlich günstiger als für den Transport von Strohballen oder Hackschnitzel. Da es sich bei der transportierten Slurrymasse nicht um eine Trockenmasse im eigentlichen Sinne handelt, bietet es sich für einen Vergleich an, die Kosten auf die transportierte Energie zu beziehen. Entsprechend der hohen Energiedichte des Slurry liegen die Gesamtkosten mit 0,6 bzw. 0,7 €/GJ deutlich unter denen des Strohballen- (1,9 €/GJ) und Waldhackschnitzeltransportes (1,5 bzw. 2,1 €/GJ). Dementsprechend gestaltet sich im Falle des Slurrytransportes mit dem Lkw auch die Energieeffizienz sehr vorteilhaft. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Transport mit einem Lkw-Tankwagenauflieger oder mit einem 20 ft ISO-Tankcontainer erfolgt.

---

<sup>107</sup> Die hier angenommene Vorlaufstrecke von 20 km ergibt sich aus dem Ergebnis einer Analyse aus Kapitel 3.3.

Tabelle 3.7: Kosten, Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Transport von Strohballen und Waldhackschnitzel

	Stroh (86 % TM) Quaderballen 2,4 m x 1,2 m x 0,9 m; Ballendichte: 0,15 Mg/m <sup>3</sup>			Waldhackschnitzel (50 % TM) Schüttdichte: 0,4 Mg/m <sup>3</sup>			Waldhackschnitzel (65 % TM) Schüttdichte: 0,3 Mg/m <sup>3</sup>		
	Schlepper	Lkw (Gliederzug)	Bahn	Schlepper	Lkw (Gliederzug)	Bahn	Schlepper	Lkw (Gliederzug)	Bahn
<b>Transportstrecke</b>									
Fahrt in einfacher Richtung	15	100	250	15	100	250	15	100	250
<b>Transportierte(s) Masse und Volumen</b>									
Tatsächlich transportierte Masse (Gut)	10,8	14,4	360,0	13,5	19,1	916,8	10,1	19,1	916,8
Tatsächlich transportierte Masse (Gut)	9,3	12,4	309,6	6,7	9,6	458,4	6,6	12,4	595,9
Tatsächlich transportiertes Volumen (Gut)	72	96	2.400	34	48	2.294	34	64	3.058
Transport ist volumen- oder massenlimitiert	Vol.	Vol.	Vol.	Vol.	Mass.	Vol.	Vol.	Mass.	Vol.
<b>Kosten</b>									
Gesamtkosten	166	405	25.099	124	290	23.532	124	290	23.555
bezogen auf die transportierte Masse	17,9	32,7	81,1	18,5	30,4	51,3	18,9	23,3	39,5
bezogen auf die insgesamt benötigte Zeit	40,9	54,5	599,2	36,9	48,6	856,1	36,7	48,6	856,9
bezogen auf das transportierte Biomassevolumen	2,3	4,2	10,5	3,7	6,1	10,3	3,7	4,6	7,7
bezogen auf den transportierten Energiegehalt der Biomasse	1,1	1,9	4,8	1,2	2,1	3,5	1,2	1,5	2,5
Kosten für die Bereitstellung am Verladebahnhof	-	-	6.347	-	-	6.234	-	-	6.257
Kosten für das Rüsten, Warten, Be- und Entladen	100	186	2.800	47	45	1.360	47	45	1.360
Kosten für das Transportieren	66	218	15.952	77	245	15.938	77	245	15.938
Kosten für die Bereitstellung am Verladebahnhof	-	-	20,5	-	-	13,6	-	-	10,5
Kosten für Rüsten, Warten und Be- und Entladen	10,8	15,0	9,0	7,0	4,7	3,0	7,2	3,6	2,3
Kosten für das Transportieren	7,1	17,6	51,5	11,5	25,6	34,8	11,7	19,7	26,7
<b>Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>									
Gesamtverbrauch	853	2.874	85.695	803	2.901	107.829	776	2.901	107.829
bezogen auf die transportierte Masse	92	232	277	119	304	235	118	234	181
Effizienz	3,06	1,16	0,55	3,98	1,52	0,47	3,95	1,17	0,36
Effizienz (kleiner Wert bedeutet hohe Effizienz)	0,18	0,07	0,03	0,27	0,10	0,03	0,25	0,07	0,02
Gesamte CO <sub>2</sub> -Emission (CO <sub>2</sub> -Äq.)	73	244	10.663	68	247	13.703	66	247	13.703
bezogen auf die transportierte Trockenmasse	8	20	34	10	26	30	10	20	23
bezogen auf die Strecke und transport. Energie	15	6	4	23	9	4	21	6	3

Anmerkung: Die Kalkulationen beziehen sich auf die Hin- und Rückfahrt, wobei die Rückfahrt als leer angenommen wurde.

**Tabelle 3.8: Kosten, Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Transport von Holzbündel und Slurry**

	Holzbündel (65 % TM) 3 m x 0,75 m x 0,75 m; Ballendichte: 0,21 Mg/m <sup>3</sup>			Slurry Dichte: 1,25 Mg/m <sup>3</sup>			
	Schlepper	Lkw (Gliederzug)	Bahn	Lkw Tankaufleger	Lkw ISO-Tankcont.	Bahn ISO-Tankcont.	Bahn Tankwagen
<b>Transportstrecke</b>							
Fahrt in einfacher Richtung	15	100	250	100	100	250	250
<b>Transportierte(s) Masse und Volumen</b>							
Tatsächlich transportierte Masse (Gut)	15,1	17,3	466,6	26,0	15,0	900,0	1.965,0
Tatsächlich transportierte Masse (Gut)	9,8	11,2	303,3	-	-	-	-
Tatsächlich transportiertes Volumen (Gut)	71	82	2.203	21	12	720	1.572
Transport ist volumen- oder massenlimitiert	Vol.	Vol.	Vol.	Mass.	Mass.	Vol.	Mass.
<b>Kosten</b>							
Gesamtkosten	224	394	25.373	279	238	23.978	33.404
bezogen auf die transportierte Masse	22,8	35,1	83,7	10,7	15,9	26,6	17,0
bezogen auf die insgesamt benötigte Zeit	48,6	55,8	579,2	48,0	47,7	963,4	601,1
bezogen auf das transportierte Biomassevolumen	3,1	4,8	11,5	13,4	19,8	33,3	21,2
bezogen auf den transportierten Energiegehalt der Biomasse	1,4	2,2	5,2	0,6	0,9	1,5	1,0
Kosten für die Bereitstellung am Verladebahnhof	-	-	6.429	-	-	5.490	-
Kosten für das Rüsten, Warten, Be- und Entladen	146	154	2.992	65	29	1.100	4.168
Kosten für das Transportieren	78	240	15.952	214	209	17.388	29.236
Kosten für die Bereitstellung am Verladebahnhof	-	-	21,2	-	-	6,1	-
Kosten für Rüsten, Warten und Be- und Entladen	14,9	13,7	9,9	2,5	1,9	1,2	2,1
Kosten für das Transportieren	7,9	21,4	52,6	8,2	13,9	19,3	14,9
<b>Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>							
Gesamtverbrauch	1.416	3.146	100.515	2.497	2.321	132.375	164.709
bezogen auf die transportierte Masse	144	280	331	96	155	147	84
Effizienz	4,80	1,40	0,66	0,48	0,77	0,29	0,17
Effizienz (kleiner Wert bedeutet hohe Effizienz)	0,30	0,09	0,04	0,03	0,04	0,02	0,01
Gesamte CO <sub>2</sub> -Emission (CO <sub>2</sub> -Äq.)	120	267	12.137	212	197	15.572	21.247
bezogen auf die transportierte Trockenmasse	12	24	40	8	13	17	11
bezogen auf die Strecke und transport. Energie	26	7	5	2	4	2	1

Anmerkung: Die Kalkulationen beziehen sich auf die Hin- und Rückfahrt, wobei die Rückfahrt als leer angenommen wurde.

Beim Slurrytransport mit der Bahn wurden zwei unterschiedliche Transportvarianten untersucht. Bei der ersten Variante erfolgt vor dem Bahntransport ein Lkw-Vorlauf (20 km), wobei die Bahnwaggons mit den von den Lkw bereitgestellten ISO-Tankcontainern an der Güterverkehrsstelle beladen werden. Im Falle der zweiten Variante werden Tankwaggons direkt (d.h. ohne Lkw-Vorlauf) an der Pyrolyseanlage mit Slurry befüllt. Bei Betrachtung der Auswertungen zeigen sich dabei klare ökonomische Präferenzen zugunsten der zweiten Variante, was insbesondere darauf zurückzuführen ist, dass im Vergleich zur ersten Variante keine vergleichbaren Bereitstellungskosten<sup>108</sup> anfallen und darüber hinaus die Tankwaggons bis an die Lastgrenze beladen werden können. Insofern wäre ein unmittelbarer Gleisanschluss ein wichtiges Kriterium zur Standortauswahl einer Pyrolyseanlage.

Die Bahn scheint auch dahingehend für einen Slurrytransport geeignet, da der Slurry an definierten Orten kontinuierlich und in großen Mengen anfällt. Damit können regelmäßige und gut planbare Transporte durchgeführt werden, welche eine Voraussetzung für einen kostengünstigen Bahntransport darstellen.

Da die gesamten Transportkosten neben dem entfernungsunabhängigen Fixkostenanteil auch maßgeblich durch eine von der Transportentfernung abhängigen Kostenkomponente mitbestimmt werden (vgl. Gleichung 2.1 in Kapitel 2.4.2), sind für die in Tabelle 3.7 und Tabelle 3.8 dargestellten Transportmittel die Transportkosten in Abhängigkeit der Transportentfernung veranschaulicht. Das Ergebnis hierzu zeigen Abbildung 3.14 und Abbildung 3.15, wobei die dargelegten Kosten bei einer Strecke von 0 km den Fixkostenanteil der Transportkosten (Rüsten, Warten, Laden) wiedergeben. Eine ausführlichere Darstellung der Transportkostenverläufe für die in Tabelle 3.7 und Tabelle 3.8 dargestellten Transportmittel findet sich in Anhang 6.46 (S. A-164) bis Anhang 6.48 (S. A-166).

Entsprechend der Darstellung aus Abbildung 3.14 zeigen sich für den Strohballen-transport mit dem landwirtschaftlichen Schlepper, bis zu einer Entfernung von etwa 30 km, im Vergleich zum Lkw Kostenvorteile. Beim Hackschnitzel- und Holzbündeltransport veranschaulichen die Kostenkurven, dass der Lkw das Transportmittel der Wahl darstellt; hierbei ergeben sich für den Transport von vorgetrockneten Hackschnitzel deutliche Kostenvorteile. Aufgrund der hohen Umschlagkosten in Zusammenhang mit den für den Bahntransport notwendigen Bereitstellungskosten, ist der Bahntransport von Stroh, Hackschnitzel und Holzbündel in einem Entfernungsbereich bis 90 km hinsichtlich der Kosten gänzlich unattraktiv und aus diesem Grunde auch nicht in Abbildung 3.14 dargestellt.

Auch für den Transport von Slurry stellt der Lkw (mit Tanksattelaufleger) zunächst die wirtschaftlichste Transportvariante dar. Allerdings ergibt sich ab ca. 90 km bereits ein geringer Kostenvorteil zugunsten des Bahntransportes. Der Lkw- und Bahntransport von Slurry unter Verwendung von ISO-Tankcontainern sollte im Entfernungsbereich bis 90 km nicht erwogen werden, weil aufgrund der hohen Bereitstellungskosten ein wirtschaftlicher Transport nicht gegeben ist.

---

<sup>108</sup> Inwieweit Kosten für das Rangieren der Waggons an der Pyrolyseanlage anfallen, wurde nicht kalkuliert.

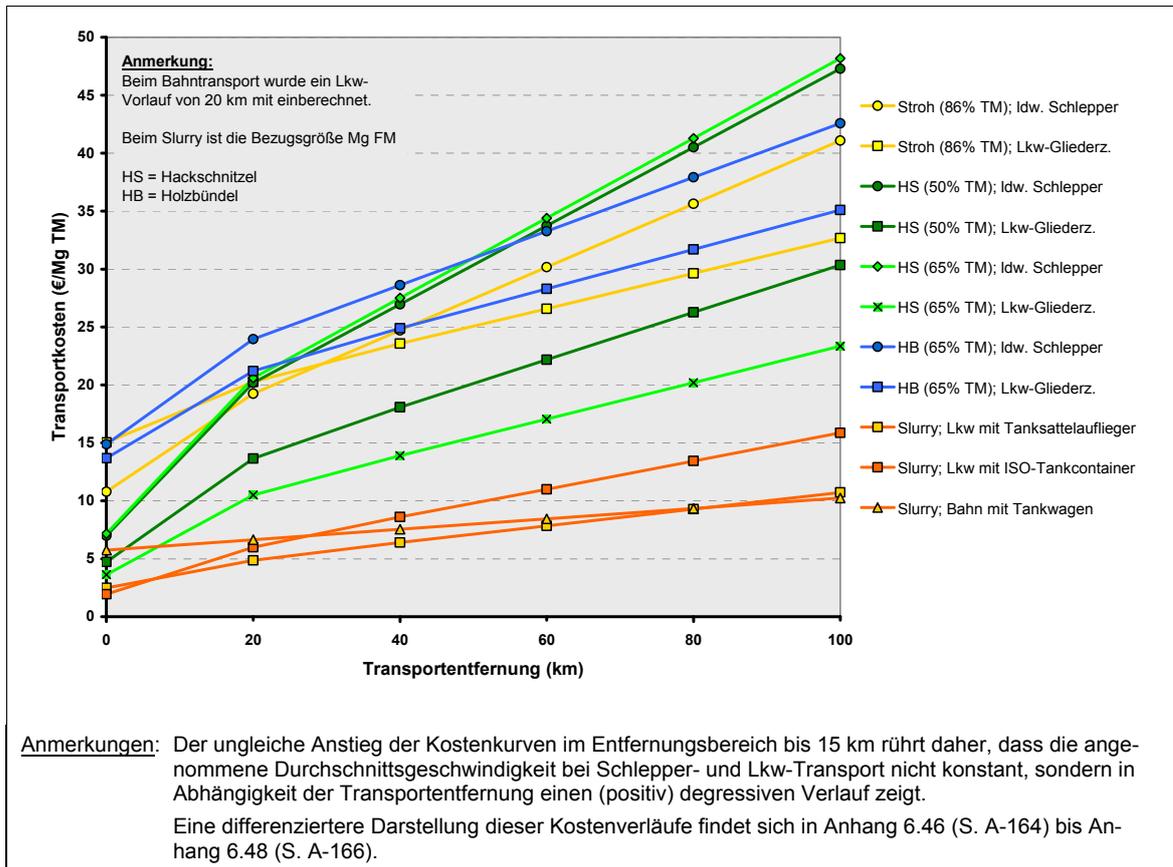


Abbildung 3.14: Transportkosten ausgewählter Transportmittel – Kurzstrecke

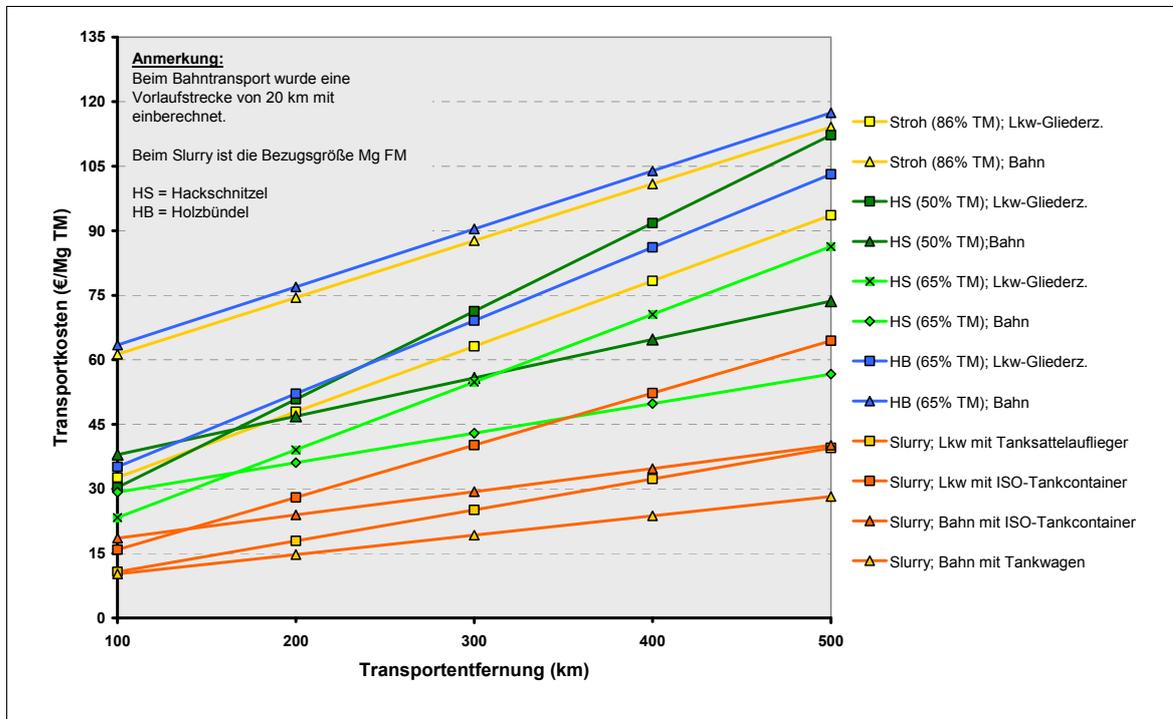


Abbildung 3.15: Transportkosten ausgewählter Transportmittel – Langstrecke

In Abbildung 3.15 sind die Transportkosten für die Transportentfernungen von 100 bis 500 km wiedergegeben. Da für diesen Entfernungsbereich der Transport mit dem landwirtschaftlichen Schlepper keinen Sinn mehr macht, wurde auf eine Darstellung hierzu verzichtet. Hinsichtlich des Strohballentransportes zeigen sich klare wirtschaftliche Vorteile zugunsten des Lkw. Doch lässt die Kostenkurve für die Bahn erahnen, dass der Bahntransport ab einer Entfernung von deutlich über 1000 km günstiger werden könnte. Bei solcherlei Entfernungen wäre allerdings der Transport mit dem Schiff als weitere Alternative mit in Betracht zu ziehen, oder aber die, wie sich im weiteren Verlauf der Arbeit zeigen wird, Konversion des Strohs zu Slurry vorzuziehen.

Bezüglich des Waldhackschnitzeltransportes (50 % TM bzw. 65 % TM) zeigt sich ein Schnittpunkt der Kostenkurve von Lkw und Bahn bei einer Entfernung von ca. 150 km. Ab dieser Entfernung ist auch der Slurrytransport (ISO-Tankcontainer) mit der Bahn günstiger als mit dem Lkw. Jedoch ist der Slurry-Bahntransport mit Tankwagen und einer Direktbefüllung an der Pyrolyseanlage unter den gegebenen Annahmen kostenmäßig unschlagbar.

Abschließend soll hier nochmals darauf aufmerksam gemacht werden, dass bei den Kalkulationen zum Transport von herkömmlichen Transportfahrzeugen/-mittel ausgegangen wurde. Sollte in der Praxis tatsächlich eine energetische Nutzung von Waldrestholz und Reststroh nach dem bioliq®-Konzept erfolgen, wäre durch den Einsatz von Sonderfahrzeugen in Zusammenhang mit Sondergenehmigungen, die ein Überschreiten der gesetzlich zulässigen Beladungen erlauben, sicherlich ein großes Rationalisierungspotenzial gegeben. Dennoch werden in der Praxis die Fahrzeuge entsprechend ihrer Transportkapazitäten sicherlich nicht in jedem Falle optimal beladen werden.

In diesem Kapitel wurde auf eine summarische Darstellung von Erfassungs- und Transportkosten verzichtet, da die Transportkosten von der zurückzulegenden Strecke abhängen und diese je nach Anlagenstandort verschieden sind. Darüber hinaus beeinflusst die an einem bestimmten Anlagenstandort zur Verfügung stehende Verkehrsinfrastruktur die Auswahl eines geeigneten Transportmittels und damit auch die Transportkosten. Da zudem die Erfassung und der Transport immer nur einen Teil einer mehrstufigen Prozesskette bildet, darf eine zusammenfassende bzw. abschließende Bewertung nur unter Berücksichtigung aller Prozesskettenglieder und in Abhängigkeit verschiedener standortspezifischer Gegebenheiten erfolgen. In Kapitel 3.4 wird darauf näher eingegangen.

### 3.3 Standortanalyse, Standortauswahl und -bewertung

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse der Standortanalysen (Kapitel 3.3.1) vorgestellt, aus denen abgeleitet werden kann, welche Gemeinden als Standort/Einzugsgebiet<sup>109</sup> (hinsichtlich des dezentralen Konzepts) oder aber als Erfassungsgebiet (hinsichtlich des integrierten Konzepts) besonders geeignet erscheinen. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, erfolgten diese Analysen anhand verschiedener gemeindenspezifischer Kennwerte.

Anschließend werden im Rahmen einer Standortauswahl (Kapitel 3.3.2) exemplarisch drei Standorte bzw. Einzugsgebiete ausgewählt, welche im Rahmen einer Standortbewertung (Kapitel 3.3.3) hinsichtlich ihrer Aufkommens- und Kostensituation einer genaueren Betrachtung unterzogen werden.

#### 3.3.1 Standortanalyse

Mit Blick auf die Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel 3.2.4 wird klar, dass für eine kostengünstige Bereitstellungskette nicht nur das an einem bestimmten Ort vorhandene Biomasseaufkommen, sondern auch die in diesen Bereichen zur Verfügung stehende Verkehrsinfrastruktur von maßgeblicher Bedeutung ist. Deshalb stellt die in Abbildung 3.16 (S. 78) veranschaulichte Verkehrsinfrastruktur für Baden-Württemberg einen wichtigen Ausgangspunkt für die Auswahl potenzieller Standorte dar (vgl. Kapitel 3.3.2).

Die an einem bestimmten Ort gegebene Verkehrsanbindung entscheidet schließlich auch, welche Arten von Transportmitteln eingesetzt werden können, und bestimmt daher ganz wesentlich die Transporteffizienz und damit auch die Transportkosten. Aus diesem Grund ist im Falle des dezentralen Konzepts insbesondere für den Standort einer Pyrolyseanlage eine günstige Verkehrsanbindung, d.h. das Vorhandensein eines nahegelegenen Autobahnanschlusses, von großem Vorteil. Darüber hinaus ist ein Gleisanschluss<sup>110</sup> von besonderer Relevanz, da der Slurry-Bahntransport (Direktbefüllung von Tankwagen an der Anlage, ohne Lkw-Vorlauf) eine im Vergleich zum Lkw-Transport ebenfalls wirtschaftliche Transportalternative darstellt.

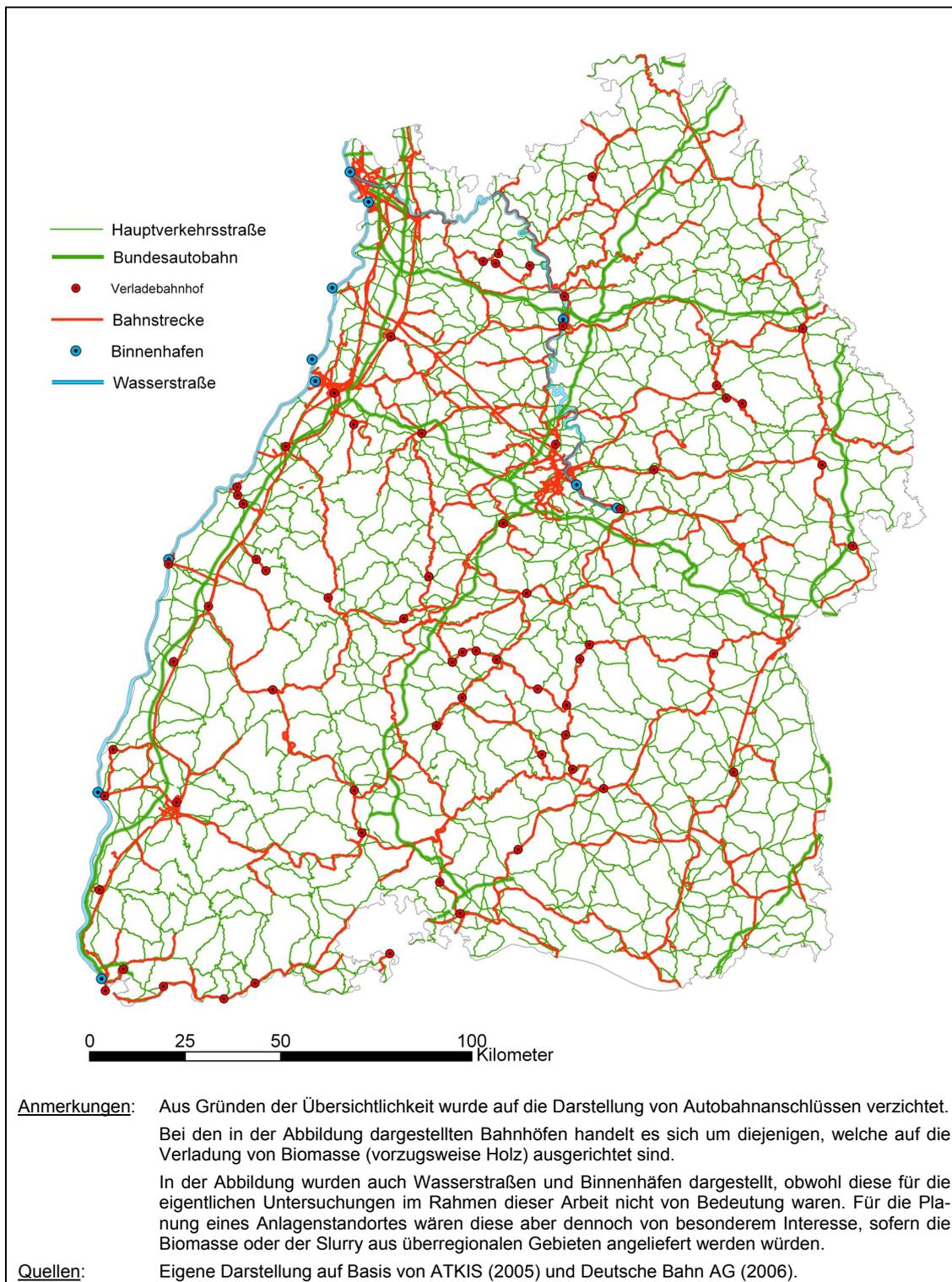
Für den Biomassetransport innerhalb Baden-Württembergs ist das Vorhandensein eines Gleisanschlusses bzw. Verladebahnhofes nicht von Bedeutung, da bei den hier betrachteten (kurzen) Transportentfernungen ein Bahntransport unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht empfohlen werden kann. Im Rahmen der Standortanalyse wurde das Vorhandensein bzw. die räumliche Nähe zu einem Verladebahnhof dennoch mit berücksichtigt, weil damit für die Standorte die Option besteht, mit Biomasse aus weit entfernten Gebieten (außerhalb Baden-Württembergs bzw. Deutschlands) relativ kostengünstig beliefert<sup>111</sup> zu werden.

---

<sup>109</sup> Als Gebiet wird hier eine Ansammlung von einzelnen Gemeinden verstanden, die in unmittelbarer räumlicher Nähe zueinander liegen.

<sup>110</sup> Die Begriffe Gleisanschluss und Verladebahnhof sind in diesem Kontext nicht gleichbedeutend. Ein Gleisanschluss bezeichnet die direkte Anbindung einer Pyrolyseanlage an eine in der unmittelbaren Umgebung zur Anlage verlaufende Bahnstrecke. Der Umschlag von Waren an Verladebahnhöfen erfordert in der Regel einen Lkw-Vorlauf. Verfügt dagegen eine Pyrolyseanlage über einen direkten Gleisanschluss, ist ein solcher Vorlauf nicht erforderlich.

<sup>111</sup> Diese Option gewinnt insbesondere dann an Bedeutung, wenn die ausschließlich auf Baden-Württemberg bezogene räumliche Abgrenzung aufgehoben wird.



**Abbildung 3.16: Verkehrsnetz in Baden-Württemberg**

### 3.3.1.1 Dezentrales Konzept

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, muss bei der Analyse von geeigneten Pyrolyse-Anlagenstandorten zwischen dem eigentlichen Anlagenstandort und dem zu diesem Standort gehörenden Biomasse-Einzugsgebiet unterschieden werden. Dabei ist insbesondere für den eigentlichen Anlagenstandort eine verkehrsgünstige Anbindung von großer Bedeutung, wohingegen für die zu diesem Anlagenstandort gehörenden Einzugsgebiete ein großes Aufkommen bei gleichzeitig geringen Erfassungskosten maßgeblich ist (vgl. Tabelle 2.3, S. 36). Diese bezüglich Anlagenstandort und Einzugsgebiet unterschiedlichen Anforderungen wurden bei der Bewertung durch eine entsprechend unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Kenngrößen berücksichtigt (vgl. Anhang 6.35, S. A-152 und Anhang 6.36, S. A-153).

Die Ergebnisse der Standortanalyse im Hinblick auf das dezentrale Konzept zeigt Abbildung 3.17 (S. 80). Die linke Darstellung veranschaulicht diejenigen Gemeinden, welche für den Standort einer dezentralen Pyrolyseanlage geeignet erscheinen. Dagegen gibt die rechte Darstellung diejenigen Gemeinden wieder, welche im Einzugsgebiet einer Pyrolyseanlage liegen sollten. Vorteilhafte Einzugsgebiete zeichnen sich hierbei durch eine große Anzahl aneinander liegender Gemeinden aus, die allesamt eine günstige Bewertung bezüglich Biomassepotenziale und -erfassungskosten aufweisen.

Wie Abbildung 3.17 zeigt, sind prädestinierte Standorte für Pyrolyseanlagen aufgrund ihrer Verkehrsanbindung insbesondere in den Ballungsräumen (Stuttgart, Karlsruhe, Heidelberg und Heilbronn) zu finden und ganz generell auch für diejenigen Gemeinden gegeben, welche sich unweit eines Autobahnanschlusses befinden.

Mit Blick auf das Biomassepotenziale sind hauptsächlich in den Landkreisen Main-Tauber, Alb-Donau, Heidenheim, Heilbronn und Neckar-Odenwald eine Vielzahl von Gemeinden vorhanden, welche sich zusammengenommen als Einzugsgebiet einer Pyrolyseanlage sehr gut eignen. Hingegen sind die Gemeinden im Bereich des Schwarzwaldes nur wenig vorteilhaft, was darauf zurückzuführen ist, dass es im Schwarzwald nur geringe Strohaufkommen und nur wenig leicht verfügbare bzw. kostengünstige Aufkommen an Waldrestholz gibt.

Da der Betrieb der Pyrolyseanlagen nicht in jedem Falle gleichzeitig – wie in Abbildung 3.17 unterstellt – sowohl den Brennstoff Holz als auch den Brennstoff Stroh erfordert, wurden dementsprechend zwei weitere Analysen von Einzugsgebieten durchgeführt, bei denen zwischen diesen beiden Brennstoffen unterschieden wurde. Das Ergebnis hierzu zeigt Anhang 6.49 (S. A-167), wobei der Karte zu entnehmen ist, dass sich insbesondere hinsichtlich der Waldrestholznutzung aufgrund der räumlichen Verteilung des leicht nutzbaren Holzaufkommens (vgl. Abbildung 3.9, S. 58) ein sehr uneinheitliches Bild ergibt. Da für die Standorte zur konventionellen Biomassenutzung in Heizwerken bzw. Heizkraftwerken mehr oder weniger dieselben Anforderungen gelten wie für die Einzugsgebiete von Pyrolyseanlagen, sind die in Anhang 6.49 dargestellten Ergebnisse auch auf diesbezügliche Standortfragen zu übertragen.

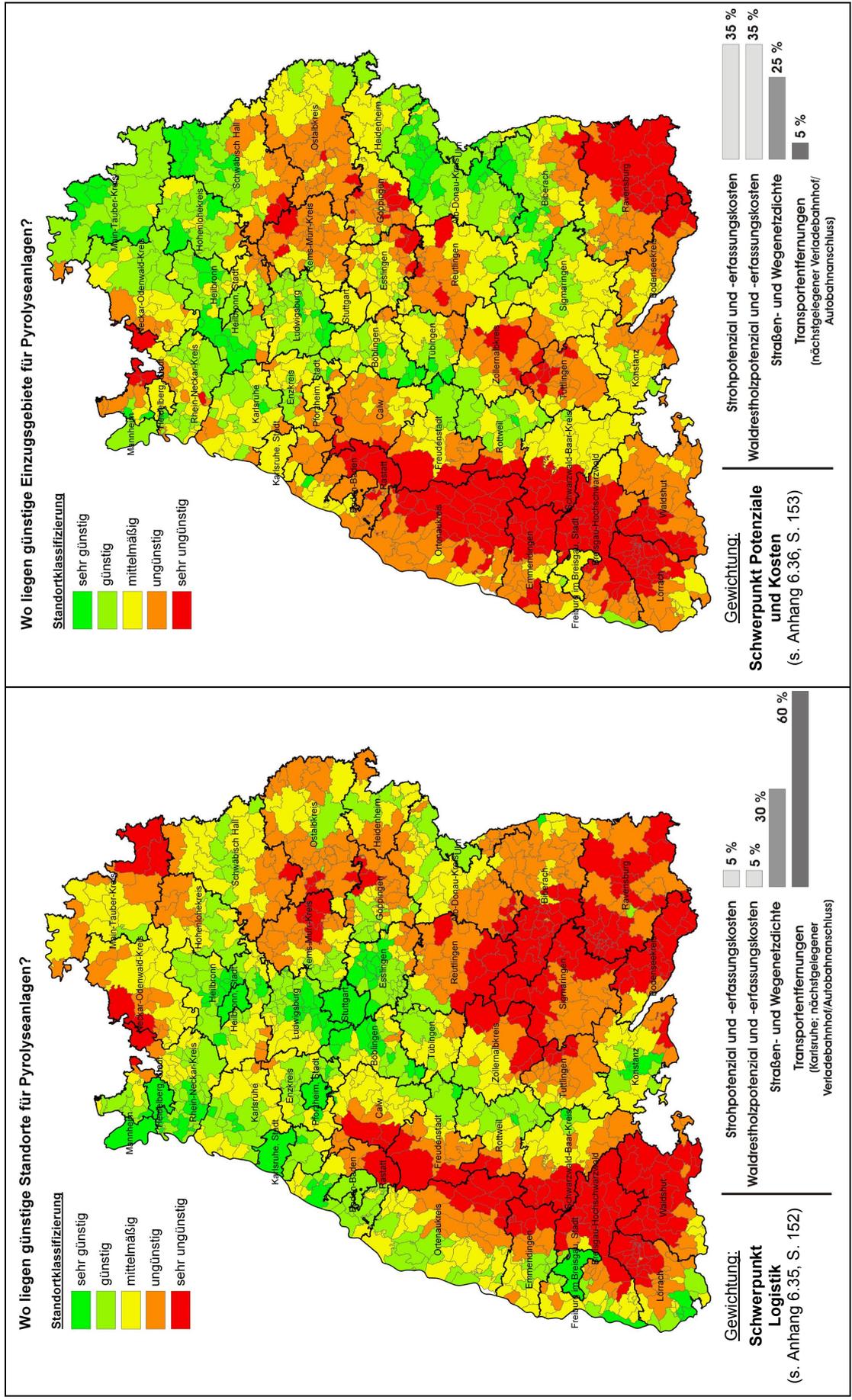
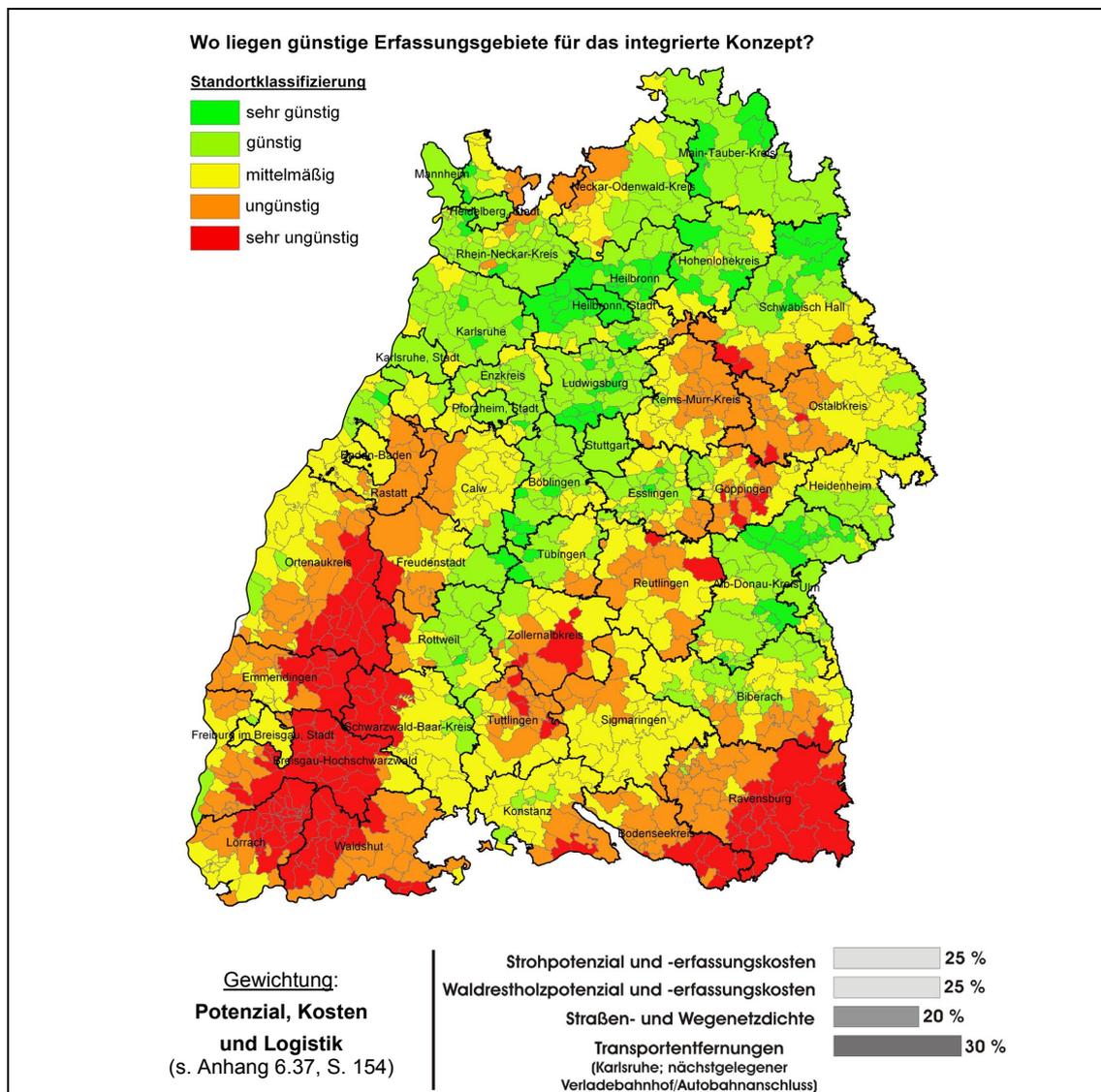


Abbildung 3.17: Vorteilhafte Standorte und Einzugsgebiete für das dezentrale Konzept

### 3.3.1.2 Integriertes Konzept

Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, wurde der Standort für eine zentrale Vergasungs-/Syntheseanlage auf Karlsruhe festgelegt. Insofern bezogen sich die im Hinblick auf das integrierte Konzept durchgeführten Analysen nicht auf den Anlagenstandort selbst, sondern vielmehr auf die Sichtbarmachung von günstigen Erfassungsgebieten; schließlich sind nicht alle im Einzugsgebiet der Großanlage liegenden Gemeinden als (Biomasse-) Aufkommensort gleichermaßen vorteilhaft.

Als geeignete Erfassungsgebiete werden insbesondere diejenigen Gemeinden angesehen, welche durch hohe Biomassepotenziale, eine günstige Verkehrsinfrastruktur bzw. Verkehrsanbindung und eine räumliche Nähe zum zentralen Anlagenstandort charakterisiert sind (vgl. Tabelle 2.3, S. 36).



**Abbildung 3.18: Vorteilhafte Erfassungsgebiete für das integrierte Konzept**

Die Ergebnisse einer solchen Analyse zeigt Abbildung 3.18. Aus dieser wird ersichtlich, dass besonders günstige Erfassungsgebiete vorzugsweise im nördlichen Teil Baden-Württembergs zu finden sind. Diese Gebiete zeichnen sich nicht nur durch ihre günstige Infrastruktur und räumliche Nähe zu Karlsruhe aus, sondern auch durch ihre hohen Strohpotenziale (vgl. Abbildung 3.4, S. 47).

Aufgrund hoher Erfassungskosten bei gleichzeitig ungünstiger Infrastruktur stellen große Teile des Schwarzwaldes keine geeigneten Erfassungsgebiete dar, wobei einige Gebiete im Bereich des Nordschwarzwaldes, bedingt durch ihre räumliche Nähe zu Karlsruhe, etwas günstiger abschneiden.

### 3.3.2 Standortauswahl

In Anlehnung an die bisher gewonnenen Ergebnisse wurden exemplarisch drei Standorte ausgewählt, die potenziell als Standort einer Pyrolyseanlage geeignet wären. Es sei hierbei nochmals explizit darauf hingewiesen, dass diese Standorte ausschließlich nach den in dieser Arbeit hergeleiteten Standortfaktoren ausgewählt wurden, d.h. weitere für eine Standortauswahl relevante Kriterien (Steuerstruktur, Arbeitsmarkt, etc.) sowie die tatsächliche Situation vor Ort blieben unberücksichtigt<sup>112</sup>. Der Standort der zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage wurde, wie bereits mehrfach erwähnt, auf Karlsruhe festgelegt.

Die Lage der ausgewählten Anlagenstandorte und deren Einzugsgebiete bzw. Einzugsgebietsgeometrie verdeutlicht Abbildung 3.19, wobei sich die linke Darstellung auf die dezentrale Auslegung und die rechte Darstellung auf die integrierte Auslegung des Konzepts bezieht. Hinsichtlich des integrierten Konzepts wurden um den Standort Karlsruhe kreisförmige Einzugsgebiete mit einem Radius von 50, 100 und 150 km definiert. Dabei blieben aus den in Kapitel 2.1 genannten Gründen die außerhalb Baden-Württembergs liegenden Flächen und somit Biomasseaufkommen unberücksichtigt.

Die eigentliche Auswahl und Festlegung der drei dezentralen Pyrolyse-Anlagenstandorte erfolgte im Wesentlichen anhand der in Abbildung 3.17 (S. 80) veranschaulichten bzw. analysierten Einzugsgebiete unter Berücksichtigung der in Abbildung 3.16 (S. 78) skizzierten Verkehrsinfrastruktur. Dabei wurden allerdings nicht alle Standorte unter denselben Gesichtspunkten ausgewählt; schließlich sollte auch untersucht werden, inwieweit durch standortspezifische Gegebenheiten die Potenzial- und Kostensituation beeinflusst wird.

Bei jedem der drei ausgewählten Pyrolyse-Anlagenstandorte wurde gleichermaßen von kreisförmigen Einzugsgebieten ( $R = 15$  und  $25$  km) ausgegangen. Damit war es möglich, die Potenzial- und Kostensituation der einzelnen Standorte gegenüberzustellen bzw. bewerten zu können.

---

<sup>112</sup> Im Zusammenhang mit der technischen Auslegung einer Pyrolyseanlage ist es von Vorteil, den Anlagenstandort in die Nähe eines Fließgewässers zu legen. Die ausgewählten Standorte Forbach (an der Murg) und Ehingen (an der Donau) würden dieses Kriterium erfüllen. Doch soll im Rahmen dieser Arbeit diese Anforderung nicht weiter beachtet werden, da für eine definitive Standortentscheidung noch eine Reihe weiterer Anforderungen mit einbezogen werden sollten.

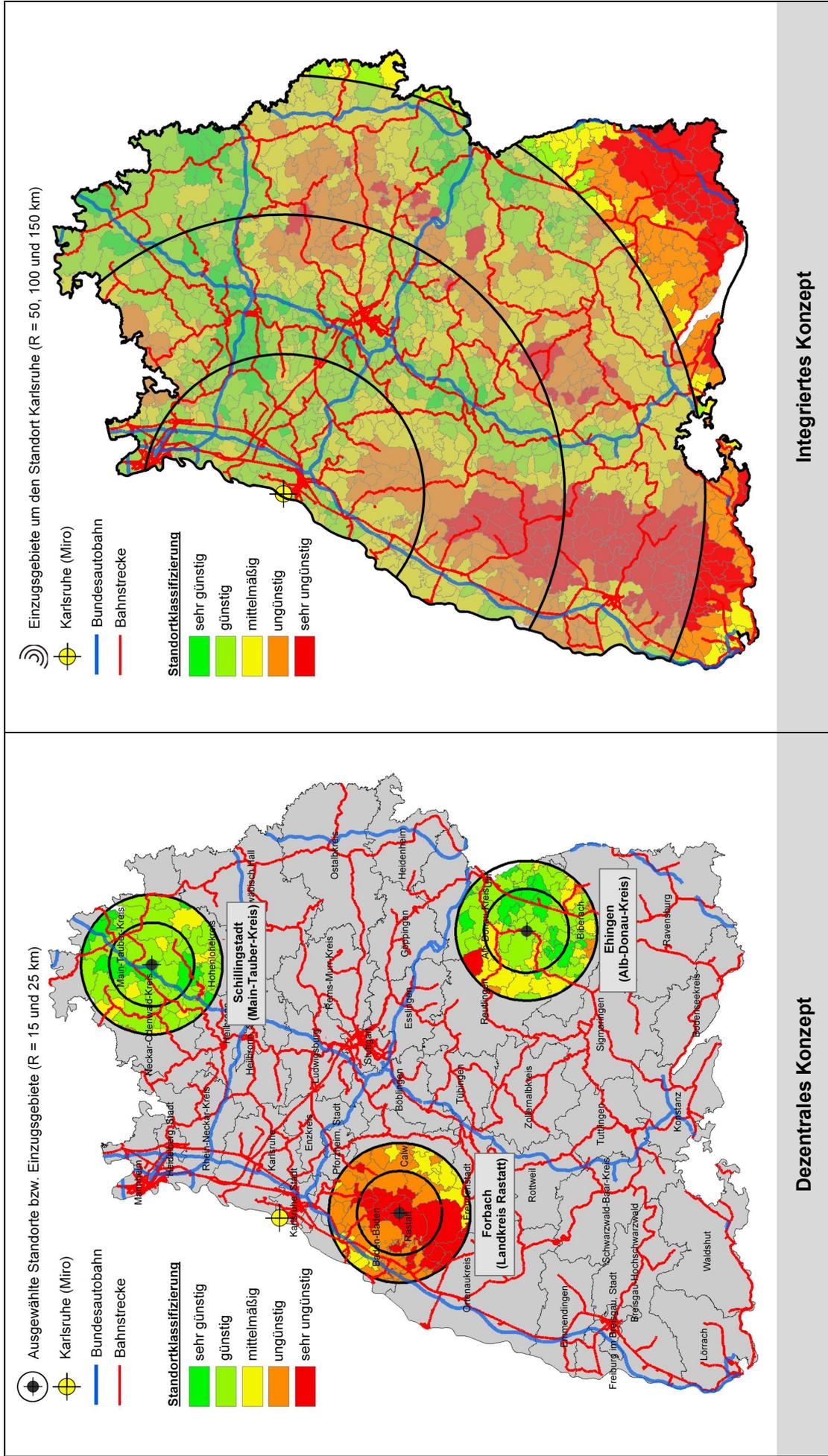


Abbildung 3.19: Darstellung der exemplarisch ausgewählten Standorte und deren Einzugsgebiete

Das Vorhandensein eines Verladebahnhofs (vgl. Abbildung 3.16 S. 78) war bei der Auswahl der drei dezentralen Standorte nicht von Bedeutung, da der Slurry-Bahntransport (einschließlich Lkw-Vorlauf) bei Verladung von ISO-Tankcontainern an einem Verladebahnhof, gegenüber dem Lkw-Transport mit Tanksattelaufleger (bei Entfernungen bis 500 km) wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig ist (vgl. Kapitel 3.2.4). Mit Blick auf die ökonomisch interessante Alternative, Bahn-Tankwagen direkt an der Pyrolyseanlage mit Slurry zu befüllen, gewinnt jedoch der unmittelbare Zugang zu einer Bahnstrecke an Bedeutung, schließlich zeigen die Kalkulationen aus Kapitel 3.2.4, dass bereits ab einer Entfernung von 100 km der Slurry-Bahntransport günstiger ist als der Straßentransport.

Im Folgenden werden nun die Gründe für die Auswahl der drei Standorte näher erläutert:

- *Schillingstadt (Main-Tauber-Kreis)*: Der Standort Schillingstadt verfügt über einen in unmittelbarer Nähe (2,5 km entfernt) gelegenen Autobahnanschluss (Anschluss Boxberg, A 81), wobei die Transportstrecke nach Karlsruhe (MiRO) rund 150 km beträgt. Da an diesem Anlagenstandort keine Bahnstrecke vorbei führt, besteht nur die Möglichkeit, den Slurry via Straße zum zentralen Standort Karlsruhe zu transportieren. Wie die Abbildung 3.19 (S. 83) zeigt, weisen sehr viele der zum Einzugsgebiet dieses Standortes gehörenden Gemeinden sehr vorteilhafte Eigenschaften auf. Das überwiegend durch landwirtschaftliche Flächennutzung geprägte Einzugsgebiet (vgl. Abbildung 3.1, S. 40) ist durch ein großes Reststrohaufkommen (vgl. Abbildung 3.4, S. 47) bei gleichzeitig günstigen Erfassungskosten charakterisiert. Des Weiteren ist in diesem Einzugsgebiet ein relativ hohes Aufkommen an leicht verfügbarem Waldrestholz (vgl. Abbildung 3.9, S. 58) gegeben.
- *Forbach (Landkreis Rastatt)*: Der im Nordschwarzwald gelegene Standort Forbach ist an einer Bundesstraße (B 462) gelegen, über die der in rund 26 km entfernte Autobahnanschluss (Rastatt, A 5) erreicht wird. Insgesamt beträgt die Entfernung nach Karlsruhe (MiRO) rund 55 km und ist damit, verglichen mit den beiden anderen Standorten, der am nächst gelegene Anlagenstandort. Darüber hinaus liegt Forbach an einer Bahnstrecke, womit theoretisch die Möglichkeit bestünde, den Slurry via Schiene nach Karlsruhe zu transportieren. Wie in Kapitel 3.2.4 jedoch analysiert, ist ein Bahntransport aufgrund der geringen räumlichen Distanz zu Karlsruhe unter ökonomischen Aspekten in diesem Falle nicht sinnvoll. Entsprechend der in Kapitel 3.3.1.1 durchgeführten Standortanalyse wurden die im Einzugsgebiet liegenden Gemeinden dieses Standortes lediglich als mittelmäßig bzw. ungünstig bewertet (vgl. Abbildung 3.19), weshalb sich die Frage aufdrängt, warum dieser Standort überhaupt ausgewählt wurde. Bei diesem überwiegend durch Wald geprägten Einzugsgebiet ist zwar nur mit einem geringen Reststrohaufkommen zu rechnen, dagegen dürfte mit Blick auf die Abbildungen aus Anhang 6.41 (S. A-158) das Aufkommen an Waldrestholz sehr groß ausfallen. Da die Erfassung dieses Waldrestholzes aus überwiegend steilerem Gelände allerdings mit erheblichen Kosten verbunden ist (vgl. Anhang 6.44, S. A-161), stellt sich die Frage, ob aufgrund der geringen räumlichen Distanz zu Karlsruhe die zu erwartenden niedrigen Transportkosten diesen Nachteil kompensieren können.

- *Ehingen (Alb-Donau-Kreis)*: Mit einer Straßenentfernung von 190 km (über Ulm) liegt der Standort Ehingen (vgl. Abbildung 3.19) deutlich weiter als die beiden anderen Standorte von der zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage in Karlsruhe entfernt. Zwar könnte von Ehingen aus über verschiedene Bundesstraßen (B 465; B 492) der Slurry in direkter Richtung nach Karlsruhe zur Autobahn transportiert werden, doch dürfte in der Praxis der geringe Umweg über Ulm in Kauf genommen werden, um (über die B 311) den nächstgelegenen Autobahnanschluss in einer Entfernung von circa 35 km (Ulm West, A 8) zu erreichen. Darüber hinaus befindet sich am Standort Ehingen eine Bahnstrecke, über die der Slurry via Bahn nach Karlsruhe transportiert werden könnte, was in Anbetracht einer Transportentfernung von deutlich über 100 km sicherlich eine interessante Alternative darstellt. Das Einzugsgebiet des Standortes Ehingen ist gleichermaßen durch Ackerflächen wie auch Waldflächen geprägt und zeigt für die im Einzugsgebiet liegenden Gemeinden insgesamt günstige Eigenschaften. Dies ist zum einen auf die hohen Reststrohaufkommensdichten<sup>113</sup> bei gleichzeitig günstigen Stroherfassungskosten und zum anderen auf die relativ hohe Aufkommensdichte von leicht verfügbarem Waldrestholz zurückzuführen.

### 3.3.3 Standortbewertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Aufkommens- und Kostensituation für die in Abbildung 3.19 (S. 83) dargestellten Standorte und deren Einzugsgebiete vorgestellt und diskutiert. Diese Ergebnisse leiten sich aus den Auswertungen von Kapitel 3.1 und 3.2 ab und zeigen exemplarisch, inwieweit mit der in dieser Arbeit angewandten Methodik einzelne Anlagenstandorte analysiert und bewertet werden können.

Auch wenn in den Ausführungen zu diesem Kapitel ebenfalls zwischen dezentralem und integriertem Konzept unterschieden wird, sei doch ausdrücklich erwähnt, dass die Gegenüberstellung dieser beiden Konzepte – welche nur unter Berücksichtigung der Anlagen-/Produktionskosten erfolgen kann – erst im folgenden Kapitel 3.4 vorgestellt wird.

Im Falle des dezentralen Konzepts werden zudem auch die Kosten für den Slurrytransport vom jeweiligen Standort der dezentralen Anlagen (Schillingstadt, Forbach und Ehingen) zum Standort der zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage (Karlsruhe) mit einbezogen. Da die eigentlichen Slurry-Herstellkosten für alle drei ausgewählten Standorte in derselben Höhe angenommen wurden, können vergleichende Aussagen zu den Bereitstellungskosten auch ohne Berücksichtigung dieser Herstellkosten erfolgen.

Aus der hier dargelegten Gegenüberstellung verschiedener Standorte sollen letztlich auch Erkenntnisse abgeleitet werden, die allgemeingültig auf andere Standortplanungen (hinsichtlich Bioenergievorhaben) übertragbar sind. Auf eine Darstellung und Diskussion von Abschätzungen zum Energieverbrauch und zu den treibhausrelevanten Emissionen wird an dieser Stelle verzichtet, da diese nicht vollständig für gesamte Prozesskette analysiert wurden.

---

<sup>113</sup> Bei der Auswahl des Standortes wurde nicht berücksichtigt, dass nahe gelegene Gemeinden ein teilweise negatives Strohaufkommen aufweisen und daher ggf. ihren Strohbedarf durch umliegende Nachbargemeinden decken. Zum einen sind diese Ströme kaum abbildbar und zum anderen lässt die sich abzeichnende Entwicklung (vgl. Kapitel 3.1.3) einen weiteren Anstieg des Strohaufkommens erwarten.

### 3.3.3.1 *Dezentrales Konzept*

Die Ergebnisse zur Flächen- und Potenzialauswertung für die drei ausgewählten Pyrolyse-Anlagenstandorte sind Tabelle 3.9 zu entnehmen. Hierbei zeigt sich, dass die Einzugsgebiete der Standorte Ehingen und Schillingstadt durch eine sehr ähnliche Landnutzungsstruktur charakterisiert sind, das Einzugsgebiet von Schillingstadt jedoch über einen etwas höheren Flächenumfang an Acker- und Waldflächen verfügt. In Bezug zur Gesamtfläche liegt bei beiden Einzugsgebieten der Anteil der Waldflächen leicht unter und der Anteil der Ackerflächen deutlich über dem Durchschnitt von Baden-Württemberg. Dementsprechend hoch ist in diesen beiden Einzugsgebieten auch der Anteil der Getreideanbauflächen. Bei einer Ausweitung des Einzugsgebietradius von 15 auf 25 km ist bei dem Einzugsgebiet von Schillingstadt kaum eine Veränderung bezüglich der prozentualen Verteilung von Acker- und Waldflächen zu verzeichnen. Anders bei dem Einzugsgebiet von Ehingen; hier nimmt mit zunehmendem Radius die Ackerfläche leicht ab, die Waldfläche geringfügig zu.

Eine gänzlich andere Charakteristik zeigt das Einzugsgebiet des Standortes Forbach. Hier liegt der Anteil der Waldflächen erheblich über dem Durchschnittswert von Baden-Württemberg. Mit Ausweitung des Radius nimmt der Waldanteil allerdings deutlich ab, da dann die durch Wein- und Obstbau geprägten Flächen der Rheinebene mit im Einzugsgebiet liegen. Insgesamt gesehen haben Ackerflächen im Einzugsgebiet des Standortes Forbach nahezu keine Bedeutung.

Hinsichtlich der frei verfügbaren Biomasseaufkommen steht Schillingstadt, gefolgt von Ehingen, an erster Stelle. Die Aufkommensdichten (Reststroh und Waldrestholz zusammen) in diesen Einzugsgebieten liegen hierbei deutlich über dem Durchschnittswert von Baden-Württemberg, wobei eine Aufteilung der Dichten nach Stroh und Holz zeigt, dass die Aufkommensdichte von Waldrestholz, sowohl in Ehingen als auch in Schillingstadt, unter dem Landeswert liegt und somit die insgesamt hohe Aufkommensdichte durch das Reststroh bedingt ist.

Interessant ist ein Blick auf die Aufkommenssituation des Einzugsgebietes von Forbach. Hier ist das Waldrestholzaufkommen zwar nahezu doppelt so hoch wie bei den beiden anderen Anlagenstandorten, dennoch kann der Nachteil fehlender Getreideanbauflächen und damit Strohaufkommen dadurch nicht ausgeglichen werden. Insgesamt liegt somit die Aufkommensdichte sogar unter den Durchschnittswerten von Baden-Württemberg.

Letztlich zeigt sich bei Auswertung der Aufkommenssituation zum Einzugsgebiet des Standortes Forbach, dass Einzugsgebiete mit einem hohen Strohaufkommen klare Präferenzen besitzen, insbesondere auch, da in diesen Einzugsgebieten neben dem Strohaufkommen zumeist auch leicht bzw. kostengünstig verfügbare Holzaufkommen zu verzeichnen sind.

**Tabelle 3.9: Flächen und Biomasseaufkommen der drei ausgewählten Pyrolyse-Anlagenstandorte des dezentralen Konzepts**

<b>Standort</b>		<b>Ehingen</b>		<b>Forbach</b>		<b>Schillingstadt</b>		<b>BW<sup>a)</sup></b>
<b>Radius des Einzugsgebietes (km)</b>		<b>15</b>	<b>25</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	
<b>Flächen</b>								
<b>Anzahl der Gemeinden im Einzugsgebiet</b>		24	61	11	51	12	36	1.111
<b>Kreisfläche (ha)<sup>b)</sup></b>		70.686	196.350	70.686	196.350	70.686	196.350	-
<b>Gesamtfläche aller Gemeinden im Einzugsgebiet (ha)<sup>c)</sup></b>		67.384	196.069	65.899	203.408	76.935	200.083	3.578.860
davon Waldflächen	Insgesamt (ha)	18.637	60.859	52.530	130.389	25.078	67.587	1.323.248
	Anteil am Einzugsgebiet (%)	28	31	80	64	33	34	40
davon Ackerflächen	Insgesamt (ha)	31.045	76.675	1.235	17.997	35.372	88.979	953.246
	Anteil am Einzugsgebiet (%)	46	39	2	9	46	44	27
davon Getreideanbauflächen	Insgesamt (ha)	18.928	47.281	377	5.693	21.786	53.301	482.900
	Anteil an der Ackerfläche (%)	61	62	31	32	62	60	51
<b>Biomasseaufkommen<sup>d)</sup></b>								
<b>Aufkommen</b>	Insgesamt (Mg TM)	<b>63.165</b>	<b>166.734</b>	<b>37.744</b>	<b>107.319</b>	<b>78.446</b>	<b>190.386</b>	<b>2.198.126</b>
	Dichte (Mg TM/ha)	<b>0,93</b>	<b>0,85</b>	<b>0,57</b>	<b>0,53</b>	<b>1,0</b>	<b>0,95</b>	<b>0,61</b>
davon Reststroh	Insgesamt (Mg TM)	45.242	111.666	187	8.917	57.904	135.132	1.003.063
	Dichte (Mg TM/ha)	0,67	0,57	0,003	0,04	0,75	0,67	0,28
	Anteil am Gesamtaufkommen (%)	72	67	0,5	8	74	71	46
davon Waldrestholz (WRH)	Insgesamt (Mg TM)	17.923	55.069	37.556	98.402	20.542	55.253	1.195.063
	Dichte (Mg TM/ha)	0,26	0,28	0,57	0,48	0,27	0,28	0,33
	Anteil am Gesamtaufkommen (%)	28	33	99,5	92	26	29	54
	davon leicht (Mg TM)	11.235	36.782	11.023	40.159	11.083	31.541	624.778
	Anteil am ges. WRH-Aufk. (%)	63	67	29	41	54	57	52
	davon möglich (Mg TM)	5.843	16.159	16.348	37.557	8.927	21.024	433.417
	Anteil am ges. WRH-Aufk. (%)	33	29	44	38	43	38	36
	davon schwer (Mg TM)	845	2.128	10.185	20.686	531	2.688	136.868
Anteil am ges. WRH-Potenz. (%)	4	4	27	21	3	5	11	

Anmerkungen: a) Summen- bzw. Durchschnittswerte für Baden-Württemberg.

b) Fläche des kreisförmigen Einzugsgebietes mit dem Radius R.

c) Summe der Bodenfläche aller zu einem Einzugsgebiet gehörenden Gemeinden; vgl. Anhang 6.38 (S. A-155).

d) Bezugsgröße für die Berechnung der Dichten ist die Bodenfläche aller zum Einzugsgebiet gehörenden Gemeinden.

Hinsichtlich der in Tabelle 3.10 dargestellten Erfassungskosten schneidet der Standort Ehingen am günstigsten ab, wobei die durchschnittlichen Erfassungskosten (für Reststroh und Waldrestholz zusammen) mit knapp 60 €/Mg TM nur geringfügig unter denen von Schillingstadt liegen. Mit einem Wert von annähernd 100 €/Mg TM sind die Erfassungskosten für den Standort Forbach im Vergleich dazu außergewöhnlich hoch.

Wie bereits dargelegt, bedingt eine Ausweitung des Einzugsgebietes grundsätzlich eine Steigerung des Biomasseaufkommens. Allerdings verdeutlicht sich am Beispiel der Standorte Ehingen und Schillingstadt, dass mit dieser Ausweitung aber auch eine Steigerung der durchschnittlichen Erfassungskosten verbunden sein kann; insbesondere dann, wenn diese zusätzliche Biomasse nur unter erhöhtem Kostenaufwand erfasst bzw. mobilisiert werden kann. Insofern wird eine beliebige Ausweitung des Einzugsgebietes nicht in jedem Falle von Vorteil sein, obwohl durch das höhere Aufkommen größere Anlagenleistungen realisiert werden können, die aufgrund von Skalen- bzw. Kostendegressionseffekten ökonomische Vorteile versprechen (vgl. Kapitel 3.4). Im Falle zunehmender Erfassungskosten könnte die Biomasse ggf. selektiv, d.h. nur an denjenigen Orten erfasst werden, an denen diese kostengünstig zur Verfügung steht. Damit wäre, wie generell bei Ausweitung des Einzugsgebietes zu erwarten, eine Steigerung der Transportkosten verbunden. Doch zeigen die ermittelten Transportkostensätze aus Tabelle 3.10, dass diese nur rund 20 bis 30 % der Erfassungskosten betragen und daher sehr viel weniger bedeutend sind als gemeinhin angenommen. Zudem hat eine Steigerung der Transportentfernung – wie hier zum Beispiel um rund 10 km – nur geringfügige Auswirkungen auf die Transportkosten, weil ein maßgeblicher Anteil davon durch die entfernungsunabhängigen Kosten für Rüsten, Warten und Laden verursacht werden (vgl. Kapitel 3.2.4).

Aus den Kosten für Erfassung- und Transport ergeben sich schließlich die Bereitstellungskosten der Biomasse frei Anlage, die am Standort Ehingen rund 75 €/Mg TM (bei  $R = 25$  km) und am Standort Schillingstadt rund 78 €/Mg TM betragen. Dagegen ist die Bereitstellung am Standort Forbach mit Kosten von deutlich über 100 €/Mg TM erheblich teurer. Werden für einen Vergleich der einzelnen Standorte darüber hinaus noch die in Tabelle 3.10 dargestellten Slurry-Transportkosten mit einbezogen, zeigt sich für den Standort Forbach, dass die hohen Erfassungskosten durch die relativ geringen Slurry-Transportkosten nicht kompensiert werden können. Somit ist der Standort Forbach schließlich aufgrund der im Vergleich zu den beiden Standorten schlechteren Aufkommens- als auch Kostensituation als Pyrolyse-Anlagenstandort letztendlich nicht geeignet.

Unter Berücksichtigung der Slurry-Transportkosten ergeben sich für die beiden anderen Standorte in der Summe nahezu identische Kostensätze. Hierbei resultiert für den Standort Ehingen im Falle des Slurrytransportes mit der Bahn<sup>114</sup> sogar ein kleiner Kostenvorteil. Letztlich aber erscheinen beide Standorte für eine Pyrolyseanlage gleichermaßen gut geeignet zu sein, wobei der Standort Schillingstadt durch ein höheres Aufkommen und der Standort Ehingen durch etwas geringere Erfassungskosten gekennzeichnet ist.

---

<sup>114</sup> Die Bereitstellung der Gleisanbindung ist mit Kosten verbunden, die im Modell nicht mit einberechnet wurden. Deshalb könnte dieser geringe Kostenvorteil wieder aufgehoben werden.

Tabelle 3.10: Erfassungs-, Transport- und Bereitstellungskosten der drei ausgewählten Pyrolyse-Anlagenstandorte des dezentrales Konzept

Standort		Ehingen		Forbach		Schillingstadt		BW <sup>a)</sup>
Radius des Einzugsgebietes (km)		15	25	15	25	15	25	
<b>Erfassungskosten (€/Mg TM)</b>								
<b>Erfassungskosten für Reststroh und Waldrestholz</b>	<b>Insgesamt <sup>b)</sup> (gewichtet)</b>	<b>55</b>	<b>58</b>	<b>113</b>	<b>92</b>	<b>59</b>	<b>61</b>	<b>74</b>
nur Stroherfassung	<b>insgesamt</b>	48	51	77	71	53	53	63
nur Holzerfassung	<b>insgesamt</b>	73	71	113	94	79	79	83
	<i>leicht</i>	58	58	61	60	55	56	57
	<i>möglich</i>	110	111	117	114	106	106	108
	<i>schwer</i>	136	140	151	147	135	136	140
<b>Transport (vom Aufkommensort bis zur Pyrolyseanlage)</b>								
<b>Mittlere Transportentfernung (km) <sup>c)</sup></b>		14	24	14	24	14	24	
<b>Transportkosten (€/Mg TM)</b>								
<b>Strohtransport (Quaderballen, 86 % TM)</b>	<b>Schlepper</b>	18	20	18	20	18	20	
	dv. Rüsten, Laden und Warten	11	11	11	11	11	11	
	<b>Lkw</b>	19	21	19	21	19	21	
	dv. Rüsten, Laden und Warten	15	15	15	15	15	15	
<b>Hackschnitzeltransport (50 % TM)</b>	<b>Schlepper</b>	18	21	18	21	18	21	
	dv. Rüsten, Laden und Warten	7	7	7	7	7	7	
	<b>Lkw</b>	13	15	13	15	13	15	
	dv. Rüsten, Laden und Warten	5	5	5	5	5	5	
<b>Hackschnitzeltransport (65 % TM)</b>	<b>Schlepper</b>	19	22	19	22	19	22	
	dv. Rüsten, Laden und Warten	7	7	7	7	7	7	
	<b>Lkw</b>	10	11	10	11	10	11	
	dv. Rüsten, Laden und Warten	4	4	4	4	4	4	
<b>Bereitstellungskosten frei Pyrolyseanlage (€/Mg TM)</b>								
<b>Strohballen (86 % TM)</b>	Schlepper	66	71	95	91	71	73	
<b>Hackschnitzel (50 % / 65 % TM)</b>	Lkw	84	84	124	107	90	92	
<b>Bereitstellungskosten</b>	<b>Insgesamt (gewichtet) <sup>b)</sup></b>	<b>71</b>	<b>75</b>	<b>124</b>	<b>105</b>	<b>76</b>	<b>78</b>	
<b>Slurrytransport (von der Pyrolyseanlage bis zur zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage)</b>								
<b>Streckendaten (km)</b>								
<b>Fahrstrecke bis Karlsruhe (MiRO) <sup>d)</sup></b>		190		55		150		
<i>Davon bis zum nächst gelegenen Autobahnanschluss</i>		35		26		3		
<b>Luftlinie bis Karlsruhe</b>		135		42		101		
<b>Mittlere Transportentfernung <sup>e)</sup></b>		190		60		143		
<b>Slurry-Transportkosten (€/Mg)</b>								
<b>Lkw</b>	Tanksattelaufleger	17		8		14		
<b>Bahn</b>	Tankwagen Direktbefüllung	14		-		-		

Anmerkungen: a) Durchschnittswerte für Baden-Württemberg.

b) Die Gewichtung der Kosten erfolgte anhand der Aufkommen.

c) Diese Entfernung wurde entsprechend der Formel für kreisförmige Einzugsgebiete (vgl. Kapitel 3.2.1) berechnet.

d) Dieser Wert ergibt sich aus der Auswertung mit einem Routenplaner.

e) Dieser Wert ergibt sich aus der Luftlinienentfernung multipliziert mit Wurzel 2 (vgl. Kapitel 3.2.1).

### 3.3.3.2 Integriertes Konzept

Die Ergebnisse zur Auswertung der Flächen- und Aufkommenssituation für die Einzugsgebiete des integrierten Konzepts zeigt Tabelle 3.11. Zunächst sei auf die bereits erwähnte Einschränkung hingewiesen, dass hierbei die außerhalb Baden-Württembergs liegenden Flächen nicht berücksichtigt wurden (vgl. Abbildung 3.19, S. 83), weshalb die Unterschiede<sup>115</sup> zwischen der eigentlichen Kreisfläche und der Summe der Flächen aller im Einzugsgebiet liegenden Gemeinden entsprechend hoch sind.

**Tabelle 3.11: Flächen und Biomasseaufkommen für die Einzugsgebiete der zentralen Anlage**

Standort		Karlsruhe (MiRO)			BW <sup>a)</sup>
		50	100	150	
<b>Flächen</b> (nur innerhalb Baden-Württembergs liegend)					
<b>Anzahl der Gemeinden im Einzugsgebiet</b>		146	524	955	1.111
<b>Kreisfläche (ha) <sup>b)</sup></b>		785.398	3.141.592	7.068.583	-
<b>Gesamtfläche aller Gemeinden im Einzugsgebiet (ha) <sup>c)</sup></b>		439.436	1.538.229	3.084.682	3.578.860
davon <b>Insgesamt (ha)</b>		185.712	631.569	1.251.785	1.323.248
Waldflächen	Anteil am Einzugsgebiet (%)	42	41	41	40
davon <b>Insgesamt (ha)</b>		111.670	390.439	846.476	953.246
Ackerflächen	Anteil am Einzugsgebiet (%)	25	25	27	27
davon <b>Insgesamt (ha)</b>		47.637	183.888	435.152	482.900
davon Getreide- anbauflächen	Anteil an der Ackerfläche (%)	43	47	51	51
<b>Biomasseaufkommen</b> (nur innerhalb Baden-Württembergs) <sup>d)</sup>					
<b>Aufkommen</b> <b>Insgesamt (Mg TM)</b>		<b>270.587</b>	<b>947.797</b>	<b>1.993.483</b>	<b>2.198.126</b>
Dichte (Mg TM/ha)		<b>0,6</b>	<b>0,6</b>	<b>0,65</b>	<b>0,61</b>
davon <b>Insgesamt (Mg TM)</b>		119.424	431.625	965.398	1.003.063
Reststroh	Dichte (Mg TM/ha)	0,27	0,28	0,31	0,28
Anteil am Gesamtaufk. (%)		44	46	48	46
davon <b>Insgesamt (Mg TM)</b>		151.163	516.172	1.028.085	1.195.063
Dichte (Mg TM/ha)		0,34	0,33	0,33	0,33
Anteil am Gesamtaufk. (%)		56	54	52	54
davon leicht (Mg TM)		85.397	249.964	525.027	624.778
Anteil am gesamten Waldrestholzaufkommen (%)		56	48	51	52
davon möglich (Mg TM)		48.906	196.213	378.442	433.417
Anteil am gesamten Waldrestholzaufkommen (%)		32	38	37	36
davon schwer (Mg TM)		16.860	69.995	124.616	136.868
Anteil am gesamten Waldrestholzaufkommen (%)		11	14	12	11

**Anmerkungen:** a) Summen- bzw. Durchschnittswerte für Baden-Württemberg.

b) Fläche des kreisförmigen Einzugsgebietes mit dem Radius R.

c) Summe der Bodenfläche aller zu einem Einzugsgebiet gehörenden Gemeinden; vgl. Anhang 6.38 (S. A-155).

d) Bezugsgröße für die Berechnung der Dichten ist die Bodenfläche aller zum Einzugsgebiet gehörenden Gemeinden

<sup>115</sup> Die Unterschiede bedingen natürlich auch, dass das absolute Aufkommen in der Praxis entsprechend höher wäre. Da ein Vergleich der einzelnen Einzugsgebiete jedoch über die Dichte erfolgt, ist dies nicht weiter von Bedeutung.

Wie die Auswertungen zeigen, ist bei allen Einzugsgebieten (Radius  $R = 50, 100$  und  $150$  km) der Anteil der Wald- bzw. Ackerflächen, bezogen auf die Gesamtfläche aller im Einzugsgebiet liegenden Gemeinden, nahezu konstant. Dieser Anteil beträgt bei den Waldflächen rund  $41\%$  und bei den Ackerflächen rund  $26\%$ , womit für alle Einzugsgebiete die Flächennutzung mehr oder weniger genau mit dem Durchschnittswert von Baden-Württemberg übereinstimmt.

Auch hinsichtlich der Aufkommen ergibt sich für alle Einzugsgebiete eine nahezu gleiche Situation, wobei ein Vergleich der Situation aufgrund der unterschiedlichen Flächenumfänge nur über die Dichte erfolgen kann. Insgesamt beträgt die Aufkommensdichte für Reststroh und Waldrestholz zusammen rund  $0,6$  Mg TM/ha Bodenfläche. Einzeln betrachtet liegt hierbei die durchschnittliche Dichte des Waldrestholzaufkommens ( $0,33$  Mg TM/ha) etwas über der des Reststrohs ( $0,28$  Mg TM/ha).

Werden die für die einzelnen Einzugsgebiete ermittelten Aufkommensdichten mit denen zum dezentralen Konzept verglichen (vgl. Tabelle 3.9, S. 87), zeigt sich, dass bei den kleineren Einzugsgebieten des dezentralen Konzeptes zum Teil erheblich höhere Aufkommensdichten erreicht werden. Die Ursache hierfür ist durch die ungleiche Landnutzung bzw. inhomogene Verteilung der Biomasseaufkommen bedingt, die mit zunehmender Ausdehnung des Einzugsgebietes die tatsächliche Aufkommensdichte maßgeblich beeinflusst.

Dieselbe Problematik ergibt sich damit auch hinsichtlich der Erfassungskosten. Schließlich wird anhand der in Tabelle 3.12 (S. 92) dargestellten durchschnittlichen Erfassungskosten ersichtlich, dass diese Kosten zwar für alle Einzugsgebiete ( $R = 50, 100$  und  $150$  km) nahezu identisch (rund  $74$  €/Mg TM) sind, deutlich aber über den Erfassungskosten der dezentralen Anlagenstandorte (Ehingen und Schillingstadt) liegen.

Hierbei verdeutlicht sich abermals die Problematik, nicht nur hinsichtlich der Aufkommenssituation, sondern auch bezüglich der Erfassungskosten, in einem zunehmend größer werdenden Biomasse-Einzugsgebiet über die gesamte Fläche gleichmäßig günstige Gegebenheiten vorzufinden. Ausgehend von einer konstanten Anlagenleistung und einem damit klar definierten Brennstoffbedarf könnten zwar die durchschnittlichen Erfassungskosten durch eine selektive Entnahme der Biomasse an günstigen Aufkommensorten gesenkt werden, doch wäre damit zwangsläufig eine Ausdehnung des Erfassungsgebietes verbunden, was einen Anstieg der Transportstrecken und damit auch der Transportkosten zur Folge hätte.

So betragen die gesamten Bereitstellungskosten für Reststroh und Waldrestholz frei Vergasungs-/Syntheseanlage je nach Transportentfernung durchschnittlich zwischen  $94$  bis  $110$  €/Mg TM. Hierbei zeigt sich, dass trotz der recht unterschiedlichen (mittleren) Transportentfernungen ( $47, 94$  bzw.  $141$  km) die einzelnen Kostensätze nur relativ wenig voneinander abweichen. Dies ist im Wesentlichen auf den Einfluss der entfernungsunabhängigen Transportkosten sowie den mit der Biomasseerfassung verbundenen Kosten zurückzuführen.

Letztlich kann für die hier festgelegten Einzugsgebiete ( $R = 50, 100$  und  $150$  km) keine eindeutige ökonomische Präferenz zugunsten eines der ausgewählten Einzugsgebietsradien herausgearbeitet werden. Doch scheinen größere Einzugsgebiete gegenüber kleineren ökonomisch insofern vorteilhafter zu sein, da ein erheblich höheres Aufkommen bei gleichzeitig nur wenig höheren Bereitstellungskosten zur Verfügung steht.

Im Zuge dieser anwachsenden Aufkommen können dann auch höhere Anlagenleistungen realisiert werden, die sich im Hinblick auf die Produktionskosten, bedingt durch Skalen- und Kostendegressionseffekte, vorteilhaft auswirken. Im folgenden Kapitel 3.4 wird hierauf näher eingegangen.

**Tabelle 3.12: Erfassungs-, Transport- und Bereitstellungskosten für die Einzugsgebiete der zentralen Anlage**

Standort		Karlsruhe (MiRO)			BW <sup>a)</sup>
		50	100	150	
Radius des Einzugsgebietes (km)					
<b>Erfassungskosten (€/Mg TM)</b>					
Erfassungskosten für Reststroh und Waldrestholz	Insgesamt (gewichtet) <sup>b)</sup>	73	75	73	74
	nur Stroherfassung	63	63	62	63
nur Holzerfassung	Insgesamt	81	84	84	83
	leicht	60	58	57	57
	möglich	114	110	109	108
	schwer	148	142	140	140
<b>Transport (vom Aufkommensort bis zur zentralen Vergasungsanlage)</b>					
Mittlere Transportentfernung (km) <sup>c)</sup>		47	94	141	
<b>Transportkosten (€/Mg TM)</b>					
Strohtransport (Quaderballen, 86 % TM)	<b>Schlepper</b>	27	39	52	
	dv. Rüsten, Warten und Laden	11	11	11	
	<b>Lkw</b>	25	32	39	
	dv. Rüsten, Warten und Laden	15	15	15	
Hackschnitzeltransport (50 % TM)	<b>Schlepper</b>	29	45	61	
	dv. Rüsten, Warten und Laden	7	7	7	
	<b>Lkw</b>	20	29	39	
	dv. Rüsten, Warten und Laden	5	5	5	
	<b>Bahn</b>	-	37	42	
	Vorlauf <sup>d)</sup>	-	14	14	
dv. Rüsten, Warten und Laden	-	3	3		
Hackschnitzeltransport (65 % TM)	<b>Schlepper</b>	30	46	62	
	dv. Rüsten, Warten und Laden	7	7	7	
	<b>Lkw</b>	15	22	30	
	dv. Rüsten, Warten und Laden	4	4	4	
	<b>Bahn</b>	-	29	32	
	Vorlauf <sup>d)</sup>	-	11	11	
dv. Rüsten, Warten und Laden	-	2	2		
<b>Bereitstellungskosten frei Anlage (€/Mg TM)</b>					
Stroh (86 % TM)	Lkw	88	95	101	
Hackschnitzel (50 % / 65 % TM)	Lkw	98	109	118	
Bereitstellungskosten	Insgesamt (gewichtet) <sup>b)</sup>	94	103	110	

Anmerkungen: a) Durchschnittswerte für Baden-Württemberg.

b) Die Gewichtung der Kosten erfolgte anhand der Aufkommen.

c) Diese Entfernung wurde entsprechend der Formel für kreisförmige Einzugsgebiete (vgl. Kapitel 3.2.1) berechnet.

d) Bei einem Lkw-Vorlauf über eine Strecke von 20 km.

### 3.4 Gegenüberstellung von dezentralem und integriertem bioliq<sup>®</sup>-Konzept

Die Fragestellungen im Hinblick auf die bestehenden Unterschiede zwischen dezentralem und integriertem Konzept waren bisher im Wesentlichen auf die Bereitstellung und Logistik und den damit verbundenen Kosten ausgerichtet. Eine unmissverständliche Gegenüberstellung und Diskussion zu den beiden unterschiedlichen Konzepten kann allerdings nur erfolgen, indem auch die bisher nicht betrachteten Kostenanteile für die Kraftstoffherstellung (Brennstoffvorbereitung, Pyrolyse, Vergasung, Gaskonditionierung, FT-Synthese) mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Dennoch soll im Rahmen dieser Arbeit auf eine überwiegend an technischen Aspekten orientierten Gegenüberstellung der beiden Varianten verzichtet werden. Diesbezüglich sei auf einen aktuellen wissenschaftlichen Bericht<sup>116</sup> des Forschungszentrums Karlsruhe (Leible et al., 2007) verwiesen, an dessen Bearbeitung der Autor dieser Arbeit mit beteiligt war.

Wie Tabelle 3.13 (S. 95) veranschaulicht, erfolgt die eigentliche Gegenüberstellung der beiden Konzepte anhand der in Kapitel 3.3 ausgewählten und untersuchten Standorte bzw. Einzugsgebiete. Insofern lässt es sich nicht vermeiden, die dort getroffenen Aussagen hier teilweise nochmals aufzugreifen.

Um einen Vergleich der beiden Konzepte zu ermöglichen, wurde bei den Kostenkalkulationen zum dezentralen Konzept zunächst von einer Vergaserleistung von 1.250 MW<sub>in</sub> ausgegangen. Diese Leistung entspricht derjenigen, die beim integrierten Konzept durch das Biomasseaufkommen (Reststroh und Waldrestholz) in einem Einzugsgebiet mit dem Radius von 150 km – ohne Berücksichtigung der außerhalb Baden-Württembergs liegenden Flächen bzw. Biomasseaufkommen – realisiert werden könnte. Durch die Ausklammerung der außerhalb Baden-Württembergs liegenden Flächen bzw. Biomasseaufkommen und der ausschließlichen Betrachtung nur einiger weniger Pyrolyseanlagen ist ein Vergleich der beiden Konzepte in methodischer Hinsicht allerdings nicht unproblematisch. Deshalb sind in Tabelle 3.13 (S. 95) neben den in Kapitel 3.3.2 ausgewählten und untersuchten Standorten bzw. Einzugsgebieten auch Kostengrößen für entsprechende konzeptspezifische Referenzanlagen mit angegeben. Bei diesen Anlagen wurde von einer Vergaserleistung von jeweils 4.500 MW<sub>in</sub><sup>117</sup> ausgegangen. Diese Leistung ergibt sich (für das integrierte Konzept) aus dem durchschnittlichen Biomasseaufkommen (Reststroh und Waldrestholz) eines kreisförmigen Einzugsgebiets<sup>118</sup> mit einem Radius von 150 km bei einer angenommenen Aufkommensdichte von 1 Mg TM/ha (vgl. Anhang 6.50 S. A-168).

---

<sup>116</sup> Diesem Bericht sind auch die in Tabelle 3.13 (S. 95) dargelegten Kostensätze für die Slurryproduktion und Vergasung/Synthese entnommen.

<sup>117</sup> Beim dezentralen Konzept hängt die realisierbare Vergaserleistung von der Menge des bereitgestellten Slurry ab, welche wiederum von der Leistung und Anzahl der einzelnen Pyrolyseanlagen bestimmt wird. Dagegen ergibt sich im Falle des integrierten Konzepts die realisierbare Anlagenleistung aus der Menge der bereitgestellten bzw. eingesetzten Biomasse.

Als Umrechnungshilfe sei vermerkt, dass eine Eingangsleistung an Biobrennstoffen von 4.500 MW<sub>in</sub> einer jährlichen Produktion von ca. 1 Mio. Mg FT-Kraftstoff (und damit lediglich rund 6 - 10 % der Outputmenge einer herkömmlichen Mineralöl-Raffinerie) entspricht.

<sup>118</sup> Hierbei wurde von den in dieser Arbeit hergeleiteten durchschnittlichen Aufkommensdichten und Erfassungskostensätzen ausgegangen und diese gleichermaßen für die außerhalb BW liegenden Flächen angenommen.

Grundsätzlich ist aus den Werten von Tabelle 3.13 (S. 95) erkennbar, dass sich mit zunehmendem Umfang des Einzugsgebietes und einem damit verbundenen Anstieg des Biomasseaufkommens eine höhere Anlagenleistung und in diesem Zuge auch geringere Herstellkosten<sup>119</sup> (für Slurryproduktion, Vergasung, Gaskonditionierung und FT-Synthese) realisieren lassen. Diese mit zunehmender Anlagenleistung einhergehende Kostenverringerung bezüglich der Herstellkosten ist durch die bereits erwähnten (Kosten-) Degressionseffekte bedingt. Ausgehend von derselben Anlagenleistung schneidet (bezüglich der Herstellkosten) das integrierte Konzept etwas besser ab, weil durch die Integration von Pyrolyse und Vergasung/Synthese in einer Anlage beispielsweise die Möglichkeit besteht, die Abwärme der Synthese zur Trocknung der feuchten Biomasse zu verwenden. Hierdurch ergibt sich eine Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades<sup>120</sup> und damit letztlich ein ökonomischer Vorteil. Die Ergebnisse aus Tabelle 3.13 zeigen zudem, dass sich die Gesteungskosten (FT-Kraftstoff) für alle betrachteten Fälle in einer Spanne zwischen 28 und 39 €/GJ<sub>FT</sub><sup>121</sup> bewegen; dies entspricht einem Produktpreis<sup>122</sup> von 0,96 bis 1,34 €/l frei Vergasungs-/Syntheseanlage.

Die Gesteungskosten der FT-Kraftstoffe nach dem dezentralen Konzept liegen für die Standorte Ehingen und Schillingstadt bei rund 30 €/GJ<sub>FT</sub>, wobei die Kosten bei einer Ausdehnung des Einzugsgebietes von R = 15 auf R = 25 km nahezu unverändert bleiben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Mehrkosten für Erfassung und Transport durch günstigere Herstellkosten für den FT-Kraftstoff kompensiert werden. Aufgrund der hohen Erfassungskosten und der höheren Herstellkosten ist der Standort Forbach im Vergleich zu den Standorten Ehingen und Schillingstadt deutlich benachteiligt.

Bei Betrachtung der Einzugsgebiete (R = 50, 100 und 150 km) zum integrierten Konzept verdeutlichen sich die durch die Anlagenleistung verursachten Kostendegressionseffekte. So steigen bei Ausweitung des Einzugsgebietes zwar die Transportkosten, doch werden diese durch die sinkenden Herstellkosten für den FT-Kraftstoff mehr als ausgeglichen. Für das Einzugsgebiet mit einem Radius von 150 km betragen somit die Gesteungskosten rund 31 €/GJ<sub>FT</sub> – hierbei wurde aber nur das in Baden-Württemberg verfügbare Biomasseaufkommen berücksichtigt.

Ausgehend von derselben Vergaserleistung (1.250 MW<sub>in</sub>) sind die Gesteungskosten beim integrierten Konzept damit allerdings höher als für die dezentralen Standorte (Ehingen und Schillingstadt). Der Grund für diesen Unterschied ist vor allem auf die deutlich höheren Erfassungskosten (vgl. Kapitel 3.3.3.2) zurückzuführen. Darüber hinaus zeigt der Vergleich der beiden Konzepte, dass für das integrierte Konzept die Produktionskosten zwar günstiger sind als für das dezentrale Konzept, die Transportkosten dagegen beim dezentralen Konzept aufgrund der höheren Transporteffizienz (Slurrytransport) günstiger ausfallen.

---

<sup>119</sup> Nicht zu verwechseln mit den Gesteungskosten, welche neben den Herstellkosten zudem noch die Kosten für die Erfassung und den Transport beinhalten.

<sup>120</sup> Insgesamt bewegen sich die Netto-Wirkungsgrade des gesamten Bereitstellungsprozesses (Biomasseerfassung, Transport, Produktion) in einer Spanne von 32 bis 38 %. Der Energieaufwand für die Biomassebereitstellung beträgt, je nach Biomasse und Logistik, rund 5 bis 12 % des Energiegehaltes des erzeugten FT-Kraftstoffs.

<sup>121</sup> GJ<sub>FT</sub>: Bezugsbasis dieser Energieeinheit ist das Fischer-Tropsch Endprodukt. Für die Umrechnung in Liter wurde ein Heizwert von 34,6 MJ/l unterstellt.

<sup>122</sup> Ohne Berücksichtigung von Mineralöl- und Mehrwertsteuer.

**Tabelle 3.13: Kostenvergleich der FT-Kraftstoffbereitstellung nach dem dezentralen und integrierten Konzept – am Beispiel der ausgewählten Standorte**

	Dezentrales Konzept a)					Integriertes Konzept a)				
	Ehingen		Forbach		Schillingstadt	Referenz-anlage	Karlsruhe (MiRO)		Referenzanlage	
	15	25	15	25	15	30 b)	50	100	150	
Radius des Einzugsgebietes (km)	15	25	15	25	15	30 b)	50	100	150	
Realisierbare Anlagenleistung (MW <sub>in</sub> )	40	105	25	60	50	4.500 c) d)	170	600	1.250 e)	
	1.250 e)									
<b>Kostendarstellung f)</b>										
Erfassung	8,5	8,8	18,1	13,7	9,1	11,0	12,4	12,5	12,1	11,9
Biomassetransport	2,9	3,2	2,2	2,2	2,9	3,6	3,5	4,6	6,1	6,0
Slurryproduktion (Pyrolyse) g)	7,2	6,6	7,8	6,9	7,0	4,6	5,5	4,9	4,7	3,2
Slurrytransport	2,1	2,0	1,1	1,1	1,9	2,0	0	0	0	0
Vergasung und Synthese (einschl. Gaskonditionierung)	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	7,1	16,7	11,0	8,6	6,5
<b>Gesamtkosten bzw. Geste-hungskosten</b>	<b>30,2</b>	<b>30,1</b>	<b>38,7</b>	<b>33,4</b>	<b>30,4</b>	<b>28,3</b>	<b>38,1</b>	<b>33,0</b>	<b>31,5</b>	<b>27,6</b>
	<b>1,05</b>	<b>1,05</b>	<b>1,34</b>	<b>1,16</b>	<b>1,06</b>	<b>0,98</b>	<b>1,32</b>	<b>1,14</b>	<b>1,09</b>	<b>0,96</b>
Anteil der Erfassungs- und Transportkosten	45	47	55	51	46	58	42	52	58	65
Anteil der Herstellkosten	55	53	45	49	54	42	58	48	42	35

Anmerkungen: a) Sowohl bei Bestimmung der Anlagenleistung als auch bei Ableitung der Kostensätze wurde davon ausgegangen, dass die energieautarken Anlagen gleichermaßen mit Reststroh (86 % TM) und Waldrestholz (65 % TM) betrieben werden. Eine Ausnahme bildet der Standort Forbach; hier wurde ausschließlich von einer Waldrestholznutzung ausgegangen.

b) Der angegebene Radius bezieht sich auf das Einzugsgebiet einer einzelnen dezentralen Pyrolyseanlage.

c) Die Versorgung der zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage erfolgt durch eine Reihe einzelner Pyrolyseanlagen. Somit ergibt sich die hier angenommene Leistung summarisch aus der Leistung von einzelnen Pyrolyseanlagen.

d) Die Vergaserleistung von 4.500 MW<sub>in</sub> ergibt sich aus einer durchschnittlichen Aufkommensdichte (insgesamt 1 Mg TM/ha) von Reststroh und Waldrestholz in einem kreisförmigen Einzugsgebiet mit dem Radius von 150 km. Dabei sind auch die außerhalb Baden-Württembergs liegenden Flächen und deren Aufkommen mit einbezogen.

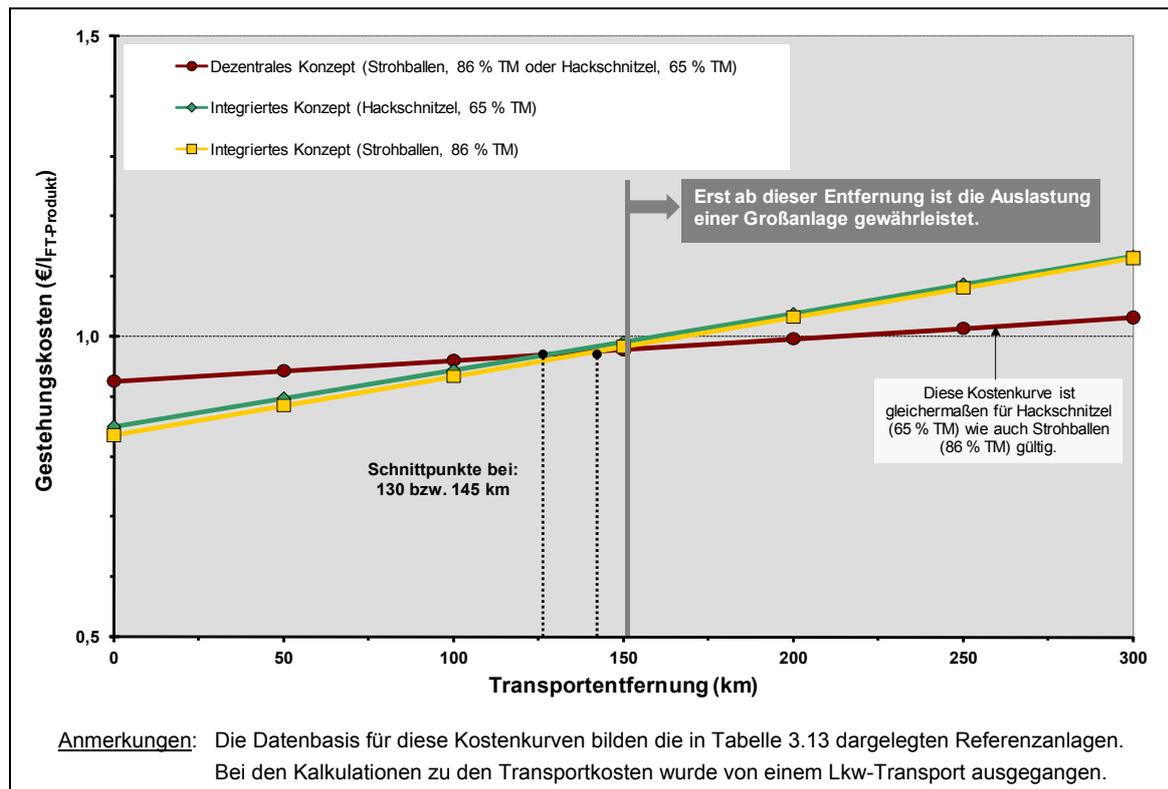
e) Um einen Vergleich der beiden unterschiedlichen Konzepte zu ermöglichen, wurde beim dezentralen Konzept von einer Vergaserleistung von 1.250 MW<sub>in</sub> ausgegangen. Diese Leistung ergibt sich durch das Biomasseaufkommen beim integrierten Konzept für einen Einzugsgebietsradius von 150 km am Standort Karlsruhe (MiRO), wenn nur Biomasse aus Baden-Württemberg berücksichtigt wird.

f) Alle hier dargestellten Kostensätze stellen Mittelwerte dar. Die Kosten für Erfassung und Transport leiten sich aus den in Tabelle 3.10 (S. 89) und Tabelle 3.12 (S. 92) dargestellten Ergebnissen ab. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden alle Kosten einheitlich auf das FT-Endprodukt bezogen. Dafür wurden je nach Produktionsschritt und Anlagenleistung unterschiedliche Wirkungsgrade mit einberechnet. Aufgrund dieser unterschiedlichen Wirkungsgrade ergeben sich für die beiden verglichenen Referenzanlagen dadurch Unterschiede hinsichtlich der Erfassungskosten, obwohl bei beiden von dem gleichen Erfassungskostensatz (€/Mg TM) ausgegangen wurde. Demnach liegt der spezifische Erfassungskostensatz beim integrierten Konzept höher, da dort ein Teil der Biomasse für die Trocknung eingesetzt wird.

g) Einschließlich Kosten für die Brennstoffvorbereitung.

h) Für die Umrechnung wurde für das FT-Endprodukt ein Heizwert von 34,6 MJ/l unterstellt. Der angegebene Kostensatz ist ohne Berücksichtigung von Steuern.

Ein Vergleich der beiden Konzepte auf Basis der Referenzanlagen lässt einen kleinen Kostenvorteil zugunsten des integrierten Konzeptes erkennen. Dies ist insbesondere auf die etwas geringeren Herstellkosten (Pyrolyse, Vergasung/Synthese) zurückzuführen. Da allerdings das dezentrale Konzept hinsichtlich der Transportkosten besser abschneidet und diese Kosten neben einem fixen auch durch einen variablen, d.h. von der Entfernung abhängigen Teil gebildet werden, stellt sich die Frage, ab welcher Transportstrecke die geringeren Transportkosten die etwas höheren Herstellkosten kompensieren und somit das dezentrale Konzept dadurch insgesamt wirtschaftlicher wird.



**Abbildung 3.20: FT-Gestehungskosten in Abhängigkeit der Transportentfernung**

Das Ergebnis einer solchen Gegenüberstellung ist Abbildung 3.20 zu entnehmen. Demnach ergeben sich für den Hackschnitzel- bzw. Strohballentransport mit dem Lkw bereits ab einer Entfernung von ca. 130 bzw. 145 km ökonomische Vorteile zugunsten des dezentralen Konzeptes. Bei den Kalkulationen zu den in Tabelle 3.13 (S. 95) dargelegten Herstellkosten wurde von einem Mischbetrieb, d.h. einem gleichzeitigen Einsatz von Stroh und Holz in einer Pyrolyseanlage ausgegangen. Für diesen Fall dürfte der tatsächliche Schnittpunkt der Kostenkurven zwischen den beiden o.g. liegen. Dies erklärt auch, warum sich bei einem Vergleich der beiden Referenzanlagen noch ein geringer Kostenvorteil zugunsten des integrierten Konzeptes ergibt.

Ein Vergleich der beiden Konzepte, anhand der ausgewählten dezentralen Standorte (Ehingen und Schillingstadt) und den verschiedenen Einzugsgebieten (R = 50, 100 und 150 km) zum integrierten Konzept, zeigt Präferenzen zugunsten des dezentralen Konzeptes. Hingegen bringt der Vergleich der beiden Konzepte auf Basis der beiden Referenzanlagen einen geringen Kostenvorteil bezüglich des integrierten Konzeptes.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.3.3 erörterten Ergebnisse bzw. Erkenntnisse lassen sich letztlich aber, wie nachfolgend aufgeführt, eine Reihe von Argumenten zugunsten des dezentralen Konzepts finden:

- Das dezentrale Konzept gestaltet sich bei der Auswahl von Standorten sehr viel flexibler als das integrierte Konzept und erlaubt das Platzieren von Anlagen an Standorten, in deren Einzugsgebiete größtenteils eine günstige Potenzialsituation vorzufinden ist. Dagegen ist es unwahrscheinlich, für ein sehr viel größeres und zusammenhängendes Einzugsgebiet, wie es das integrierte Konzept erfordert, ähnlich günstige Biomasse-Aufkommensdichten zu erreichen. Dieser sehr viel ausgeprägteren Inhomogenität der Aufkommensverteilung müsste durch eine Ausweitung des Einzugsgebietes begegnet werden, womit ein Anstieg der zurückzulegenden Transportstrecken verbunden wäre.
- Analog zur Potenzialsituation ist es für das integrierte Konzept sehr viel schwieriger, ein großes zusammenhängendes Gebiet zu finden, welches insgesamt durch geringe Biomasse-Erfassungskosten charakterisiert ist. Insofern sind die durchschnittlichen Erfassungskosten für das integrierte Konzept in der Regel höher als beim dezentralen Konzept. Zwar wäre auch hier eine Fokussierung auf kostengünstige Aufkommensgebiete möglich, doch wäre damit wiederum eine Ausweitung des Einzugsgebietes und damit eine Verlängerung der Transportstrecken verbunden.
- Durch die im Vergleich zum integrierten Konzept deutlich geringeren Transportkosten eröffnet sich durch das dezentrale Konzept auch die Möglichkeit, die zu Slurry umgewandelte Biomasse über weite Strecken zu transportieren und somit auf das Biomassepotenzial weit entfernter (mehrere Hundert km) Aufkommensgebiete zuzugreifen. Hierbei wäre sogar an eine Versorgung zu denken, bei der der Slurry über den Seeweg importiert werden würde.
- Der Nachteil des geringeren Gesamtwirkungsgrades gegenüber dem integrierten Konzept könnte auch dahingehend ausgeglichen werden, indem beispielsweise die Pyrolyseanlagen in einem Verbund weiterer industrieller Großanlagen angesiedelt wären, bei denen Abwärme entsteht, die für die Vortrocknung der Biomasse eingesetzt werden könnte.
- Alternativ zu der hier diskutierten Verwendung des Slurry für eine Vergasung, bieten sich darüber hinaus weitere Nutzungsmöglichkeiten an. So könnte der Slurry beispielsweise auch einer Co-Verbrennung zugeführt werden.
- Die Bereitstellung ausreichender Mengen an Biomasse (Stroh und Holz) an einer zentralen Vergasungs-/Syntheseanlage ist mit einem enormen logistischen Aufwand verbunden. Der tägliche Brennstoffbedarf bei der angenommenen Anlagenleistung von 4.500 MW<sub>in</sub> beträgt schätzungsweise 31.000 Mg FM, womit der Verkehrsraum im Bereich des Anlagenstandortes stark beansprucht würde. So wäre für die Bereitstellung dieser täglich benötigten Menge die Transportkapazität von 1.500 Lkw oder 35 Güterzügen notwendig. Bei der Bereitstellung von Slurry<sup>123</sup> würde sich hingegen die erforderliche Transportkapazität auf 835 Lkw oder 11 Güterzüge reduzieren.

---

<sup>123</sup> Natürlich entstehen auch beim dezentralen Konzept entsprechende Verkehrsbelastungen durch eine Reihe von Transportprozessen, doch sind diese sehr viel weniger räumlich konzentriert.

- Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften (Energiedichte) ist der Transport von Slurry nicht nur unter ökonomischen, sondern auch unter umweltrelevanten Gesichtspunkten vorteilhafter. Dabei bietet sich insbesondere bei einem Transport über weite Strecken (> 100 km) die Bahn als umweltfreundliches Transportmittel an.
- Der Aufbau und Betrieb einer Reihe von Pyrolyseanlagen an verschiedenen überwiegend durch Land- und Forstwirtschaft geprägten Gebieten könnte zu Beschäftigungseffekten führen. Damit würde ein Beitrag zur Stärkung ländlicher Räume geleistet.
- Bei Realisierung des zentralen Konzepts würden in einem großen Umfeld um die Anlage die bestehenden Biomasseaufkommen größtenteils aufgebraucht werden. Damit wären die Realisierung und der Betrieb weiterer Bioenergieanlagen innerhalb dieses Einzugsgebietes erschwert.

Vor dem Hintergrund der hier aufgeführten Argumente wird klar, dass der ohnehin nur geringe Kostenvorteil des integrierten Konzeptes keinesfalls ausreicht, um diese Konzeptvariante<sup>124</sup> zu bevorzugen. Zudem kann dieser Kostenvorteil schon durch kleine Änderungen der Rahmenbedingungen verloren gehen, insbesondere dann, wenn damit eine Steigerung der Erfassungs- und Transportkosten einhergeht. Deren Bedeutung unterstreicht nochmals ein Blick auf Tabelle 3.13 (S. 95); denn mit einem Anteil an den Gesamtkosten von bis zu 65 % stellen die Erfassungs- und Transportkosten hinsichtlich der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen den maßgeblichen Schlüsselfaktor dar. Da sich nicht nur bei der Ausgestaltung günstiger Erfassungs- und Transportkosten, sondern auch bei der technischen Auslegung und den Einsatzfeldern des Slurry das dezentrale Konzept sehr viel flexibler zeigt, ist es dem integrierten Konzept vorzuziehen.

---

<sup>124</sup> Theoretisch könnten auch beide Konzepte dahingehend kombiniert werden, dass eine integrierte Anlage zusätzlich mit Slurry beliefert wird, welcher in entfernt gelegenen dezentralen Anlagen produziert wurde. In diesem Fall wären die Vorteile beider konzeptionellen Auslegungen vereint.

## 4 Fazit und Ausblick

### 4.1 Methodisches Fazit

In dieser Arbeit wurde eine auf das Karlsruher bioliq®-Verfahren ausgerichtete systemanalytischen Untersuchung zum Potenzial und zur Bereitstellung von Reststroh und Waldrestholz durchgeführt. Wie für alle systemanalytischen Untersuchungen kennzeichnend, bestand auch hier das Problem in der Übertragung und Abbildung realer Gegebenheiten in ein auf lückenhaften Daten basierendes Modell und der mit der Modellierung zwangsläufig verbundenen Notwendigkeit, entsprechende Restriktionen und Prämissen vorzunehmen. Letztlich ergeben sich hieraus einige wesentliche methodische Schwachstellen, auf die im Rahmen dieses Kapitels näher eingegangen wird; dies auch, um hieraus Handlungsempfehlungen für weitere Untersuchungen zu dieser Thematik abzuleiten. Hierbei müssen nochmals einige der in Kapitel 2.1 vorgenommenen Annahmen, Einschränkungen und Vereinfachungen aufgegriffen werden, ohne jedoch ein weiteres Mal auf die Gründe für deren Festlegung einzugehen.

Die in dieser Arbeit vorgenommene räumliche Begrenzung auf Baden-Württemberg erlaubte es, in einem überschaubaren Rahmen detaillierte Untersuchungen durchzuführen. Wie sich in Kapitel 3.3.2 zeigte, erstrecken sich (bei entsprechend großem Radius) die kreisförmigen Einzugsgebiete von Anlagenstandorten in grenznaher Lage auch auf die außerhalb Baden-Württembergs liegenden Flächen, weshalb diese methodische Einschränkung – insbesondere bei der Auswahl landesgrenznaher Standorte – Probleme bereitet.

Empfehlung: Für eine weitergehende Untersuchung sollte entsprechend der räumlich konzeptionellen Auslegung des bioliq®-Verfahrens der untersuchte Systemraum deutlich erweitert werden, d.h. die Analyse und Bewertung von Potenzialen bzw. Anlagenstandorten sollte nicht auf das in Baden-Württemberg Machbare beschränkt bleiben.

Für die Generierung von Informationen zur Höhe der verfügbaren Biomassepotenziale und deren räumlicher Zuordnung mussten in dieser Arbeit unterschiedliche methodische Ansätze gewählt werden, die mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet sind. Diese ergeben sich nicht nur aus den für die modellhaften Abschätzungen zugrunde gelegten Annahmen, sondern auch aus den für diese Analyse verwendeten Daten, welche angesichts zum Teil sehr divergenter Erhebungsmethoden mitunter sehr ungenau sind. So basieren beispielsweise die für die Potenzialabschätzung verwendeten statischen Daten (Agrarstrukturerhebung, Bundeswaldinventur, Ernteerträge, Viehbestand, u.a.) auf mehr oder weniger genauen Abschätzungen bzw. Stichprobenverfahren.

Grundlage der Abschätzung zum Waldrestholzpotenzial bildeten die Daten eines von der FVA entwickelten Prognosemodells (WEHAM). Wie Borchert (2005) anmerkt, ist es hierbei fraglich, ob die aus den beiden Stichjahren (1987 und 2002) abgeleitete Vorratsentwicklung bzw. Holznutzung – wie angenommen – in die Zukunft fortgeschrieben werden kann. Gerade mit Blick auf sich verändernde klimatische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen, könnten sich für die Zukunft zum Teil deutlich andere Entwicklungen ergeben.

Die Festlegung der Gemeindefläche als kleinste räumliche Bezugseinheit machte es erforderlich, die vorwiegend auf Landkreisebene ermittelten Potenziale auszuwerten und unter Berücksichtigung gemeindespezifischer Kennzahlen (Waldflächen, Getrei-

deanbauflächen, Hangneigungen<sup>125</sup>, Viehbestand, Sturmwurfflächen, Naturschutzflächen, Besitzstruktur) – diese wurden zum großen Teil durch Einsatz des GIS<sup>126</sup> abgeleitet – anhand unterschiedlicher methodischer Ansätze auf die jeweiligen Gemeinden zu verteilen. Da diese gemeindespezifischen Gegebenheiten keinesfalls exakt und in vollem Umfange abbildbar sind, sowie einer zeitlichen wie auch räumlichen Variation unterliegen, eignen sich diese nur bedingt zur räumlichen Verteilung des Potenzials. So wurden beispielsweise bei der Verteilung des Waldrestholzpotenzials<sup>127</sup> auf die einzelnen Gemeinden, Kennwerte zum Bestandsaufbau und zur Nutzungsstruktur nicht mit einbezogen, obwohl sich diesbezüglich lokal erhebliche Unterschiede ergeben. Insofern können die aus dem Modell abgeleiteten Größen lediglich Durchschnitts- bzw. Orientierungswerte darstellen.

Empfehlung: Hinsichtlich der Verteilung des Strohaufkommens sollte anstatt auf die statistischen Daten, auf die neuerdings zur Verfügung stehenden GIS-Daten der Landwirtschaft (GISELa) zurückgegriffen werden, da damit die Getreideanbauflächen flächenscharf abgebildet werden können. Darüber hinaus sollten von den landwirtschaftlichen Versuchs- und Forschungsanstalten aktuelle Erhebungen zum gegenwärtigen Stand und zur weiteren Entwicklung der Viehhaltungsverfahren durchgeführt werden, weil diese einen wesentlichen Einfluss auf den Strohbedarf haben. Hinsichtlich des Waldrestholzaufkommens sollten von den forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten aktuelle empirische Daten erhoben werden, um darzulegen welchen Anteil die einzelnen Restholzsortimente am Einschlag tatsächlich haben und in welchem Umfang diese (unter Erhalt der Nährstoffhaushaltes) tatsächlich dem Wald entnommen bzw. unter den bestehenden forstwirtschaftlichen Rahmenbedingungen mobilisiert werden könnten. Wünschenswert wäre auch eine belastbare und räumlich differenzierte Abschätzung zum Potenzial des energetisch nutzbaren Durchforstungs- und Schwachholzes. Zur Durchführung von kleinräumigen Waldrestholzanalysen könnte zwar, wie auch oft praktiziert, auf die Daten der Forsteinrichtungsplanung zurückgegriffen werden, doch sollten diese Daten durch die Ergebnisse der Bundeswaldinventur ergänzt werden. Für großräumige und exakte Waldrestholz-Potenzialabschätzungen ergibt sich das Problem, dass wichtige Kennwerte zum Bestand (Bestandsaufbau, Altersstruktur, u.a.) nicht, oder wie bei der Bundeswaldinventur nur für einzelne Stichprobenpunkte zur Verfügung stehen. Diesbezügliche Lösungsansätze sind vor allem aus dem Anwendungsbereich der Fernerkundung zu erwarten. Seit einigen Jahren sind insbesondere mit dem Laserscanning die Erwartungen verbunden, die tatsächliche Waldstruktur genau abzubilden und für große Flächen bestandspezifische Kennwerte (z.B. Baumart, -alter) bereitzustellen, wie sie bis dato mit hohem Aufwand nur durch statistischen Stichproben gewonnen werden können (Heurich, 2007).

In der vorliegenden Arbeit wurde davon ausgegangen, dass das bis dato weitestgehend ungenutzte Potenzial an Waldrestholz und Reststroh vorzugsweise für die Herstellung biogener Kraftstoffe zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wurde die Konkurrenzsituation zwischen den einzelnen energetischen Nutzungsoptionen (Strom, Wärme, Kraftstoff) nicht bzw. nur ansatzweise mit berücksichtigt, obwohl diese Konkurrenz in Anbetracht der jüngst zu beobachtenden (Energiepreis-) Entwicklungen das

---

<sup>125</sup> Die über das GIS ermittelten Hangneigungen waren ein wichtiges Kriterium zur räumlichen Verteilung und Zuordnung von Potenzialen. Da das hierfür verwendete Digitale Höhenmodell (DHM BW) lediglich eine Auflösung von 50 mal 50 Metern aufweist, konnten damit kleinräumige Höhenunterschiede nur bedingt abgebildet werden. Insofern sollte bei weiteren Analysen ein feinmaschigeres Modell eingesetzt werden, um den Umfang der nutzbaren Flächen genauer abbilden zu können.

<sup>126</sup> Auf eine methodische Beurteilung des GIS-Einsatzes soll an dieser Stelle verzichtet werden.

<sup>127</sup> Hierbei stellt beispielsweise die Annahme eines konstanten Umrechnungsfaktors, mit dem das Holzvolumen in die Trockenmasse umgerechnet wurde, eine wesentliche Vereinfachung dar. Bei Angabe des Potenzials in Mg TM wurde auch keine Trennung mehr zwischen Laub- und Nadelholz vorgenommen, obwohl mit letzterem geringere, spezifische Erfassungskosten verbunden sind.

für die Kraftstofferzeugung abgeschätzte bzw. tatsächlich zur Verfügung stehende Biomassepotenzial deutlich reduzieren dürfte.

Bei einem Vergleich unterschiedlicher Biomasse-Nutzungsoptionen richtet sich das Augenmerk oftmals auch auf die insgesamt mit der Energiebereitstellung verbundenen treibhausrelevanten Emissionen. Die Untersuchung und Darstellung dieser Emissionen erfolgte in dieser Arbeit jedoch nur für einzelne Prozessschritte des bioliq®-Konzepts.

Empfehlung: Trotz aller Schwierigkeiten sollte bei weiteren Potenzialabschätzungen, in Zusammenhang mit der Planung von großen Bioenergieanlagen, untersucht werden, in welcher Weise sich in naher Zukunft zwischen den einzelnen Biomasse-Nutzungsoptionen eine Potenzialaufteilung einstellen wird bzw. könnte. Dabei sollte die Untersuchung dieser Konkurrenzsituation auch räumlich differenziert erfolgen. Im Kontext eines Vergleichs unterschiedlicher Nutzungsoptionen, sollten auch die CO<sub>2</sub>- und Energiebilanz des bioliq®-Konzepts deutlicher herausgearbeitet werden.

Die Mobilisierung der in dieser Arbeit abgeleiteten freien Potenziale an Reststroh und Waldrestholz hängt im Wesentlichen auch von verschiedenen energie-, agrar- und forstpolitischen Rahmenbedingungen und deren Entwicklung ab. Da diese in der vorliegenden Arbeit nur ansatzweise mit einbezogen wurden, bleibt fraglich, inwieweit die geschätzten Potenziale tatsächlich erschlossen werden könnten. Zwar wurden zur Abschätzung des Waldrestholzpotenzials unterschiedliche Mobilisierungsfaktoren angenommen, doch ist ungewiss, wann und unter welchen Rahmenbedingungen diese Annahmen zutreffend sind. Zudem wurde in der Analyse auch der Versuch unternommen, das in Abhängigkeit vom Marktpreis (Bereitstellungskosten) zu erwartende Potenzial in Form einer Angebotsfunktion abzubilden, obwohl der Marktpreis nicht das alleinige Kriterium für die Mobilisierung darstellen kann bzw. muss.

Empfehlung: Bei einer weitergehenden Analyse der Potenzialsituation sollten die tatsächlichen Mobilisierungsmöglichkeiten in Abhängigkeit verschiedener Rahmenbedingungen genauer untersucht werden. Dabei sollte auch geprüft werden, inwieweit nicht nur der Preis, sondern auch organisatorische Strukturen (Aufbau eines Brennstoffmarktes, Bildung von Forstbetriebsgemeinschaften, u.a.) und Fördermaßnahmen eine Rolle spielen und unter welchen Bedingungen auch (Holz-) Sortimente mobilisierbar wären, die bis dato noch ausschließlich stofflich genutzt werden.

Die in der Arbeit durchgeführten Abschätzungen zu den Erfassungskosten für Reststroh auf Basis der technischen Kennwerte von KTBL (2005) scheinen dahingehend plausibel zu sein, da die Ergebnisse mit denen anderer Autoren vergleichsweise gut übereinstimmen. Dabei muss allerdings hinterfragt werden, inwieweit die übernommenen bzw. hergeleiteten Kennwerte tatsächlich die in der Praxis erzielbaren Leistungswerte widerspiegeln. Die aus der Literatur abgeleiteten Erfassungskosten für Waldrestholz weisen aus den in Kapitel 2.4.2 erwähnten Gründen große methodische Unsicherheiten auf. Folglich sind sämtliche Aussagen, welche sich in der Argumentation auf diese Kosten stützen, nur als bedingt belastbar einzustufen.

Als problematisch darf auch der Versuch angesehen werden, die Bandbreite der Erfassungskosten (für Reststroh und Waldrestholz) in Abhängigkeit gemeindespezifischer Gegebenheiten für jede einzelne Gemeinde separat auszuweisen um daraus dann letztlich eine Aussage zur Standorteignung abzuleiten. Schließlich basieren die aus eigenen Auswertungen abgeleiteten gemeindespezifischen Daten notgedrungen auf pauschalen Prämissen. So ist beispielsweise, wie im Falle des Waldrestholzes erfolgt, die Einteilung in Nutzungsklassen (in Abhängigkeit von Hangneigungen) nur als modellhafte Annahme zu verstehen. Das heißt, was in der Praxis tatsächlich als leicht verfü-

bares Potenzial angesehen wird, bleibt unbekannt bzw. müsste empirisch ermittelt werden. Außerdem wurden einige wesentliche gemeindespezifische Gegebenheiten (z.B. Bestandsaufbau/-struktur des Waldes, Erschließungssituation), welche einen wesentlichen Einfluss auf die technische Verfügbarkeit und in diesem Kontext auch auf die Erfassungskosten haben, nicht berücksichtigt. Da allerdings bei Abschätzung der Erfassungskosten für alle Gemeinden dieselben Kriterien angesetzt wurden, dürfte sich dieser Fehler relativieren.

Empfehlung: Im Hinblick auf die vielfach unterschätzte Bedeutung der Erfassungskosten, sollte vor einem weiteren Ausbau der Biomassenutzung der Analyse dieser Kosten besonderes Augenmerk geschenkt werden. So erscheint es insbesondere mit Blick auf die Waldrestholzerfassung dringend geboten, durch detaillierte Studien belastbares Zahlenmaterial bereitzustellen. Dabei sollten auch die Bedeutung bzw. der Einfluss bestimmter örtlicher Gegebenheiten, wie in dieser Arbeit ansatzweise versucht, klar herausgestellt werden.

Neben der Biomasseerfassung stellt auch der Transport ein unter ökonomischen Gesichtspunkten entscheidendes Element in der Bereitstellungskette dar. Zwar können die in dieser Arbeit durchgeführten Kalkulationen zum Transport (mit Ausnahme des Bahntransportes) bzw. zu den Transportmitteln als relativ belastbar angesehen werden, doch bleiben auch hier einige Unsicherheiten bestehen. So können beispielsweise die angenommenen spezifischen Personal- und Maschinenkosten, sowie die in der Praxis tatsächlich erzielbaren Leistungswerte in einigen Fällen erheblich von den in der Kalkulation unterstellten Werten abweichen.

Die über verschiedene Formeln abgeleiteten mittleren Transportentfernungen (vom Aufkommensort der Biomasse bis zur dezentralen Pyrolyseanlage) wichen nur gering von den empirisch ermittelten Werten ab. Doch sind die Aussagen zur Gültigkeit der Formelwerte, aufgrund des geringen Stichprobenumfangs der Untersuchung, unter Vorbehalt zu sehen. Da die Transportkosten maßgeblich durch die entfernungsunabhängigen Kosten (Rüsten, Warten, Laden) bestimmt werden, haben kleinere Abweichungen bei Ermittlung der Transportstrecke nur einen sehr geringen Einfluss auf die tatsächlichen Transportkosten. Insofern ist der bestehende Unterschied zwischen empirisch abgeleitetem Wert und Formelwert nahezu vernachlässigbar.

Hinsichtlich des Transports wurde in der Arbeit ausschließlich von kreisförmigen Einzugsgebieten ausgegangen, obwohl diese modellhafte Form in der Praxis aufgrund einer Reihe von Faktoren (Landnutzungsarten, Geländeverhältnisse, Flächenrestriktionen) sicherlich eine Ausnahme darstellen wird. Beeinflusst durch Abweichungen von dieser ideal-geometrischen Form dürften in der Praxis damit auch vom Formelwert abweichende mittlere Transportentfernungen resultieren.

Empfehlung: Die in dieser Arbeit betrachteten Transportmittel<sup>128</sup> orientieren sich an dem derzeitigen technischen Standard. Für weitere Untersuchungen sollte das durch technische Neuerungen gegebene Rationalisierungspotenzial (z.B. Sonderfahrzeuge) mit berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind insbesondere auch die technischen und organisatorischen Optimierungspotenziale bezüglich der Be-, Um- und Entladevorgänge zu untersuchen. Hinsichtlich der mittleren Transportentfernungen sollten die in der Arbeit dargelegten Näherungsformeln durch weitere empirische Untersuchungen untermauert werden.

---

<sup>128</sup> Für weitere Untersuchungen sollte auch das Binnenschiff als Transportmittel in Betracht gezogen werden; insbesondere wenn für die Biomasse- bzw. Slurrybereitstellung Transportstrecken von mehreren hundert Kilometern zurückzulegen sind.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Potenzialanalysen waren auf die beiden mengenmäßig interessanten Bioenergieträger Reststroh und Waldrestholz beschränkt. Doch sind entsprechend der technischen Auslegungsmöglichkeiten des bioliq®-Verfahrens noch eine Reihe weiterer, vorzugsweise trockener Bioenergieträger (z.B. Heu<sup>129</sup>) als Einsatzstoff geeignet. Unter Berücksichtigung weiterer Biomassen ergäbe sich gegenüber den in dieser Arbeit durchgeführten Analysen eventuell ein differenzierteres Bild hinsichtlich Aufkommen und räumlicher Verteilung der Biomasse und damit auch in der Beurteilung von potenziellen Anlagenstandorten.

Empfehlung: Es sollte untersucht werden, welche weiteren Bioenergieträger für das bioliq®-Verfahren geeignet erscheinen und in welchen Mengen und Gebieten diese ggf. verfügbar wären. Zu diesen zusätzlichen Potenzialen wären beispielsweise nicht nur das bereits genannte Heu, sondern auch gezielt angebaute Energieträger sowie bisher ausschließlich stofflich genutzte Holzsortimente (z.B. Starkholz, Industrieholz) hinzuzurechnen. Wie bereits erwähnt, sollte hierbei auch betrachtet werden, unter welchen Bedingungen diese zusätzlichen Potenziale tatsächlich mobilisierbar sind.

Die Bewertung und Auswahl von Anlagenstandorten für Pyrolyseanlagen erfolgte durch eine Zusammenführung und Bewertung der in den einzelnen Kapiteln gewonnenen Ergebnisse. Insofern besteht hierbei die Problematik, dass sich die bei der Herleitung der Ergebnisse bestehenden Unsicherheiten kumulieren. Wie bereits erwähnt, ist die Auswahl der Entscheidungskriterien keinesfalls vollständig oder spiegelt umfassend alle Standortgegebenheiten wider. Außerdem erfolgte die Gewichtung der (Standort-) Kriterien nach eigenem Ermessen und ist daher nur eingeschränkt objektiv. Folglich sind die hier durchgeführten Standortanalysen lediglich als eine erste Orientierung zu verstehen.

Empfehlung: Wie im Rahmen von Machbarkeitsstudien vielfach durchgeführt, sollten bei der Standortauswahl auch weitere betriebswirtschaftlich relevante, ortsspezifische Gegebenheiten (z.B. Personalverfügbarkeit, Steuerstruktur, regionalspezifische Fördermaßnahmen) mit einbezogen werden.

Aufgrund der eingangs erwähnten Problematik und in Anbetracht der in diesem Kapitel diskutierten methodischen Schwierigkeiten wird klar, dass es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, eine umfassende und in sich geschlossene Darstellung zu geben. Schließlich hätte die Berücksichtigung aller in diesem Kapitel dargelegten Empfehlungen den Rahmen dieser Arbeit bei weitem gesprengt.

In diesem Zusammenhang drängt sich auch die Frage auf, ob eine ebenso umfangreiche wie auch detaillierte Betrachtung aller Facetten dieses Themas dazu überhaupt dazu beitragen kann, Erkenntnisse zu gewinnen, die für eine erste Gesamtbeurteilung und Einordnung dieses Verfahrens notwendig bzw. von Bedeutung sind. Vielmehr empfiehlt es sich den Focus einer Untersuchung zunächst auf diejenigen Elemente der Prozesskette zu richten, welche quasi den „Flaschenhals“ bzw. die K.-o.-Kriterien darstellen, d.h. Bereiche, die einen maßgeblichen Einfluss auf die tatsächlichen Realisierungschancen des Vorhabens haben. In dem Bemühen diese Problemfelder herauszuheben und eine Einschätzung zur Machbarkeit des bioliq®-Verfahrens zu geben, scheint die in dieser Arbeit angewandte Methodik dieser Sachlage Rechnung getragen zu haben.

---

<sup>129</sup> Heu von Grünland, welches für die Rauhfuttererzeugung nicht mehr benötigt wird. Aus dieser überschüssigen Grünlandfläche (schätzungsweise 167.000 ha) resultiert ein energetisch nutzbares Heuaufkommen von rd. 0,7 Mio. Mg TM/a (Rösch et al., 2007).

## 4.2 Inhaltliches Fazit

Ein wesentlicher Eckpunkt zur Untersuchung der Umsetzbarkeit und Realisierungschancen der auf Biomasse gestützten Energiebereitstellungsketten bildet die Kenntnis um die Potenziale, deren Aufkommensort und Verfügbarkeit. So haben die Auswertungen in dieser Arbeit gezeigt, dass in Baden-Württemberg theoretisch große freie Potenziale der beiden mengenmäßig bedeutendsten Bioenergieträger Reststroh und Waldrestholz für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehen. Schließlich verbleiben unter den gegenwärtig gegebenen ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen schätzungsweise 40 % des Stroh- und 85 % des Waldrestholzes ungenutzt auf dem Acker bzw. im Wald. Unter den in der Arbeit angesetzten Prämissen und Restriktionen ergaben sich für beide Energieträger nahezu gleich große und frei verfügbare Aufkommensmengen von rund 1 Mio. Mg TM/a. Ausgehend von diesen eher zurückhaltenden Abschätzungen dürfte allerdings hinsichtlich des Waldrestholzes das tatsächlich nutzbare Aufkommen<sup>130</sup> erheblich höher liegen.

In Machbarkeitsstudien zur energetischen Nutzung von Waldrestholz in Großanlagen wird unter den gegebenen Rahmenbedingungen oftmals von einem durchschnittlichen Bereitstellungspreis frei Anlage von 60 €/Mg TM<sup>131</sup> ausgegangen und unterstellt, dass damit ausreichend große Mengen an Waldrestholz zur Verfügung stünden. Bezogen auf die Verhältnisse von Baden-Württemberg dürften zu diesem Bereitstellungspreis in der Regel jedoch nur Holzsortimente erschließbar sein, die einerseits ein günstiges Stück-Masse-Verhältnis aufweisen und/oder andererseits in gut erschlossenen und maschinell zugänglichen Gebieten anfallen. Da diese Waldrestholzsortimente stark begrenzt sind, die leichte Zugänglichkeit oft nicht gewährleistet ist, und rationelle Aufbereitungsverfahren (z.B. Kronennutzung) nur bedingt zur Anwendung kommen bzw. kommen können, ist das Potenzial, welches tatsächlich kostengünstig zur Verfügung steht, stark limitiert. So können bei dem o.g. Bereitstellungspreis in Baden-Württemberg schätzungsweise nur etwa 25 % des abgeschätzten Potenzials tatsächlich wirtschaftlich erschlossen werden. Insofern kann unter den gegenwärtigen Gegebenheiten eine Versorgung von BtL-Großanlagen mit ausreichenden Mengen an kostengünstigem Waldrestholz (auch ohne Berücksichtigung von Konkurrenzbeziehungen) kaum erreicht werden.

Letztendlich hat dies mit zur Folge, dass ein Großteil des Waldrestholzes, insbesondere aber die mengenmäßig bedeutsamen Sortimente mit geringem Durchmesser, weiterhin im Bestand verbleiben. Inwieweit und wann es gelingen wird, diese größtenteils schwer mobilisierbaren Potenziale einer Nutzung (in Großanlagen) zuzuführen, hängt in erster Linie von zwei wesentlichen Faktoren ab. Einerseits von der Entwicklung der Energiepreise und andererseits davon, inwieweit es gelingt, durch organisatorische Maßnahmen klare Marktverhältnisse zu erreichen (Bauer et al., 2006).

---

<sup>130</sup> Je nachdem, in welchem Umfang von einer Mobilisierung der vorhandenen Durchforstungsreserven, einer vollständigen Nutzung des Schlagabbaus und einer Erschließung von Holzsortimenten, die bisher ausschließlich für die stoffliche Nutzung reserviert waren, ausgegangen wird.

Wie sich zeigte, sind die Flächenanteile des mittleren und kleinen Privatwaldes (30 %) im Vergleich zum öffentlichen Wald (70 %, inkl. Großprivatwald) eher gering. Insofern wird das Waldrestholzaufkommen auch künftig durch das Aufkommen aus dem öffentlichen Wald dominiert, obwohl im Privatwald deutlich höhere Vorräte zu finden sind und demnach dort auch der Holzeinschlag erhöht werden könnte.

<sup>131</sup> Einschließlich ca. 11 €/Mg TM für den Transport zur Anlage. Dabei handelt es sich oftmals um Hackenschnitzel aus (durchmesserstarkem) Schwachholz (in gut zugänglicher Lage).

Bei der Bereitstellung von Waldrestholz kommen je nach örtlichen Gegebenheiten unterschiedliche Erntesysteme<sup>132</sup> bzw. Erntetechniken zum Einsatz. In Hinblick auf das bioliq®-Konzept ist es unter logistischen bzw. ökonomischen Gründen besonders vorteilhaft, wenn dieses Waldrestholz in Form von vorgetrockneten Hackschnitzeln an der Pyrolyseanlage bereitgestellt wird. Eine Trocknung außerhalb der Anlage erhöht nicht nur den Gesamtwirkungsgrad des Herstellprozesses für Biokraftstoffe, sondern bedingt auch eine Steigerung der Transporteffizienz. Dahingehend scheint die neuerdings teilweise praktizierte Methode der Vorkonzentrierung von Waldhackgut mit anschließender Trocknung auf einem zentralen Sammelplatz empfehlenswert. Darüber hinaus ist mit dem zeitlich und räumlich entkoppelten Hacken auch eine bessere Maschinenauslastung realisierbar (Wittkopf, 2005a).

Wie zu erwarten war, ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der aufkommensrelevanten Flächen und unterschiedlicher Nutzungsstrukturen eine sehr inhomogene Verteilung und Verfügbarkeit der Aufkommen innerhalb Baden-Württembergs. Inwieweit allerdings diese ortsspezifischen Aufkommen wirtschaftlich erfassbar sind, wird maßgeblich durch die vor Ort gegebenen Bedingungen (Erschließungssituation, Geländeverhältnisse, Bestandsparameter, Struktur, etc.) bestimmt. So ist beispielsweise hinsichtlich des Waldrestholzes im Schwarzwald, obwohl dort der Holzeinschlag und damit auch das Waldrestholzaufkommen im Vergleich zu anderen Gebieten in Baden-Württemberg am höchsten sind, an vielen Orten eine Entnahme von Waldrestholz derzeit technisch bzw. wirtschaftlich vielfach nicht sinnvoll. Hingegen erweisen sich Gebiete als vorteilhaft, die im Vergleich zum Schwarzwald zwar nur über relativ geringe Waldflächenanteile verfügen, dort aber aufgrund geeigneter Geländeverhältnisse kostengünstig Waldrestholz bereitgestellt werden kann.

Die Vorteilhaftigkeit dieser überwiegend flacheren Gebiete wird dahingehend noch unterstrichen, da diese oftmals durch eine landwirtschaftliche Flächennutzung geprägt sind und dort mit Stroh ein weiterer geeigneter Energieträger zur (freien) Verfügung steht. Zwar zeigen auch die Erfassungskosten von Stroh eine entsprechend große Bandbreite, diese ist aber weit weniger ausgeprägt und die Erfassungskosten sind insgesamt niedriger als für Waldrestholz. Um die Stroherfassung, welche ein in der Praxis gängiges Verfahren darstellt, möglichst ökonomisch zu gestalten, ist eine effiziente Organisation (Betriebsgemeinschaften, Maschinenring) unabdingbar – diese begünstigt den Einsatz schlagkräftiger Ballenpressen bei gleichzeitig optimaler Auslastung. Eine Hauptproblematik hinsichtlich einer umfassenden Mobilisierung der Strohaufkommen besteht darin, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein überregionaler Brennstoffmarkt für Stroh vorhanden ist (Kalies et al., 2006). Sollte es aber gelingen, einen funktionierenden bzw. gut organisierten Brennstoffmarkt zu errichten, dürfte auch unter den gegebenen ökonomischen Rahmenbedingungen eine energetische Strohnutzung in großem Umfang schon in den kommenden Jahren möglich sein.

Wie die Auswertungen ergaben, werden bis zu 65 % der Gestehungskosten für Biokraftstoffe durch die Bereitstellung der Biomasse verursacht. Aus diesem Grund kommt auch dem Transport, als zweite maßgebliche Komponente im Bereitstellungsprozess, besondere Relevanz zu. Im Hinblick auf eine hohe Transporteffizienz ist es von Bedeutung, die Transportmittel bzw. Transportbehältnisse optimal auszulasten.

---

<sup>132</sup> Im Zusammenhang mit einer kostengünstigeren Bereitstellung wäre es auch vorstellbar, in vereinzelten Gebieten Erntesysteme zur Anwendung zu bringen, welche durch einen wesentlich höheren Anteil an flächiger Endnutzung charakterisiert sind (Wittkopf, 2005a).

Voraussetzung hierfür ist, die Biomasse in einer für den Transport und Umschlag geeigneten vorkonditionierten Form (gepresst bzw. gebündelt<sup>133</sup>, gehackt, vorgetrocknet) am Verladeort bereitzustellen. Neben einer möglichst hohen Transportdichte ist im Rahmen der Vorkonditionierung auch ein möglichst hoher Trockenmasseanteil der Biomasse anzustreben, weil hierdurch der Anteil der tatsächlich transportierten Energie ansteigt und damit die spezifischen Transportkosten geringer werden.

Die Auswertungen dieser Arbeit bestätigten, dass sich bei entsprechend großen Transportstrecken hinsichtlich der Transporteffizienz eine klare Präferenz zugunsten des Slurry ergibt. Bezogen auf das tatsächlich transportierte Volumen beim Lkw-Transport liegt die Energiedichte ( $H_u$ ) beim Slurry ( $22 \text{ GJ/m}^3$ ) beispielsweise um den Faktor 10 über der von Stroh ( $2,2 \text{ GJ/m}^3$ ). Letztlich wird damit bei maximal möglicher Lkw-Zuladung mit dem Slurry mehr als das Doppelte an Energie transportiert. Unter Berücksichtigung der Slurry-Herstellkosten kann somit ab einer Entfernung von rund 140 km, der aus Stroh gewonnene Slurry kostengünstiger bereitgestellt werden als das unbehandelte Stroh in Ballenform. Für den Hackschnitzeltransport ergibt sich bereits ab einer Entfernung von ca. 130 km ein Kostenvorteil zugunsten der Slurrybereitstellung.

Wie die Analysen zeigten, ist der Einfluss der Transportentfernung auf die Transportkosten<sup>134</sup> weniger bedeutend als dies gemeinhin angenommen wird, da die Transportkosten auch die Kosten für das Be- und Umladen enthalten, und diese bei geringen Transportentfernungen zu deutlich höheren spezifischen Transportkosten pro km führen als bei großen Transportentfernungen. Damit wirkt sich auch der Fehler, der bei der Abschätzung der mittleren Transportstrecke über die in dieser Arbeit hergeleitete Formel entsteht, kaum auf die Gesamtkosten aus. Insofern stellen die hergeleiteten Formeln eine geeignete Methode zur Abschätzung mittlerer Transportstrecken dar.

Für den Biomassetransport stehen mehrere Transportmittel zur Verfügung, wobei der Lkw aufgrund seiner Kostenstruktur und seiner Flexibilität für alle hier diskutierten Transportgüter (Strohballen, Holzhackschnitzel, Slurry) das geeignetste Transportmittel darstellt. Aufgrund der hohen möglichen Lademassen zeigen Schienentransporte insbesondere unter energetischen Gesichtspunkten günstigere Kennwerte als Straßen Transporte. Allerdings erfordern Schienentransporte in der Regel einen Vorlauf<sup>135</sup> auf der Straße, so dass der Transport, wie beispielsweise im Falle der Hackschnitzel (65% TM), erst ab einer Transportstrecke von ca. 160 km mit der Bahn günstiger zu bewerkstelligen ist als mit dem Lkw. Unter ökonomischen Aspekten stellt sich der Strohtransport mit der Bahn sehr ungünstig dar, weil dieser kaum über Straße-Schiene kompatible Containersysteme abgewickelt werden kann und somit ein zeitaufwändiger Umschlag der einzelnen Strohballen an der Güterverkehrsstelle erforderlich wird.

Beim Slurry lässt sich mit der Bahn bereits ab einer Entfernung von ca. 100 km ein im Vergleich zum Lkw günstigerer Transport realisieren, sofern der Slurry direkt an der Pyrolyseanlage, d.h. ohne vorherigen Lkw-Vorlauf mit ISO-Tankcontainern, in Bahn-

---

<sup>133</sup> Die Bereitstellung von gebündeltem Schlagabraum ist im Vergleich zu Waldhackschnitzel sowohl hinsichtlich der Erfassungskosten als auch der Transportkosten sehr viel unwirtschaftlicher.

<sup>134</sup> Beim Lkw-Strohtransport, welcher durch ein zeitaufwändiges Be-, Um- bzw. Entladen der Strohballen charakterisiert ist, liegen beispielsweise bis zu einer Entfernung von 80 km die entfernungsunabhängigen über den entfernungsabhängigen Kosten. Hierbei verdeutlicht sich, welche Bedeutung einer rationalen Gestaltung diesen Umschlagsprozessen zukommt.

<sup>135</sup> Hierbei besteht das Problem, dass eine zunehmende Schließung von Güterverkehrsstellen zu beobachten ist und deshalb die Vorlaufdistanzen zunehmend größer werden.

tankwagen befüllt werden kann. Inwieweit ein solcher direkter Gleisanschluss in der Praxis realisiert wird, bleibt fraglich, da die Erstellung von Gleisanschlüssen nicht durch die öffentliche Hand subventioniert wird und somit von dem Anlagenbetreiber nicht unerhebliche Infrastrukturinvestitionen zu tragen sind (Arlt, 2003). Da schienengebundene Logistikkonzepte in der Regel aber einen Vorlauf erfordern und dieser mit einem zusätzlichen Kostenaufwand verbunden ist, werden Bahntransporte für die innerhalb des Systemraums Baden-Württemberg relevanten Transportdistanzen unter wirtschaftlichen Aspekten nur in Einzelfällen sinnvoll umzusetzen sein.

In der Praxis werden zur Gewährleistung einer kontinuierlichen Brennstoffbereitstellung in größeren Mengen sicherlich unterschiedliche Transportmittel gleichzeitig eingesetzt werden, wobei deren Einsatz auch von der vor Ort zur Verfügung stehenden Infrastruktur abhängt. Dementsprechend werden die tatsächlich entstehenden Bereitstellungskosten immer eine entsprechende Bandbreite aufweisen.

Die Gesamtleistung der Bereitstellungskette hängt im Wesentlichen nicht nur von der Leistung und Effizienz der einzelnen Arbeitsschritte ab, sondern auch davon, inwieweit die einzelnen Prozessschritte miteinander gekoppelt bzw. aufeinander abgestimmt sind. Dies erfordert detaillierte Kenntnisse über den Prozess und eine entsprechende organisatorische Ausgestaltung. Dabei wird insbesondere in Hinblick auf die zwangsläufig innerhalb der Bereitstellung durchzuführenden Be-, Um- und Entladevorgänge noch ein deutliches technisches Rationalisierungspotenzial gesehen. Dies betrifft in erster Linie die Strohbereitstellung, für die nicht nur effiziente Verladetechniken, sondern auch für den Umschlag geeignete Transportbehältnisse entwickelt werden müssen. Letztlich ist davon auszugehen, dass im Rahmen einer steigenden Nachfrage nach Biobrennstoffen auch die Bereitstellungsverfahren zunehmend rationaler werden.

In Anbetracht der gewonnenen Ergebnisse erscheinen unter den gegenwärtigen technischen wie auch ökonomischen Rahmenbedingungen, bei einem ausschließlichen Einsatz der in dieser Arbeit betrachteten Brennstoffsortimente Stroh und Waldrestholz, für Baden-Württemberg sehr viel weniger Standorte<sup>136</sup> für Pyrolyseanlagen geeignet zu sein als zunächst angenommen. Insbesondere aufgrund hoher biomasse- und ortsspezifischer Erfassungskosten könnten somit allenfalls bis zu vier Standorte<sup>137</sup> (Einzugsgebietsradius ca. 25 km) für die Errichtung einer Pyrolyseanlage (Anlagenleistung 100 MW<sub>in</sub>) in Betracht gezogen werden. Wie bereits angedeutet, sind hierbei aufgrund der relativ kostengünstigen Erfassung und der beachtlichen Potenziale bei gleichzeitig geringer Nutzungskonkurrenz insbesondere diejenigen Standorte prädestiniert, welche ein hohes Reststrohaufkommen aufweisen.

Wie die Auswertungen verdeutlicht haben, kann die BtL-Kraftstofferzeugung unter marktwirtschaftlichen Aspekten nur in Großanlagen sinnvoll bewerkstelligt werden. Dementsprechend wäre zur Slurryversorgung einer zentralen Großanlage mit einer Anlagenleistung von 4.500 MW<sub>in</sub> die Anlagenkapazität von rund 56 dezentralen Pyrolyseanlagen (jeweils 100 MW<sub>in</sub>) notwendig. Ausgehend vom angenommenen Standort dieser zentralen Großanlage in Karlsruhe, würde eine ausreichende Versorgung den Aufbau sehr vieler Pyrolyseanlagen in weit außerhalb Baden-Württembergs liegenden

---

<sup>136</sup> Die Ergebnisse können eingeschränkt auch auf die Standortvorteilhaftigkeit herkömmlicher Biomasseheizkraftwerke übertragen werden. Allerdings haben diese nicht dieselben infrastrukturellen Anforderungen wie eine Pyrolyseanlage, da ein Weitertransport eines Sekundärenergieträgers nicht stattfindet.

<sup>137</sup> Ausgehend von Anlagen mit geringerer Leistung und damit kleineren Erfassungsgebieten könnten sicherlich eine Reihe weiterer geeigneter Standorte gefunden werden. Allerdings ist unter ökonomischen Aspekten eine Realisierung leistungsschwacher Pyrolyseanlagen nicht sinnvoll.

Gebieten erfordern. Auch wenn es in Hinblick auf die hohe Transporteffizienz dabei durchaus möglich wäre, den zu Slurry umgewandelten Bioenergieträger über große Transportstrecken (> 200 km) hinweg kostengünstig an der zentralen Großanlage bereitzustellen, bleibt es auch mit Blick auf konkurrierende Nutzungsoptionen fraglich, ob es überhaupt gelingt, ausreichend geeignete Standorte zu finden.

In Anbetracht der Problematik, ausreichende Mengen an geeigneter und kostengünstiger Biomasse bereitzustellen, wird die Versorgung einer Großanlage (Standort Karlsruhe, 4.500 MW<sub>in</sub>) ohne vorherige Slurryerzeugung, wie für das zentrale Konzept vorgesehen, derzeit wirtschaftlich kaum möglich sein. Zwar ergab die in dieser Arbeit durchgeführte Gegenüberstellung beider Konzepte keine klaren ökonomischen Präferenzen zugunsten des einen oder anderen Konzepts, doch sprechen neben der sehr viel höheren Flexibilität hinsichtlich der räumlichen Auslegung eine Reihe weiterer Gründe für das dezentrale Konzept.

In der Gesamtschau der Ergebnisse bietet das bioliq<sup>®</sup>-Konzept durchaus die Möglichkeit, das räumlich weit verteilte Biomasseaufkommen zu erschließen und einen biogenen Kraftstoff relativ kostengünstig bereitzustellen. Hierbei ist allerdings zu diskutieren, was unter kostengünstig zu verstehen ist. Die insbesondere durch die Bereitstellung dominierten Biokraftstoff-Gestehungskosten (ohne Berücksichtigung von Energie- und Mehrwertsteuer) betragen für die hier getroffenen Annahmen bei gemeinsamer Nutzung von Holz und Stroh rund 1 € pro Liter und sind insofern nicht nur deutlich teurer als vergleichbarer fossiler Dieselkraftstoff<sup>138</sup>, sondern liegen mit Blick auf die von Leible et al. (2007) durchgeführten Auswertungen teilweise auch deutlich über den Kosten der Strom- und Wärmebereitstellung (vgl. Anhang 6.51, S. A-169) aus Biomasse. Mit geschätzten 200 €/Mg<sub>CO<sub>2</sub>-Äq.</sub> liegen auch die CO<sub>2</sub>-Minderungskosten für das bioliq<sup>®</sup>-Konzept (vgl. Anhang 6.51) deutlich über denen klassischer energetischer Nutzungskonzepte, weshalb im Kontext der Diskussionen zur CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie nur wenig für eine voreilige und übermäßige Forcierung der Aktivitäten zu Bereitstellung von BtL-Kraftstoffen aus Biomasse spricht.

Es wird zwar vielfach angenommen, dass für das bioliq<sup>®</sup>-Verfahren durch Lern- und Degressionseffekte sowie technische Weiterentwicklungen ein entsprechend großes Kostensenkungspotenzial im eigentlichen Herstellungsprozess gegeben ist, doch sind die Hauptkostentreiber auf Seiten der Biomassebereitstellung zu finden. Wie sich bei den Auswertungen auch gezeigt hat, führt eine Steigerung der Anlagenleistung und der damit verbundenen anlagenspezifischen Kostendegressionseffekte nicht zwangsläufig zu einer Verringerung der Gestehungskosten. Insofern kann eine herstellungsbedingte Kostenreduktion durch eine kostenintensive Biomasseerfassung, oder einem für die Versorgung einer Großanlage notwendigen Transport des Slurry über mehrere hundert Kilometer, wieder kompensiert werden.

Bei den wenigen bis dato durchgeführten Abschätzungen zu BtL-Gestehungskosten wird von durchschnittlichen Biomasse-Aufkommensdichten und Erfassungskosten ausgegangen. Da räumliche Spezifika hierbei größtenteils unberücksichtigt bleiben, ist davon auszugehen, dass solche Abschätzungen zu unzureichenden Kostenabschätzungen und in der Folge damit zu falschen Schlussfolgerungen führen. Vor diesem Hintergrund erscheint der oftmals „öffentlich propagierte“ Preis für BtL-Kraftstoffe aus Reststroh und Waldrestholz von deutlich unter 1 €/Liter ziemlich optimistisch.

---

<sup>138</sup> Zum Vergleich: Bei einem Rohölpreis von 65 \$/bbl liegen bei Diesel die vergleichbaren Bereitstellungskosten frei Raffinerie bei rund 0,45 €/l.

### 4.3 Ausblick

Vor dem Hintergrund aktueller Gegebenheiten dürfte in Deutschland die großindustrielle Produktion der besonders vielversprechenden BtL-Kraftstoffe eher unwahrscheinlich sein. Schließlich bleibt fraglich, ob es in Anbetracht des sehr hohen Brennstoffbedarfs einer Großanlage in der Praxis gelingen wird, ausreichend große Mengen an kostengünstiger Biomasse bereitzustellen. Zwar werden, ausgehend von der Annahme zunehmend steigender Energiepreise, künftig erheblich höhere Potenziale als zum gegenwärtigen Stand mobilisier- und verfügbar sein, doch ist auch von einer zunehmenden Konkurrenz zwischen den einzelnen Nutzungsoptionen (Strom, Wärme bzw. Kraftstoff) auszugehen. Insofern wird sich dann eine Potenzialaufteilung einstellen, wobei nur schwer abzuschätzen ist, wie sich diese tatsächlich darstellen wird.

Sofern der Staat nicht durch flankierende Maßnahmen die Einführung bestimmter Technologien forciert bzw. fördert, werden letztendlich ökonomische Tatsachen bestimmen, welche Art der Biomassenutzung sich in der Praxis zunehmend durchsetzen wird. Gegen einen umfassenden Einsatz der Biomasse zur Bereitstellung von biogenen Kraftstoffen spricht die Tatsache, dass die Kraftstoffbereitstellung im Vergleich zu den klassischen Nutzungsoptionen (Strom- und Wärmebereitstellung) nicht nur mit höheren Energieaufwendungen, weitreichenderen Umweltauswirkungen, sondern auch mit erheblich höheren Gestehungs- und CO<sub>2</sub>-Minderungskosten verbunden ist. Für den Einsatz von Biomasse zur Kraftstofferzeugung spricht jedoch deren besondere Eigenschaft als erneuerbare Kohlenstoffquelle, die durch Konversion in flüssiger Form bereitgestellt werden kann und somit geeignet wäre, im mobilen Bereich teilweise die Rolle des Erdöls zu übernehmen. Insofern sollte für den Aufbau einer nachhaltigen Mobilität ein Teil der Ressourcen der Kraftstofferzeugung vorbehalten bleiben. Es sei hierbei allerdings angemerkt, dass auch die für die Wärmegewinnung eingesetzte Biomasse dazu beitragen kann, Heizöl zu substituieren und damit den Kraftstoffmarkt zu entspannen.

Selbst wenn große Teile der insgesamt in Deutschland vorhandenen (Waldrestholz- und Reststroh-) Ressourcen für eine Kraftstofferzeugung zur Verfügung stünden, könnten voraussichtlich nur einige wenige Großanlagen (wie auch die im hier vorgestellten Leistungsbereich von 4.500 MW<sub>in</sub><sup>139</sup>) realisiert werden. Dabei bliebe deren Outputmenge im Vergleich zu herkömmlichen Raffinerien<sup>140</sup> eher unbedeutend. Somit könnten BtL-Kraftstoffe zwar einen Beitrag zur Verringerung der Erdölimportabhängigkeit leisten, diese aber kaum aufheben. Nicht zuletzt aus diesem Grund müssen mit Blick auf eine nachhaltige Mobilität von Seiten der Politik sehr viel drastischere bzw. weitreichendere energiepolitische Maßnahmen ergriffen werden, als dies derzeit noch der Fall ist.

Mit Blick auf die in Entwicklung befindlichen unterschiedlichen BtL-Technologien stellt sich die Frage, welche dieser Technologien die besten Zukunftsperspektiven aufweisen. Hier erscheint das im Mittelpunkt dieser Arbeit stehende bioliq<sup>®</sup>-Verfahren

---

<sup>139</sup> Als Umrechnungshilfe sei vermerkt, dass eine Eingangsleistung an Biobrennstoffen von 4.500 MW<sub>in</sub> einer jährlichen Produktion von etwa 1,0 Mio. Mg BtL-Kraftstoff entspricht. Zur Versorgung dieser Großanlage müsste das komplette in einem Radius von rund 250 km befindliche Aufkommen an Waldrestholz und Reststroh verfügbar gemacht werden.

<sup>140</sup> Zum Vergleich: Die Mineralölraffinerie Oberrhein (MiRO) in Karlsruhe ist Deutschlands größte Kraftstoffraffinerie hat eine Produktionskapazität von rund 16 Millionen Mg im Jahr (MiRO, 2007). Der Gesamtbedarf in Deutschland an Kraftstoffen beträgt derzeit rund 50 Mio. Mg (MWV, 2007b).

ziemlich aussichtsreich zu sein, schließlich ist es nicht nur bezüglich seiner räumlichen Auslegung sehr flexibel, sondern erlaubt neben flüssigen Sekundärenergieträgern und FT-Kraftstoff, auch chemische Rohstoffe<sup>141</sup> (z.B. Methanol) aus schwieriger und insbesondere als Reststoff verfügbarer Biomasse zu erzeugen. Dabei ist es auch möglich, die Vergasung des Slurry als Annexbetrieb in einer Mineralölraffinerie gemeinsam mit dem dort entstehenden Petrolkoks und Schwerölen durchzuführen. Daraus ergeben sich nicht nur Synergieeffekte, sondern es wird auch der Erfordernis Rechnung getragen, die Umsetzung in einer Großanlage vorzunehmen. Ähnlich vorteilhaft wäre der Einsatz des Slurry in der Co-Verbrennung, die durch sehr günstige Gestehungskosten charakterisiert ist, in der Regel bis dato aber durch die hohen Transportkosten der Biomasse beschränkt ist.

Auf dem Weg zur industriellen Umsetzung des bioliq®-Konzepts besteht jedoch noch ein erhöhter Forschungs- und Entwicklungsbedarf, in dessen Kontext noch eine Reihe technischer, ökonomischer und umweltrelevanter Fragestellungen zu beantworten sind. Hinsichtlich einer Optimierung des Konzepts sollte das Augenmerk dabei nicht nur auf die Ausgestaltung anlagentechnischer Prozesse, sondern auch auf die Systeme der Bereitstellung und die mit der Bereitstellung verbundenen Mobilisierungs- bzw. Organisationsstrukturen gerichtet werden. Zudem sollte die Diskussion zum bioliq®-Konzept in puncto Potenziale und Anlagenstandorte geografisch sehr viel weiter betrachtet werden und nicht nur auf Deutschland oder Europa beschränkt bleiben.

Auch wenn vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse unter den gegenwärtigen und mittelfristig zu erwartenden Rahmenbedingungen – diese können sich unter einem längerfristigen Horizont deutlich ändern – eine Umsetzbarkeit des bioliq®-Konzepts in Deutschland bzw. Baden-Württemberg eher unwahrscheinlich erscheint, verdient das Verfahren aufgrund seiner spezifischen Vorteile weitere Aufmerksamkeit und FuE-Einsatz. Schließlich müssen am Technologiestandort Deutschland mit Blick auf die Zukunft bereits heute Energietechnologien entwickelt werden, mit denen, falls erforderlich, zu gegebener Zeit auch erneuerbare, flüssige Kohlenstoffträger bereitgestellt werden können.

---

<sup>141</sup> Die chemische Nutzung kann dabei auch mit der energetischen gekoppelt werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- AGCO-Fendt GmbH, 2006: Technische Daten zu Fendt-Schleppern [www.fendt.com, letzter Zugang am: 10.07.2007]
- Agrarplus GmbH, 2003: Optimierung der Bereitstellungskette von Waldhackgut. St. Pölten, 94 S.
- AgrStatG (Agrarstatistikgesetz), 2006: Gesetz über Agrarstatistiken. In der Fassung der Bekanntmachung vom 19. Juli 2006, BGBl. I S. 1662. Am 25. Juni 1998 fand eine Novellierung des Agrarstatistikgesetzes statt (BGBl. I S. 1635).
- Albus, M., 2003: Energierohstoff Holz. AFZ-DerWald 20/2003, S. 1060-1063
- Arlt, A., 2003: Systemanalytischer Vergleich zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen aus biogenen Abfällen am Beispiel von kommunalem Klärschlamm, Bioabfall und Grünabfall. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6949, Forschungszentrum Karlsruhe, 214 S.
- Arndt, J., 2004: Wohin führt der Strukturwandel in der Landwirtschaft? Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 10/2004, S. 29-33
- ATKIS (Amtlich Topographisches-Kartographisches Informationssystem), 2005: Digitales Landschaftsmodell DLM25 BW, Stand: 31.12.2004. Landesvermessungsamt Stuttgart. Die Daten wurden in teilweise aufbereiteter Form von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) zur Verfügung gestellt.
- Basse, D., H. Wassermann und J. Nier, 2002: Energieholzproduktion. Forst & Technik 10/2002, S. 19-22
- Bauer, J., F. Zormaier, H. Borchert und F. Burger, 2006: Energieholzmarkt Bayern. Analyse der Holzpotenziale und der Nachfragestruktur. Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF-Wissen 53, Freising, 67 S.
- Bayer, J., 2007: Persönliche Mitteilung vom 23.02.2007. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- BDG (Bundesverband des deutschen Güterkraftverkehrs), 1999: Kostenorientierte Unverbindliche Richtsatz-Tabellen KURT für den Güterkraftverkehr, mit Erläuterungen von Klaus Pittroff. Verkehrsverlag J. Fischer, Düsseldorf.
- Beckmann, G., 2006: Regionale Potenziale ausgewählter biogener Reststoffe; in: Bioenergie - Zukunft für ländliche Räume. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Heft 1/2.2006, Bonn, 138 S.
- BEE (Bundesverband Erneuerbare Energie e.V.), 2007: Fakten über erneuerbare Energien. [www.bee-ev.de, letzter Zugang am: 01.08.2007]
- Benkwitz, W., 2006: Besteuerung und Steuerentlastung von Biokraftstoffen. UFOP-Praxisinformation 09/2006. Berlin, 7 S.
- BioKraftQuG (Biokraftstoffquotengesetz), 2006: Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundesimmissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften vom 18. Dezember 2006. BGBl. I 3180.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz), 2007: Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2007. Berlin, 133 S.
- BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten), 2000: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2000. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 533 S.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), 2004: Umweltpolitik. Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Berlin, 286 S.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), 2007: Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung. Stand: Juni 2007. Berlin, 47 S.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), 2001: Statistischer Monatsbericht 2/2001. Reihe Daten-Analysen mit „Futterwirtschaft“, Bonn.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), 2005a: Biokraftstoffe. Strategie für die Mobilität von morgen. Rostock, 34 S.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), 2005b: Zukunft der Nutztierhaltung. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates Agrarpolitik, nachhaltige Landbewirtschaftung und Entwicklung ländlicher Räume. Angewandte Wissenschaft, Heft 508, Münster-Hiltrup, 43 S.

- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), 2005c: Die Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2002 bis 2003. Online verfügbare Datenbank . [www.bundeswaldinventur.de, letzter Zugang am: 30.06.2007]
- BMW (Hrsg.), 2001: Energiepolitische und gesamtwirtschaftliche Bewertung eines 40 %-igen Reduktionsszenarios. Endbericht von Prognos, EWI und BEI, Juli 2001. Gutachten erstellt im Auftrag des BMWi, Dokumentation Nr. 492, Berlin, 79 S. + Anhang.
- Borchert, H., 2005: Holzaufkommensprognose für Bayern. Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF Wissen 50, Freising, 72 S.
- Brökeland, R., 2005: Verbrennung von Stroh und Getreide – Rechtliche Bedingungen und technische Möglichkeiten. Vortrag im Rahmen des C.A.R.M.E.N.-Fachgesprächs „Heizen mit Holz und Energiepflanzen“ am 23. Oktober 2005 in Straubing. Foliensatz, 21 S.
- Brümmel, R., 2004: Unmöglich? Rentable Holzernte in steilen Lagen. Das Blatt ThüringenForst, 3/2004, S. 5-7
- Bundesamt für Güterverkehr, 2004: Informationen über die Lkw-Maut. Köln, 2 S.
- Bundesregierung, 2004: Fortschrittsbericht 2004. Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Presse und Informationsamt der Bundesregierung, Berlin, 240 S.
- CDU/CSU und SPD, 2004: Gemeinsam für Deutschland. Mit Mut und Menschlichkeit. Koalitionsvertrag von CDU, CSU und SPD. Rheinbach, 43 S.
- Cremer, T., 2006: Einsatz innovativer Holzernteverfahren – vorteilhaft bei der Ernte von Waldenergieholz? Vortrag am Workshop „Bioenergienutzung in Baden-Württemberg – Bereitstellung von Energieholz aus dem Wald“ im Forstlichen Bildungszentrum Karlsruhe am 17. Oktober 2006.
- Daiber, A., 2006: Energieholzkonzept der Stadt Laichingen. Vortrag am Workshop „Bioenergienutzung in Baden-Württemberg – Bereitstellung von Energieholz aus dem Wald“ im Forstlichen Bildungszentrum Karlsruhe am 17. Oktober 2006.
- DB-Cargo, 2003: Persönliche Mitteilung vom 10. Mai 2003
- Deutsche Bahn AG, 2006: Katalog Holzverladebahnhöfe in Deutschland. Stand 01.03.2006. [www.stinnes-freight-logistics.de, letzter Zugang am: 20.07.2006]
- Dieter, M., H. Englert und M. Klein, 2001: Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie 2001/11, 40 S.
- Dritte Bundeswaldinventur-Verordnung, 2007: Verordnung über die Durchführung der dritten Bundeswaldinventur vom 23. Mai 2007, BGBl. I 954
- Eberhard, G., 2004: Prozesskette Bereitstellung von Energiewaldhackschnitzel. AFZ-DerWald 12/2004, S. 615-617
- EBO, 1967: Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967, BGBl. II S. 1563; zuletzt geändert durch das Gesetz zur Neuordnung des Einbahnwesens vom 27. Dezember 1993, BGBl. I S. 2378; BGBl. III 933-10; in: Freise, R., 1998: Handbuch der Eisenbahngesetze, 12. Aufl., Hestra-Verlag.
- EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz), 2006: Gesetz für den Vorrang erneuerbaren Energien vom 21. Juli 2004, BGBl. I S. 1918; zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. November 2006, BGBl. I S. 2550
- Eltrop, L., J. Moerschner, M. Härdtlein und A. König, 2006: Bilanz und Perspektiven der Holzenergienutzung in Baden-Württemberg. Forschungsbericht Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Universität Stuttgart, Band 98, 83 S.
- EnergieStG (Energiesteuergesetz), 2006: Gesetz zur Neuregelung der Besteuerung von Energieerzeugnissen und zur Änderung des Stromsteuergesetzes vom 15. Juli 2006, BGBl. I 1534; zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Dezember 2006, BGBl. I 3180.
- Europäische Kommission, 2000: Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit. Grünbuch. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften Luxemburg, 113 S.
- Europäische Kommission, 2004: Förderung von Biokraftstoffen in Europa. Den Verkehr freundlicher machen. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 13 S.
- Europäische Kommission, 2005a: Grünbuch über Energieeffizienz oder Weniger ist mehr. Mitteilung der Kommission – KOM(2005) 265, Brüssel, 58 S.
- Europäische Kommission, 2005b: Aktionsplan für Biomasse. Mitteilung der Kommission – KOM (2005) 628, Brüssel, 50 S.

- Europäische Kommission, 2006: Eine EU-Strategie für Biokraftstoffe. Mitteilung der Kommission – KOM (2006) 43, Brüssel, 30 S.
- Europäischer Rat, 2003: Richtlinie 2003/96/EG des Rates vom 27. Oktober 2003 zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 283/51.
- Europäisches Parlament, 2003: Richtlinie 2003/30/EG (Biokraftstoffrichtlinie) des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen im Verkehrssektor. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 123/42.
- Eurostat, 2006: Der Energieverbrauch in der EU: erste Schätzungen 2005. Eurostat-Pressestelle Luxemburg, Pressemitteilung 126/2006 vom 21. September 2006.
- FAT (Eid. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik Agroscope), 2006: Maschinenkosten 2006, Kostenelemente und Entschädigungssätze für die Benützung von Landmaschinen. FAT-Berichte, Nr. 643, Tänikon [www.fat.ch, letzter Zugang am: 21.08.2006]
- Feldbinder, 2006: Technische Daten zu Spezialfahrzeugen und Containern [www.feldbinder.de, letzter Zugang am: 14.10.2006]
- Fischer, U., 1995: Holzpotentiale für die energetische Nutzung. Forschungsbericht 1995/2 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung für Arbeitswirtschaft und Forstbenutzung, Freiburg, 18 S.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2005a: Biokraftstoffe - Pflanzen, Rohstoffe, Produkte. Gülzow, 42 S.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2005b: Basisdaten Bioenergie Deutschland. Stand August 2005. Gülzow, 4 S.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2005c: Basisdaten Biokraftstoffe. Stand August 2005. Gülzow, 6 S.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.), 2006: Holzpellets - Komfortabel, effizient, zukunftssicher. Gülzow, 34 S.
- FVA (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg), 1993: Der Wald in Baden-Württemberg. Im Spiegel der Bundeswaldinventur 1986 - 1990. Ergebnisse der Ersterhebung. Freiburg, 180 S.
- FVA (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg), 2005: Daten zur Landeswaldinventur Baden-Württemberg. Die Daten wurden von der Abteilung für Biometrie und Informatik entsprechend aufbereitet und am 10. März 2005 zur Verfügung gestellt.
- Gabriel, O., 2004: Energieholzernte auf dänisch. Forst & Technik 11/2004, S. 8-9
- GEMIS, 2006: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.3 (Mai 2006). Öko-Institut, Darmstadt [http://www.oeko.de/service/gemis, letzter Zugang am: 10.07.06 ]
- Hahn, J., 2005: Bereitstellung von Scheitholz, Hackschnitzel und Pellets. Vortrag im Rahmen des C.A.R.M.E.N.-Fachgesprächs „Heizen mit Holz und Energiepflanzen“ am 23. Oktober 2005 in Straubing. Foliensatz, 43 S.
- Harms, H., 1995: Ernte- und Aufbereitungstechnik von Halmgütern; in: Logistik bei der Nutzung biogener Festbrennstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 5, Landwirtschaftsverlag Münster, S. 23-40
- Hartmann, H., 2001: Die energetische Nutzung von Stroh und strohähnlichen Brennstoffen in Kleinanlagen; in: Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. Gülzower Fachgespräche Band 17. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, S. 62-84
- Hartmann, H., 2005: Produktion, Bereitstellung und Eigenschaften biogener Festbrennstoffe; in: Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, S. 52-90
- Haschke, P., 1998: Forstliche Energieholzpotentiale in Deutschland und Aspekte ihrer zukünftigen Nutzung. Holz-Zentralblatt Nr. 53, S. 805-806
- Heisig, H., L. Paredes und J. Wiesel, 2004: GIS-based energy wood resource assessment in the northern black forest region; in: Fjällstrom, T., A. Grassi, P. Helm und W. P. M. van Swaaji (Hrsg.): Proceed. World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10 - 14 May 2004, Rome (Italy). Verlag WIP Munich, S. 455-458

- Hemme-Seifert, K., 2003: Regional differenzierte Modellanalyse der Erzeugung von Biomasse zur energetischen Nutzung in Deutschland. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL). Institut für Betriebswirtschaft, Agrarstruktur und ländliche Räume, Braunschweig, 146 S.
- Henrich, E., E. Dinjus und D. Meier, 2002: Hochwertige Biomassenutzung durch Flugstrom-Druckvergasung von Pyrolyseprodukten. 13. Internationales Sonnenforum, Berlin 12. - 14. September 2002
- Henrich, E., N. Dahmen und E. Dinjus, 2007: Das FZK-Projekt. Herstellung von Synthekraftstoff aus Biomasse. Präsentation auf der internationalen Tagung „Thermo-chemisch Biomasse-Vergasung für eine effiziente Strom/Kraftstoffbereitstellung – Erkenntnisstand 2007“, 27./28. Februar 2007
- Henrich, E., und E. Dinjus, 2004: Das FZK-Konzept zur Kraftstoffherstellung aus Biomasse; in: FNR (Hrsg.): Biomasse-Vergasung – Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung? Internationale Tagung, 01./02. Oktober in Leipzig. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, S. 298 - 337
- Hepperle, F., 2005: Weiterentwicklung GIS-gestützter Prognosemodelle für Waldenergieholz auf Grundlage forstlicher Inventur- und Planungsdaten. Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und Arbeitswissenschaften, Freiburg, 97 S.
- Heurich, M., 2007: Waldinventuren aus dem Flugzeug. LWF-aktuell Nr. 58, Kapitel 24
- HKH (Handelskammer Hamburg), 2006: Das Energiesteuerrecht ab 1. August 2006. Dokument Nr. 38208, Hamburg [www.hk24.de; letzter Zugang 03.08.2007]
- Höllerl, H., 2004: Testfall für das Energieholz Bündel. Forst & Technik 5/2004, S. 4-6
- Holzenergie Schweiz, 2004: Merkblatt Rationelle Holzschnitzelbereitstellung im Forstbetrieb. Zürich, 8 S. [http://www.holzenergie.ch, letzter Zugang 08.03.2007]
- Hydro Agri Dülmen GmbH (Hrsg.), 1993: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hilltrup, 618 S.
- IKP, 1998: GaBi 3 – das Softwaresystem zur ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart [http://www.ikp2.uni-stuttgart.de]
- Kalies, M., N. Rommeiß, S. Schneider und J. Witt, 2006: Thermische Energie; in: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, S. 67-155
- Kaltschmitt, M., 1993: Ernterückstände der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion; in: Kaltschmitt, M. und A. Wiese (Hrsg.): Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Potentiale und Kosten. Heidelberg, S. 201-224
- Kaltschmitt, M., 2001: Einleitung und Zielsetzung; in: M. Kaltschmitt und H. Hartmann (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg, S. 1-34
- Kaltschmitt, M., und H. Hartmann, 2001: Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle; in: M. Kaltschmitt und H. Hartmann (Hrsg.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg, S. 95-122
- Kändler, G., 2005: Persönliche Mitteilung vom 30. März 2005. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- Kändler, G., M. Schmidt und J. Breidenbach, 2004: Der Wald in Baden-Württemberg im Jahr 2002 und seine Entwicklung seit 1987 – Die wichtigsten Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur; in: Der Wald im Spiegel der 2. Bundeswaldinventur. Kolloquiumsband des FVA-Kolloquiums vom 12. Oktober 2004, Freiburg, S. 1-6
- Kanzian, C., 2005: Bereitstellung von Waldhackgut: Verfahren Energieholz Bündel im Gebirge. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forsttechnik, 32 S.
- Kanzian, C., B. Fenz, F. Holzleitner und K. Stampfer, 2006b: Waldhackguterzeugung aus Schlagrücklass. Fallbeispiele im Laub- und Nadelholz. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forsttechnik, 31 S.
- Kanzian, C., F. Holzleitner, G. Kindermann und K. Stampfer, 2006a: Regionale Energieholzlogistik Mittelkärnten. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Forsttechnik, 133 S.
- KGS, 2005 (V. Wilken, Hrsg.): Kostensätze Gütertransport Straße. Unverbindliche Kostensätze für Gütertransporte auf der Straße.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.), 2004: Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/2005. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 573 S.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.), 2005: Datenbank Kalkulationsdaten: Landwirtschaftliche Maschinen und Geräte. Darmstadt [www.ktbl.de, letzter Zugang am: 24.07.2007]

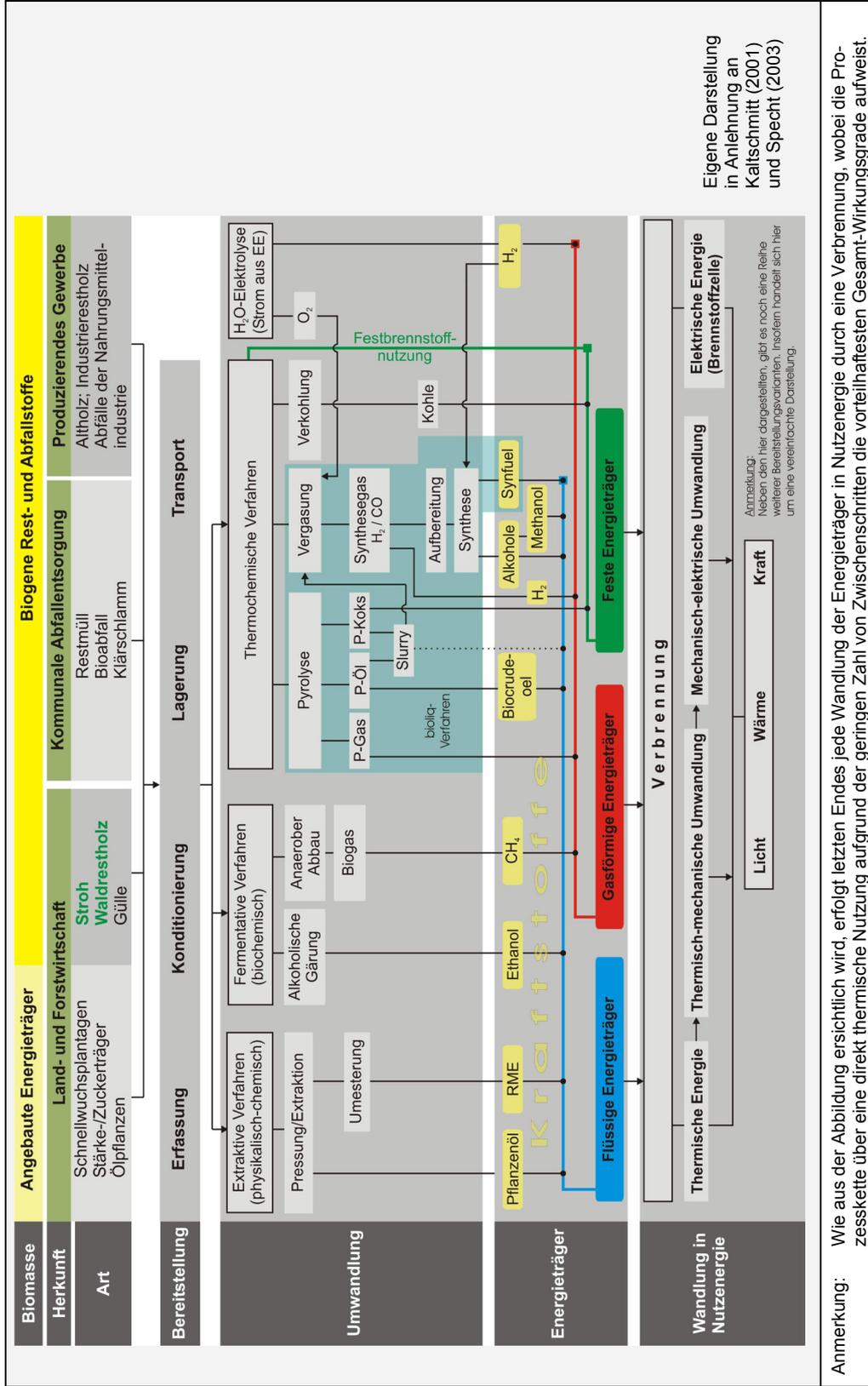
- KWF (Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik e.V.), 2004: Holzernteverfahren (Interaktive CD zur vergleichenden Erhebung und Beurteilung aktueller Holzernteverfahren). Stand 12/2004.
- Lechner, H., G. Becker und M. Bücking, 2004: Effiziente Bereitstellung von Energieholz. AFZ-DerWald 18/2004, S. 988-991
- Leible, L., A. Arlt, B. Fürniß, S. Kälber, G. Kappler, S. Lange, E. Nieke, C. Rösch und D. Wintzer, 2003: Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft – Möglichkeiten, Chancen, Ziele. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6882, Forschungszentrum Karlsruhe, 278 S.
- Leible, L., S. Kälber und G. Kappler, 2005: Entwicklungen von Szenarien über die Bereitstellung von land- und forstwirtschaftlicher Biomasse in zwei baden-württembergischen Regionen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen – Mengenszenarien zur Biomassebereitstellung. Forschungszentrum Karlsruhe, 42 S.
- Leible, L., S. Kälber, G. Kappler, S. Lange, E. Nieke, P. Proplesch, D. Wintzer und B. Fürniß, 2006: Kraftstoff, Wärme oder Strom aus Stroh und Waldrestholz – ein systemanalytischer Vergleich. Technikfolgenabschätzung, Theorie und Praxis Nr. 1/2006, S. 61-72
- Leible, L., S. Kälber, G. Kappler, S. Lange, E. Nieke, P. Proplesch, D. Wintzer und B. Fürniß, 2007: Kraftstoff, Strom und Wärme aus Stroh und Waldrestholz – Eine systemanalytische Untersuchung. Wissenschaftliche Berichte FZKA 7170, Forschungszentrum Karlsruhe, , 117 S.
- LWBW (Landwirtschaftliches Wochenblatt Baden-Württemberg), 2004: Orientierungspreise für Rauhfutter. Januar bis Dezember 2004. Verschiedene Hefte.
- LWF (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft), 2004: Holzernte in steilen Hanglagen. LWF-Merkblatt 13, Ausgabe 4/2004, 2 S.
- Malcher, L., E. Henrich, L. Krebs und L. Leible, 2004: Slurry und Synthesgaserzeugung aus trockener Biomasse – zentral oder dezentral?; in: Nachwachsende Rohstoffe für Baden-Württemberg – Forschungsprojekte für den Ländlichen Raum. Tagungsband zur Tagung vom 14. Oktober 2004 an der Universität Hohenheim, Stuttgart.
- Marutzky, R., und K. Seeger, 1999: Energie aus Holz und anderer Biomasse. Grundlagen, Technik, Entsorgung, Recht. DRW-Verlag Weinbrenner, Leinfelden-Echterdingen, 352 S.
- Meinhardt, J., 2000: Energieholz in Baden-Württemberg. Potenziale und derzeitige Verwertung. Diplomarbeit an der Fachhochschule Nürtingen, Fachbereich Landschaftsarchitektur/Stadt- und Umweltplanung. Nürtingen, 69 S.
- Mengele Agrartechnik, 2003: Technische Daten zu 3-Seiten-Kippern [[www.mengele-agrartechnik.de](http://www.mengele-agrartechnik.de), letzter Zugang am: 17.04.2007]
- MinöStG (Mineralölsteuergesetz), 1992: Mineralölsteuergesetz vom 21. Dezember 1992. BGBl I 1992, 2150, 2185; aufgehoben durch das Energieneuordnungsgesetz (EnergieNOG) am 15. Juli 2006, BGBl I 962
- MiRO, 2007: Die Mineralölraffinerie Oberrhein GmbH & CO. KG im Überblick [[www.miro-ka.de](http://www.miro-ka.de); letzter Zugang am: 01.10.07]
- MLR (Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg), 2003: Jahresbericht 2002 der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg. Materialband 48. Jahrgang, Stuttgart, 384 S.
- MLR (Ministerium für Ernährung und Ländlicher Raum Baden-Württemberg), 2004: Vergütung der Mineralölsteuer nach dem Agrardieselgesetz. Infodienst der Landwirtschaftsverwaltung [[www.landwirtschaft-bw.de](http://www.landwirtschaft-bw.de), zuletzt besucht 08.06.06]
- MLR (Ministerium für Ernährung und Ländlicher Raum Baden-Württemberg), 2007: Brennholzabsatz stark gestiegen. Online Pressemeldung vom 16. April 2007 auf der Homepage von AFZ-DerWald [[www.afz-derwald.de/holzmarkt](http://www.afz-derwald.de/holzmarkt), letzter Zugang am: 05.07.07]
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband), 2007a: Jahresbericht Mineralölzahlen 2006. Hamburg, 80 S.
- MWV (Mineralölwirtschaftsverband), 2007b: Mineralölverbrauch, Foliensatz 2007. Hamburg, 80 S.
- Neugebauer, G., S. Wittkopf, C. Baudisch und F. Günsche, 2005: Hackschnitzel auf dem Vormarsch. Umfrage bei bayerischen Biomasseheizwerken – Material und Kosten. LWF-aktuell Nr. 48, S. 9-10
- Odenthal-Kahabka, J., 2005: Handreichung Sturmschadensbewältigung. Landesforstverwaltung Baden-Württemberg und Landesforsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.), Freiburg, 5 S.
- Polley, H., 2005: Persönliche Mitteilung vom 20.04.2005. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Waldökologie und Waldinventuren Eberswalde.

- Raab, K., B. Schneider und S. Deimling, 2005: Brennstoffkosten und Brennstoffpreise; in: Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, S. 205-223
- Raab, S., S. Feller, E. Uhl, A. Schäfer und G. Ohrner, 2002: Aktuelle Holzernteverfahren am Hang. Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF-Bericht Nr. 36, 80 S.
- RIPS, 2005: Räumliches Informations- und Planungssystem. Geodatenbank der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW).
- Rösch, C., K. Raab, J. Skarka und V. Stelzer, 2007: Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung? Wissenschaftliche Berichte FZKA 7333, Forschungszentrum Karlsruhe, 179 S.
- Ruhr-Stickstoff AG (Hrsg.), 1988: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau (11. Aufl.). Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 587 S.
- Schröder, G., B. Jahraus und P. Heinrich, 2005: Technik der Energiebereitstellung, Randbedingungen, geeignete Anwendungsbereiche und Anlagenkonzepte; in: Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow, S. 91-96
- Schütte, A., 2006: Interview „BtL: Biokraftstoff der Zukunft“ vom Mai 2006. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 3 S.
- Sigmund, V., und J. Frommherz, 2000: Herleitung des verfügbaren Wald-Energieholzpotenzials in Baden-Württemberg auf der Basis der Forsteinrichtungsplanung. Landesforstverwaltung Freiburg, 17 S.
- Specht, M., U. Zuberbühler und A. Bandi, 2003: Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen – Potenziale, Herstellung, Perspektiven; in: Regenerative Kraftstoffe. Entwicklungstrends, Forschungs- und Entwicklungsansätze, Perspektiven. Tagungsband der FVS Fachtagung vom 13.-14. November 2003, Stuttgart, S. 10-60
- Spinelli, R., 2004: Hackschnitzelerzeugung in den italienischen Alpen. AFZ-DerWald 19/2004, S. 1054-1056
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 1980: Statistische Berichte, Bodennutzung 1979 – Ergebnisse der Bodennutzungshaupterhebung. Stuttgart, 7 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 1981a: Statistische Berichte, Viehbestände im Dezember 1980 – Endgültige Ergebnisse der allgemeinen Viehzählung. Stuttgart, 15 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 1981b: Statistische Berichte, Ernte der Hauptfeldfrüchte – Endgültige Ergebnisse. Stuttgart, 7 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2000 bis 2005: Statistische Berichte (verschiedener Jahre), Ernte der Hauptfeldfrüchte in Baden-Württemberg – Endgültige Ergebnisse. Stuttgart
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2000: Statistische Berichte, Bodennutzung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 1999 – Ergebnisse der Landwirtschaftszählung/allgemeinen Bodennutzungshaupterhebung. Stuttgart, 8 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2002a: Statistische Berichte, Viehbestände und -halter in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 2001 – Endgültige Ergebnisse der allgemeinen Viehzählung im Mai. Stuttgart, 47 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2002b: Statistische Berichte, Bodennutzung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 2001 – Endgültige Ergebnisse der allgemeinen Bodennutzungshaupterhebung. Stuttgart, 4 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2004a: Statistische Berichte, Bodennutzung in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 2003 – Ergebnisse der Agrarstrukturerhebung/allgemeinen Bodennutzungshaupterhebung. Stuttgart, 19 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2004b: Statistische Berichte, Viehbestände und -halter in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 2003 – Endgültige Ergebnisse der allgemeinen Viehbestandserhebung am 03. Mai 2003. Stuttgart, 15 S.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2007a: Agrarstrukturerhebung 2007 startet in den nächsten Tagen. Pressemeldung (Nr. 071) des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg vom 5. März 2007.
- StaLa (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2007b: Bodennutzung in Baden-Württemberg 2007, Anbau auf dem Ackerland – Vorläufige Ergebnisse der repräsentativen Bodennutzungshaupterhebung. Stuttgart, 5 S.

- STINNES Logistics, 2006: Technische Daten zu den Güterwagen der Bahn. Online verfügbare Datenbank [www.stinnes-freight-logistics.de, letzter Zugang am: 17.09.2006]
- StVO (Straßenverkehrsordnung), 2006: Straßenverkehrsordnung vom 16. November 1970, BGBl. I 1565; zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. Dezember 2006, BGBl. I 3226
- StVZO (Straßenverkehrszulassungsordnung), 2007: Straßenverkehrszulassungsordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. September 1988, BGBl. I S. 1793. Zuletzt geändert durch die Verordnung vom 24. Mai 2007, BGBl. I 893
- TAufhG (Tarifaufhebungsgesetz), 1993: Gesetz zur Aufhebung der Tarife im Güterverkehr vom 13. August 1993, BGBl. I S. 1489. Geltung ab 01.01.1994. Aufgehoben durch Artikel 30 G v. 19.09.2006 BGBl. I 2146
- Textor, B., 2000: Waldhackschnitzelgewinnung aus Laubholzkronen für Heizzwecke. Badische Bauern Zeitung, Nr. 36, S. 39-41
- Textor, B., 2006: Bereitstellungsverfahren und Bereitstellungskosten von Waldhackschnitzel. Vortrag am Workshop „Bioenergienutzung in Baden-Württemberg – Bereitstellung von Energieholz aus dem Wald“ im Forstlichen Bildungszentrum Karlsruhe am 17.10.2006
- Textor, B., F. Hepperle und P. Siemens, 2006: Energieholz aus Nadel- und Laubstarkholz. Ergebnisse aus Praxisversuchen. Vortrag am Workshop „Bioenergienutzung in Baden-Württemberg – Bereitstellung von Energieholz aus dem Wald“ im Forstlichen Bildungszentrum Karlsruhe am 17.10.2006
- Thrän, D., und M. Kaltschmitt, 2001: Stroh als biogener Festbrennstoff in Europa; in: Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. Gölzower Fachgespräche Band 17. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gölzow, S. 85-102
- TREMODO, 1995: Traffic Emission Estimation Model (TREMODO). IFEU, Heidelberg [http://www.ifeu.de/soft/seiten/so\_trem.htm]
- Umweltministerium BW (Baden-Württemberg), 2006: Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2005 (2. Aufl.). Umweltministerium und Wirtschaftsministerium, Stuttgart, 27 S.
- Wagner, K., und S. Wittkopf, 2000: Der Energieholzmarkt Bayern. LWF Bericht Nr. 26. Freising, 66 S.
- Wiese, A., und M. Kaltschmitt, 1993: Energetische Nutzung forstwirtschaftlicher Reststoffe; in: Kaltschmitt, M. und A. Wiese (Hrsg.): Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Potentiale und Kosten. Heidelberg, S. 177-200
- Wittkopf, S., 2004: Rücken und Hacken von Fichtenkronen. AFZ-DerWald 12/2004, S. 612-614
- Wittkopf, S., 2005a: Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Dissertation, Technische Universität München, 209 S.
- Wittkopf, S., 2005b: Einsatz der Bündelmaschine Fiberpac. LWF-aktuell Nr. 48, S. 24-25
- Wittkopf, S., C. Krichbaum und C. Baudisch, 2003a: Energieholznutzung und Waldschutz im Einklang. LWF-aktuell Nr. 39, S. 7-10
- Wittkopf, S., U. Hömer und S. Feller, 2003b: Bereitstellungsverfahren für Waldhackschnitzel – Leistungen, Kosten, Rahmenbedingungen. Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 82 S.

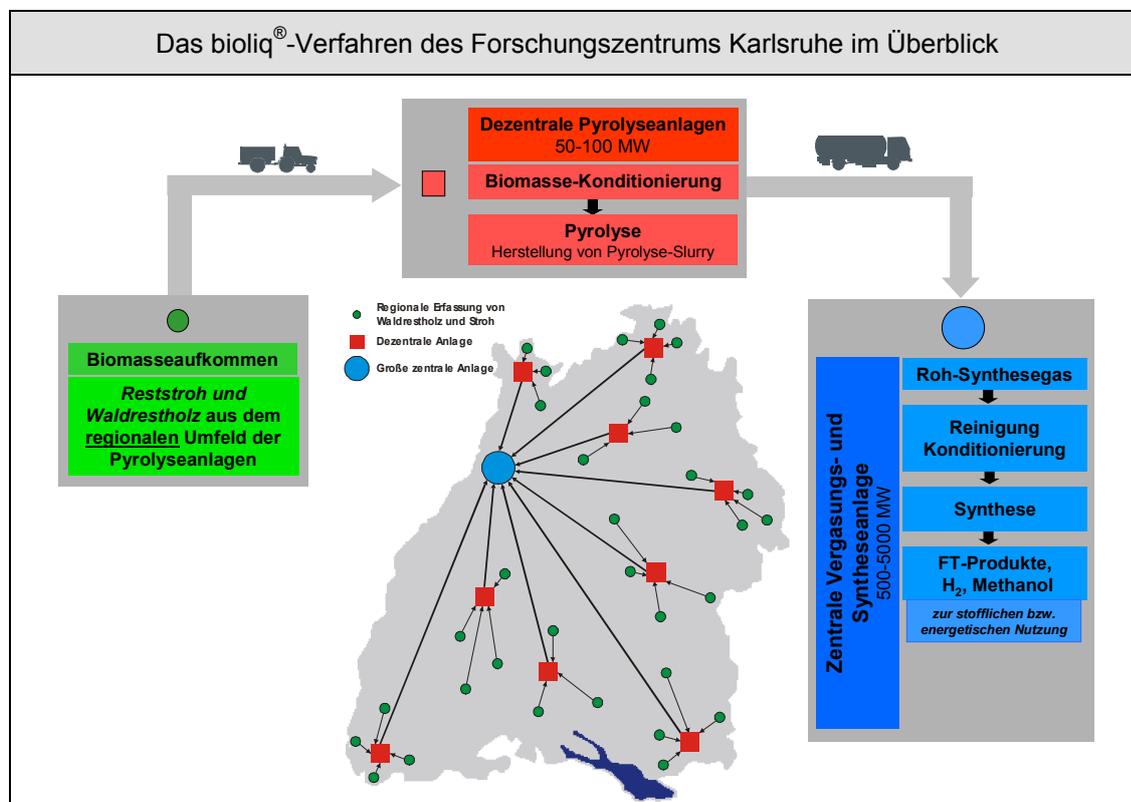


Anhang 6.1: Vereinfachte Darstellung von Bioenergie-Bereitstellungsketten



## Anhang 6.2: Beschreibung des am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten bioliq<sup>®</sup>-Verfahrens

Die folgend ausgeführten Beschreibungen zum bioliq<sup>®</sup>-Verfahren sind im Wesentlichen den Publikationen von Henrich et al. (2007), Malcher et al. (2004) sowie Henrich und Dinjus (2004) entnommen.



### Beschreibung des Verfahrens:

Zunächst wird das in einem Einzugsbereich von ca. 30 km zur Verfügung stehende Reststroh und Waldrestholz erfasst und mithilfe von landwirtschaftlichen Schleppern bzw. Lkws an der Pyrolyseanlage bereitgestellt. Dort wird in einem ersten Schritt die getrocknete und zerkleinerte Biomasse bei Umgebungsdruck und unter Luftausschluss in einem Doppelschnecken-Mischreaktor mit einem etwa 10-fachen Überschuss an vorgeheiztem Sand, welcher als Wärmeträger dient, vermischt und bei ca. 500 °C thermisch (pyrolytisch) zersetzt. Der Prozess der Aufheizung, pyrolytischen Zersetzung und Kondensation laufen hierbei innerhalb weniger Sekunden ab. Bei dieser so genannten Schnellpyrolyse entsteht als schwarzbraunes, rauchig riechendes, organisches viskoses Kondensat das Pyrolyseöl (Pyrolyseteer und Pyrolyseessig; zusammen > 50 %) sowie Koks (< 25 %) und nicht kondensierbares Pyrolysegas (< 25 %). Der Großteil des spröden Pyrolysekoks wird vor Ort fein vermahlen und dem Pyrolyseöl beigemischt (dadurch wird die Selbstentzündung des Kokes verhindert; enthalten ist auch die Asche der Biomasse) – diese Mischung ergibt dann als pump- und lagerfähiger Energieträger den so genannten Slurry. Das bei dieser Schnellpyrolyse entstehende, nicht kondensierbare Pyrolysegas (insbesondere CO, CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>) kann dabei ggf. mit einem Teil des Slurry zur Bereitstellung von prozessinterner Energie (Sandaufheizung, Trocknung der Biomasse) genutzt werden. Die Viskosität und die Zusammen-

setzung der Ausbeuten unterscheiden sich je nach eingesetzter Biomasse. Dabei machen das Pyrolysekondensat und der im Zyklon abgetrennte Pyrolysekoks bis zu 90 % der ursprünglich in der Biomasse gespeicherten Energie aus.

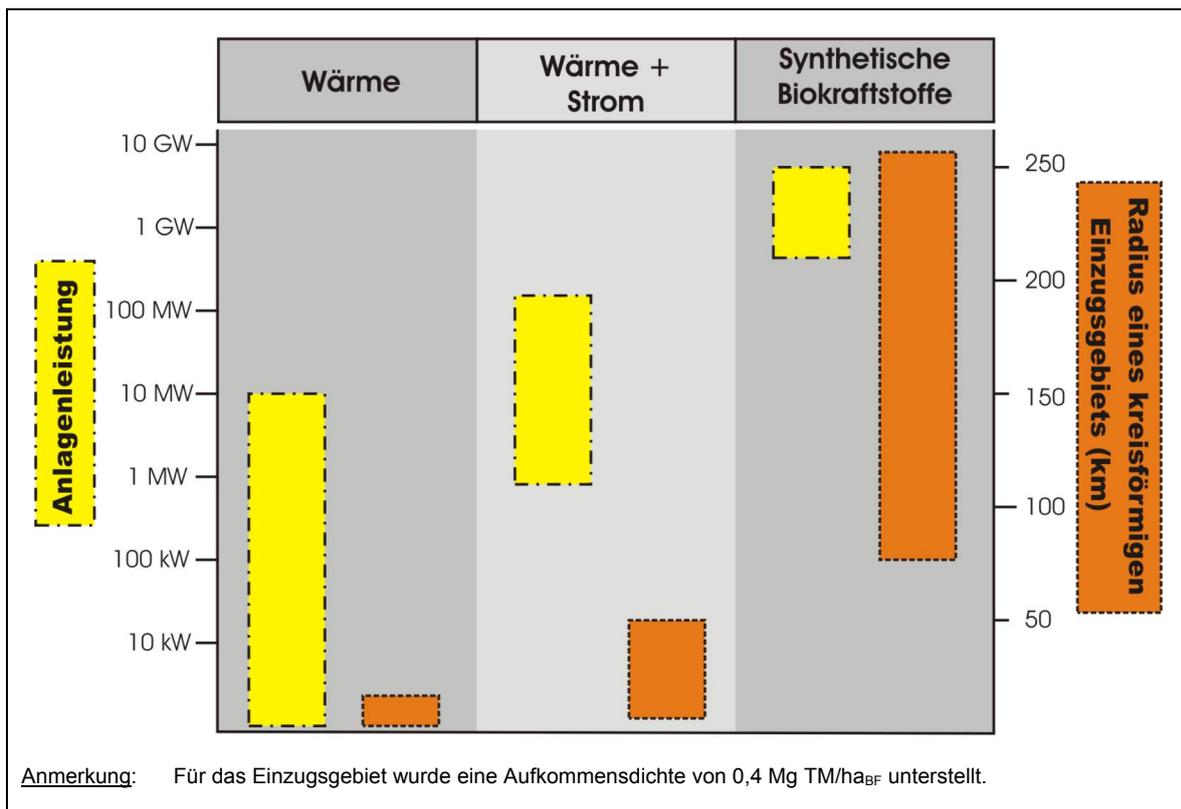
Im nachfolgenden Schritt wird der Slurry, welcher eine im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Stroh/Waldrestholz) deutlich höhere volumetrische Energiedichte aufweist (vgl. Tabelle 2.1, S. 17), aus den verschiedenen dezentral gelegenen Pyrolysenlagen zu einer großen zentralen Flugstromvergaser-/Syntheseanlage transportiert. In Abhängigkeit der jeweils vor Ort bestehenden Infrastruktur und der für diesen Transport zurückzulegenden Entfernungen stehen hierbei unterschiedliche Transportmittel (Lkw, Zug bzw. Binnenschiff) zur Verfügung.

Im folgenden Verfahrensschritt wird der Slurry pneumatisch mit Sauerstoff in den Vergaser eingedüst und bei hoher Temperatur (1.300 °C) und hohem Druck (< 100 bar) innerhalb kurzer Zeit zu einem teer- und rußfreien Rohsynthesegas (50 Vol.-% CO, 30 Vol.-% H<sub>2</sub>, 10-20 Vol.-% CO<sub>2</sub>) praktisch vollständig (zu 99 %) umgesetzt. Dabei bildet die im Slurry enthaltene Asche an der Innenwand des Vergasers einen abtropfenden Schlackepelz, welcher die Wand des Vergasers vor Korrosion schützt. Vor einer weiteren Verwendung des Rohsynthesegases muss dieses, insbesondere vor chemischen Syntheseprozessen, von Partikeln, kondensierbaren Teeren, Alkalisalzen, sauren bzw. schwefelhaltigen Gasen bis in den ppb-Bereich gereinigt werden, um die hochselektiven Synthese-Katalysatoren nicht zu vergiften. Nun kann das gereinigte und konditionierte Synthesegas in einer Fischer-Tropsch-Synthese (es ist auch die Methanolsynthese möglich) durch Variation verschiedener Prozessparameter in ein variables Produktspektrum von Kohlenwasserstoffen (Methan, Benzin, Kerosin, Diesel, Wachse) überführt werden.

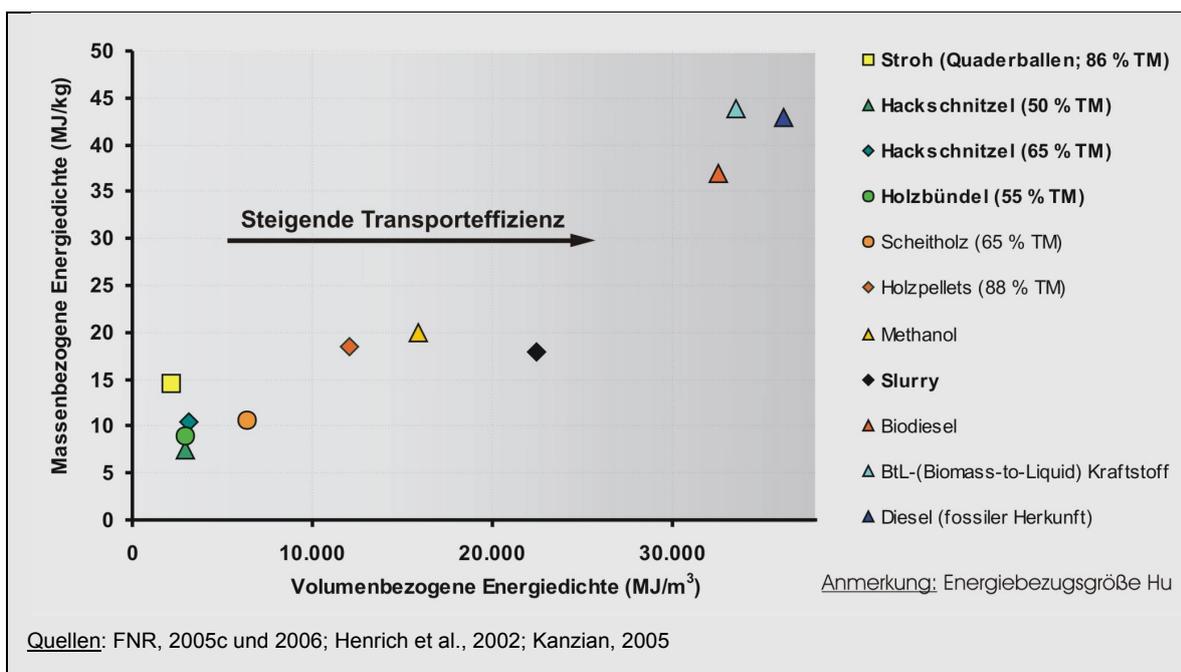
#### **Einige wesentliche Charakteristika des Verfahrens:**

- Das Verfahren ist auch für den Einsatz von aschereicher Biomasse (z.B. Stroh) geeignet, die bei der konventionellen energetischen Verwendung (z.B. Verbrennung) Probleme bereitet.
- Die hohe Energiedichte (siehe Anhang 6.4, S. A-122) des Sekundärenergieträgers Slurry ermöglicht einen kostengünstigen Transport über große Entfernungen.
- Der Slurry ist ausreichend pump- und lagerbar. Tankleckagen sind gut beherrschbar.
- Im Vergleich zu aufgemahlener Biomasse kann der Slurry sehr viel einfacher in den Flugstrom-Druckvergaser eingebracht werden. Der hohe Druck im Vergaser erlaubt die Anlage relativ klein zu gestalten, erleichtert die anschließende Gasreinigung und macht eine aufwändige Gaskompression vor einer Kraftstoffsynthese unnötig. Zudem ist das im Vergaser hergestellte Synthesegas teerfrei, was den Aufwand der (kostenintensiven) Gasreinigung deutlich reduziert.
- Für den Slurry gibt es noch weitere Einsatzbereiche (z.B. Co-Verbrennung).

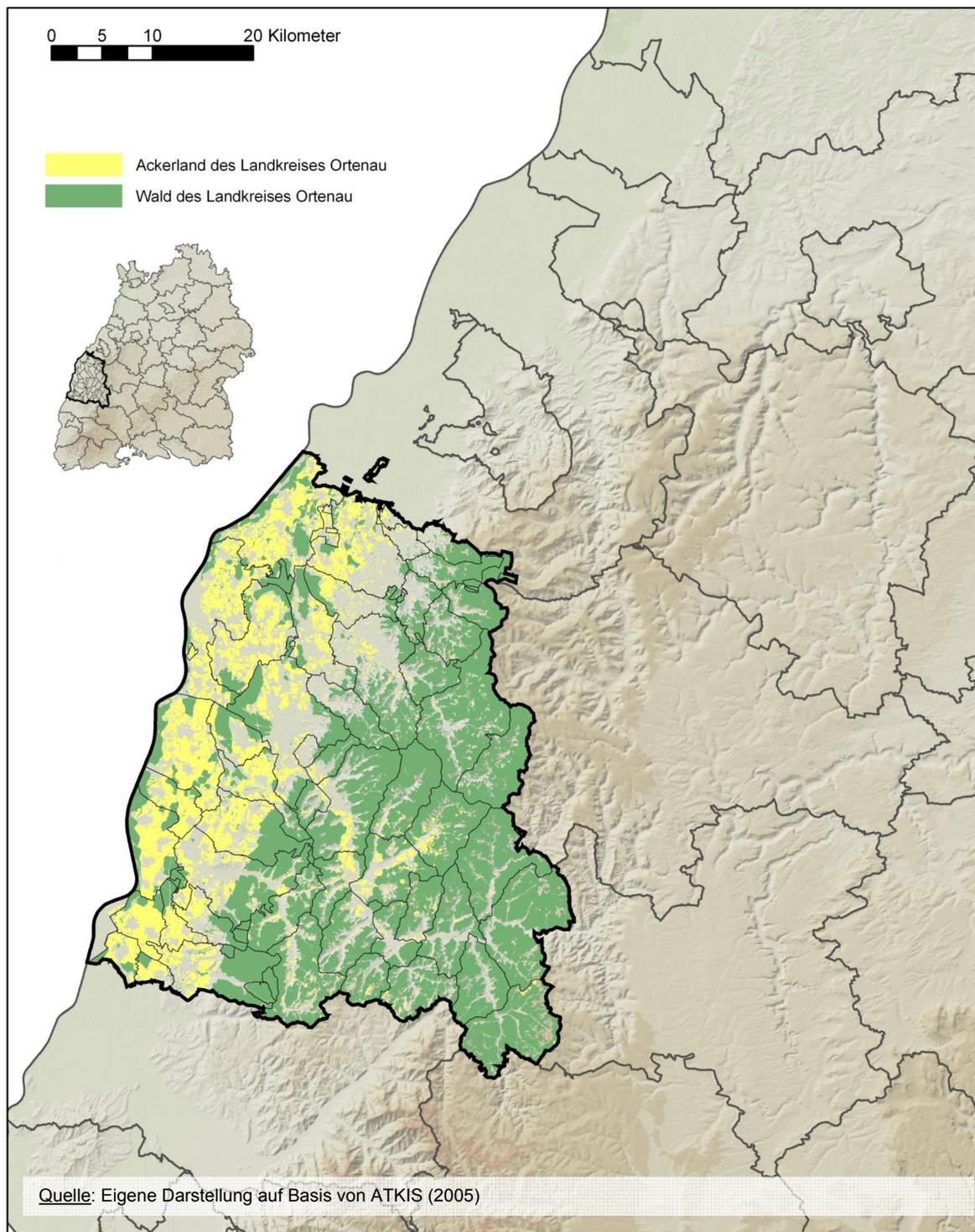
### Anhang 6.3: Einzugsgebietsgröße in Abhängigkeit von der Anlagenleistung



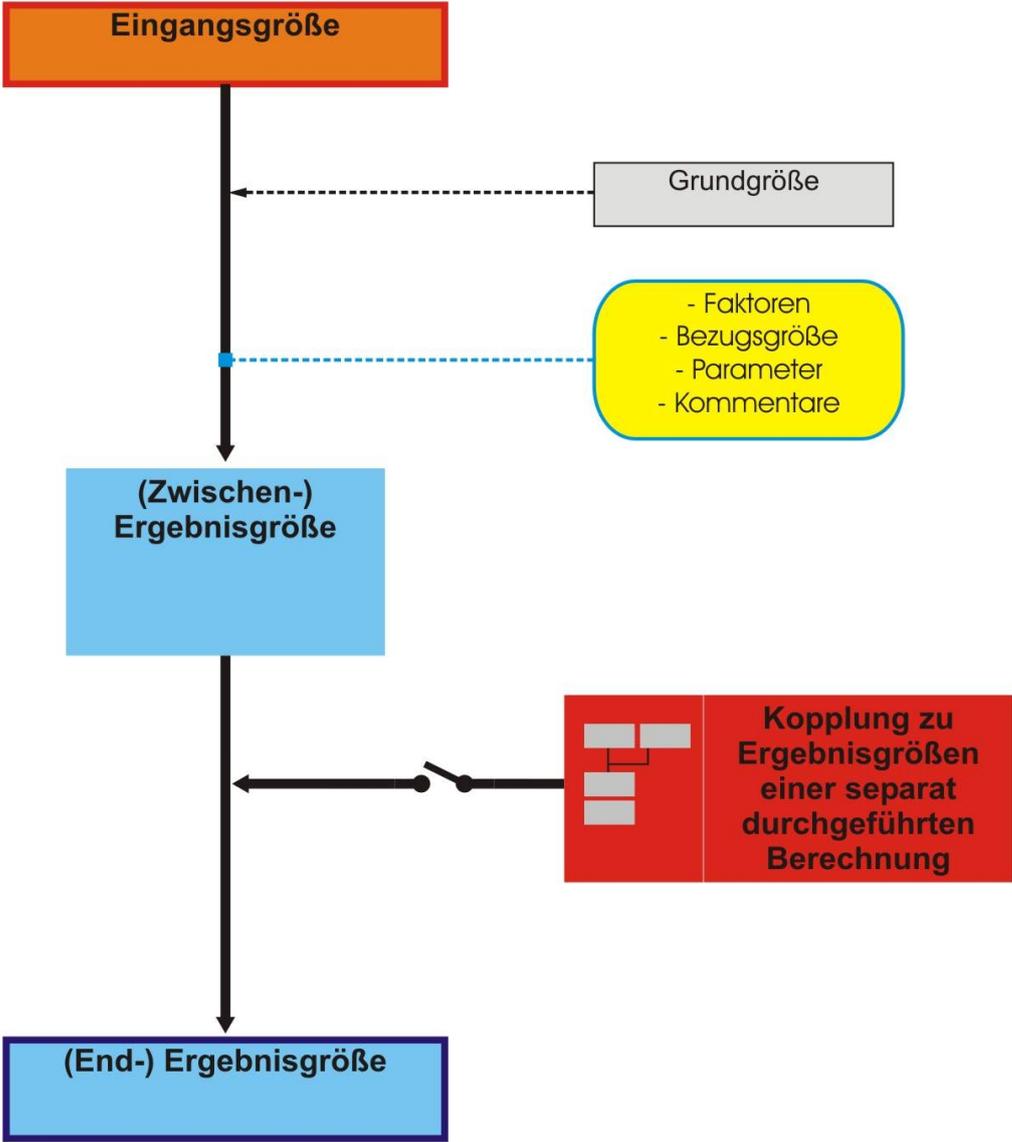
### Anhang 6.4: Massen- und volumenspezifische Energiedichten ausgewählter Energieträger



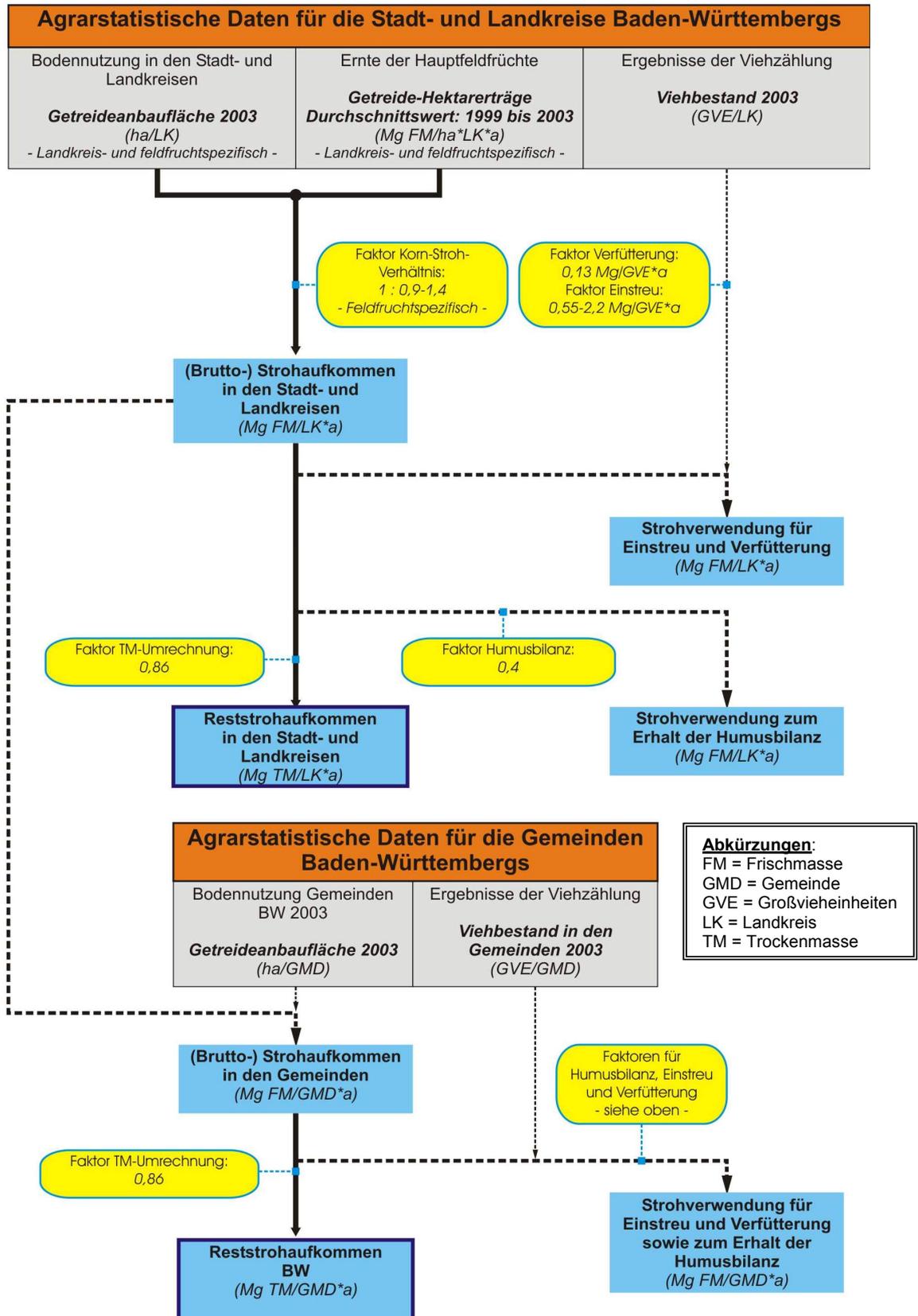
## Anhang 6.5: Landnutzung im Landkreis Ortenau



Anhang 6.6: Symbolik für die Berechnungsschemata

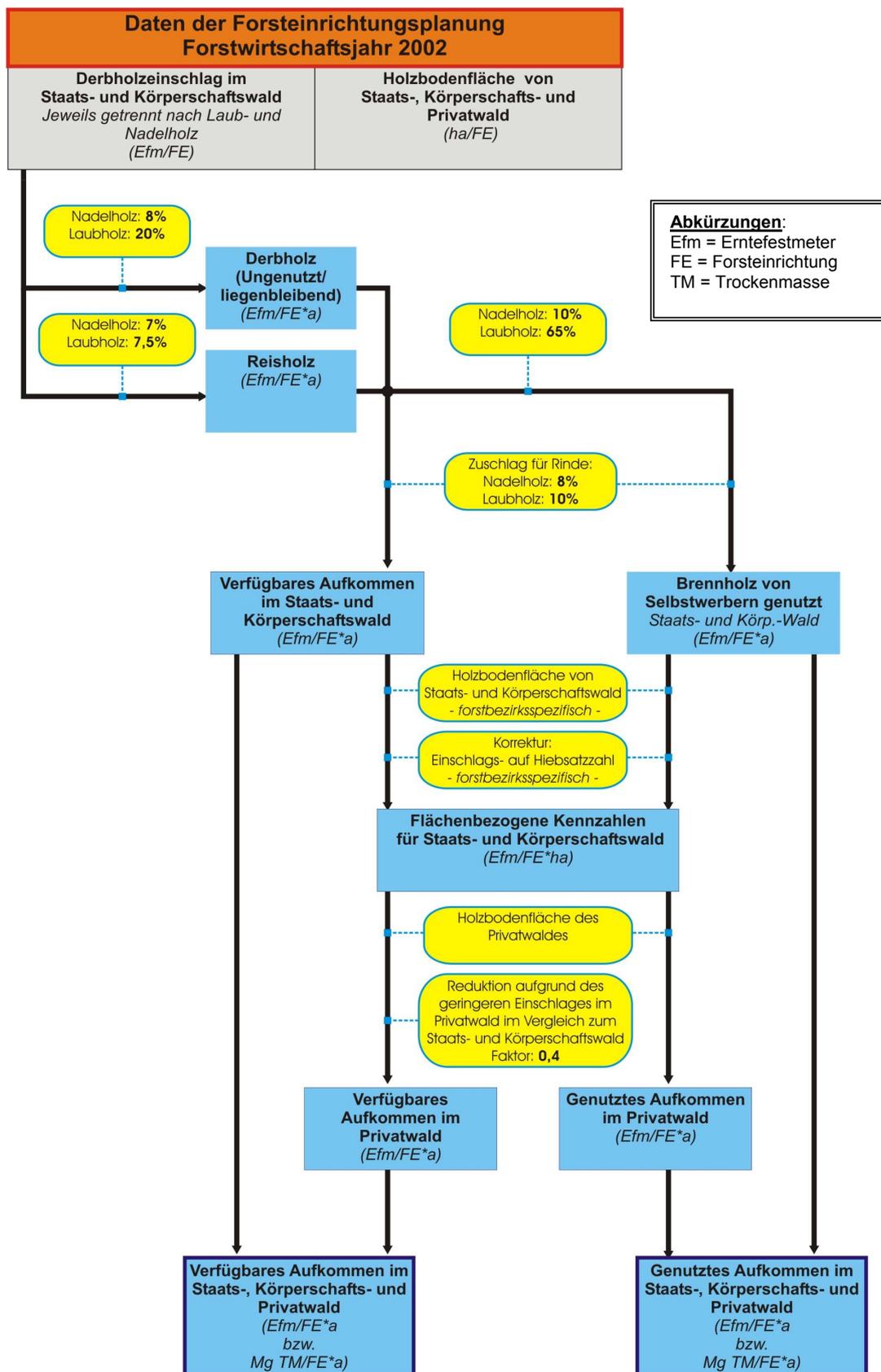


## Anhang 6.7: Schema zur Berechnung des Reststrohaufkommens



Anmerkung: Zur Erklärung der Symbolik siehe Anhang 6.6 (S. A-124)

## Anhang 6.8: Schema zur Berechnung des Waldrestholzaufkommens auf Basis der Daten zur Forsteinrichtungsplanung (Modell 1)



- Anmerkungen:**
- Zur Erklärung der Symbolik siehe Anhang 6.6 (S. A-124)
  - Weitere Erläuterungen zu diesem Modell sind Anhang 6.9 (S. A-127) zu entnehmen.

## Anhang 6.9: Anmerkungen und Annahmen zu Modell 1

- In dem forststatistischen Bericht zum Jahr 2002 (MLR, 2003) wurden keine Angaben zur Befahrbarkeit der angegebenen Waldflächen gemacht. Deshalb konnten in diesem Modell diesbezüglich keine Restriktionen vorgenommen werden. Da der dokumentierte Holzeinschlag sich auf die „Holzbodenfläche regelmäßiger Bewirtschaftung“ bezieht, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das bei diesem Einschlag anfallende Waldrestholz zumindest theoretisch größtenteils zugänglich ist.
- Obwohl im forststatistischen Bericht Angaben zum forstbezirksspezifischen Aufkommen an liegenbleibendem Derbholz (DS-Holz) gemacht wurden, hat sich anhand einer bei einigen Forstämtern durchgeführten Nachfrage gezeigt, dass diese Angaben sehr uneinheitlich geschätzt wurden und daher relativ inkonsistent sind. Aus diesem Grund wurde, unabhängig von den Angaben im Bericht, das Aufkommen dieser Fraktion über einen prozentualen Satz abgeschätzt.
- Die im forststatistischen Bericht für die unterschiedlichen Besitzverhältnisse dokumentierten Waldflächen beziehen sich beim Privatwald nicht auf die Holzbodenfläche. Deshalb wurden die im Bericht angegebenen Privatwaldflächen, entsprechend der Angaben zum Staats- und Körperschaftswald, um 5 % reduziert.
- Erfahrungsgemäß liegt der Holzeinschlag im Privatwald deutlich unter dem des Staats- und Körperschaftswaldes. Deshalb wurde das Aufkommen im Privatwald unter Berücksichtigung eines Faktors (0,4) aus den Ergebnissen zum Staats- und Körperschaftswald abgeleitet. Dieser Faktor ergibt sich aus den Ergebnissen zur Bundeswaldinventur 2 (BMVEL, 2005c).
- Als Umrechnungsfaktor von Holzvolumen (Efm) in Trockenmasse (TM) wurde in Anlehnung an Wagner und Wittkopf (2000) der Faktor 0,5 angesetzt.

# Anhang 6.10: Datentabelle zur Bundeswaldinventur

Landkreis	BWI 1 (1987)				BWI 2 (2002)				Ernteverlust (m³) (=Ausgesch. Vorrat minus Nutzung)				
	Holzbodenflächen ohne Blößen/Lücken (ha)	Holzbodenflächen einschließlich Blößen/Lücken (ha)	Vorrat (m³ Vfm)	Vorratsgliederung (%)		Vorrat (m³ Vfm)	Vorratsgliederung (%)			Nutzung (verwertet) der Periode 1987 bis 2002 (m³ Efm)			
				Schwach	Mittel		Stark	schwach			mittel	stark	
Stuttgart, Landeshauptstadt	5.301	5.301	1.938.188	13,5%	55,6%	31,0%	768.802	10,2%	48,4%	41,5%	918.686	658.344	260.342
Böblingen	20.205	20.605	7.498.946	22,5%	63,8%	13,7%	3.334.461	14,5%	61,7%	23,9%	5.998.064	4.117.872	1.780.193
Esslingen	18.204	18.304	6.659.615	23,4%	55,6%	21,0%	3.348.211	16,7%	55,6%	27,7%	3.296.776	2.336.447	960.329
Göppingen	19.305	19.405	7.316.865	26,1%	80,0%	14,0%	3.636.975	7,7%	61,7%	22,5%	3.288.174	2.391.007	907.166
Ludwigsburg	11.203	11.303	3.970.807	18,3%	52,9%	30,8%	1.707.767	11,2%	44,7%	44,1%	1.543.316	1.050.304	493.012
Rems-Murr-Kreis	31.108	31.508	11.757.730	19,0%	60,3%	20,8%	6.870.308	13,4%	55,1%	30,4%	5.873.934	4.426.598	1.447.336
Heilbronn, Stadt	1.800	1.800	477.278	21,5%	39,0%	39,5%	259.271	57,4%	41,7%	42,5%	176.603	118.130	59.474
Heilbronn	26.006	26.206	8.920.276	20,7%	53,4%	26,0%	4.518.244	17,9%	53,3%	28,8%	4.175.277	3.112.108	1.063.169
Hohenlohekreis	18.304	18.605	5.542.254	24,6%	55,7%	19,7%	3.130.740	18,5%	54,4%	27,0%	2.494.227	1.625.116	869.111
Schwäbisch Hall	41.910	42.610	14.318.607	29,2%	62,4%	9,4%	8.605.798	21,9%	60,1%	18,0%	8.605.082	6.376.511	2.228.551
Main-Tauber-Kreis	37.209	37.509	11.345.966	32,6%	55,1%	12,3%	6.182.028	22,1%	60,3%	17,6%	5.561.660	4.081.123	1.510.537
Heidenheim	25.506	26.006	8.939.758	25,1%	63,6%	11,3%	5.130.204	20,1%	63,0%	16,9%	6.012.538	4.699.178	1.313.360
Ostalbkreis	58.814	59.614	21.412.182	22,9%	65,4%	11,7%	11.000.069	18,8%	60,9%	18,9%	13.780.081	10.748.682	3.031.409
Baden-Baden, Stadt	8.202	8.202	2.659.652	23,3%	52,2%	24,8%	1.461.684	2,2%	54,2%	28,0%	1.744.263	1.194.629	549.634
Karlsruhe, Stadt	4.701	4.801	1.150.397	36,7%	38,4%	24,8%	718.057	1,7%	49,9%	27,2%	839.265	590.810	249.455
Karlsruhe	33.808	34.108	10.684.341	23,9%	55,1%	20,9%	5.365.486	16,9%	56,7%	27,4%	6.884.203	4.875.418	1.818.785
Rastatt	36.709	37.909	11.306.088	22,8%	52,3%	24,9%	6.627.420	17,9%	51,6%	30,5%	7.260.013	5.214.395	2.045.618
Heidelberg, Stadt	5.101	5.201	1.481.006	24,6%	55,4%	20,0%	942.222	14,8%	51,0%	34,1%	704.156	515.773	188.383
Mannheim, Universitätsstadt	2.000	2.000	550.633	21,1%	61,3%	17,7%	218.639	14,8%	62,8%	22,5%	220.360	105.887	114.473
Neckar-Odenwald-Kreis	44.411	44.711	14.650.593	26,6%	62,2%	11,2%	9.059.782	19,3%	60,3%	20,4%	9.128.585	6.947.073	2.181.492
Rhein-Neckar-Kreis	33.408	33.908	10.249.004	25,2%	56,8%	18,0%	5.963.424	16,4%	56,2%	24,9%	5.669.225	4.101.776	1.467.449
Pforzheim, Stadt	5.101	5.101	1.934.771	28,4%	51,7%	19,9%	873.345	10,5%	58,9%	24,9%	1.891.006	1.092.876	598.130
Calw	48.412	48.912	20.419.898	16,0%	62,5%	21,4%	7.977.523	12,8%	58,3%	27,9%	11.026.780	8.483.652	2.543.107
Enzkreis	21.505	21.805	7.244.212	22,4%	61,1%	16,4%	3.606.941	18,1%	56,2%	25,7%	4.676.187	3.496.285	1.079.882
Freudenstadt	51.012	51.813	21.447.994	17,3%	63,6%	19,1%	10.601.272	11,3%	57,3%	31,4%	9.359.456	6.944.797	2.514.660
Freiburg im Breisgau, Stadt	6.402	6.502	2.016.078	25,6%	41,7%	32,7%	1.303.415	17,4%	45,9%	36,7%	1.146.034	774.595	373.440
Breisgau-Hochschwarzwald	62.715	64.115	22.155.023	19,9%	58,1%	22,0%	13.109.924	14,6%	54,5%	30,9%	10.657.915	7.771.657	2.886.258
Emmendingen	29.507	29.907	10.060.798	21,0%	60,5%	18,5%	5.861.266	14,4%	59,3%	26,2%	3.941.407	2.865.051	1.076.356
Ortenaukreis	81.420	82.620	26.446.823	22,6%	57,3%	20,1%	16.028.978	16,9%	54,2%	29,0%	13.164.388	9.867.992	3.296.376
Rottweil	33.608	33.808	13.447.912	22,3%	61,4%	16,2%	8.003.754	15,3%	56,8%	25,9%	5.263.789	3.947.320	1.316.469
Schwarzwald-Baar-Kreis	45.511	46.111	18.671.814	23,1%	64,3%	12,6%	9.483.854	14,3%	64,4%	21,3%	7.350.809	5.588.166	1.761.642
Tuttlingen	34.608	35.308	11.543.010	29,1%	62,0%	8,9%	6.224.615	12,2%	62,3%	15,8%	5.912.424	4.490.168	1.322.256
Konstanz	22.705	23.106	8.020.241	27,1%	57,9%	15,0%	4.708.039	16,5%	59,5%	24,0%	3.631.248	2.717.598	913.652
Lörrach	38.009	38.709	13.382.052	19,6%	59,9%	20,4%	7.398.897	14,6%	56,0%	27,9%	6.863.838	5.000.314	1.863.524
Waldshut	51.012	52.213	19.241.147	23,0%	59,2%	17,8%	10.026.557	17,5%	59,1%	24,4%	7.543.780	5.472.742	2.071.018
Reutlingen	38.109	38.209	10.644.439	28,0%	59,5%	12,5%	6.284.978	21,1%	61,6%	17,3%	5.247.317	3.924.529	1.322.788
Tübingen	18.404	18.705	6.853.181	22,5%	63,6%	13,9%	2.811.647	18,7%	55,7%	25,6%	4.657.363	3.493.685	1.163.678
Zollernalbkreis	35.409	36.609	11.921.115	26,7%	66,2%	7,1%	7.357.637	14,2%	64,5%	15,3%	5.789.489	4.260.433	1.533.056
Ulm, Universitätsstadt	1.000	1.200	433.660	18,3%	61,2%	20,4%	171.830	36,5%	29,9%	14,1%	226.289	181.453	44.836
Alb-Donau-Kreis	41.510	42.010	14.596.933	26,5%	62,7%	10,7%	7.993.169	15,4%	59,1%	26,8%	7.143.979	5.496.717	1.647.262
Biberach	36.209	36.609	15.242.572	24,1%	68,2%	7,7%	8.608.147	18,6%	63,6%	17,5%	8.652.941	6.659.790	1.964.151
Bodenseekreis	20.605	20.805	9.067.856	17,7%	62,1%	20,2%	4.810.939	11,8%	56,0%	33,4%	4.231.621	3.257.688	973.934
Ravensburg	47.211	48.912	20.169.844	19,5%	69,1%	11,4%	12.164.340	14,3%	61,8%	23,9%	10.812.370	8.318.402	2.493.968
Sigmaringen	43.210	43.310	15.743.530	26,0%	63,5%	10,6%	9.437.398	18,8%	63,5%	17,7%	9.683.909	7.469.025	2.214.884
<b>BW</b>	<b>1.296.213</b>	<b>1.315.818</b>	<b>462.796.174</b>	<b>23,0%</b>	<b>60,8%</b>	<b>16,1%</b>	<b>253.718.058</b>	<b>17,0%</b>	<b>58,6%</b>	<b>24,5%</b>	<b>241.474.719</b>	<b>180.962.111</b>	<b>60.512.608</b>

Anmerkung: Aufgrund der geringen Anzahl von Stichprobenpunkten sind die Werte zu den Stadtkreisen mit teilweise recht hohen statistischen Fehler verbunden. Quelle: FVA, 2005

**– FORTSETZUNG –**

Landkreis	BWJ 2 (2002)										Ausblick 2003 bis 2017	
	Mittlere jährliche Nutzung (m³ Efm)	Jährliche Nutzung je Hektar [m³ Efm/ha]	mittl. Periodenlänge (Jahre)	HolzboDENfläche ohne Blößen/Lücken (ha)	HolzboDENfläche einschließlich Blößen/Lücken (ha)	Staatswald (Land + Bund) (ha)	Körperschaftswald (ha)	Privatwald (ha)	Vorrat (m³ Vfm/ha)	mittlere jährliche Nutzung (m³ Efm/ha)	Vorrat (2017) (m³ Vfm)	
Stuttgart, Landeshauptstadt	45.264	8,46	14,54	5.201	5.301	2.601	2.301	400	347,2	54.576	1.380.233	
Böblingen	286.988	13,40	14,35	18.805	20.505	6.101	12.603	1.800	288,0	146.186	5.461.407	
Esslingen	165.370	8,98	14,13	17.304	18.004	5.801	8.702	1.800	394,9	188.023	6.250.372	
Göppingen	171.809	8,63	13,92	18.604	19.805	5.801	5.101	8.902	417,5	214.582	7.181.647	
Ludwigsburg	74.657	6,63	14,07	11.703	11.903	5.000	9.302	2.101	375,0	115.737	3.705.647	
Reims-Murr-Kreis	291.441	9,16	15,19	31.208	32.208	12.903	7.202	12.203	432,1	376.802	12.620.245	
Heilbronn, Stadt	8.478	5,13	13,93	1.500	1.600	400	1.000	200	382,8	15.102	523.692	
Heilbronn	224.092	8,45	13,89	27.207	27.807	6.001	15.504	6.101	342,4	252.246	9.130.288	
Hohenlohekreis	128.097	6,78	14,25	18.805	19.405	3.801	5.401	10.202	344,2	172.155	6.258.890	
Schwäbisch Hall	425.955	9,95	14,97	41.110	42.910	12.003	7.502	23.606	352,2	348.513	15.809.962	
Main-Tauber-Kreis	295.462	7,77	13,81	37.109	38.209	7.202	12.203	18.805	326,1	297.618	12.331.476	
Heldernheim	315.454	11,96	14,90	25.806	26.606	11.203	7.602	7.802	317,0	191.165	9.214.284	
Ostalbkreis	764.431	12,54	14,25	57.114	60.014	22.906	8.802	28.307	329,6	451.544	20.930.993	
Baden-Baden, Stadt	80.327	9,66	14,87	7.402	8.002	1.500	6.502	600	301,3	81.072	2.357.025	
Karlsruhe, Stadt	43.362	8,93	13,63	4.701	5.001	2.701	1.800	600	249,8	39.237	1.117.024	
Karlsruhe	350.704	10,42	13,90	32.608	33.508	11.503	21.705	400	281,7	226.739	9.636.156	
Rastatt	350.512	9,17	14,88	34.908	37.509	9.302	25.306	2.901	313,5	323.859	10.885.918	
Heidelberg, Stadt	35.951	6,78	14,35	5.101	5.301	1.400	3.901	100	356,3	47.183	1.750.394	
Mannheim, Universitätsstadt	7.168	3,58	14,77	2.000	2.000	100	1.800	100	280,6	20.207	349.003	
Neckar-Odenwald-Kreis	462.275	10,30	15,03	44.711	45.011	3.901	23.106	18.004	324,9	349.861	15.880.197	
Rhein-Neckar-Kreis	297.724	8,52	14,26	33.108	33.808	9.402	16.404	8.002	328,4	259.414	11.568.141	
Pforzheim, Stadt	83.188	15,19	13,14	4.401	5.201	2.101	2.801	300	239,1	27.735	1.166.041	
Calw	645.458	13,09	13,14	46.311	48.512	22.605	18.905	7.102	376,7	462.625	18.793.086	
Enzkreis	252.186	11,67	13,86	20.205	21.205	7.402	12.703	1.100	309,9	159.862	6.488.364	
Freudenstadt	473.897	9,03	14,44	49.912	51.612	19.905	15.304	16.404	456,3	590.550	21.440.443	
Freiburg im Breisgau, Stadt	50.233	8,10	15,42	6.201	6.502	300	6.001	200	352,6	72.719	1.860.922	
Breisgau-Hochschwarzwald	498.875	7,80	15,58	62.515	64.115	14.604	25.906	24.606	406,4	695.076	24.048.698	
Emmendingen	196.939	6,59	14,55	28.807	29.607	5.101	9.402	15.104	418,9	318.822	11.819.372	
Ortenaukreis	687.556	8,41	14,15	79.519	82.620	9.602	32.608	40.510	372,5	767.033	30.640.511	
Rottweil	273.545	8,04	14,43	33.308	34.208	2.301	14.504	17.404	499,9	461.319	15.481.584	
Schwarzwald-Baar-Kreis	396.430	8,60	14,10	45.611	46.311	5.101	22.505	18.705	461,4	561.188	19.170.111	
Tuttlingen	327.909	9,39	13,69	34.508	35.208	4.201	19.105	12.303	354,0	304.981	12.598.185	
Konstanz	193.679	9,31	14,03	23.806	24.406	4.601	8.802	11.103	412,1	255.240	9.580.956	
Lörrach	334.424	7,65	14,95	37.509	38.309	8.002	19.705	11.303	389,6	448.326	13.092.992	
Waldshut	394.805	8,88	13,86	50.912	51.913	13.803	16.804	22.705	437,1	586.505	20.920.297	
Reutlingen	285.111	7,50	13,74	38.309	38.809	9.202	22.906	6.802	312,5	287.572	12.814.419	
Tübingen	249.134	12,92	14,02	17.204	17.204	6.001	9.002	3.501	296,3	142.285	4.686.464	
Zollernalbkreis	306.355	8,38	13,91	36.209	37.109	2.601	24.006	10.803	392,7	369.061	14.357.750	
Ulm, Universitätsstadt	13.816	11,99	13,13	1.100	1.100	500	400	200	350,2	10.785	356.008	
Alb-Donau-Kreis	400.219	9,51	13,73	41.410	42.310	16.404	10.102	15.804	372,3	386.276	15.225.391	
Biberach	476.151	13,04	13,98	35.909	37.409	11.703	6.502	19.405	436,3	422.895	16.103.539	
Bodenseekreis	235.016	11,46	13,86	20.805	20.805	5.001	3.601	485,5	271,182	271.182	9.373.909	
Ravensburg	564.031	12,12	14,24	48.112	49.312	10.803	2.801	37.109	473,3	586.130	22.885.479	
Sigmaringen	529.231	12,23	14,11	43.010	44.211	1.300	17.904	25.506	363,4	373.344	17.734.511	
<b>BW</b>	<b>12.704.312</b>	<b>9,43</b>	<b>14,23</b>	<b>1.281.409</b>	<b>1.323.119</b>	<b>320.177</b>	<b>526.027</b>	<b>483.917</b>	<b>364.88</b>	<b>12.743.281</b>	<b>484.054.118</b>	

## Anhang 6.11: Zusammenstellung einiger Daten zur Bundeswaldinventur

Daten zur Bundeswaldinventur (BWI)		BWI 1 (1987)	BWI 2 (2002)
<b>Holzbodenfläche</b> (1000 ha) <sup>a)</sup>		<b>1.316</b>	<b>1.323</b>
<b>nach Baumart</b> (%)	Nadelwald	65	57
	Laubwald	35	43
<b>nach Eigentumsart</b> (%)	Staatswald <sup>b)</sup>	24	24
	Körperschaftswald	39	40
	Privatwald	37	36
<b>Vorrat</b> (1000 m <sup>3</sup> VmR) <sup>c)</sup>		<b>462.800</b>	<b>485.500</b>
<b>nach Baumart</b> (%)	Nadelholz	72	65
	Laubholz	28	35
<b>nach Eigentumsart</b> (%)	Staatswald <sup>b)</sup>	23	21
	Körperschaftswald	38	37
	Privatwald (insgesamt)	39	42
	Kleinprivatwald (< 5 ha)	14	17
	Mittlerer Privatwald (5 bis 200 ha)	13	14
	Großprivatwald (> 200 ha)	12	11
<b>nach Holzstärke</b> <sup>d)</sup> (%)	Schwach	23	17
	Mittel	61	59
	Stark	16	24
<b>Vorratsdichte</b> (m <sup>3</sup> VmR/ha)		<b>352</b>	<b>367</b>

Anmerkungen: a) Einschließlich Blößen und Lücken

b) Einschließlich Bundeswald

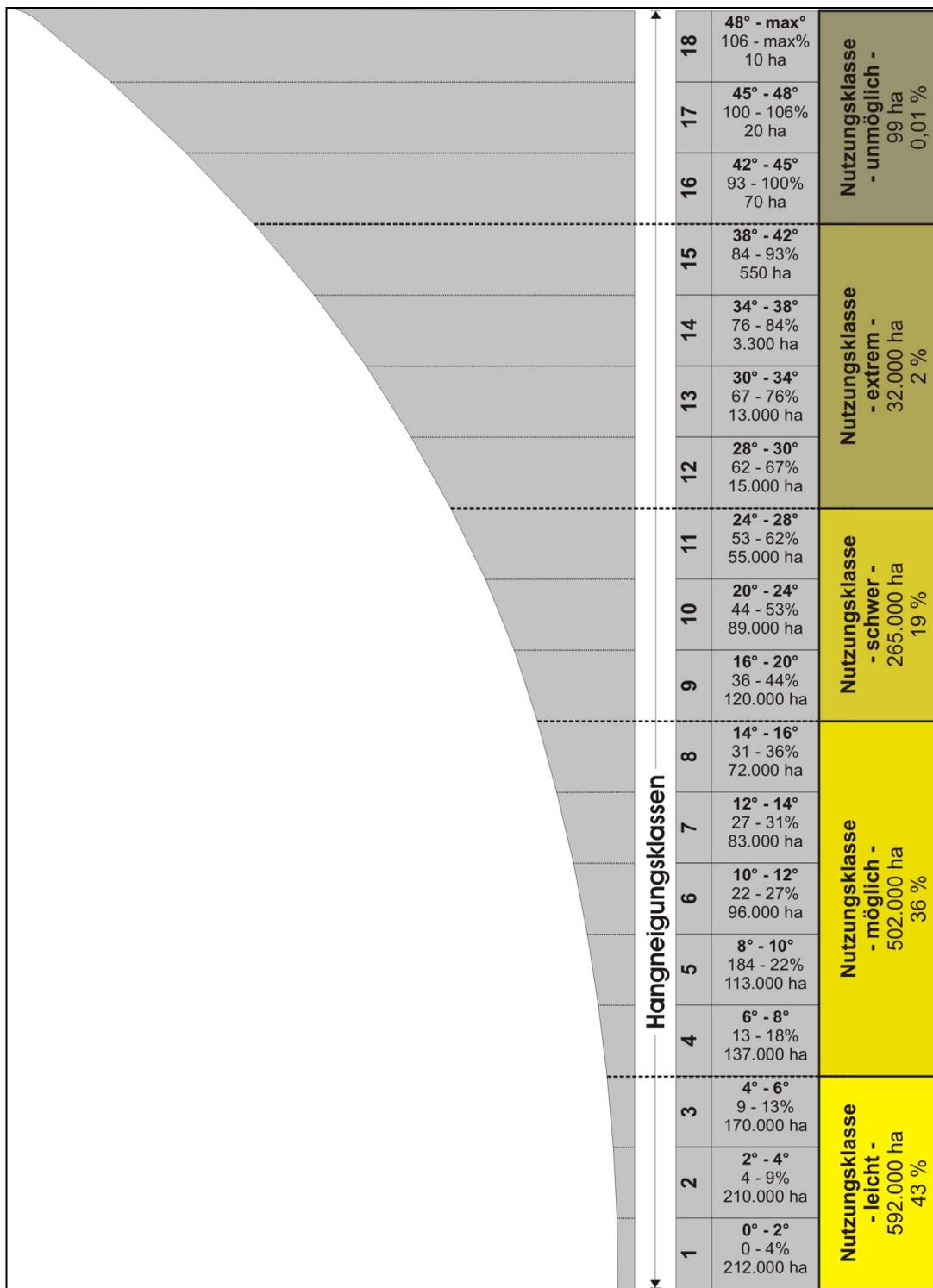
c) Vorratsfestmeter (Maßeinheit für den stehenden Holzvorrat im Wald) Derbholz mit Rinde (Derbholz ist die Masse des Schaftes und der Äste eines Baumes über 7 cm Durchmesser)

d) Brusthöhendurchmesser: Schwachholz (< 25 cm), Mittelholz (25 bis 50 cm), Starkholz (> 50 cm)

Eine genaue Darlegung der Daten zur Bundeswaldinventur auf Landkreisebene sind der Datentabelle aus Anhang 6.10 (S. A-128) zu entnehmen

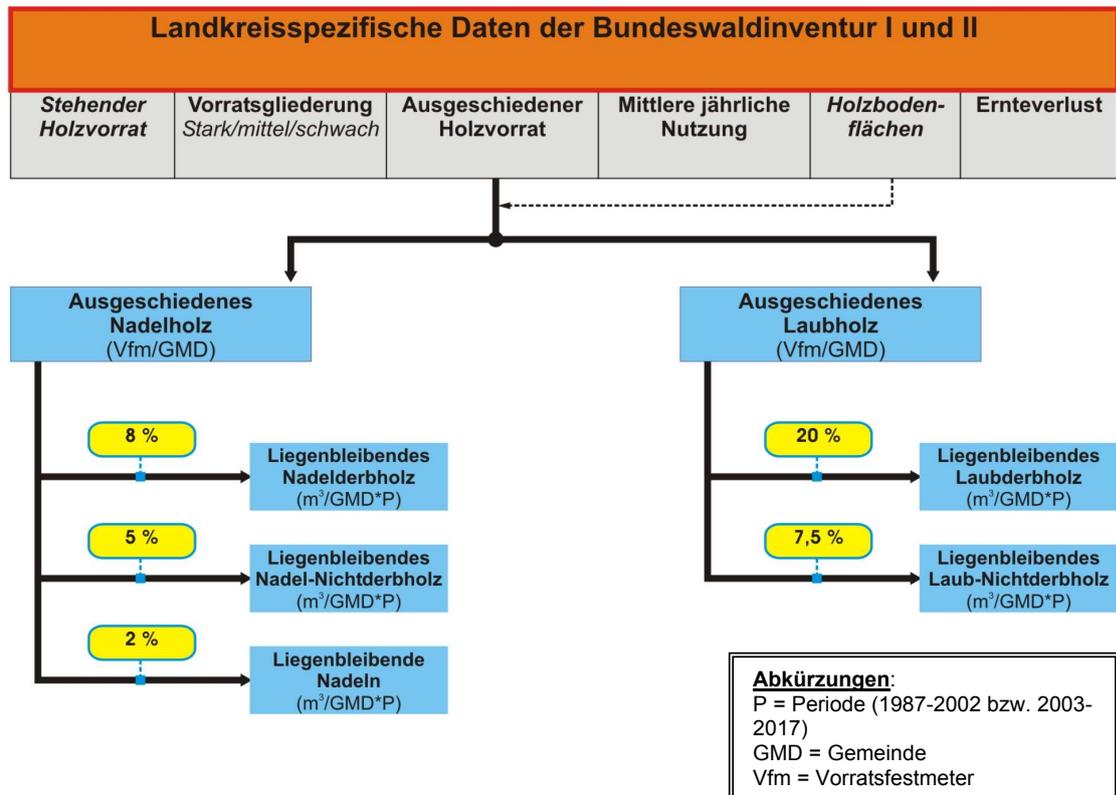
Quellen: FVA, 1993; Kändler et al., 2004; Kändler, 2005.

**Anhang 6.12: Hangneigungs- und Nutzungsklassen der Waldflächen Baden-Württembergs**



Anmerkung: Diese Einteilung der Waldflächen in verschiedene Nutzungsklassen erfolgte für jede einzelne Gemeinde Baden-Württembergs.

### Anhang 6.13: Vereinfachtes Schema zur Berechnung des Waldrestholzaufkommens auf Basis der Bundeswaldinventurdaten (Modell 2)



- Anmerkungen:
- Zur Erklärung der Symbolik siehe Anhang 6.6 (S. A-124)
  - Die landkreisspezifischen Daten für dieses Modell sind in der Datentabelle von Anhang 6.10 (S. A-128) dargestellt.

## Anhang 6.14: Anmerkungen und Annahmen zu Modell 2

- Die den Gemeinden zugeordneten und in verschiedene Hangneigungsklassen eingeteilten Waldflächen wurden, wie im Hauptdokument erläutert, hinsichtlich ihrer Besitzstruktur (Privatwald und öffentlicher Wald) unterschieden. Dabei ist diese Besitzverteilung für die Waldflächen jeder Hangneigungsklasse gleichermaßen gültig.
- Regional stark differenzierte Einflussgrößen wie Bodenständigkeit, Bestandshöhe, mittleres Alter, Durchmesserverteilung, Altersklassenzusammensetzung etc. wurden nicht berücksichtigt. Diese finden sich ansatzweise in stark aggregierter Form in den landkreisspezifischen BWI-Daten (vgl. Anhang 6.10, S. A-128) wieder (beispielsweise in der Vorratsgröße). Insofern gelten diese Gegebenheiten, soweit diese überhaupt berücksichtigt wurden, gleichermaßen für alle Waldflächen eines Landkreises.
- Auch die zusätzlich betrachteten Waldrestholzfraktionen wie Schwachholz und NV-Holz und der zusätzlich nutzbare Vorrat wurden entsprechend der Besitzverhältnisse und Hangneigungen gleichermaßen verteilt.
- Da die im ATKIS (2005) abgebildeten Waldflächen neben dem Laub- und Nadelwald auch das Attribut Mischwald besitzen, wurde diese als Mischwald benannten Waldflächen mit Hilfe einer GIS-Auswertung und in Anlehnung an die landkreisspezifischen Flächenangaben (vgl. Anhang 6.10, S. A-128) in Laub- und Nadelwald aufgeteilt und den jeweiligen Gemeinden zugeordnet. Dabei wurde bei dieser Aufteilung und Zuordnung nicht zwischen unterschiedlichen Besitzverhältnissen und Hangneigungsklassen unterschieden.
- Anders als die im Wald liegenden Naturschutzflächen wurden die FFH-Flächen nicht gesondert berücksichtigt, weil diese wie bisher genutzt werden dürfen, sofern der spezifische Aufbau und die charakteristische Artenzusammensetzung des Habitats erhalten bleiben.
- Als Umrechnungsfaktor von Holzvolumen (Efm) in Trockenmasse (TM) wurde, wie bei Modell 1, auch hier der Faktor 0,5 angenommen, obwohl hier als Bezugsbasis der Vorratsfestmeter gewählt wurde. Anders als bei Modell 2 wurde bei Modell 1 (Bezugsbasis in Erntefestmeter) vor der Umrechnung allerdings noch ein Rindenzuschlag (rund 9 %) vorgenommen, so dass sich die Unterschiede diesbezüglich nahezu ausgleichen.

## Anhang 6.15: Verteilung des ausgeschiedenen Vorrates nach Holzart

Modell 2	Nadelholz	Laubholz
Variante 1 (2002) <sup>a)</sup>	80 %	20 %
Variante 2 (2017) <sup>b)</sup>	70 %	30 %

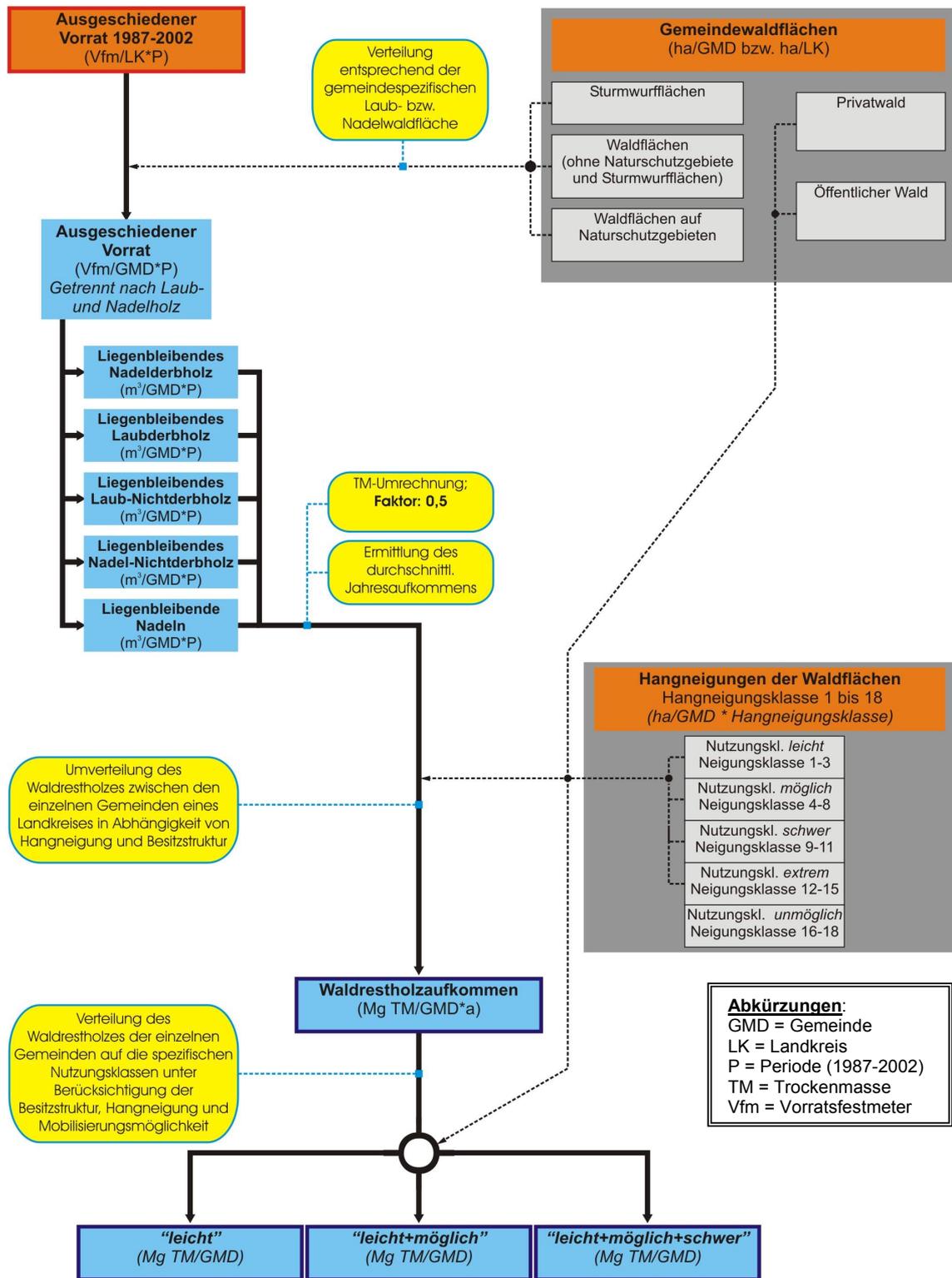
- Anmerkung:
- a) Diese Verteilung leitet sich aus den Ergebnissen zur zweiten Bundeswaldinventur (vgl. BMVEL, 2005c) ab.
  - b) Eigene Annahme. Hierbei wurde angenommen, dass sich künftig das Verhältnis des Einschlages etwas zugunsten des Laubholzes verschiebt.

## Anhang 6.16: Faktoren für die Verteilung des abgeleiteten Aufkommens auf die einzelnen Gemeinden

Modell 2	Eigentumsart	VERHÄLTNISSZAHLEN <sup>a)</sup>				Verteilung der Nutzung <sup>b)</sup> (%)
		Nutzungsklasse				
		leicht	möglich	schwer	extrem	
Variante 1 (2002)	Privatwald	20	15	11	4	33
	Öffentlicher Wald	42	34	22	2	67
Variante 2 (2017) <sup>c)</sup>	Privatwald	30	27	20	4	45
	Öffentlicher Wald	38	35	24	3	55

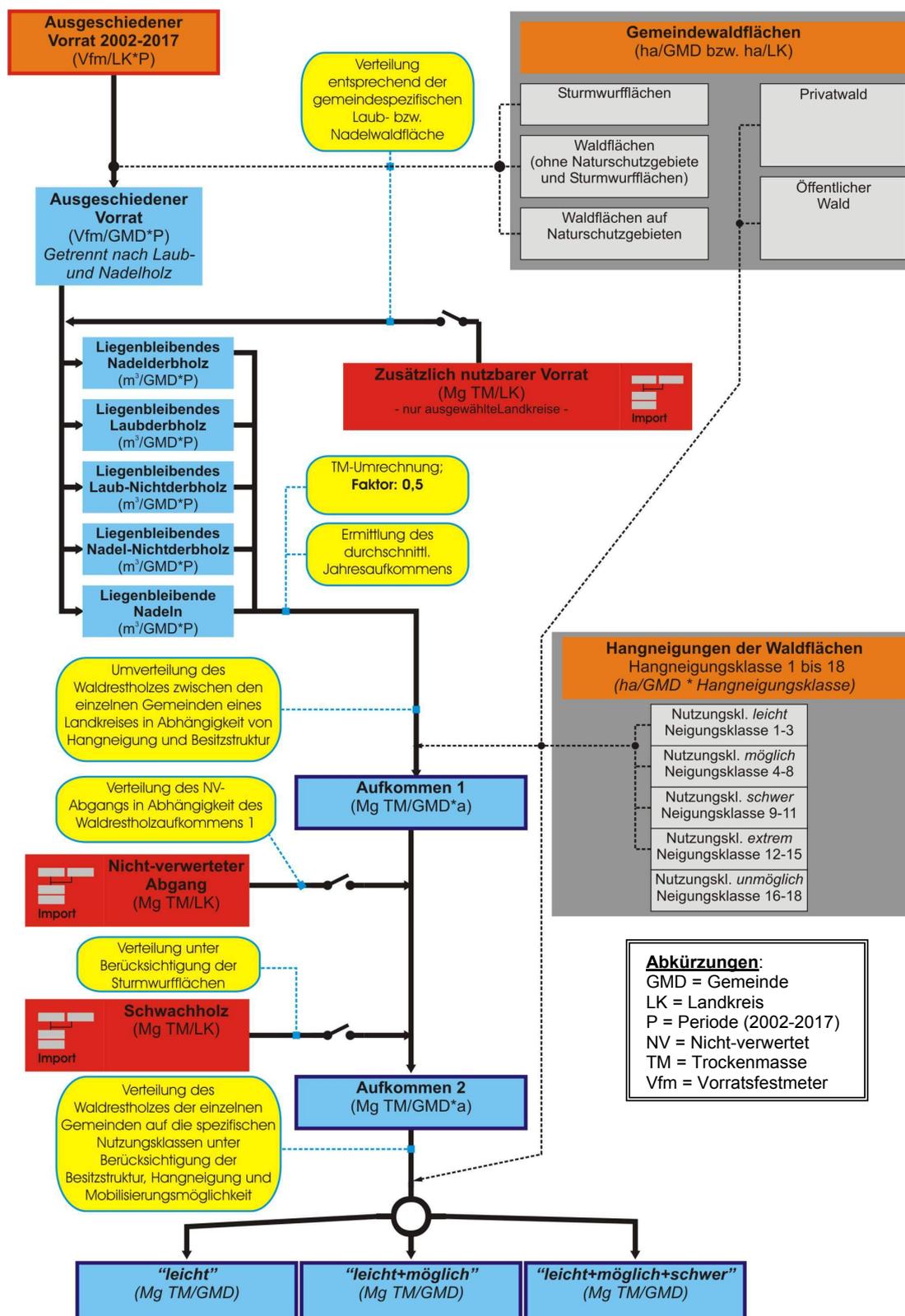
- Anmerkung:
- a) Die Festlegung dieser Verhältniszahlen erfolgte in eigener Annahme. Diese Zahlen besitzen keine Einheit und dienen dazu, das landkreisspezifische Aufkommen in Abhängigkeit von Nutzungsklasse und Eigentumsart auf die einzelnen Gemeinden zu verteilen. Für diese Verteilung wurden allerdings noch eine Reihe weiterer Kriterien verwendet.
  - b) Durch die Wahl der Verhältniszahlen ergibt sich auch die Verteilung der Nutzung zwischen Privatwald und öffentlichem Wald. Insofern wurden die Verhältniszahlen bei Variante 1 so festgelegt, dass sich in Anlehnung an die Ergebnisse zur Bundeswaldinventur 2 (vgl. BMVEL, 2005c) eine Verteilung von ein Drittel zu zwei Drittel ergab.
  - c) Für diese Variante wurde angenommen, dass in den kommenden Jahren der Einschlag im Privatwald gegenüber dem gegenwärtigen Stand deutlich erhöht werden könnte. Zudem wurde angenommen, dass künftig auch etwas mehr in steileren Hanglagen entnommen werden könnte, da auf diesen ein großes Vorratspotenzial zu erwarten ist.

## Anhang 6.17: Schema zur Berechnung des Waldrestholzaufkommens für die Periode 1987 bis 2002 (Modell 2 – Variante 1)



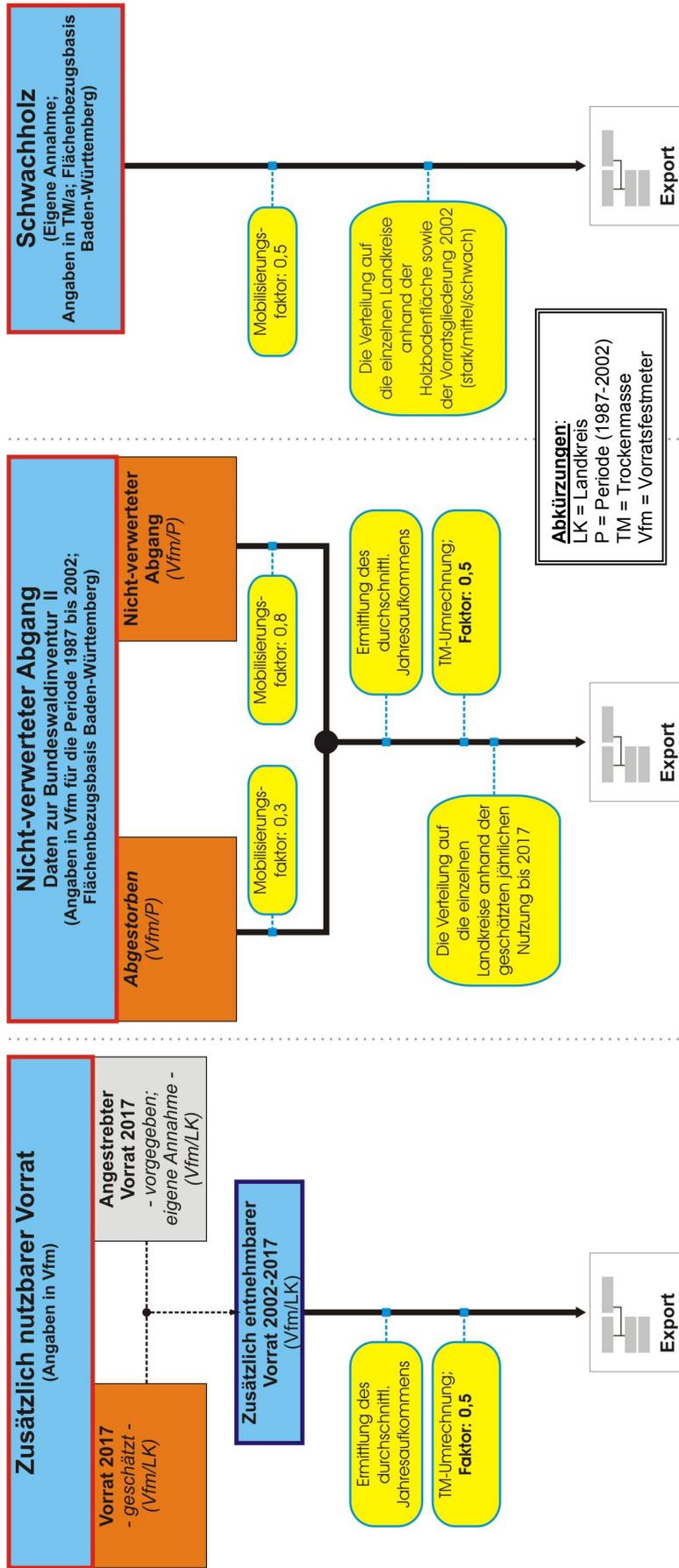
Anmerkung: Zur Erklärung der Symbolik siehe Anhang 6.6 (S. A-124)

## Anhang 6.18: Schema zur Berechnung des (Wald-) Energieholzaufkommens für die Periode 2002 bis 2017 (Modell 2 – Variante 2)



Anmerkung: Zur Erklärung der Symbolik siehe Anhang 6.6 (S. A-124)

**Anhang 6.19: Schema zur Berechnung der zusätzlich nutzbaren (Wald-) Energieholzaufkommen**



**Anmerkung:**

- Zur Erklärung der Symbolik siehe Anhang 6.6 (S. A-124)
- Die für die Berechnung berücksichtigte Menge des nicht-verwerteten Abgangs und des Schwachholzes ist in Anhang 6.20 (S. A-138) dargelegt.
- Bei dem Modell kann variiert werden ob bzw. inwieweit diese zusätzlichen Mengen mit in die Berechnung mit einbezogen werden (vergleiche Symbolik).

## Anhang 6.20: Berechnung der zusätzlichen Waldrestholzfraktionen „Nicht-verwerteter Abgang“ und „Schwachholz“

Nicht-verwerteter Abgang <sup>a)</sup>	In der BWI 2 dokumentierte Menge für Baden-Württemberg Periode 1987-2002 (m <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>	Berücksichtigter Anteil (%) <sup>b)</sup>	Jährlich verfügbare Menge (Mg TM) <sup>c)</sup>
▪ Abgesägte Bäume die ungenutzt im Wald verblieben (nur Derbholz)	7.872.000	80	221.279
▪ Totholz <sup>d)</sup>	5.488.000	30	57.850
			<b>279.129</b>

Anmerkungen: a) Aus Gründen der Vereinfachung wurde, anders als in der Bundeswaldinventur üblich, auch das Totholz unter dem nicht-verwerteten Abgang subsumiert.

b) Eigene Annahme.

c) Für die Umrechnung auf das jährliche Aufkommen wurde die in der Bundeswaldinventur 2 ermittelte durchschnittliche Periodendauer von 14,23 Jahren zugrunde gelegt. Die Umrechnung in Trockenmasse erfolgte mit dem Faktor 0,5.

d) Diese Fraktion wurde unter dem ausgeschiedenen Vorrat subsumiert (vgl. Anhang 6.10, S. A-128) und insofern bei der Berechnung des Potenzials zu (sehr) geringen Anteilen bereits berücksichtigt.

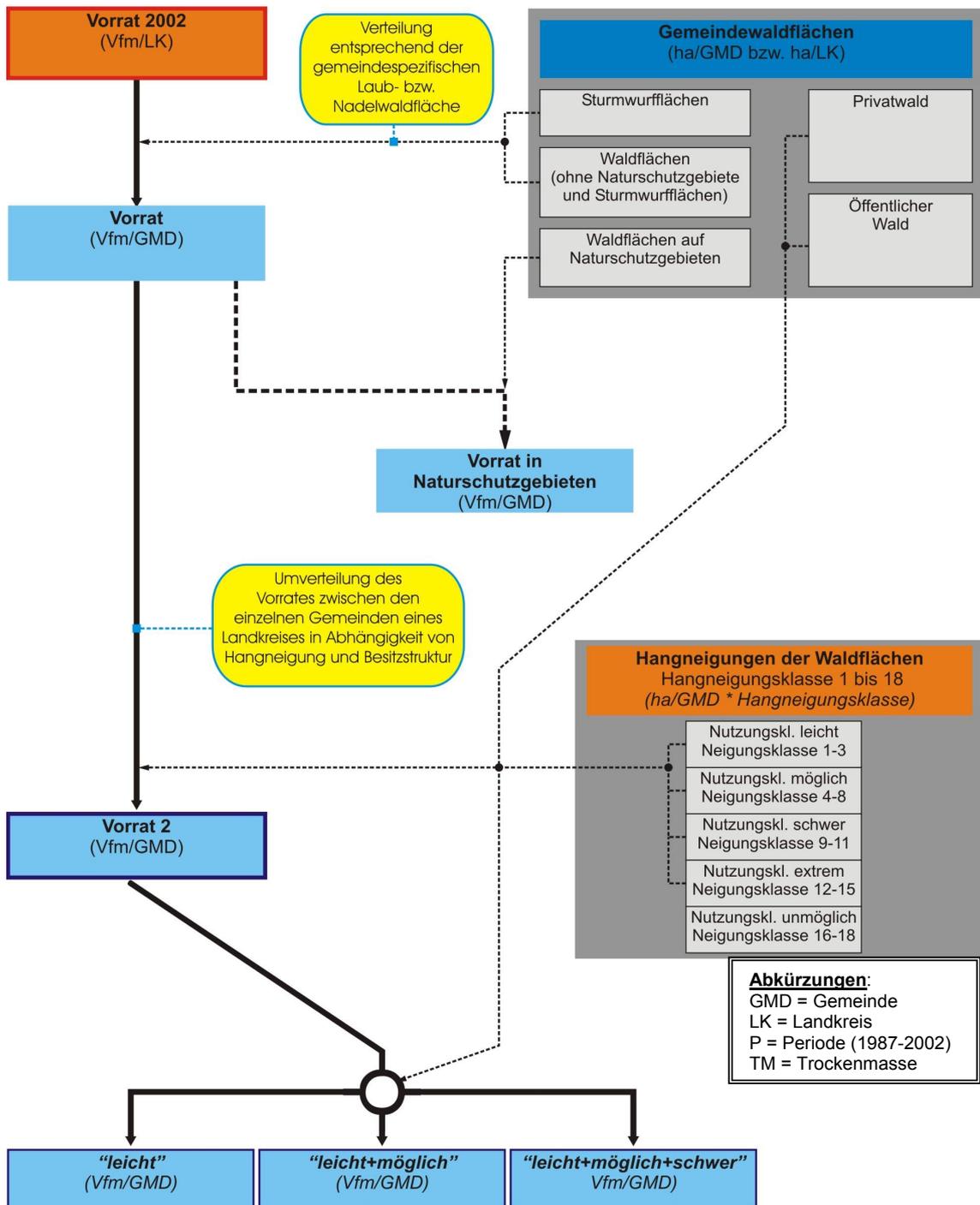
Quellen: 1) BMVEL, 2005c; Polley, 2005

Bezeichnung	Geschätzte jährlich verfügbare Menge (Mg TM)	Berücksichtigter Anteil (%) <sup>a)</sup>	Jährlich verfügbare Menge (Mg TM)
Schwachholz	1.000.000 <sup>1)</sup>	50	<b>500.000</b>

Anmerkungen: a) Die Schwachholznutzung (insbesondere in Form von Industrieholz) ist bei dem in der Datentabelle zur Bundeswaldinventur 2 (vgl. Anhang 6.10, S. A-128) ausgeschiedenen Vorrat bereits berücksichtigt; entsprechend der angenommenen Prozentsätze (vgl. Anhang 6.13, S. A-132) wurde anteilmäßig daraus ein Waldrestholzaufkommen ermittelt. Durchforstungsholz, welches abgesägt im Bestand verbleibt, ist unter dem o.g. nicht verwerteten Holz erfasst. Zum eigentlichen Schwachholz zählt diesbezüglich also Durchforstungsholz, welches im Bestand verbleibt und unter der Derbholzgrenze liegt und somit von der Bundeswaldinventur nicht erfasst wurde. Dieter et al. (2001) vermerken, dass Durchforstungsmaßnahmen aufgrund der Problematik bei Aufarbeitung von Rohholz unterhalb gewisser Grenzdurchmesser nicht mehr wirtschaftlich lohnend ist und deshalb Durchforstungsmaßnahmen in Beständen mit kleinerem Mittendurchmesser vernachlässigt werden. Aus diesen Gründen wird, wie in oben stehender Tabelle dargelegt, eine bestimmte Menge an Schwachholz zur jährlich verfügbaren Menge hinzugerechnet. Allerdings wird dem Umstand Rechnung getragen, dass der Schwachholzbestand in der Periode zwischen den beiden Inventuren um rund 23 % zurückgegangen ist. Vor diesem Hintergrund wird von der von Dieter et al. (2001) geschätzten Menge lediglich 50 % als jährlich verfügbar angenommen.

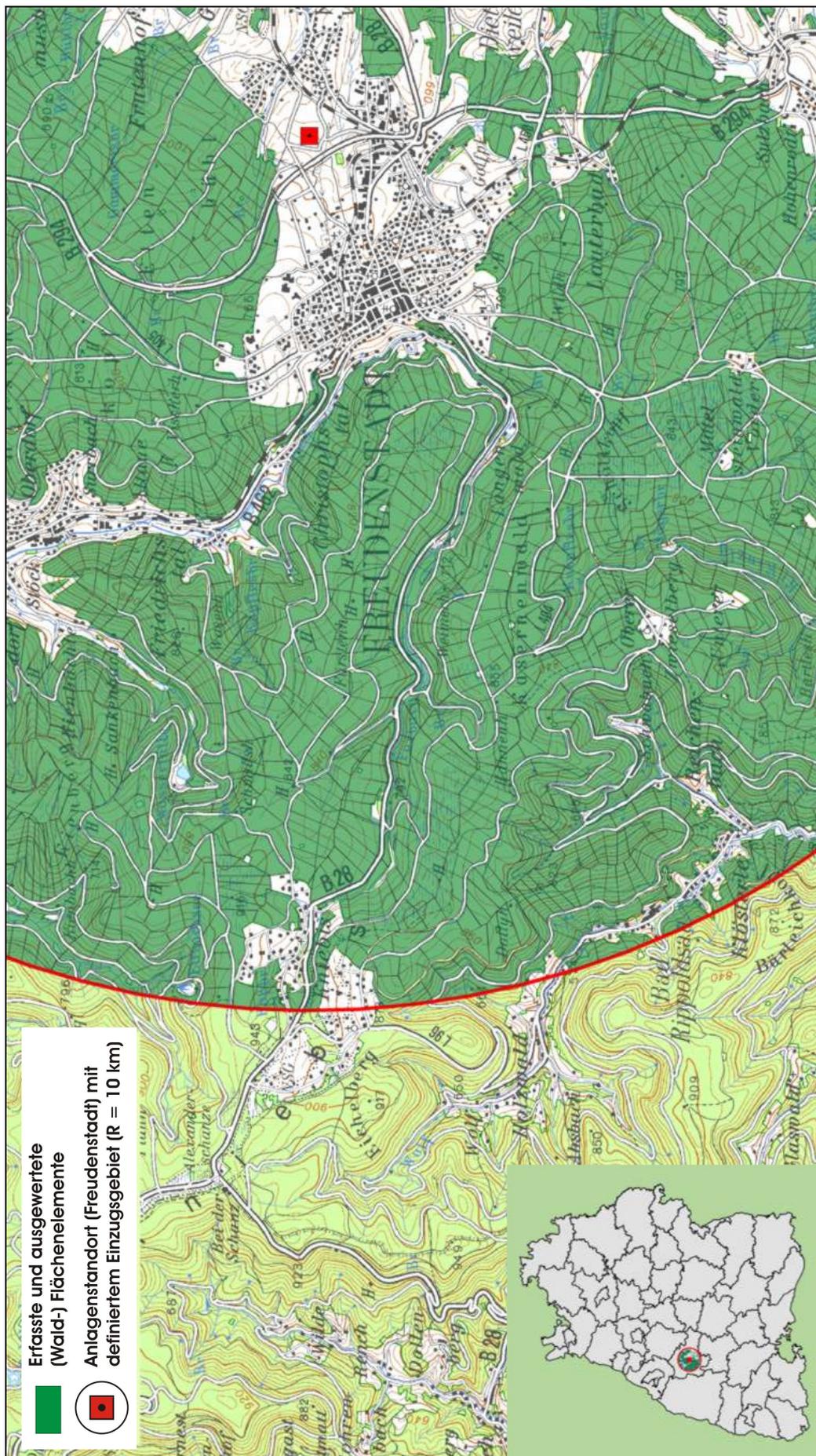
Quellen: 1) In Anlehnung an Dieter et al. (2001).

## Anhang 6.21: Schema zur Bestimmung der räumlichen Verteilung des Holzvorrates 2002 (Modell 2 – Variante 3)

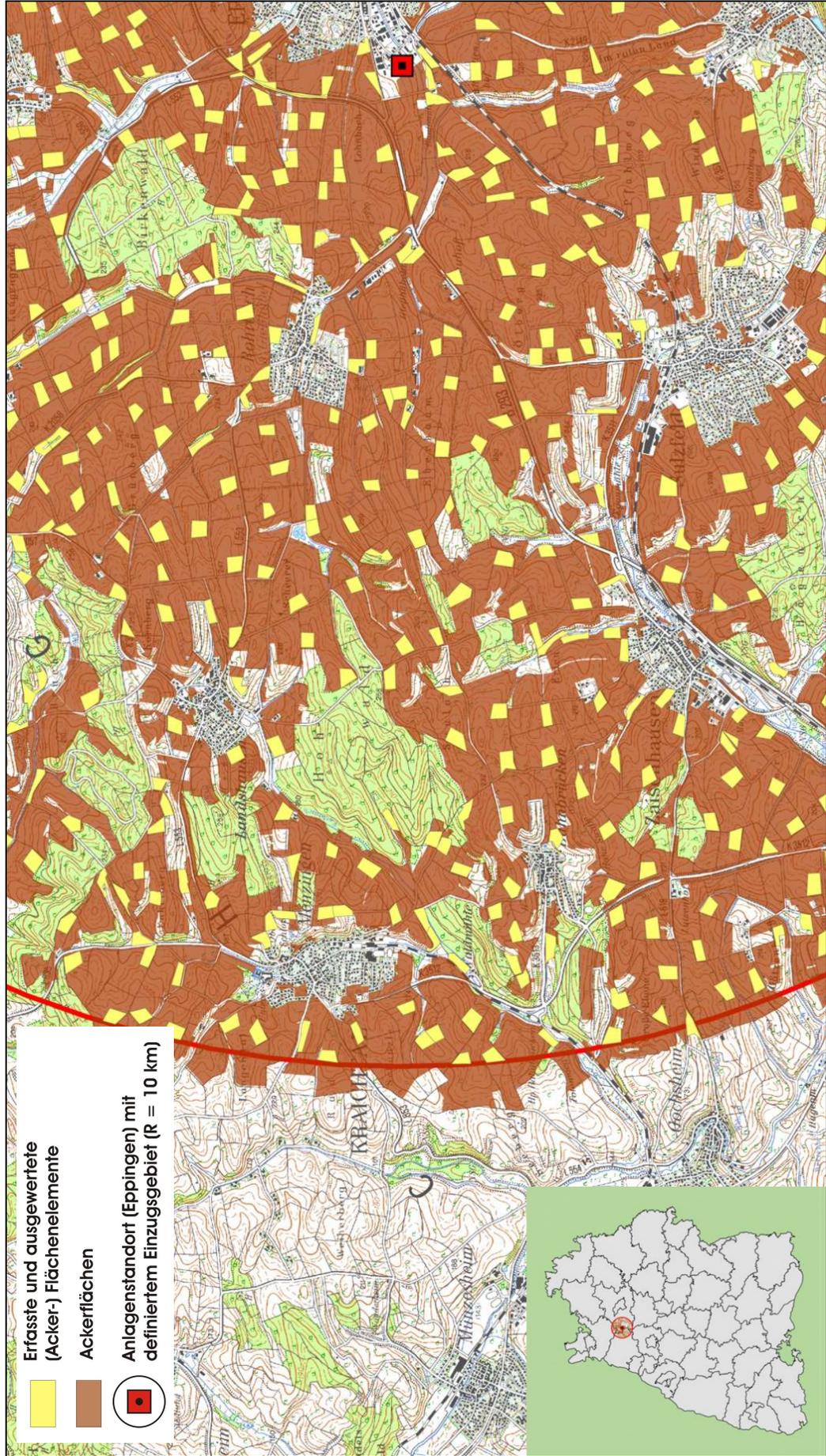


Anmerkung: Zur Erklärung der Symbolik siehe Anhang 6.6 (S. A-124)

Anhang 6.22: Darstellung zur empirischen Transportstreckenanalyse (Bereitstellung von Waldrestholz)



Anhang 6.23: Darstellung zur empirischen Transportstreckenanalyse (Bereitstellung von Stroh)



## Anhang 6.24: Untersuchte Transportkombinationen

Art und Form der transportierten Biomasse		Landwirtschaftlicher Schlepper	Lkw	Bahn
<b>Stroh</b>	<b>Quaderballen<sup>a)</sup></b> (L x B x H; in m) (2,0 x 0,8 x 0,9) (2,4 x 1,2 x 0,7) <b>Rundballen<sup>a)</sup></b> (D x H; in m) (1,2 x 1,2) (1,5 x 1,2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ldw. Schlepper mit zwei Anhängern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lkw-Gliederzug</li> <li>▪ Lkw-Sattelzug</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bahn <i>Vorlauf mit Ldw. Schlepper oder Lkw</i></li> </ul>
<b>Waldrestholz</b>	<b>Hackschnitzel</b> (50 % TM) <b>Hackschnitzel</b> (65 % TM) <b>Holz Bündel</b> (50 % TM) <b>Holz Bündel</b> (65 % TM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ldw. Schlepper mit zwei Anhängern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lkw-Gliederzug mit zwei Abrollcontainern (ACTS)<sup>b)</sup></li> <li>▪ Lkw-Sattelzug mit einem ISO-Wechselcontainer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bahn <i>ACTS/Vorlauf mit Lkw</i></li> <li>▪ Bahn <i>ISO-Wechselcontainer/Vorlauf mit Lkw</i></li> </ul>
<b>Slurry</b>	<b>Pyrolyseöl-Koks-Suspension</b>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lkw-Tankauflieger</li> <li>▪ Lkw-ISO-Wechsel-Tankcontainer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bahn <i>ISO-Wechsel-Tankcontainer/Vorlauf mit Lkw</i></li> <li>▪ Bahn (Tankwagen) <i>Direktbefüllung an der Pyrolyseanlage/ohne Lkw-Vorlauf</i></li> </ul>

Anmerkungen: a) Abkürzungen: L = Länge, B = Breite, H = Höhe, D = Durchmesser

b) ACTS: Das Abrollcontainer-Transportsystem wird für den kombinierten Verkehr Straße-Schiene eingesetzt.

Eine symbolische Darstellung der Transportfahrzeuge bzw. Transportmittel zeigt Anhang 6.25 (S. A-143) bis Anhang 6.27 (S. A-145).

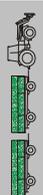
## Anhang 6.25: Technische Daten zu den Transportfahrzeugen/-behältnissen für den Strohballen- und Holzbündeltransport

<b>Strohtransport</b> (die hier angegebenen Daten gelten auch für den <b>Holz Bündeltransport</b> )	<b>Ldw. Schlepper Zugfahrzeug mit zwei Hängern</b>	<b>Gliederzug Zugfahrzeug + Hänger</b> <sup>2)</sup>	<b>Sattelzug Zugfahrzeug mit Aufflieger</b> <sup>2)</sup>	<b>Bahn Zugfahrzeug mit Waggons</b> <sup>3)</sup>
<b>Leistung Zugfahrzeug (kW)</b>	90	350	350	5600
<b>Eigengewicht Zugfahrzeug (Mg)</b>	6,2	13	8	84
<b>Zulässiges Gesamtgewicht Zugfahrzeug (Mg)</b>	18	26	18	-
<b>Transportsystem (Beispiel)</b>	Dreiseitenkippanhänger (Mengele MZDK 18000)	<i>Zugfahrzeug</i> Plateau mit Rungen	Plateauaufflieger mit Rungen	Tragwagen mit Rungen (Drehgestellfachwagen mit vier Radsätzen, Typ RES 686)
<b>Zulässiges Gesamtgewicht je Hänger, Waggon (Mg)</b>	18	-	36	80
<b>Eigengewicht Hänger, Aufbau, Waggon (Mg)</b>	4,2	-	6,55	24
<b>Plattformmaße (Innenmaße) L x B (m)</b>	5,25 x 2,25	7,7 x 2,48	13,4 x 2,48	18,5 x 2,65
<b>Plattformhöhe (m)</b>	1,34	1,3	1,0	1,24
<b>Maximale Aufladehöhe (m)</b>	2,66	2,7	3,0	2,56
<b>Anzahl der Hänger, Behälter, Waggons pro Zug</b>	2	2	1	24
<b>Theo. Transportvolumen ohne Überladung (m<sup>3</sup>)</b>	62,8	106,5	99,7	3012
<b>Maximale Länge des Zuges (m)</b>	18	18,75	16,5	500
<b>Zulässiges Gesamtgewicht des gesamten Zuges (Mg)</b>	40	40	38	< 2000
<b>Maximale Zuladung (Mg)</b>	25,4	22,5	23,5	1.344

**Anmerkungen:** Bei den hier dargestellten Transportmitteln handelt es sich nicht um Sonderkonstruktionen, obwohl solche für einen Strohtransport über große Entfernungen sicherlich vorteilhafter wären.

- Quellen:**
- 1) AGCO GmbH, 2006: Mengele Agrartechnik, 2006
  - 2) Verschiedene Herstellerangaben
  - 3) STINNES Logistics, 2006

**Anhang 6.26: Technische Daten zu den Transportfahrzeugen/-behältnissen für den Hackschnitzeltransport**

Hackschnitzeltransport	Ldw. Schlepper Zugfahrzeug mit zwei Hängern 	Lkw Gliederzug Zugfahrzeug + Hänger 	Sattelzug Zugfahrzeug mit Auflieger 	Zugfahrzeug mit Waggons 	Bahn <sup>3)</sup> Zugfahrzeug mit Waggons
Leistung Zugfahrzeug (kW)	90	350	350	5.600	5.600
Eigengewicht Zugfahrzeug (Mg)	6,2	12	9	84	84
Zulässiges Gesamtgewicht Zugfahrzeug (Mg)	18	26	26	-	-
Transportsystem/Transportbehältnis (Beispiel)	Dreiseitenkippanhänger (Mengele MZDK 18000)	<u>Zugfahrzeug</u> Abrollcontainer mit 36 m <sup>3</sup>  <u>Hänger</u> Abrollcontainer mit 36 m <sup>3</sup>	Auflieger mit 40 ft ISO-Container <sup>a)</sup>	Vierachsiger Tragwagen (Typ Simms) mit einem 40 ft ISO- Container pro Waggon	Vierachsiger Tragwagen für Großcontainer und Wechselbehälter; (Typ Sgns 691) mit zwei Abrollcontainern (36 m <sup>3</sup> ) pro Waggon
Zulässiges Gesamtgewicht je Hänger, Waggon (Mg)	18	-	18	80	90
Eigengewicht Hänger, Aufbau, Waggon (Mg)	4,2	-	4,5	18	20
Eigengewicht Container (Mg)	-	2,2	2,2	1 x 3,9	2 x 2,2
Maße Transportbehältnis (Innenmaße) L x B x H (m)	5,25 x 2,25 x 1,5	6,5 x 2,3 x 2,4	6,5 x 2,3 x 2,4	1x (12,0 x 2,4 x 2,4)	2x (6,5 x 2,3 x 2,4)
Anzahl der Hänger, Behälter, Waggons pro Zug	2	2	1	1 x 30	2 x 24
Theo. Transportvolumen ohne Überladung (m <sup>3</sup> )	35,4	71,8	69,1	2.074	1.722
Maximale Länge des Zuges (m)	18	18,75	16,5	500	500
Zulässiges Gesamtgewicht des gesamten Zuges (Mg)	40	40	40	< 2000	< 2000
Maximale Zuladung (Mg)	25,4	19,1	20,1	1.743	1.575

Anmerkungen: a) Nach der Straßenverkehrszulassungsordnung darf für die Beförderung von 40 ft ISO-Containern im kombinierten Güterverkehr ein zulässiges Gesamtgewicht von 44 Mg erreicht werden. Dies wurde hier jedoch nicht berücksichtigt.

- Quellen:
- 1) AGCO-Fendt GmbH, 2006; Mengele Agrartechnik, 2006
  - 2) Verschiedene Herstellerangaben
  - 3) STINNES Logistics, 2006

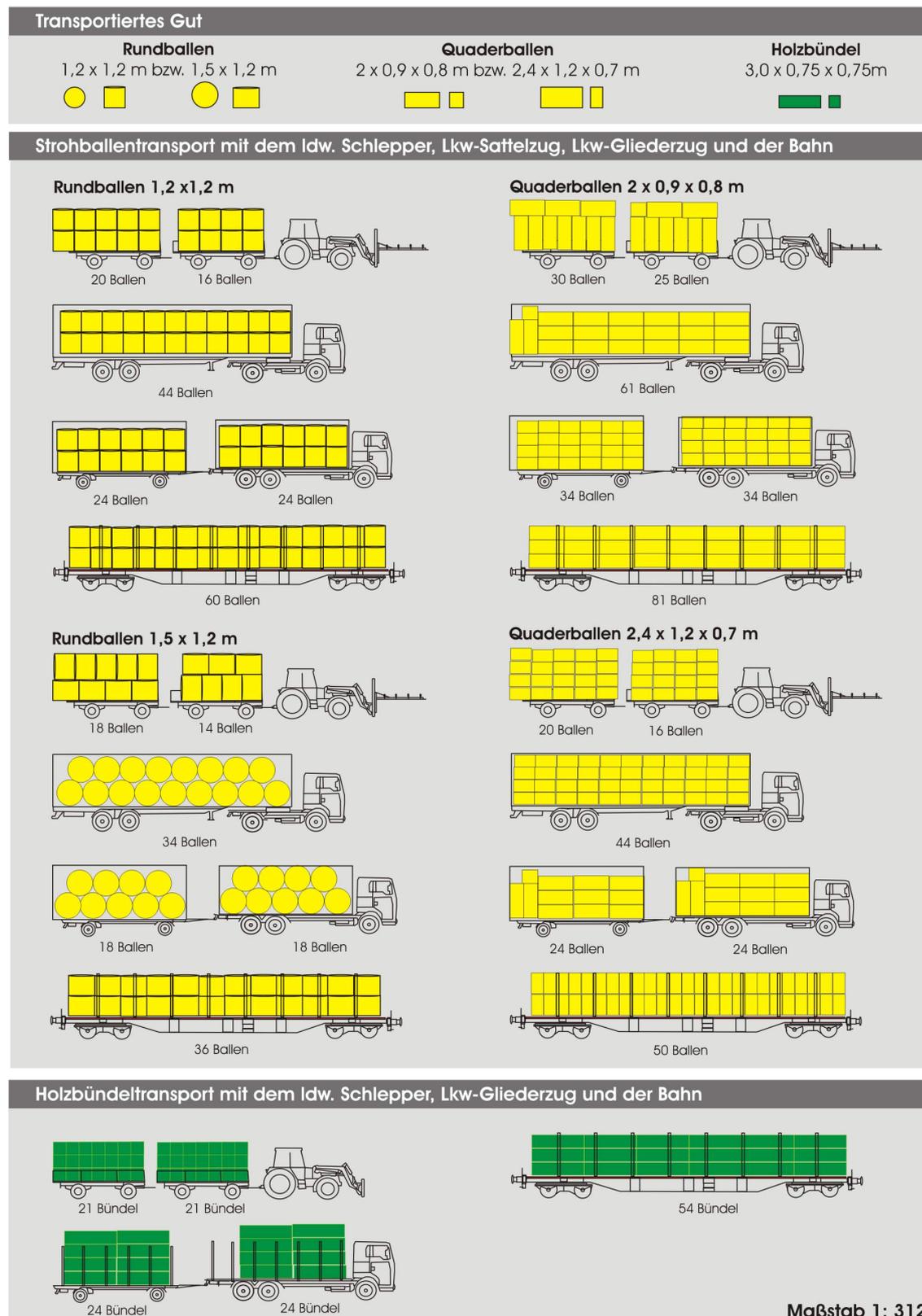
## Anhang 6.27: Technische Daten zu den Transportfahrzeugen/-behältnissen für den Slurrytransport

Slurrytransport	Lkw <sup>1) 2)</sup>		Bahn <sup>2) 3)</sup>	
				
Leistung Zugfahrzeug (kW)	350	350	5.600	5.600
Eigengewicht Zugfahrzeug (Mg)	14	8	84	84
Zulässiges Gesamtgewicht Zugfahrzeug (Mg)	32	18	-	-
Transportbehältnis (Beispiel)	20 ft ISO-Tankbehälter (Thermo; Typ Feldbinder CONT 26.20 LM)	Tankaufleger (Typ Feldbinder TSA 23.3)	Vierachsiger Tankwagen (Typ Feldbinder BTAN)	Vierachsiger Tragwagen (Typ Smmns) mit zwei 20 ft ISO-Tankbehälter
Zulässiges Gesamtgewicht je Hänger, Waggon (Mg)	34 (Tankbehälter)	34	90	80
Eigengewicht Hänger, Aufbau, Waggon (Mg)	-	6,0	24,5	18
Eigengewicht Container (Mg)	3,0	-	-	2 x 3,0
Volumen Transportbehältnis (m <sup>3</sup> )	26	22,5	62	2 x 26
Anzahl der Hänger, Behälter, Waggons pro Zug	1	1	1 x 20	2 x 30
Max. Transportvolumen ohne Überladung (m <sup>3</sup> )	26	22,5	1.240	1.560
Maximale Länge des Zuges (m)	12	16,5	500	500
Zulässiges Gesamtgewicht des gesamten Zuges (Mg)	32	40	< 2.000	< 2.000
Maximale Zuladung (Mg)	15	26,0	1.310	1.680

Quellen:

- 1) Verschiedene Herstellerangaben
- 2) Feldbinder, 2006
- 3) STINNES Logistics, 2006

## Anhang 6.28: Angenommene Beladungsschemata für den Transport von Strohballen und Holzbündeln



Maßstab 1: 312

**Anmerkungen:** Bei den Beladungsschemata wurden die gesetzlichen Ordnungsrahmen (STVO, 2006; STVZO, 2007) eingehalten. Für Fahrzeuge, welche für land- und forstwirtschaftliche Zwecke eingesetzt werden, gibt es eine Reihe von Ausnahmen; diese wurden nicht mit berücksichtigt.

## Anhang 6.29: Parameter, Kenngrößen und Kostensätze für die Berechnung der Erfassungs- und Transportkosten

Ökonomische Rahmendaten		Quelle
Personalkostensatz (Landwirtschaft)	13,5 €/h	KTBL, 2004
Personalkostensatz (Lkw)	22 €/h	Eigene Annahme
Kalkulatorischer Zins	6 %	Eigene Annahme
Kalkulatorische Abschreibungsdauer	8 - 12 Jahre (abhängig von der Technik)	KTBL, 2005; eigene Annahmen
Kraftstoffkosten (Land- und Forstwirtschaft)	0,8 €/l (gasölverbilligt)	MLR, 2004
Kraftstoffkosten für Lkw	1,0 €/l	Eigene Annahme
Mautkosten für Autobahnfahrt	0,12 €/km	Bundesamt für Güterverkehr, 2004
Energiekosten für die Bahnfahrt	0,09 €/kWh	Eigene Abschätzung; DB Cargo, 2003

## Anhang 6.30: Kennwerte zu den treibhausrelevanten Emissionen

		CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	ΣCO <sub>2</sub> -Äq.
<b>Diesel</b> (Heizwert H <sub>u</sub> 35,87 MJ/l)	<i>in kg/MJ<sub>Hu</sub></i> <i>Brennstoff</i>	0,0836	1,51e-05	2,57e-06	<b>0,085</b>
<b>Bahnstrom (Mix)</b> <b>Deutschland</b>	<i>kg/MJ</i> <i>Strom</i>	0,1585	6,01e-04	5,84e-06	<b>0,173</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalenzfaktoren</b> (GWP100)		<b>1</b>	<b>21</b>	<b>310</b>	

Quellen: a) Diese Daten wurden ausgewählt unter Auswertung von GEMIS (2006), IKP (1998) und TREMOD (1995).

Anmerkung: Bei der Bestimmung dieser Werte wurde von einer Totaloxidation des Kohlenstoffs ausgegangen. Bei den Angaben zu den treibhausgasrelevanten Emissionen hinsichtlich des Bahnstroms wurden die Vorketten der Energiebereitstellung berücksichtigt, nicht jedoch die mit dem Bau der Anlagen und der Maschinen verbundenen Emissionen.

## Anhang 6.31: Unterstellte Maschinenstundensätze (auf Vollkostenbasis)

Maschine	Kostensatz	Anmerkung		Quelle
Lkw-Gliederzug (Zugmaschine + Anhänger)	37 €/h	Inkl. Personal- kosten (22 €/h); ohne Energiekosten	Einsatz als Trans- portfahrzeug	Eigene Abschät- zung
Lkw-Sattelzug <sup>a)</sup> (Zugmaschine + Anhänger)	34 €/h			
Landwirtschaftlicher Schlep- per; 90 kW	Fixkosten <sup>b)</sup> : 28 €/h Var. Kosten <sup>c)</sup> : 9 €/h	Inkl. Personal- kosten (13,5 €/h)	Einsatz als Trans- portfahrzeug; Einsatz als Zug- fahrzeug für die Ballenpresse	Eigene Abschät- zung auf Basis von: KTBL, 2005 und FAT, 2006
Landwirtschaftlicher Schlep- per; 59 kW	Fixkosten: 23 €/h Var. Kosten: 4 €/h		Einsatz als Sam- melfahrzeug bei der Strohbereit- stellung	
Frontlader für den ldw. Schlepper	4,5 €/h	Nur in Kombi- nation mit einem Schlep- per; ohne Personalkosten	Einsatz um Stroh- ballen zu sammeln und zu verladen	
Ballenzange/Ballengreifer	2 €/h		Einsatz als Trans- portmittel für Strohballen, Hack- schnitzel und Holzbündel	
Landwirtschaftlicher Anhänger (Dreiseitenkipper)	2 €/h			
Rundballenpresse (1,2 x 1,2 m) <sup>d)</sup>	46 €/h		Einsatz um Stroh- ballen zu pressen	
Rundballenpresse (1,5 x 1,2 m) <sup>d)</sup>	47 €/h			
Quaderballenpresse (2,0 x 0,8 x 0,9 m) <sup>d)</sup>	111 €/h			
Quaderballenpresse (2,4 x 1,2 x 0,7 m) <sup>d)</sup>	122 €/h			
Forwarder	Fixkosten: 45 €/h Var. Kosten: 15 €/h		Inkl. Personal- kosten (25 €/h)	Einsatz um Holz- bündel zu verla- den

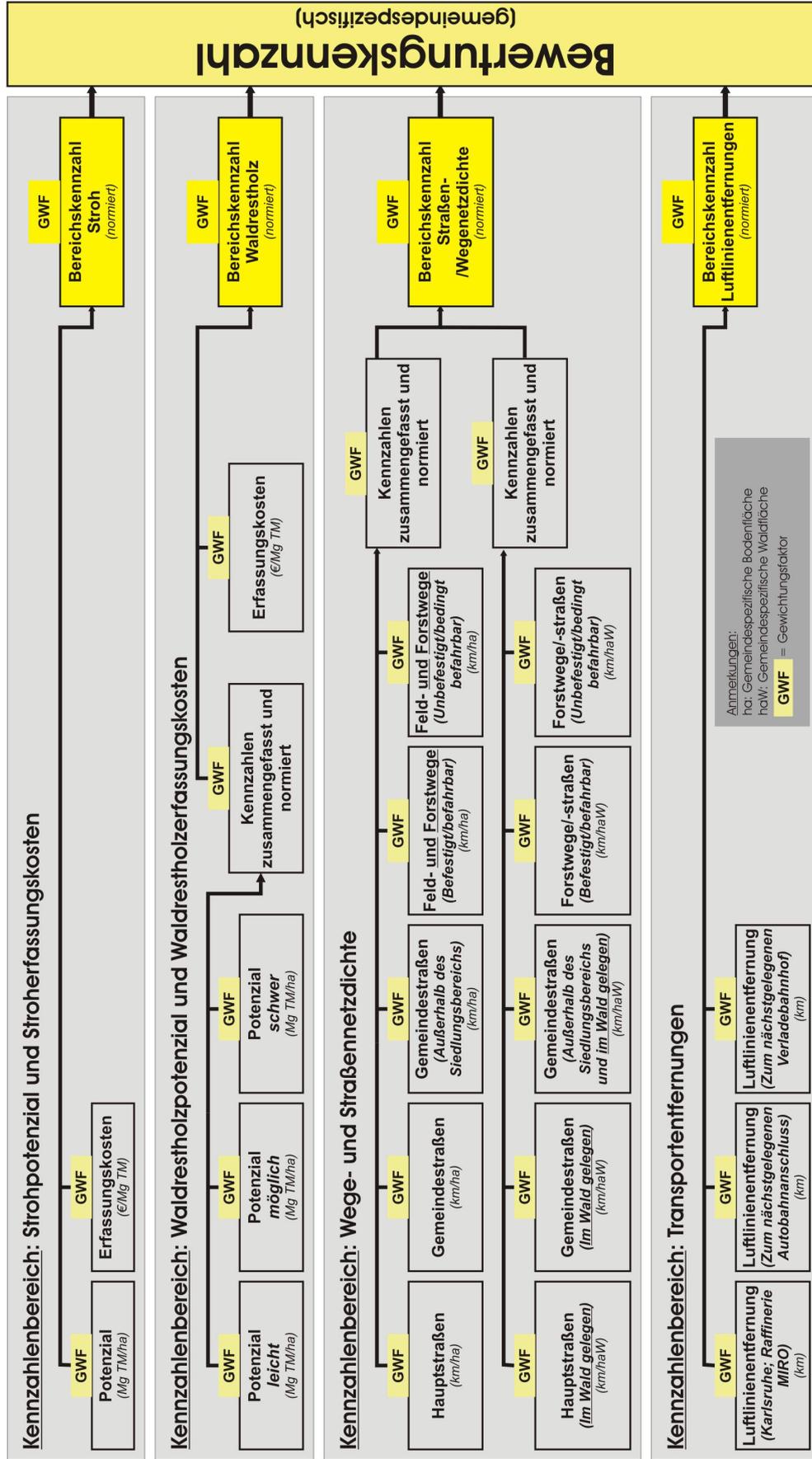
Anmerkungen: a) Der hier ermittelte Stundensatz wird auch bei den Kalkulationen für den Abrollkipper (Slurrytransport mit ISO-Tankcontainer) angesetzt.

b) Der Fixkostensatz besteht insbesondere aus den Kapital- und den Personalkosten.

c) Der variable Kostensatz besteht insbesondere aus den Betriebs-/Energiekosten; hierbei wurde von einem Mittellastbetrieb ausgegangen.

d) Bei Rundballen: Durchmesser x Höhe; bei Quaderballen: Länge x Breite x Höhe

## Anhang 6.32: Kennzahlen (-bereiche) und Gewichtungsschema der Standortanalyse



Anmerkungen: Die als GWF bezeichneten Felder stehen für Gewichtungsfaktoren, welche in Abhängigkeit der spezifischen Standortanforderungen mit entsprechenden Zahlen versehen werden (vgl. Anhang 6.35, S. A-152 bis Anhang 6.37, S. A-154).

### Anhang 6.33: Kriterien bzw. Faktoren für die Bildung gemeindespezifischer Kostensätze der Stroherfassung

Faktor <sup>a)</sup>	Gewichtung	Bemerkung
$\frac{\text{Strohaufkommen (Mg TM)}}{\text{Getreideanbaufläche (ha)}}$	30 %	Die Höhe dieses Faktors lässt Rückschlüsse auf die Ertragslage zu. Bei hohen Erträgen können während der Erfassung hohe Durchsatzleistungen erzielt werden, welche sich günstig auf den Maschinenstundensatz der Ballenpresse auswirken.
$\frac{\text{Strohaufkommen (Mg TM)}}{\text{Gemeindebodenfläche (ha)}}$	30 %	Ist die Reststrohaufkommensdichte in einer Gemeinde hoch, so können leistungsfähige Maschinen zum Einsatz kommen.
$\frac{\text{Getreideanbaufläche (ha)}}{\text{Gemeindebodenfläche (ha)}}$	20 %	Aus diesem Faktor können tendenziell Rückschlüsse auf die Schlaggrößen gezogen werden. Leistungsfähige Pressen können gut ausgelastet werden (geringere Leerlaufzeiten durch kurze Distanzen zwischen den einzelnen Feldern).
$\frac{\text{Ackerfläche (ha)}}{\text{Gemeindebodenfläche (ha)}}$	20 %	Aus diesem Faktor können Rückschlüsse auf den Umfang der landwirtschaftlichen Flächennutzung einer Gemeinde gezogen werden. Entsprechend ist die Infrastruktur auf die landwirtschaftliche Nutzung ausgerichtet. Dies bringt Kostenvorteile bezüglich Maschinenrüstzeiten und im Hinblick auf die Bildung von Betriebsgemeinschaften (Maschinenring).

Quellen: a) Die gemeindespezifischen Flächenbezugsgrößen sind einer Auswertung der ATKIS (2005) Geodaten entnommen.

Anmerkung: Unter Berücksichtigung der angegebenen Gewichtungsgrößen werden die einzelnen Faktoren zu einer Bezugsgröße aggregiert, die als Basis für die Kostenzuordnung einer spezifischen Gemeinde dient. Als Kostenbandbreite wurden in Anlehnung an die Berechnungen aus Kapitel 3.2.3 eine Kostenbandbreite von **30 bis 80 €/Mg TM** unterstellt. Entsprechend bekommt die Gemeinde mit der ungünstigsten Kenngröße den höchsten und die Gemeinde mit der günstigsten den niedrigsten Kostensatz zugeteilt.

### Anhang 6.34: Angenommene Erfassungskostensätze für die Bereitstellung von Hackschnitzel frei Waldstraße – differenziert nach Nutzungsklasse, Holzsortiment und Besitzstruktur

(Rest-) Holzsortiment		Angenommener Kostensatz der jeweiligen Nutzungsklasse (€/Mg TM) <sup>1) 2)</sup>		
		leicht	möglich	schwer
Öffentlicher Wald	Nadel-Stammholz (energetisch nutzbar)	31	71	93
	Laub-Stammholz (energetisch nutzbar)	27	62	81
	Nadel-Schwachholz	55	127	164
	Laub-Schwachholz	50	115	150
	Liegenbleibendes Nadel-Derbholz und Nadel-Nichtderbholz (einschl. Nadeln), sowie NV-Nadelholz <sup>3)</sup>	68	122	159
	Liegenbleibendes Laub-Derbholz und Laub-Nichtderbholz, sowie NV-Laubholz <sup>3)</sup>	61	110	143
Privatwald	Nadel-Stammholz	20	46	60
	Laub-Stammholz	18	40	52
	Nadel-Schwachholz	36	82	107
	Laub-Schwachholz	33	75	97
	Liegenbleibendes Nadel-Derbholz und Nadel-Nichtderbholz (einschl. Nadeln), sowie NV-Nadelholz <sup>3)</sup>	44	80	103
	Liegenbleibendes Laub-Derbholz und Laub-Nichtderbholz, sowie NV-Laubholz <sup>3)</sup>	40	71	93

Quellen: Eigene Annahmen in Anlehnung an die in Anhang 6.43 (S. A-160) genannten Quellen, sowie Raab et al. (2002) und LWF (2004).

Anmerkungen: 1) Da in der Literatur keine eindeutigen Aussagen zu den Erfassungskosten in Abhängigkeit von Hanglagen und Besitzstruktur angegeben werden, liegen den in der Tabelle dargelegten Werte notgedrungen folgende Annahmen zugrunde:

Nach Wittkopf et al. (2003) liegen die Kosten für Eigenleistung/Maschinenring rund 35 - 40 % unter denen des Unternehmereinsatzes. Ausgehend von einem hohen Grad an Eigenleistung bei gleichzeitig niedrigerem Lohn, wurden die Kostensätze für den Privatwald um 35 % gegenüber dem Öffentlichen Wald reduziert.

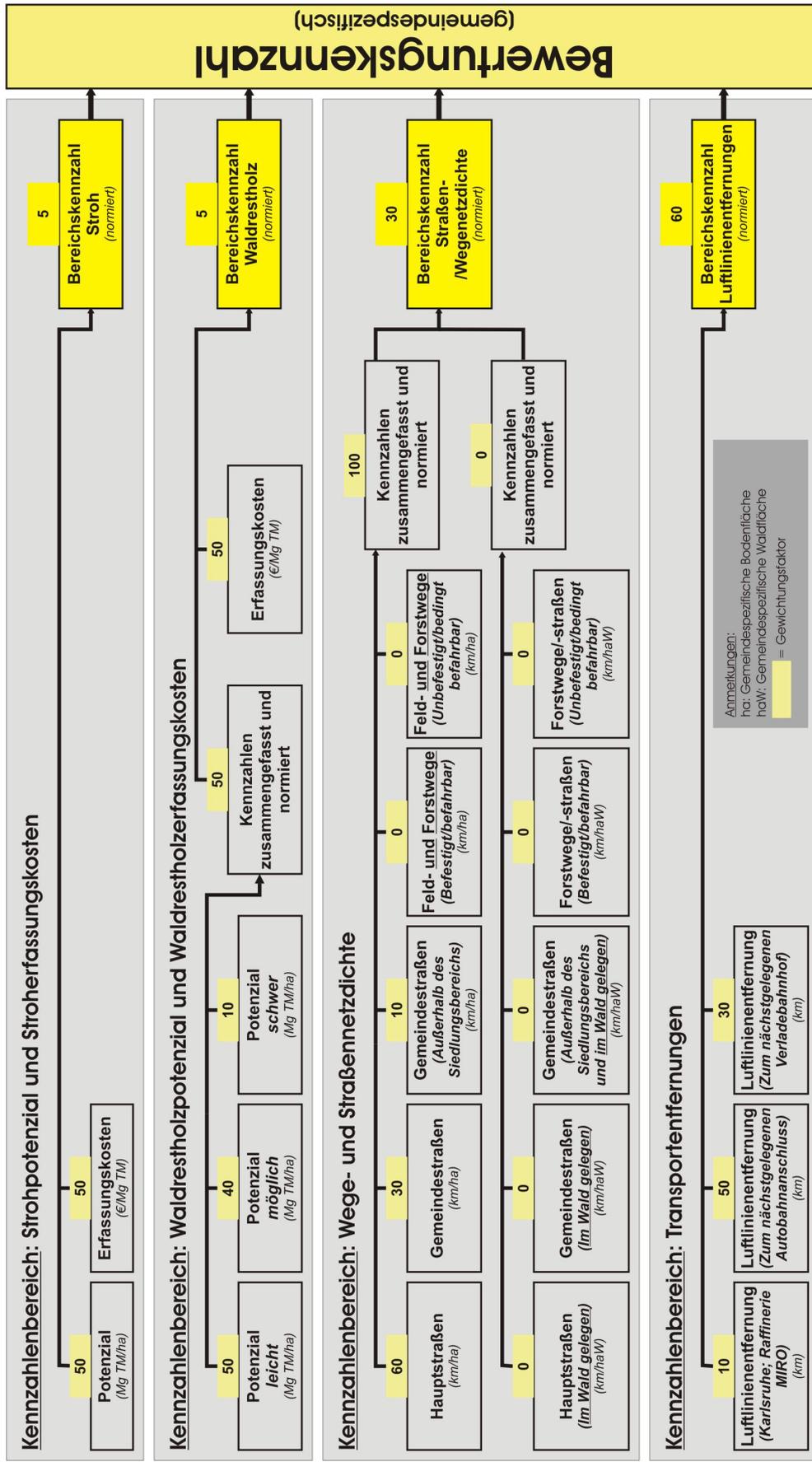
Bei der Umrechnung von Schüttraummetern in Mg TM wurden die in Anhang 6.43 (S. A-160) erläuterten Umrechnungsfaktoren berücksichtigt.

Zur Bildung der Kostensätze der Nutzungsklasse „möglich“ wurden die Kostensätze der Nutzungsklasse „leicht“ mit dem Faktor 2,3 multipliziert. Dieser leitet sich aus den Angaben von KWF (2004) und Raab et al. (2002) ab. Bei der Fraktion des liegenbleibenden Derbholzes bzw. Nicht-Derbholzes wurde allerdings nur ein Faktor von 1,8 angesetzt, da in hängigem Gelände die Kosten für das Rücken (insbesondere beim Ganzbaumverfahren) dem Hauptnutzungspfad angerechnet werden. Zur Bildung der Kostensätze für die Nutzungsklasse „schwer“ wurden die Kostensätze der Nutzungsklasse „möglich“ einheitlich mit dem Faktor 1,3 multipliziert. Da ab einer bestimmten Hangneigung stets dasselbe Erntesystem zur Anwendung kommt, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Hangneigung auf die Kosten nur noch unwesentlich ansteigt. Allerdings wird die Erschließungssituation mit zunehmender Hängigkeit schwieriger, so dass auch die Logistik der Holzabfuhr mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden ist. In Steilhängen werden mittels Seilkran die Bäume zur Forststraße gerückt und konventionelle Sortimente erzeugt; der verbleibende Schlagabraum wird als Hackholz verwendet.

2) Zur Definition der Nutzungsklassen siehe Anhang 6.12 (S. 131).

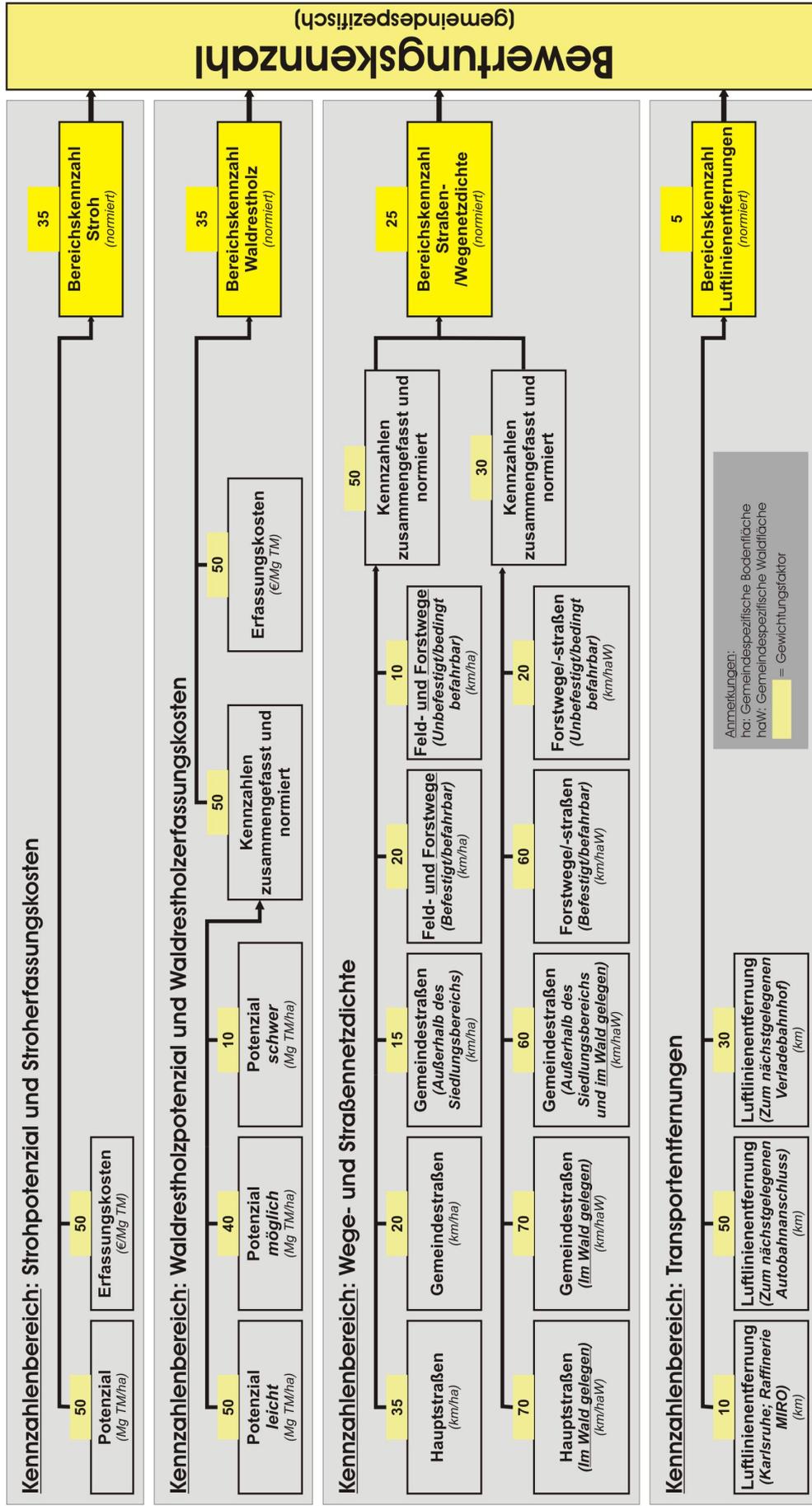
3) NV: Nicht-verwertetes Holz (= nicht-verwerteter Abgang); vgl. hierzu die Ausführungen von Anhang 6.19 (S. A-137).

## Anhang 6.35: Gewichtungsschema der Standortanalyse – Pyrolyseanlagenstandorte



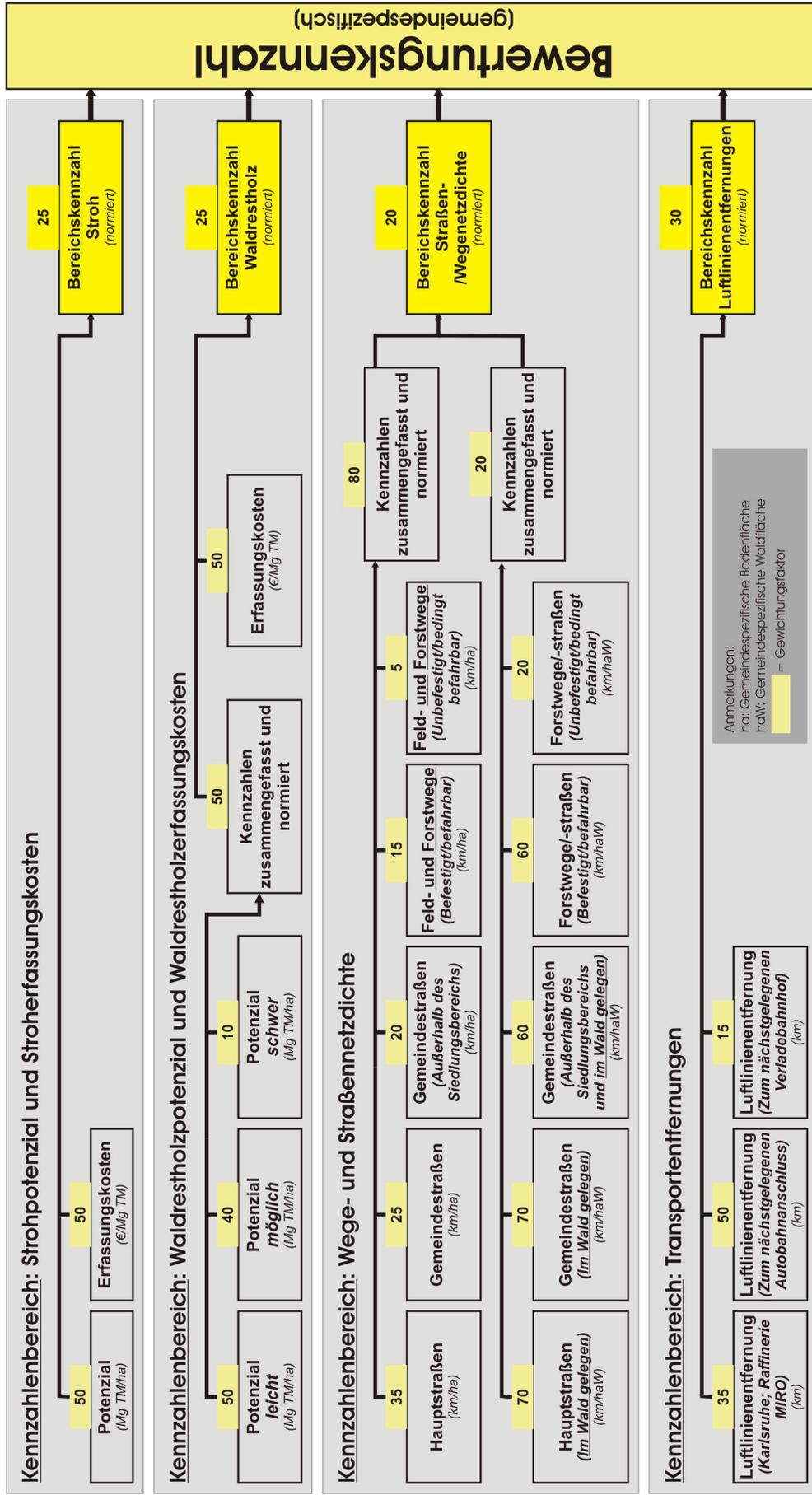
**Anmerkungen:** Die in den gelben Feldern dargelegten Gewichtungsfaktoren wurden in eigener Annahme festgelegt. Da es sich hierbei lediglich um Verhältniszahlen handelt, sind diese Faktoren nur bedingt untereinander vergleichbar. Insofern muss auch die Quersumme mehrerer Zahlen in einem Bereich nicht zwangsläufig den Wert 100 ergeben.

## Anhang 6.36: Gewichtungsschema der Standortanalyse – Einzugsgebiete für Pyrolyseanlagen



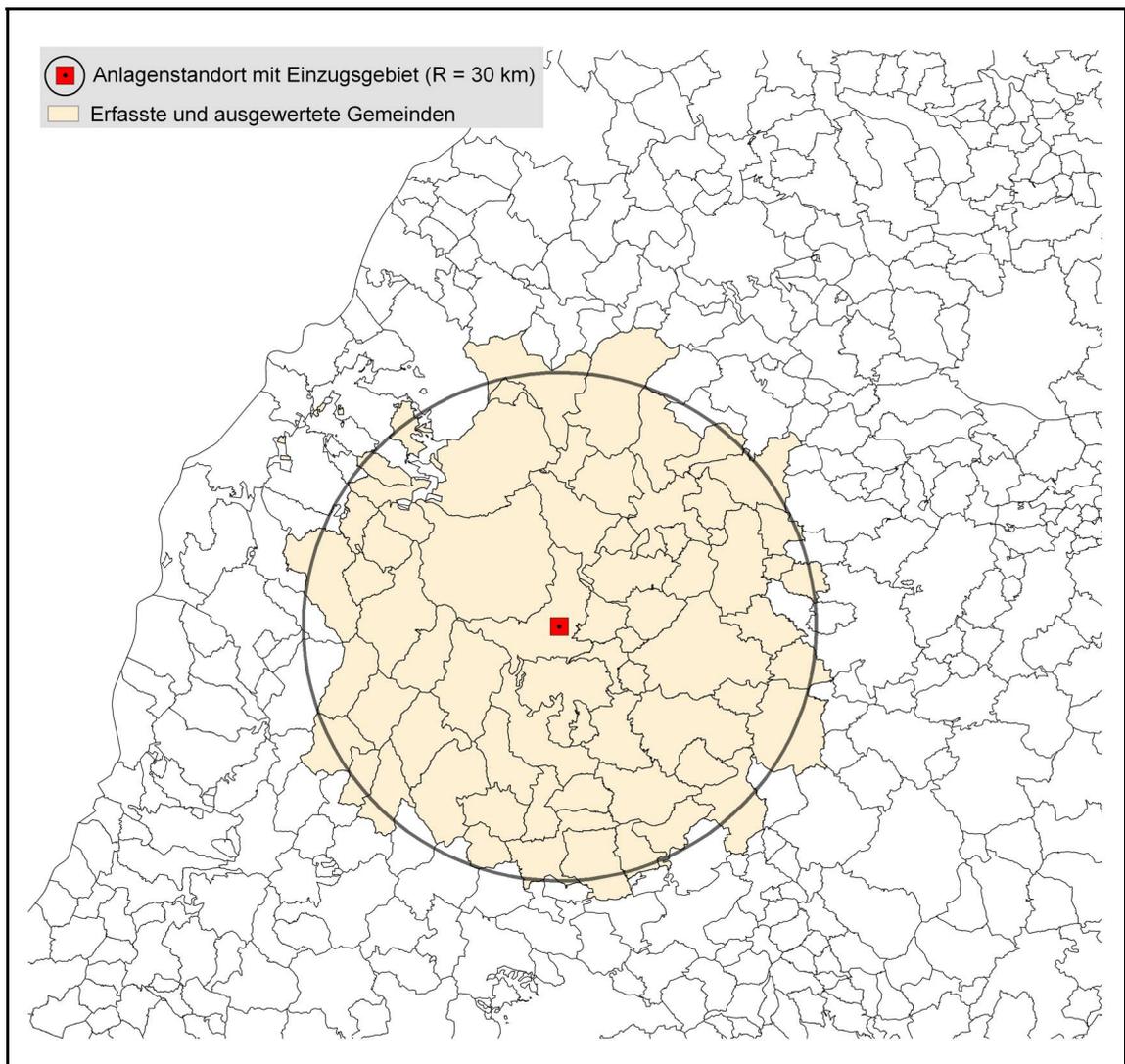
**Anmerkungen:** Die in den gelben Feldern dargelegten Gewichtungsfaktoren wurden in eigener Annahme festgelegt. Da es sich hierbei lediglich um Verhältniszahlen handelt, sind diese Faktoren nur bedingt untereinander vergleichbar. Insofern muss auch die Quersumme mehrerer Zahlen in einem Bereich nicht zwangsläufig den Wert 100 ergeben.

**Anhang 6.37: Gewichtungsschema der Standortanalyse – Erfassungsgebiete für das integrierte Konzept**

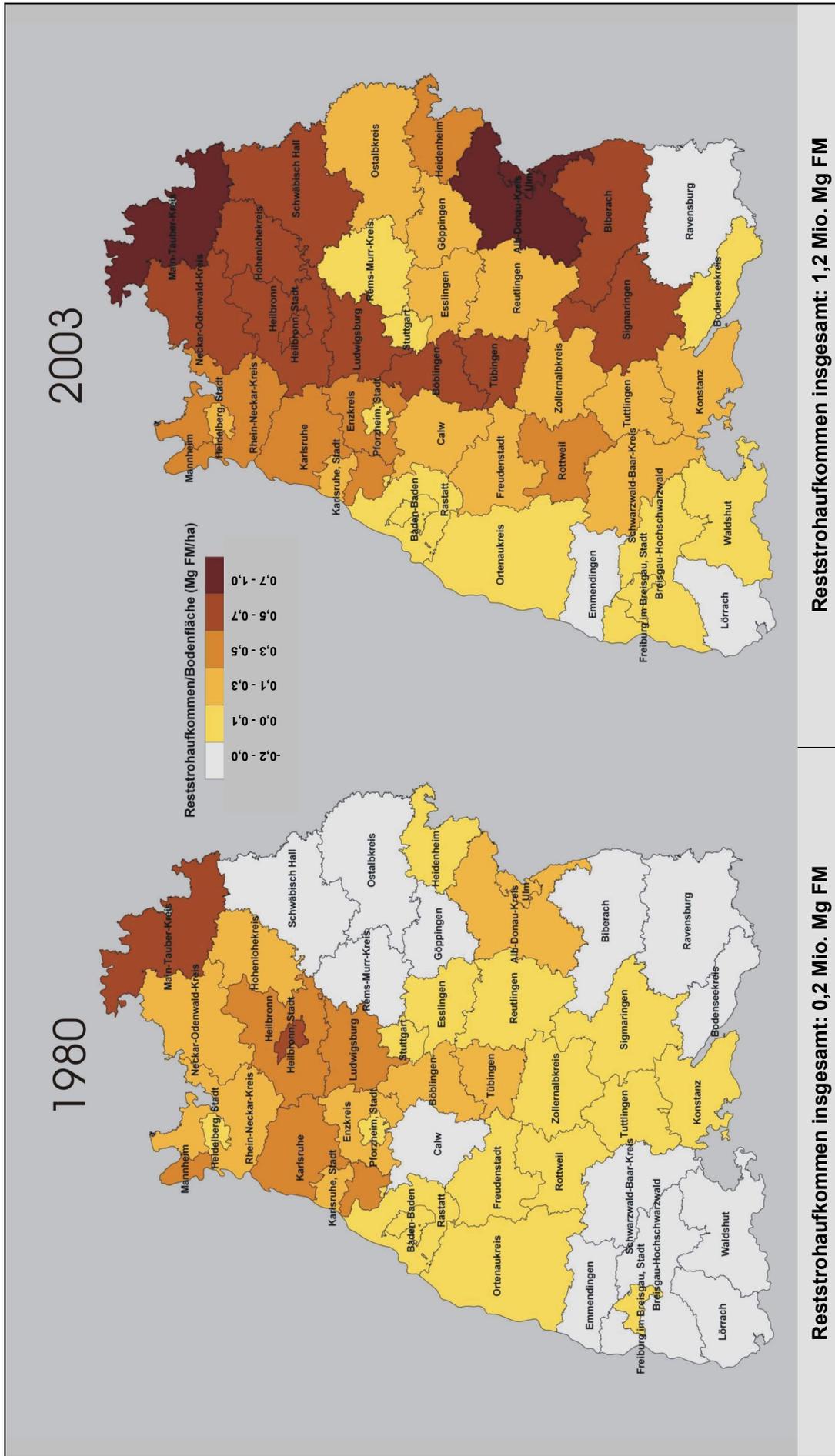


**Anmerkungen:** Die in den gelben Feldern dargelegten Gewichtungsfaktoren wurden in eigener Annahme festgelegt. Da es sich hierbei lediglich um Verhältniszahlen handelt, sind diese Faktoren nur bedingt untereinander vergleichbar. Insofern muss auch die Quersumme mehrerer Zahlen in einem Bereich nicht zwangsläufig den Wert 100 ergeben.

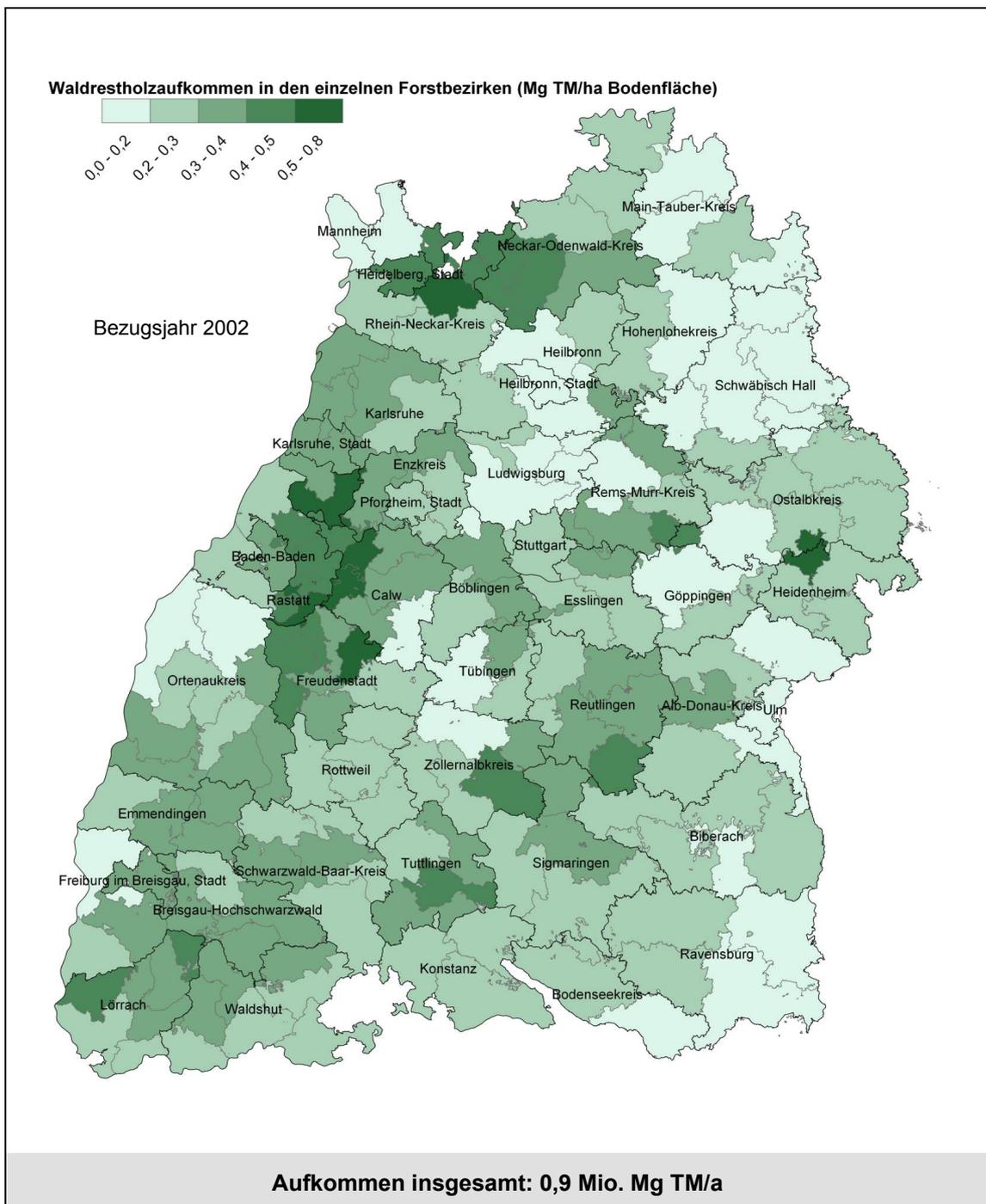
## Anhang 6.38: Exemplarische Darstellung eines Einzugsgebietes



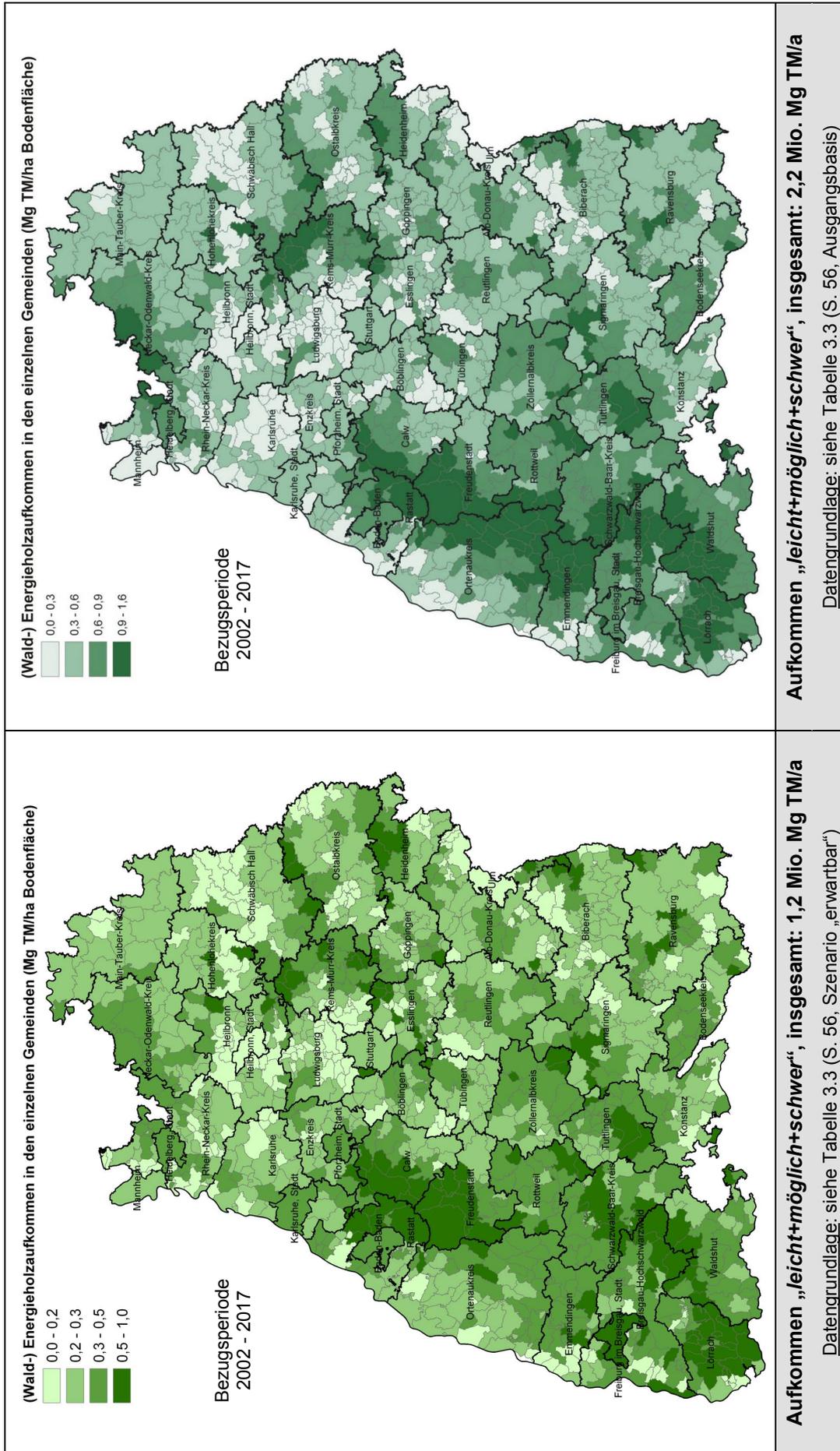
Anhang 6.39: Reststrohaufkommen in den Landkreisen Baden-Württembergs 1980 und 2003



## Anhang 6.40: Waldrestholzaufkommen in den Forstbezirken Baden-Württembergs im Jahr 2002



### Anhang 6.41: (Wald-) Energieholzaufkommen in den Gemeinden Baden-Württembergs





## Anhang 6.43: Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Erfassung von Waldrestholz

Bereitstellungsform	Erfasstes Sortiment	Grad der Mechanisierung	Erfassungskosten <sup>a)</sup>	
			(in €/Srm) <sup>b)</sup>	(€/Mg TM)
Hackschnitzel <sup>1) c)</sup>	Nadel- und Laubholzkronen sowie Schlagrücklass	Teil- bzw. Vollmechanisiert	7 - 16	48 - 109
Hackschnitzel <sup>2)</sup>	aus Schwachholz/Industrieholz	Vollmechanisiert	8 - 39	36 - 176
		Motormanuell bzw. teilmechanisiert	6 - 28	27 - 126
Holzbündel <sup>3) c) d)</sup>	Schlagabraum	Teil- bzw. Vollmechanisiert	7 - 18	43 - 110

**Anmerkungen:** a) Die angegebenen Kosten beziehen sich auf die Bereitstellung von Hackschnitzel bzw. Holzbündel frei Waldstraße oder Hackplatz. Die Kosten für den Transport zur (Pyrolyse-) Anlage sind hierbei nicht enthalten.

- b) Für die Umrechnung von Srm zu Mg TM wurden folgende Umrechnungsfaktoren gewählt: 6,8 bei Nadel-/Laubholzkronen und Schlagrücklass (Wittkopf, 2004); 4,5 bei Schwachholz/Industrieholz (KWF, 2004); 6,1 bei Holzbündel (Kanzian, 2005)
- c) In der Regel sind die Autoren bei der Bildung dieser Kostensätze davon ausgegangen, dass die Kosten für Fällen und Vorliefern (bei Ganzbaumverfahren auch das Rücken) dem Hauptnutzungspfad zugeordnet werden.
- d) Ohne Berücksichtigung von Hackkosten.

**Quellen:**

- 1) Agrarplus GmbH, 2003; Daiber, 2006; Eberhard, 2004; Hahn, 2005; Holzenergie Schweiz, 2004; Kanzian et al., 2006b; KWF, 2004; Odenthal-Kahabka, 2005; Textor, 2000; Textor et al., 2006; Wittkopf et al., 2003; Wittkopf, 2004; Wittkopf, 2005a
- 2) Agrarplus GmbH, 2003; Albus, 2003; Basse et al., 2002; Brümmel, 2004; Cremer, 2006; Eberhard, 2004; Gabriel, 2004; Hahn, 2005; Holzenergie Schweiz, 2004; KWF, 2004; Lechner et al., 2004; Spinelli, 2004; Textor, 2006; Wittkopf et al., 2003; Wittkopf, 2005a
- 3) Höllerl, 2004; Kanzian, 2005; Wittkopf, 2005a und 2005b

Bereitstellungsform	Erfasstes Sortiment	CO <sub>2</sub> -Emissionen <sup>a)</sup>	
		(in l/Srm) <sup>b)</sup>	(kg/Mg TM)
Hackschnitzel <sup>1)</sup>	Nadel- und Laubholzkronen sowie Schlagrücklass	3	62
Hackschnitzel <sup>3)</sup>	aus Schwachholz/Industrieholz	3 - 4	41 - 55
Holzbündel <sup>2)</sup>	Schlagabraum	3	57

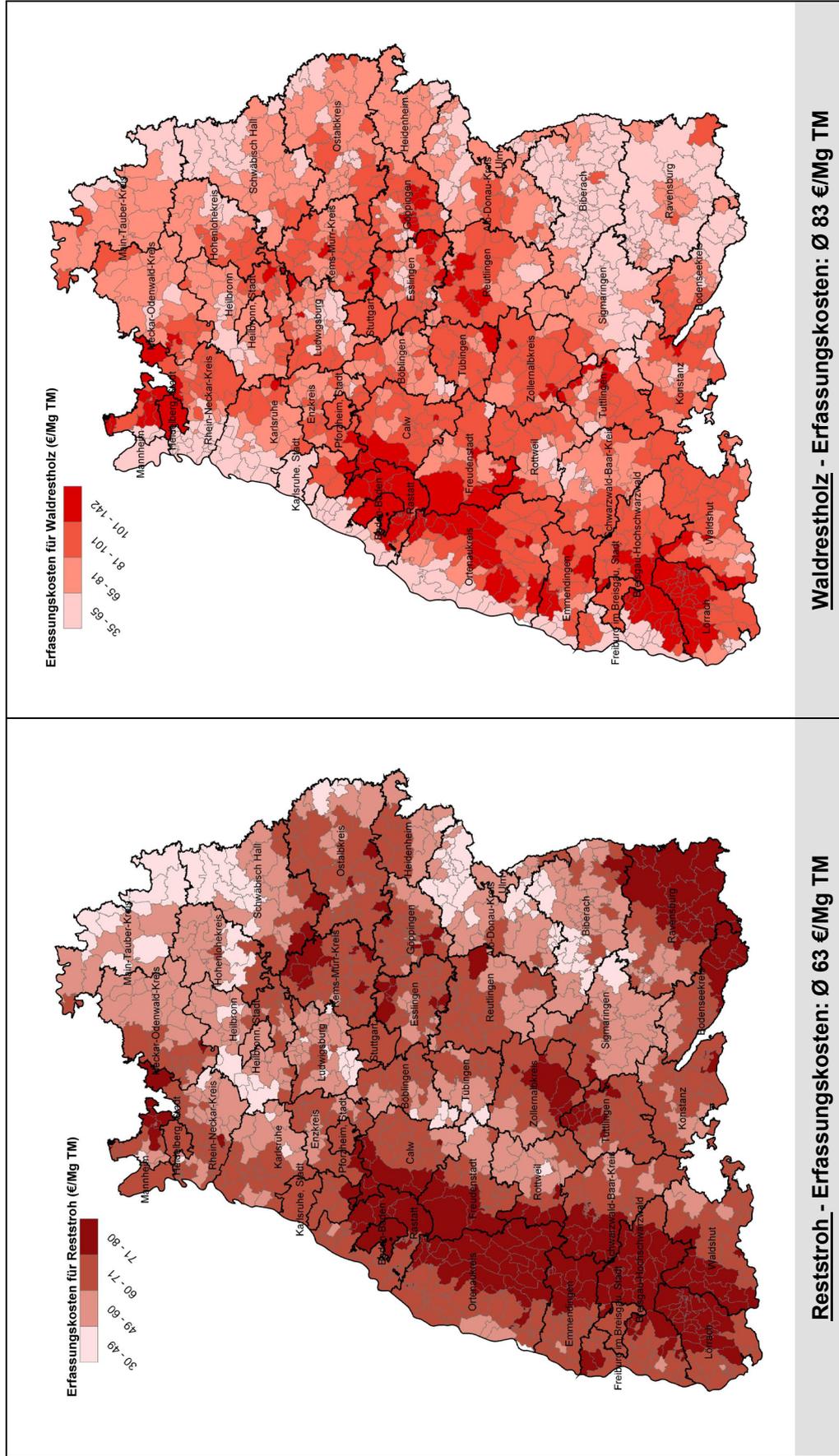
**Anmerkungen:** a) Ohne Emissionen, die bei dem Transport der Hackschnitzel bzw. Holzbündel zur (Pyrolyse-) Anlage entstehen

- b) Umrechnungsfaktoren von Srm in Mg TM wie bei den Anmerkungen zu obiger Tabelle dargelegt. Für die energie- bzw. emissionsspezifische Umrechnung wurden die in Anhang 6.29 (S. A-147) dargestellten Umrechnungsfaktoren verwendet.

**Quellen:**

KWF, 2004; Wittkopf, 2005a

**Anhang 6.44: Erfassungskosten für Reststroh und Waldrestholz in den Gemeinden Baden-Württembergs**



## Anhang 6.45: Darstellung einer Transportkalkulation am Beispiel des Strohtransportes mit dem Lkw-Gliederzug

Strohballentransport (inkl. leerer Rückfahrt) mit dem Lkw Die Beladung der Strohballen erfolgt mit einem ldw. Schlepper		Gliederzug			
Transportentfernung (einfache Richtung)	km	100			
		Rundballen		Quaderballen	
		1,2x1,2	1,5x1,2	2x0,9x0,8	2,4x1,2x0,7
Ballenmaße (Höhe x Durchmesser; Länge x Breite x Höhe)	m				
Ballendichte	Mg/m <sup>3</sup>	0,11	0,12	0,13	0,15
Ballenmasse	Mg FM	0,16	0,25	0,18	0,30
Ballenvolumen	m <sup>3</sup>	1,44	2,12	1,44	2,00
Heizwert	MJ/kg FM	14,5	14,5	14,5	14,5
Anteil Trockenmasse	%	86	86	86	86
<b>Zu transportierende Ballen insgesamt</b>	Stück	<b>48</b>	<b>36</b>	<b>68</b>	<b>48</b>
<b>Fahrzeugdaten</b>					
Leergewicht Zugfahrzeug + Anhänger	Mg	17,5	17,5	17,5	17,5
Max. mögliche Zuladung (ganzer Zug)	Mg				
Anzahl der Transportbehältnisse	Stück	2	2	2	2
max Transportbehältniszuladung	Mg				
Maximal mögliche Zuladung (ganzer Zug)	Mg	22,5	22,5	22,5	22,5
Theoretisches Transportvolumen (insgesamt)	m <sup>3</sup>	106,5	106,5	106,5	106,5
<b>Transportiertes Gut</b>					
Transport ist volumen- oder massenlimitiert		Vol.	Vol.	Vol.	Vol.
Tatsächlich transportierte Ballen	Stück	48	36	68	48
Tatsächlich transportiertes Volumen (Gut)	m <sup>3</sup>	69,1	76,3	97,9	96,0
Tatsächlich transportierte Masse (Gut)	Mg FM	7,7	9,0	12,2	14,4
	Mg TM	6,6	7,7	10,5	12,4
Transportierte Biomasseenergie	MJ	111.360	130.500	177.480	208.800
Ausnutzungsgrad (Transportvolumen bzw. Gewichtszuladung)	Volumen Gewicht	100% 34%	100% 40%	100% 54%	100% 64%
<b>Stundensätze</b>					
Stundensatz Schlepper (fix; inkl. Frontlader und Ballenzange)	90 kW Schlepper	€ <sub>fix</sub> /h	33,0	33,0	33,0
Stundensatz Schlepper (variabel)	90 kW Schlepper	€ <sub>var</sub> /h	7,5	7,5	7,5
Stundensatz LKW (mit Personalkosten; ohne Energiekosten)		€ <sub>fix</sub> /h	37,0	37,0	37,0
<b>Zeit für Rüsten (Schlepper und Lkw)</b>					
Schlepper		h	0,58	0,58	0,58
Zeit fürs Rüsten im Hof (Schlepper)	20 min				
Zeit für Anfahrt (und Abfahrt) zum Feld (Schlepper)	15 min				
Lkw		h	0,50	0,50	0,50
Zeit für Rüsten (Lkw)	10 min				
Zeit für Anfahrt zum Feld (Lkw)	20 min				
<b>Beladezeit</b>					
Zeit fürs Beladen der Strohballen		h	1,53	1,23	2,03
Rüsten/Warten am Feld	20 min				
Ladezeit pro Ballen	1,5 min/Ballen				
<b>Fahrzeit Lkw</b>					
Wald bis Ortstraße (Strecke bzw. Durchschnittsgeschwindigkeit)	2 km	km/h	6	6	6
Ortsdurchgangsstraße	6 km	km/h	30	30	30
Kreis-/Land-/Bundesstraßen	20 km	km/h	45	45	45
Autobahn	72 km	km/h	65	65	65
Fahrzeit errechnet (Lastfahrt/Hinfahrt; einfache Strecke)		h	2,09	2,09	2,09
damit ergibt sich eine v <sub>quer</sub> (nur Hinfahrt)		km/h	48,0	48,0	48,0
Zeit für die Rückfahrt/Leerfahrt	0,80	h	1,67	1,67	1,67
damit ergibt sich eine v <sub>quer</sub> (Hin- und Rückfahrt)		km/h	53,3	53,3	53,3
<b>Entladezeit</b>					
Zeit fürs Entladen der Strohballen		h	1,05	0,85	1,38
Zeit für Rüsten/Warten an der Anlage	15 min				
Entladeladezeit pro Ballen	1,0 min/Ballen				
<b>Alle Zeiten zusammengefasst</b>					
Zeitaufwand für Rüsten+Anfahrt (Schlepper)		h	0,58	0,58	0,58
Zeitaufwand für Rüsten+Anfahrt (Lkw)		h	0,50	0,50	0,50
Zeitaufwand fürs Beladen des Lkw		h	1,53	1,23	2,03
Zeitaufwand fürs Transportierten (Lkw) Hin- und Rückfahrt		h	3,75	3,75	3,75
Zeitaufwand fürs Entladen		h	1,05	0,85	1,38
Gesamter Zeitaufwand		h	<b>7,42</b>	<b>6,92</b>	<b>8,25</b>
<b>Fahrtkosten (LKW)</b>					
Kraftstoffkosten insgesamt (Hin- und Rückfahrt)		€	56,5	57,6	60,3
Kraftstoffverbrauch (Hinfahrt/abhängig vom Beladungszustand)		L/100km	31,5	32,6	35,3
Leerfahrt	25 l/100km				
Lastfahrt	44 l/100km				
Kosten pro Liter	1,0 €/l				
Mautkosten insgesamt (Hin- und Rückfahrt)		€	17,3	17,3	17,3
Kosten pro Kilometer	0,12 €/km				
<b>Kostenaufstellung</b>					
Kosten fürs Rüsten (Schlepper)		€	11,00	11,00	11,00
Kosten für die Anfahrt (Schlepper)		€	10,13	10,13	10,13
Kosten fürs Rüsten (Lkw)		€	6,17	6,17	6,17
Kosten für die Anfahrt (Lkw)		€	1,25	1,25	1,25
Kosten fürs Beladen des Lkw (Schlepper)		€	62,10	49,95	82,35
Kosten fürs Beladen des Lkw (Lkw)		€	56,73	45,63	75,23
Kosten fürs Transportieren (Lkw)		€	212,66	213,77	216,51
Kosten fürs Entladen (Lkw)		€	38,85	31,45	51,18
<b>Summe der Kosten</b>		€	<b>398,88</b>	<b>369,35</b>	<b>453,82</b>
<b>bezogen auf die transportierte Masse</b>		€/Mg TM	<b>60,39</b>	<b>47,72</b>	<b>43,11</b>
bezogen auf die Stunden		€/h	53,75	53,37	54,98
bezogen auf den Ballen		€/m <sup>3</sup>	5,77	4,84	4,63
bezogen auf den Energieinhalt		€/GJ	3,58	2,83	2,56

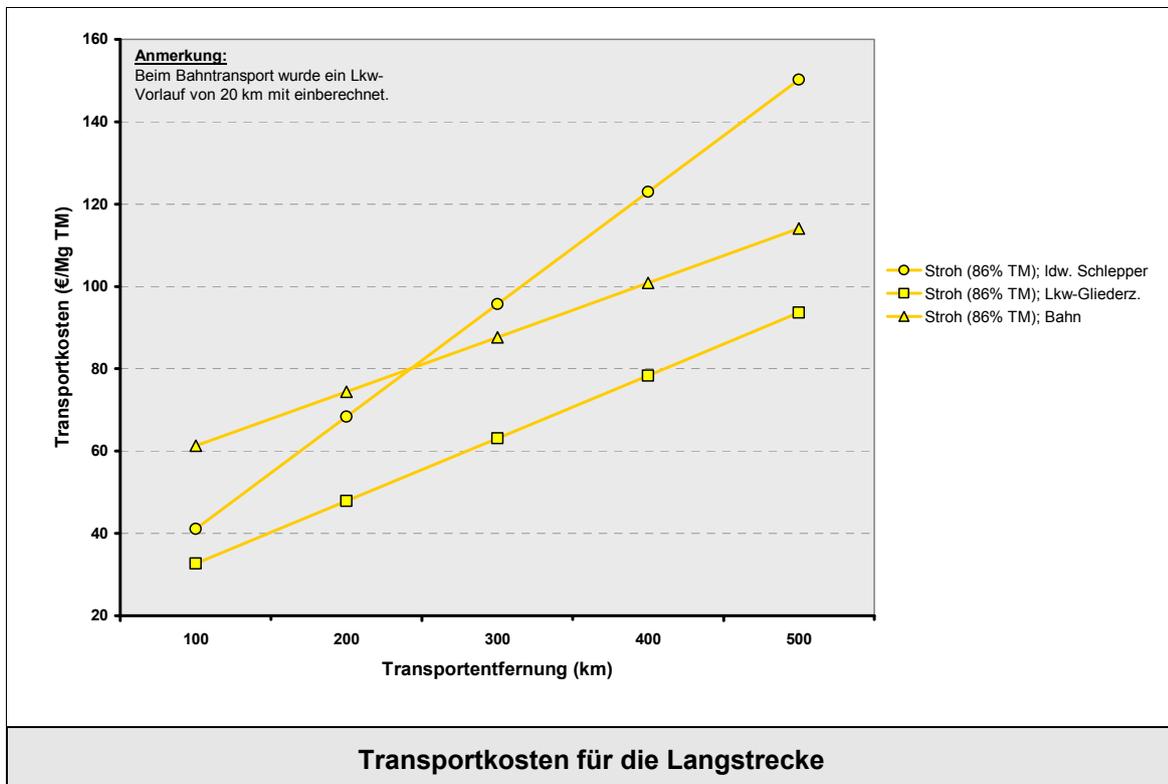
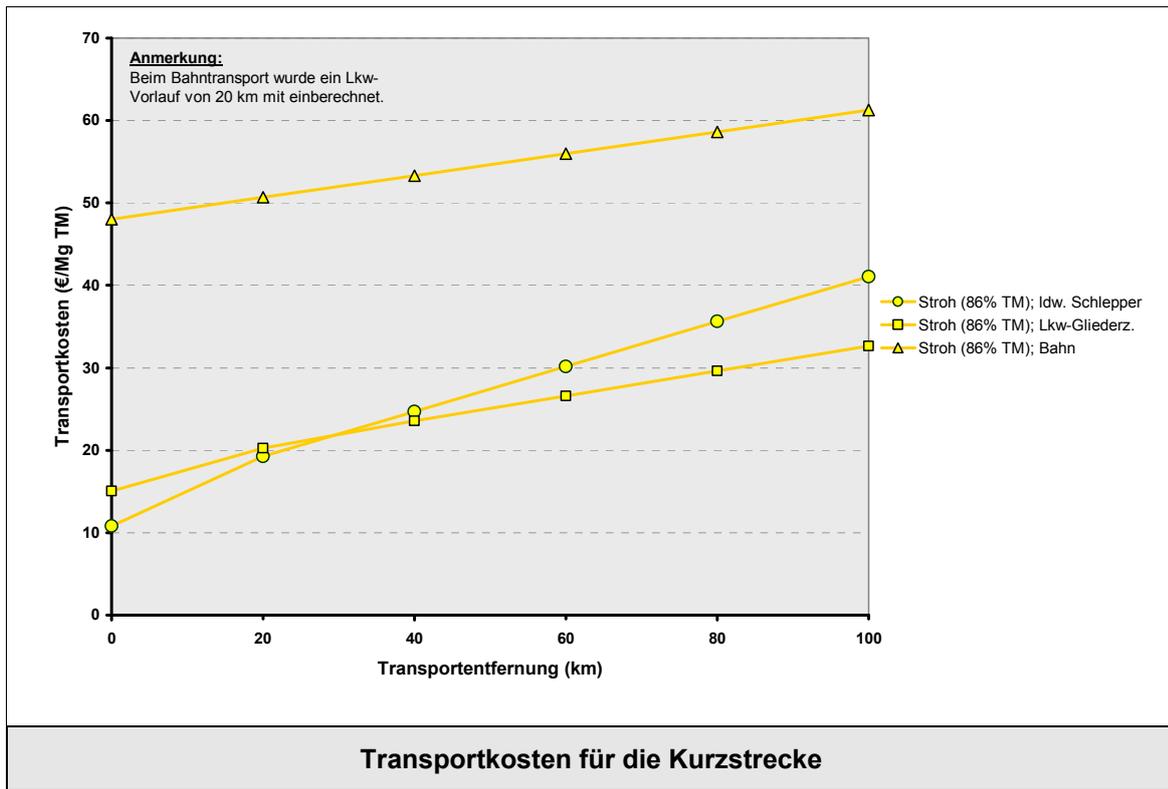
- Fortsetzung -

Strohballentransport (inkl. leerer Rückfahrt) mit dem Lkw		Gliederzug				
Transportentfernung (einfache Richtung)	km	100				
		Rundballen		Quaderballen		
Ballenmaße (Höhe x Durchmesser; Länge x Breite x Höhe)	m	1,2x1,2	1,5x1,2	2x0,8x0,9	2,4x1,2x0,7	
<b>Energieverbrauch</b>						
Kraftstoffverbrauch (Anfahrt Schlepper + Lkw)	0,8 €/l (nur Schlepper)	Liter	3,6	3,6	3,6	3,6
Kraftstoffverbrauch (Be- und Entladen)		Liter	14,4	11,6	19,1	14,4
Kraftstoffverbrauch (Hin- und Rückfahrt)		Liter	56,5	57,6	60,3	62,2
<b>Verbrauch insgesamt</b>		Liter	74,5	72,8	83,0	80,1
	Heizwert Diesel 35,87 MJ/l	MJ	2.671	2.610	2.977	2.874
bezogen auf die transportierte Masse		MJ/TM	404	337	283	232
bezogen auf die Entfernung		MJ/km	13,4	13,0	14,9	14,4
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>						
Gesamte CO <sub>2</sub> -Emission	0,085 kg CO <sub>2</sub> /MJ	kg	227	222	253	244
Gesamte CO <sub>2</sub> -Emission (auf transportierte Biomasse bezogen)		kg/Mg TM	34,4	28,7	24,0	19,7
Gesamte CO <sub>2</sub> -Emission (auf transportierte Entfernung bezogen)		kg/km	1,1	1,1	1,3	1,2
<b>Kostenaufteilung (entfernungsabhängig bzw. entfernungsunabhängig)</b>						
Kosten für das Rüsten, Warten und Laden		€	186,2	155,6	237,3	186,2
Kosten für das Transportieren		€	212,7	213,8	216,5	218,3
Kosten für das Rüsten, Warten und Laden		€/Mg TM	28,2	20,1	22,5	15,0
Kosten für das Transportieren		€/Mg TM	32,2	27,6	20,6	17,6
<b>Kostenverteilung</b>						
Energiekosten		€	74,45	72,76	82,99	80,13
Personalkosten Schlepper	13,5 €/h	€	28,58	24,53	35,33	28,58
Personalkosten Lkw	22,0 €/h	€	150,42	139,42	168,75	150,42
Kapitalkosten (Schlepper 90 KW)	11,5 €/h	€	24,34	20,89	30,09	24,34
Kapitalkosten (Lkw)	8,4 €/h	€	57,43	53,23	64,43	57,43
Sonstige Kosten		€	63,66	58,52	72,22	63,66
Energiekosten		€/Mg TM	11,27	9,40	7,88	6,47
Personalkosten insgesamt		€/Mg TM	27,10	21,18	19,39	14,45
Kapitalkosten		€/Mg TM	12,38	9,58	8,98	6,60
Sonstige Kosten		€/Mg TM	9,64	7,56	6,86	5,14

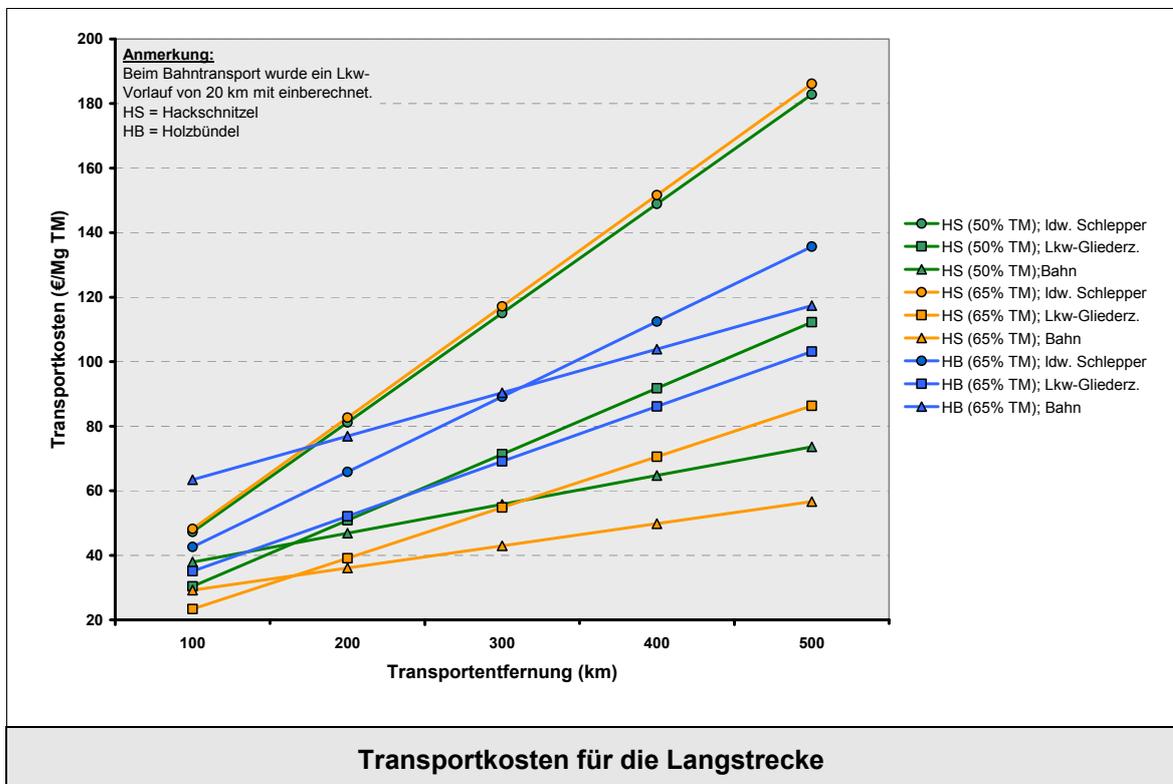
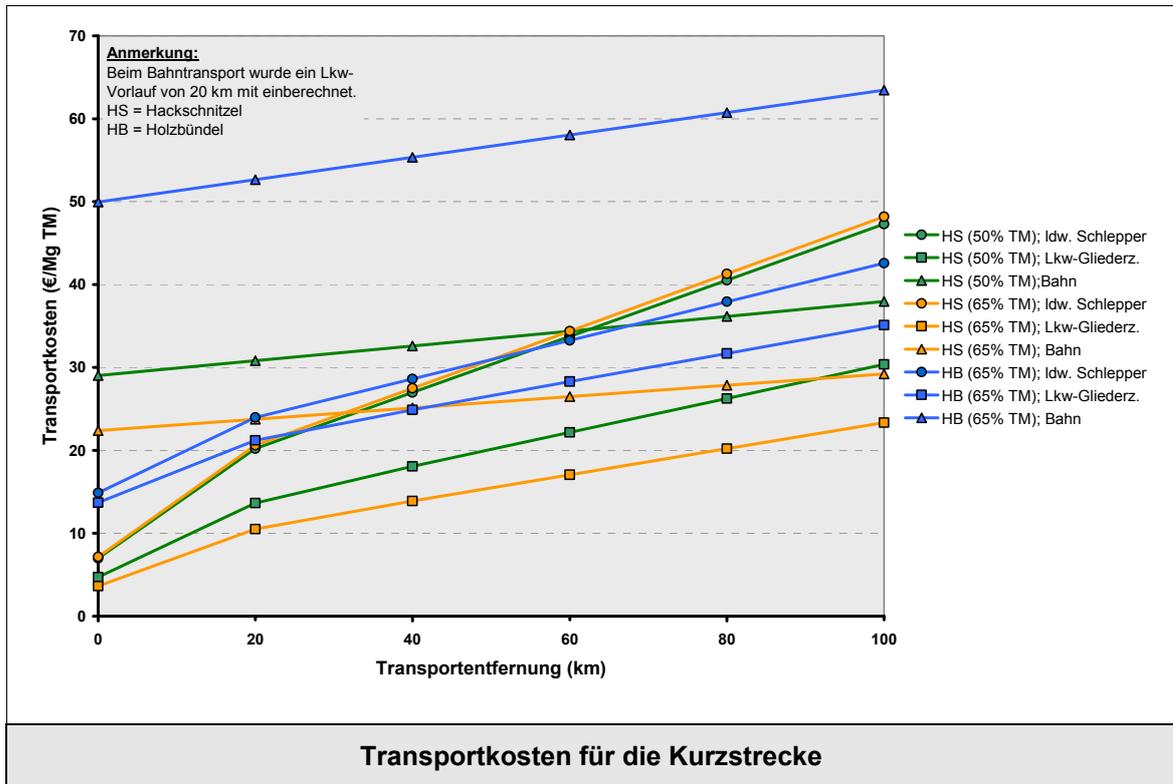
Anmerkungen: Die in der Tabelle dargestellten gelben Felder stehen für variable Eingabegrößen. Diese Größen sind den Angaben aus Anhang 6.29 (S. A-147) und Anhang 6.31 (S. A-148) entnommen bzw. aus diesen abgeleitet.

Die der Kalkulation zugrunde gelegten Beladungsschemata des Lkw sind Anhang 6.28 (S. A-146) zu entnehmen.

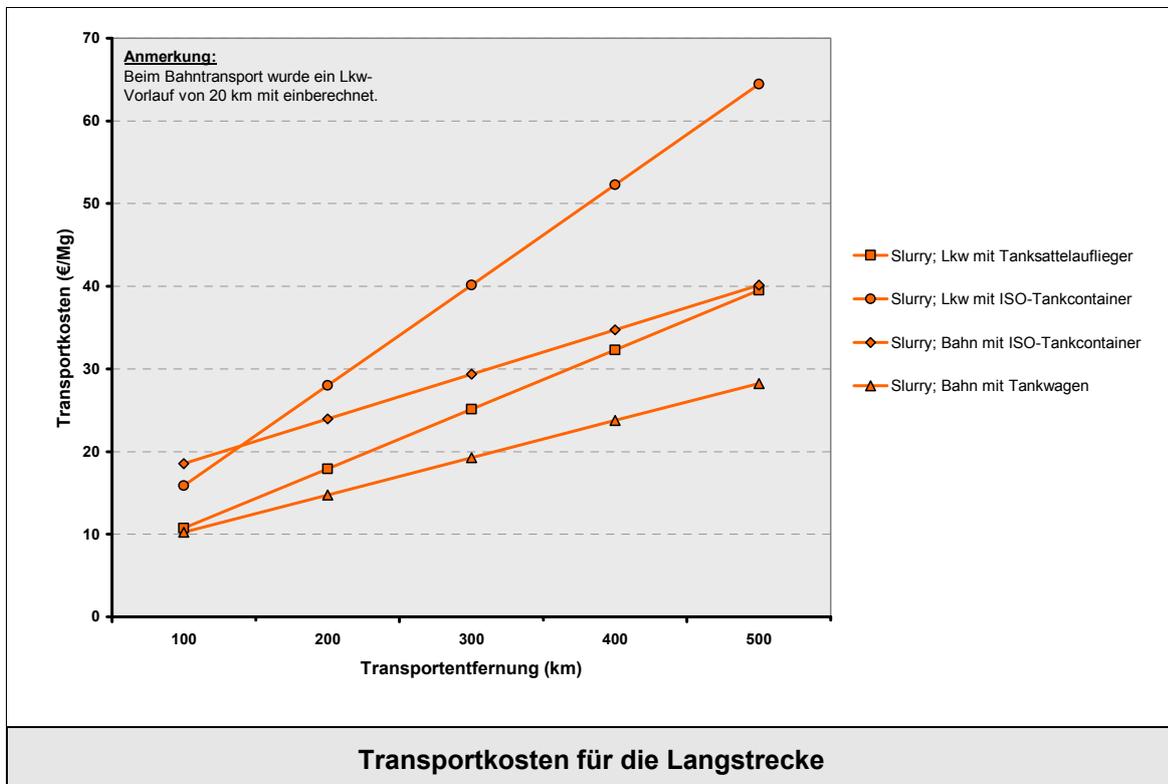
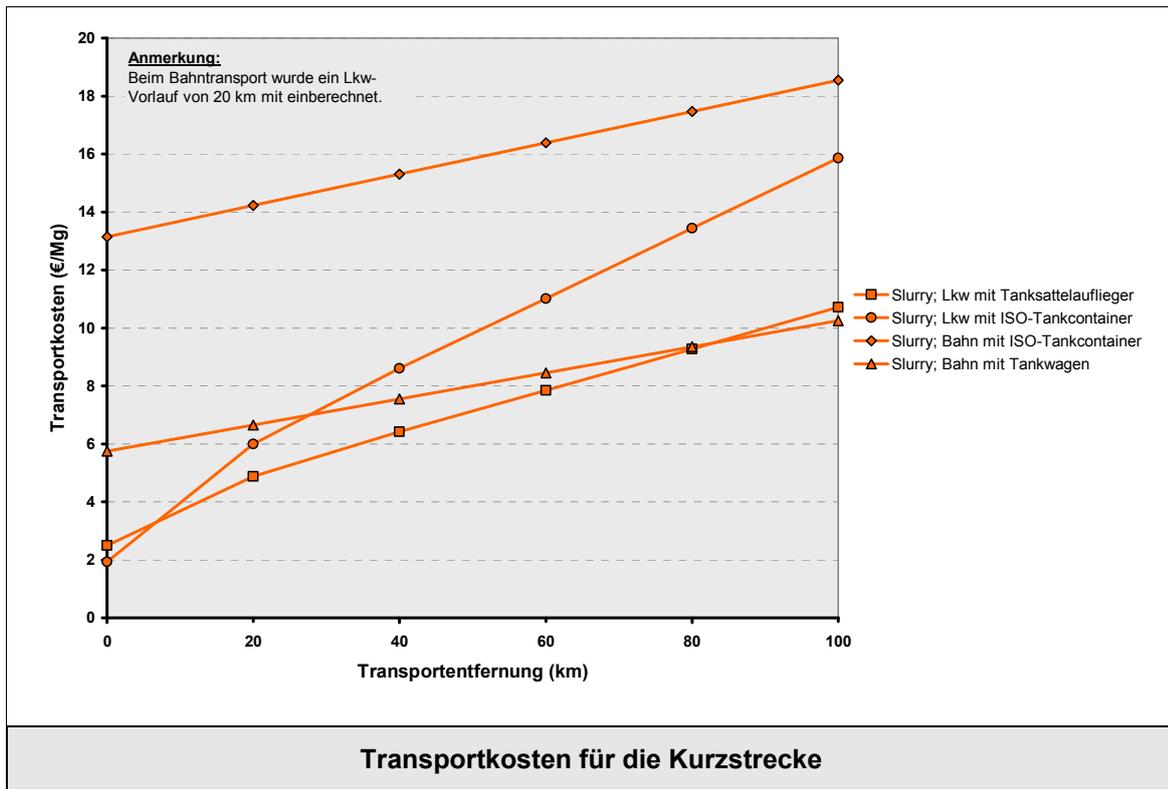
## Anhang 6.46: Transportkosten für Stroh (Quaderballen)



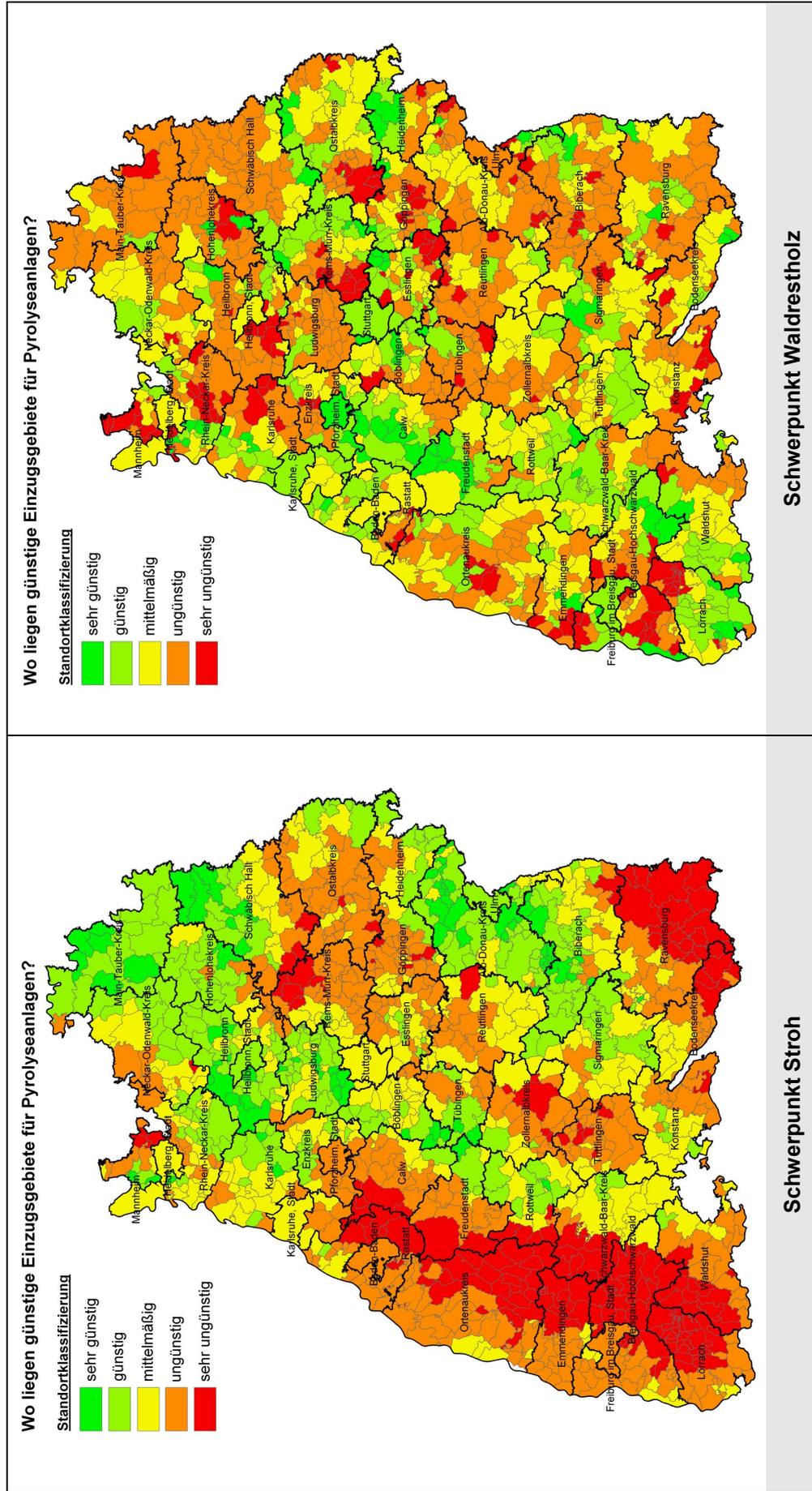
## Anhang 6.47: Transportkosten für Waldhackschnitzel (HS) und Holzbündel (HB)



## Anhang 6.48: Transportkosten für Slurry

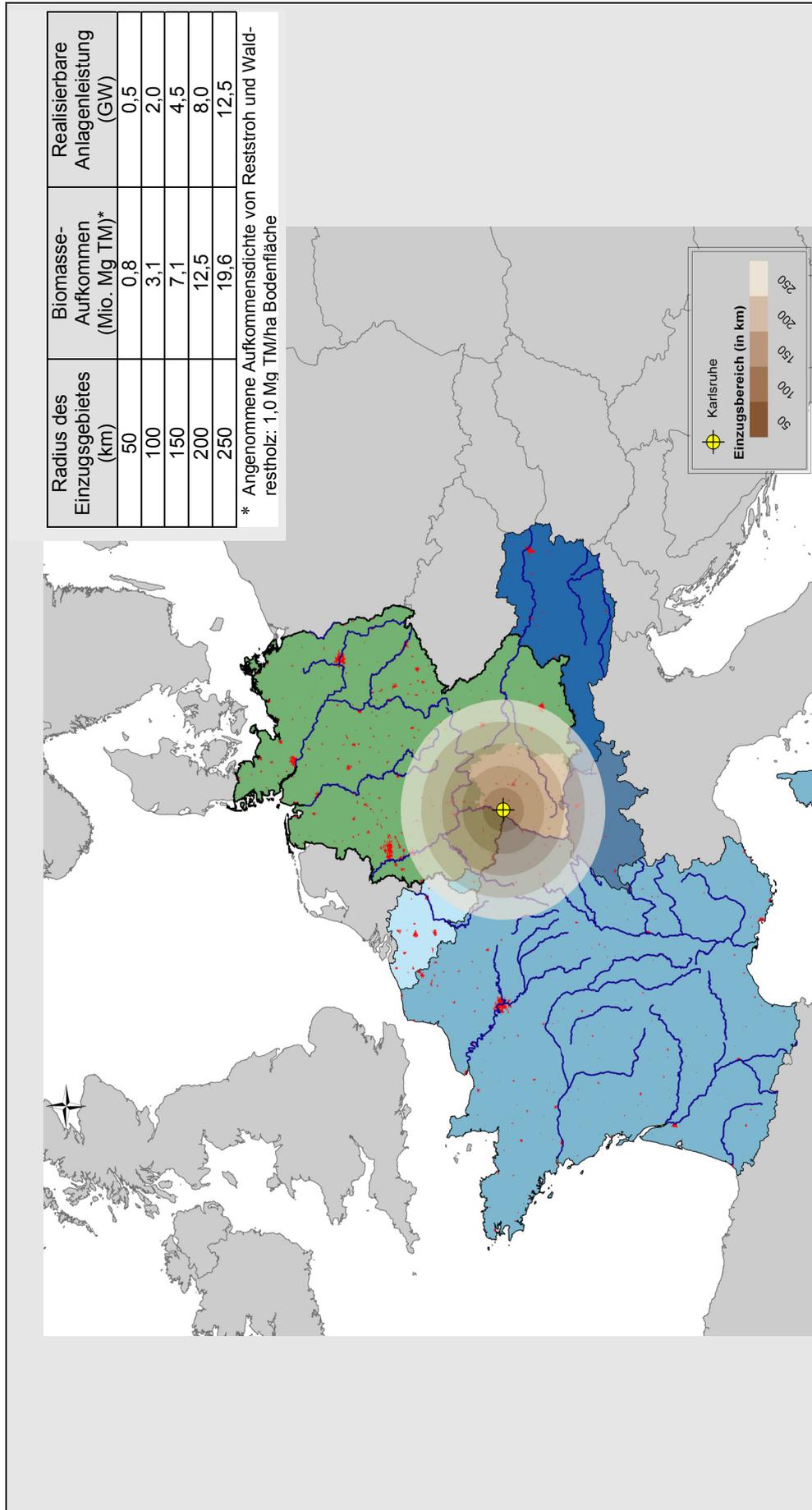


## Anhang 6.49: Vorteilhafte Einzugsgebiete für das dezentral Konzept – getrennt nach Reststroh und Waldrestholz

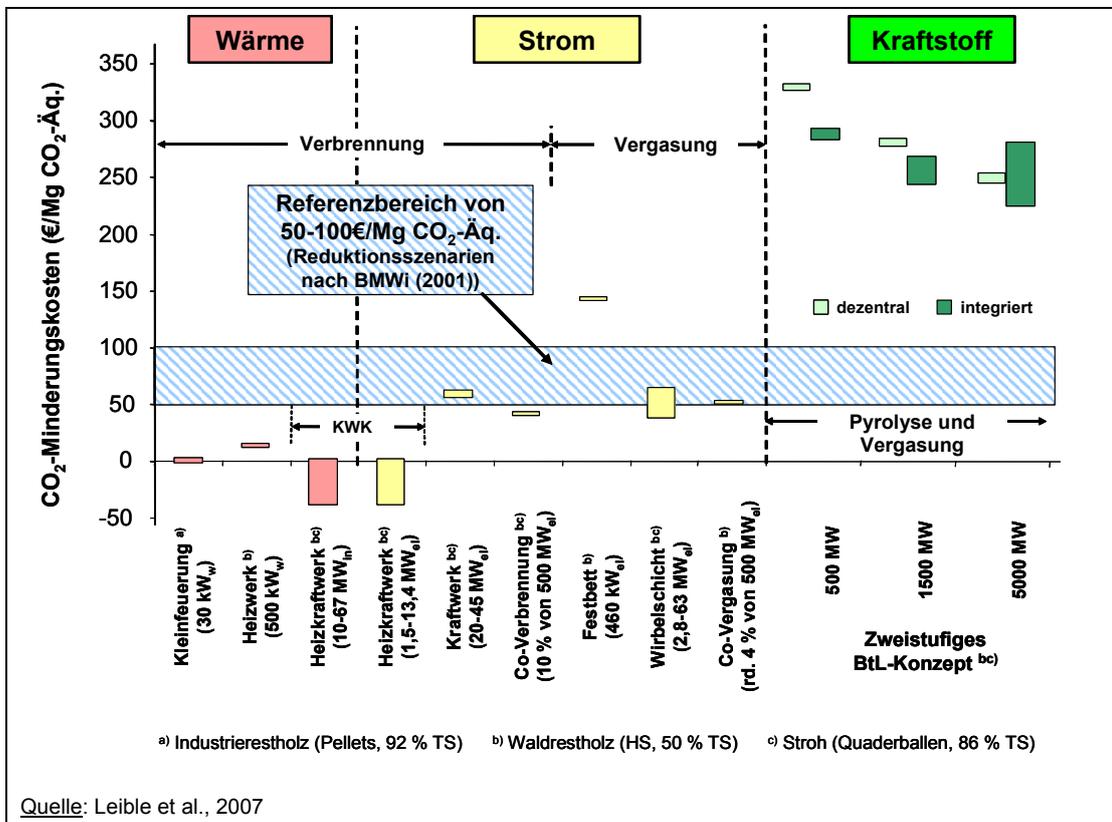
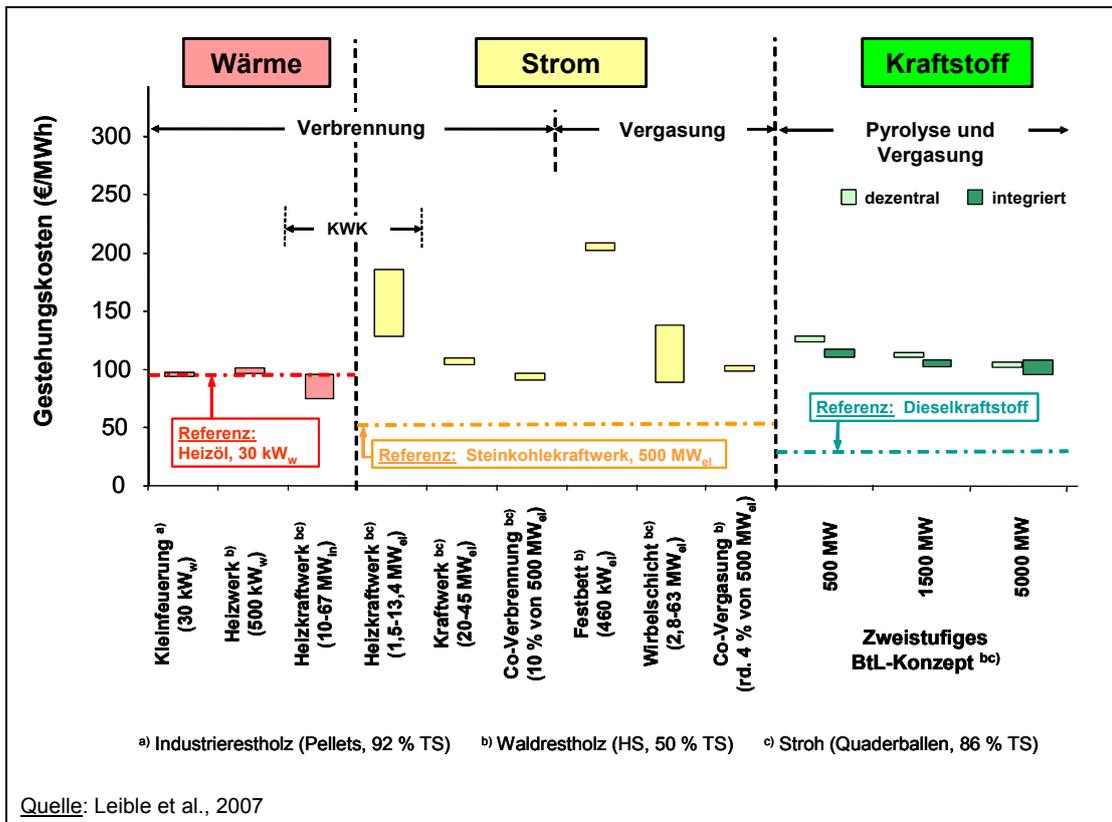


Anmerkung: Die Gewichtung erfolgte in Anlehnung an das in Abbildung 3.17 (S. 80, linke Darstellung) dargelegte Schema, indem jeweils nur einer der beiden Bioenergieträger (Reststroh oder Waldrestholz) mit einbezogen wurde.

**Anhang 6.50: Einzugsgebiete für eine Großanlage nach dem integriertem Konzept (Standort Karlsruhe)**



## Anhang 6.51: Gestehungs- und CO<sub>2</sub>-Minderungskosten alternativer Verfahren



September 2008