

# **Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 150**



**bast**

# **Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst**

von

Nikolas Rommeiß  
Daniela Thrän  
Thomas Schlägl  
Jaqueline Daniel  
Frank Scholwin

Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE)  
Leipzig

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Verkehrstechnik Heft V 150**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M- Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 03.376/2004/LRB**  
Energetische Verwertung von Grünabfällen  
aus dem Straßenbetriebsdienst

Projektbetreuung  
Hermann Wirtz

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN (10) 3-86509-595-x  
ISBN (13) 978-3-86509-595-4

Bergisch Gladbach, Dezember 2006

## Kurzfassung – Abstract

### Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst

Ziel des Forschungsvorhabens war es, Möglichkeiten einer ökonomisch tragfähigen energetischen Verwertung von Grünabfällen (Grasschnitt, Gehölzschnitt und Bankettschälgut) aus dem Straßenbetriebsdienst aufzuzeigen, zu diskutieren und Empfehlungen abzuleiten.

Dazu wurden unter Berücksichtigung der stoffstromspezifischen, technischen, organisatorischen, rechtlichen, ökologischen und förderpolitischen Randbedingungen geeignete Verwertungswege dargestellt. Diese wurden hinsichtlich ihrer Kostenstrukturen grundlegend analysiert und bewertet. Zusätzlich wurde modellhaft für mehrere Straßenmeistereien, die günstige Ausgangsbedingungen für eine energetische Nutzung des Straßenbegleitgrüns aufwiesen, untersucht, wie und unter welchen Randbedingungen mögliche Konzepte einer energetischen Nutzung der anfallenden Grünabfälle (Einzellösung, Verbundlösung, Kooperation mit Dritten etc.) wirtschaftlich tragfähig umgesetzt werden können.

Datengrundlage bildeten die aus dem Straßenbetrieb erwarteten wie auch von der energetischen Nutzung geforderten Brennstoffmengen und -qualitäten, welche auf Literaturangaben, vielfältigen Umfragen sowie stichprobenartigen Laboruntersuchungen für Bankettschälgut beruhten.

Die energetische Verwertung von Gehölzschnitt in meistereieigenen oder externen Biomasseanlagen stellt eine ökonomische Alternative gegenüber der bisherigen Entsorgung dar. Für Grasschnitt ist dies nur in Gemeinschaftsanlagen mehrerer Meistereien und unter optimalen ökonomischen Randbedingungen wirtschaftlich. Weiterhin fehlen für die externe Nutzung von Grasschnitt praktische und wissenschaftliche Erfahrungen mit diesem Material. Bankettschälgut ist für eine energetische Nutzung ungeeignet.

Im Ergebnis erhalten die betroffenen Einrichtungen eine Unterstützung und Hilfestellung zur zeitnahen Umsetzung möglicher Konzepte einer energetischen Nutzung von Grünabfällen.

### Energetic utilisation of green wastes from the technical road service

Aim of the research project was to discuss and recommend possibilities of a sustainable economical and energetic utilisation of green wastes from the technical road service (grass cut, wood cut and grass scrapings from roadsides).

Suitable utilisation concepts were developed, in consideration of the specific material flow as well as the technical, organisational, legal, ecological and political promotion framework. The cost structures were fundamentally analysed and evaluated. In addition several road maintenance companies – with favourable initial conditions for an energetic use of the green waste – were exemplarily assayed. This included a recommendation under which economical boundary conditions possible concepts of an energetic use of the resulting green wastes (single solutions, group solution, co-operation with third etc.) should be implemented.

The database was formed by the expected mass of green waste from road service and also the demanded qualities and quantities of fuel for an energetic use.

The energetic utilisation of wood cut, e.g. the internal or external use in biomass plants, represents an economic alternative in relation to the existing disposal.

The energetic utilisation of grass cut is only reasonable in communal facilities of several road maintenance staff and under optimal economic boundary conditions.

Furthermore, practical and scientific experiences for the external use of grass cut are still not available. The energetic use of grass scrapings from roadside is not suitable.

As a result the involved facility receives assistance and a timely support realisation of possible concepts of an energetic use of green wastes.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	11	5.2.1	Grasschnitt .....	26
<b>2</b>	<b>Methodik</b> .....	11	5.2.2	Gehölzschnitt .....	27
<b>3</b>	<b>Allgemeine Rahmenbedingungen des Straßenbetriebsdienstes</b> .....	12	5.2.3	Bankettschälgut .....	28
3.1	Struktur des Straßenwesens .....	13	5.3	Brennstoff- und Substrat- qualitäten .....	29
3.2	Grünabfälle des Straßenbetriebs- dienstes .....	13	5.3.1	Brennstoffspezifikationen für biogene Festbrennstoffe .....	30
3.2.1	Grasschnitt .....	13	5.3.2	Spezifikationen für Biogas- substrate .....	31
3.2.2	Gehölzschnitt .....	15	<b>6</b>	<b>Stoffströme – Datenanalyse</b> .....	31
3.2.3	Bankettschälgut .....	15	6.1	Datengrundlage .....	31
3.3	Entsorgungswege für Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst .....	15	6.2	Mengenpotenziale von Grünabfällen .....	34
<b>4</b>	<b>Gesetzliche Rahmenbedingungen der energetischen Nutzung von Grünabfällen aus dem Straßen- betriebsdienst</b> .....	16	6.2.1	Potenzialbegriffe .....	34
4.1	Straßenbegleitgrün und Bankett- schälgut als Energieträger .....	16	6.2.2	Technisches Mengenpotenzial .....	35
4.1.1	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) .....	16	6.2.3	Erschließbare Potenziale .....	37
4.1.2	Biomasseverordnung .....	18	6.3	Logistik und Entsorgung .....	39
4.1.3	Bioabfallverordnung .....	19	6.3.1	Grasschnitt .....	39
4.1.4	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz .....	19	6.3.2	Gehölzschnitt .....	40
4.1.5	Zusammenfassende Einordnung .....	20	6.3.3	Bankettschälgut .....	41
4.2	Anforderungen an die Verwertungs- anlage .....	20	6.4	Energiebedarf der Meistereien .....	41
4.2.1	Emissionsvorschriften .....	20	6.4.1	Wärmebedarf .....	41
4.2.2	Hygienevorschriften .....	20	6.4.2	Strombedarf .....	42
4.3	Verwertung/Entsorgung der Rückstände .....	21	<b>7</b>	<b>Analyse der Systemtechnik</b> .....	42
4.4	Marktanreiz- und Förderprogramme ...	22	7.1	Konversionsverfahren .....	42
4.4.1	Förderprogramme des Bundes .....	22	7.1.1	Thermo-chemische Umwandlung .....	43
4.4.2	Förderprogramme der Länder .....	22	7.1.2	Physikalisch-chemische Umwandlung .....	44
<b>5</b>	<b>Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften</b> .....	23	7.1.3	Bio-chemische Umwandlung .....	44
5.1	Energetische Kenngrößen .....	23	7.1.4	Technische Optionen für Meistereien .....	45
5.1.1	Grasschnitt .....	23	7.2	Technologien zur Verbrennung .....	45
5.1.2	Gehölzschnitt .....	23	7.2.1	Handbeschickte Anlagen .....	46
5.1.3	Bankettschälgut .....	24	7.2.2	Automatisch beschickte Anlagen .....	47
5.2	Schad- und Störstoffe .....	25	7.2.3	Schlussfolgerung .....	49
			7.3	Techniken der Biogasnutzung .....	49
			7.3.1	Grundlagen der anaeroben Vergärung .....	49
			7.3.2	Konzepte .....	50
			7.3.3	Eigenschaften von Biogas .....	51

7.3.4	Besonderheiten der Nutzung fester organischer Stoffe	52	9.6	Entsorgungskosten nach energetischer Verwertung	73
7.3.5	Häufige Schwachstellen der Biogasgewinnung und -nutzung	53	<b>10</b>	<b>Kosten-Nutzen-Analysen und Kostenvergleiche</b>	74
7.3.6	Schlussfolgerung	54	10.1	Zentralheizungsanlagen (Gehölzschnitt)	75
<b>8</b>	<b>Energetische Verwertungskonzepte für Grünabfälle in Meistereien</b>	54	10.1.1	Wirtschaftlichkeitsanalyse – Beschreibung der Szenarien	75
8.1	Interne Verwertung	55	10.1.2	Sensitivitätsanalyse	77
8.1.1	Gehölzschnitt	55	10.2	Biogasanlagen (Grasschnitt)	80
8.1.2	Grasschnitt	56	10.2.1	Wirtschaftlichkeitsanalyse	81
8.1.3	Bankettschälgut	56	10.2.2	Sensitivitätsanalyse	82
8.2	Externe Verwertung	56	<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen</b>	82
8.2.1	Absatzmöglichkeiten in Biogasanlagen	56	<b>12</b>	<b>Leitfaden</b>	85
8.2.2	Absatzmöglichkeiten in Biomasseheiz(kraft)werken	57	12.1	Glossar	85
8.3	Verwertungsansätze für Modellmeistereien	58	12.2	Vorgehensweise	86
8.3.1	Straßenmeisterei Wurzen (Sachsen)	58	12.3	Planung Holzheizungsanlage	88
8.3.2	Straßenmeisterei Elmshorn (Schleswig-Holstein)	58	12.3.1	Erneuerungsbedarf	88
8.3.3	Autobahnmeisterei Duisburg (Nordrhein-Westfalen)	59	12.3.2	Brennstoffbedarf	88
8.3.4	Erfahrungen des Straßendienstes Niederösterreich	59	12.3.3	Flächen- und Lagerkapazitäten	90
<b>9</b>	<b>Typische Kostenstrukturen und Randbedingungen</b>	61	12.4	Brennstoffpotenziale	91
9.1	Kostenmodell	61	12.4.1	Bestimmung der Gehölzschnittmengen-Potenziale	91
9.2	Allgemeine Annahmen	61	12.4.2	Zuschlagsfaktor der Potenziale	92
9.3	Kostenstruktur Holzfeuerung	62	12.5	Kostenbetrachtung	93
9.3.1	Kapitalgebundene Kosten	62	12.5.1	Kapitalgebundene Kosten	93
9.3.2	Verbrauchsgebundene Kosten	64	12.5.2	Verbrauchsgebundene Kosten	94
9.3.3	Betriebsgebundene Kosten	64	12.5.3	Betriebsgebundene Kosten	96
9.3.4	Sonstige Kosten	65	12.5.4	Sonstige Kosten	96
9.4	Kostenstruktur Biogasanlage	66	12.5.5	Entsorgungskosten	97
9.4.1	Kapitalgebundene Kosten	66	12.5.6	Berechnungsformel aller Kosten	97
9.4.2	Verbrauchsgebundene Kosten	67	12.6	Wirtschaftlichkeitsprognose	98
9.4.3	Betriebsgebundene Kosten	67	12.6.1	Wärmeentstehungskosten	99
9.4.4	Sonstige Kosten	67	12.7	Vergleich mit fossilen Energieträgern	99
9.4.5	Biogaserträge- und -erlöse	68	12.8	Technische und rechtliche Randbedingungen	100
9.5	Biomassegewinnungs- und Bereitstellungskosten	68	12.9	Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung	101
9.5.1	Grasschnitt	68	12.10	Erfahrungen des Straßendienstes Niederösterreich	102
9.5.2	Gehölzschnitt	69	<b>Literatur</b>		104
9.5.3	Entsorgungskosten von Grünabfällen	72			

## Abkürzungsverzeichnis

ABD	Autobahndirektion	KW	Kohlenwasserstoffe
AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung	LAGA	Landesarbeitsgemeinschaft Abfall
AfA	Absetzung für Abnutzung	MK	Maßnahmenkatalog
AM	Autobahnmeisterei	NaWaRo	Nachwachsender Rohstoff
Akh	Arbeitskraftstunden	NÖEB	Niederösterreichische Landesregierung
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	oTS	Organische Trockensubstanz
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen	PAK	Kohlenwasserstoffe
BE	Brennstoffeinheit	PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
BioAbfV	Bioabfallverordnung	PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
BiomasseV	Biomasseverordnung	SBA	Straßenbauamt
BHD	Brusthöhendurchmesser	SBG	Straßenbegleitgrün
BHKW	Blockheizkraftwerk	SBH	Straßenbegleitholz
BMF	Bundesministerium für Finanzen	SM	Straßenmeisterei
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	Srm	Schüttraummeter
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit	TOC	Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff
BSG	Bankettschälgut	TS	Trockensubstanz
BSK/BLK	Bundes-, Landes-/Staats- und Kreisstraßen		
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsförderung		
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz		
EKE	Entsorgungskosten-Einsparung		
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen		
FM	Frischmasse		
FNR	Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe		
FS	Feuchtsubstanz		
HHS	Holzhackschnitzel		
Hu <sub>wf</sub>	unterer Heizwert wasserfrei		
IE	Institut für Energetik und Umwelt gGmbH		
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz		



## Begriffsdefinitionen

**AUFWUCHSMENGE:** Bezeichnet die durchschnittliche jährliche hinzukommende (zuwachsende) Gewichtseinheit pro Fläche an pflanzlichen Materialien

**BANKETTSCHÄLGUT:** „Bankette sind unbefestigte begrünte Seitenstreifen an Straßen, die sich – etwa 3 cm tiefer – an den Rand der befestigten Fläche“ anschließen. Dem Hochwachsen der Seitenstreifen ist durch geeignete Maßnahmen entgegenzuwirken [FGSV, 1987]

Die Bankette erhöhen sich durch Schwemmmaterial (Erdmaterial, Streugut, Reifenabrieb, Pflanzenwuchs, Staub), das sich am Rand der Straße ablagert und den Ablauf des Niederschlagwassers verhindert. Dieses muss in regelmäßigen Abständen bis zu einer Tiefe von ca. 5-10 cm [GALLENKEMPER et al., 1992] abgefräst (geschält) werden

**BRUSTHÖHENDURCHMESSER:** Bezeichnet den Stammdurchmesser auf ca. 1,3 m Höhe über dem Boden

**DERBHOLZ:** Bezeichnet die oberirdischen Baumteile ab einem Mindest-Durchmesser von 7 cm

**ELUAT:** Bezeichnet das Ab- oder Herauslösen von Stoffen durch Lösemittel. Das gelöste Produkt nennt man Eluat

**FEUCHTSUBSTANZ:** siehe FRISCHMASSE

**FRISCHMASSE:** Biomasse nach der Ernte, ohne dass diese getrocknet oder umgewandelt wurde. Abgekürzt mit FM

**GEHÖLZSCHNITT:** Beinhaltet sämtliches Material von Strauch- und Baumbeständen, das durch Pflegemaßnahmen an Straßen anfällt. Dies beinhaltet bodendeckende Strauchflächen, Gehölzflächen, Feldhecken, geschlossene Gehölzflächen, Straßenbäume und bepflanzte Sonderstandorte

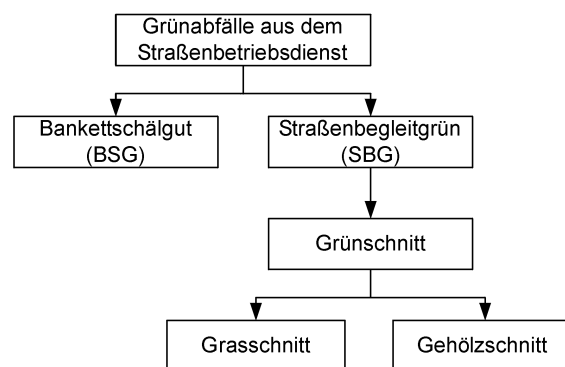
**GRASSCHNITT:** Bezeichnet Material, das durch die Pflege von Rasenflächen (Mahd), wie Landschaftsrasen, Mähwiesen, Magerrasen, Heiden, etc., an Straßen anfällt

**GRASSILAGE:** Als Grassilage wird GRASSCHNITT bezeichnet, der durch Milchsäurevergärung konserviert wird

**GRÜNABFÄLLE:** Als Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst werden in dieser Studie BANKETTSCHÄLGUT und STRAßENBEGLEITGRÜN verstanden

Hierbei wird Bankettschälgut ausnahmsweise als Grünabfall betrachtete, da es zusammen mit Gras- und Gehölzschnitt im Hinblick auf die energetische Verwertung untersucht wurde. Ansonsten ist Bankettschälgut aufgrund seiner hohen mineralischen Bestandteile nicht zu den Grünabfällen zu zählen

**STRAßENBEGLEITGRÜN** umfasst GRASSCHNITT und GEHÖLZSCHNITT. In der nachfolgenden Abbildung werden die Zusammenhänge bzw. die jeweilige Zugehörigkeit der verschiedenen Materialien anschaulich dargestellt:



**GRÜNSCHNITT:** gleichbedeutend mit STRAßENBEGLEITGRÜN; der Begriff wird nachfolgend nicht verwendet

**HALMGUTARTIGE BIOMASSE:** kommt von Pflanzen, die keinen holzartigen Stamm aufweisen und nach der Wachstumsperiode absterben [CEN, 2005]; hier gleichbedeutend mit GRASSCHNITT

**HEIZWERT:** Bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmenge ist der Heizwert die bei der Verbrennung nutzbare Wärmemenge. Angegeben wird dieser mit KJ/kg oder üblicherweise in der Haustechnik mit kWh/BE (BE = Brennstoffeinheit, wie kg, l oder m<sup>3</sup>)

Die in dieser Arbeit übliche Bezeichnung des Heizwertes bezieht sich auf Hu(wf) (Heizwert eines wasserfreien Brennstoffs)

**HOLZARTIGE BIOMASSE:** stammt von Bäumen, Büschen und Gesträuch [CEN, 2005]; hier gleichbedeutend mit GEHÖLZSCHNITT

**KERNHOLZ:** Bezeichnet den nicht mehr wasserführenden Teil eines Baumes. Gegenüber dem SPLINTHOLZ ist es meist trockener und schwerer

**oTS:** Der organische Trockensubstanzanteil ist der um den Wasseranteil und die anorganischen Substanzen reduzierte Anteil eines Stoffgemisches. Die Bestimmung erfolgt durch standardisierte Verfahren in der Regel bei 105 °C und einem nachfolgenden Glühen bei 550 °C

**PFLEGEMASSE:** Bezieht sich in dieser Arbeit auf die im Straßenbetriebsdienst zu pflegenden Grünabfälle, wie Gras- und Gehölzschnitt

**SCHLAGABRAUM:** Bezeichnet primär das Kronenderbholz

**SCHÜTTRAUMMETER:** Ein Schüttraummeter, kurz Srm, entspricht einem Kubikmeter Schüttgut (z. B. Hackgut oder Sägespäne). Ein Srm Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst entspricht etwa 0,25 t FM

**SCHWACHHOLZ:** Bezeichnet die bei Durchforschungsmaßnahmen entnommenen konkurrierenden, kranken oder minderwertigen Bäume. Meistens mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von etwa 7 bis 20 cm

**SPLINTHOLZ:** Bezeichnet die Zone zwischen Kern und Rinde. Dient der Wasserleitung am stehenden Baum

**STRABENBEGLEITGRÜN:** siehe GRÜNABFÄLLE

**STRABENBEGLEITHOLZ:** gleichbedeutend mit GEHÖLZSCHNITT; dieser Begriff wird nachfolgend nicht verwendet

**TROCKENMASSE:** Der bei der Trocknung eintretende Massenverlust wird als Trockenverlust bezeichnet. Neben einem Großteil des enthaltenen Wassers verdampfen auch andere flüchtige Bestandteile. Die Trockenmasse wird über standardisierte Verfahren ermittelt (i. d. R. bei 105 °C). Bezogen auf Biomasse, wie Holz, wird darunter das Gewicht des Materials mit einem Wassergehalt von 0 % verstanden. Abgekürzt mit TM

**TROCKENSUBSTANZ:** siehe TROCKENMASSE

**TOC:** Mit TOC (total organic carbon) wird der gesamte organisch gebundene Kohlenstoff; als Summenparameter, bezeichnet



## 1 Einleitung

Die Erhöhung des Anteils regenerativer Energien im Energiesystem ist zentraler Bestandteil der Energieprogramme auf nationaler und europäischer Ebene. Dabei hat die Biomasse in allen Programmen einen hohen Stellenwert. Auf den deutschen Energiemärkten hat die Bundesregierung u. a. durch die Mineralölsteuerbefreiung von Biokraftstoffen und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) klare Schwerpunkte gesetzt, durch welche die Energiegewinnung aus Biomasse merklich und wirkungsvoll unterstützt wird. Die durch diese Maßnahmen gesetzten Impulse sind aber nur dann dauerhaft erfolgreich, wenn sie für die Verwertung der verschiedenen Biomassen ökologisch sinnvoll und ökonomisch darstellbar sind. Hier muss eine differenzierte Betrachtung der verschiedenen Biomassestoffströme unter Berücksichtigung der jeweiligen Rahmenbedingungen der Energienachfrage erfolgen.

Vor diesem Hintergrund hat die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) das Institut für Energetik und Umwelt (IE) beauftragt, Möglichkeiten einer ökonomisch tragfähigen energetischen Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst aufzuzeigen, zu diskutieren und Empfehlungen abzuleiten. Für die Autobahn- und Straßenmeistereien können dadurch sowohl die im Sinne der Vorbildfunktion der öffentlichen Hand geforderten Umwelt- und Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt als auch Kostenentlastungen durch reduzierte Entsorgungsgebühren und/oder Energiekosten erwartet werden.

Für Gras- und Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst können sich hier günstige Effekte ergeben, wenn es gelingt, die Lücke zwischen den anfallenden Stoffströmen und den kostengünstig verfügbaren Nutzungstechnologien durch geeignete Verfahrens- bzw. Logistikkonzepte zu schließen und mit den Betriebsabläufen in den Meistereien abzustimmen. Dabei ergeben sich nicht nur aus der Schad- und Störstoffproblematik, sondern auch aus dem ökologisch, sicherheits- und verkehrstechnisch bedingten Jahresgang des Materialanfalls Anforderungen, die nur begrenzt beeinflusst bzw. verändert werden können und deren Überwindung gegebenenfalls die Anwendung veränderter Betriebsabläufe und Konzepte erfordert.

Dazu werden unter Berücksichtigung der stoffspezifischen, technischen, organisatori-

schen, rechtlichen, ökologischen und förderpolitischen Randbedingungen geeignete Verwertungswege dargestellt. Diese werden dann hinsichtlich ihrer Kostenstrukturen grundlegend analysiert und bewertet. Zusätzlich soll modellhaft für zwei Straßenmeistereien und eine Autobahnmeisterei, die günstige Ausgangsbedingungen für eine energetische Nutzung des Straßenbegleitgrüns aufweisen, untersucht werden, wie und unter welchen Randbedingungen mögliche Konzepte einer energetischen Nutzung der anfallenden Grünabfälle (Einzellösungen, Verbundlösung, Kooperation mit Dritten etc.) wirtschaftlich tragfähig umgesetzt werden können.

Damit bekommen die betroffenen Einrichtungen eine Unterstützung zur zeitnahen Umsetzung von derartigen Konzepten einer energetischen Nutzung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst.

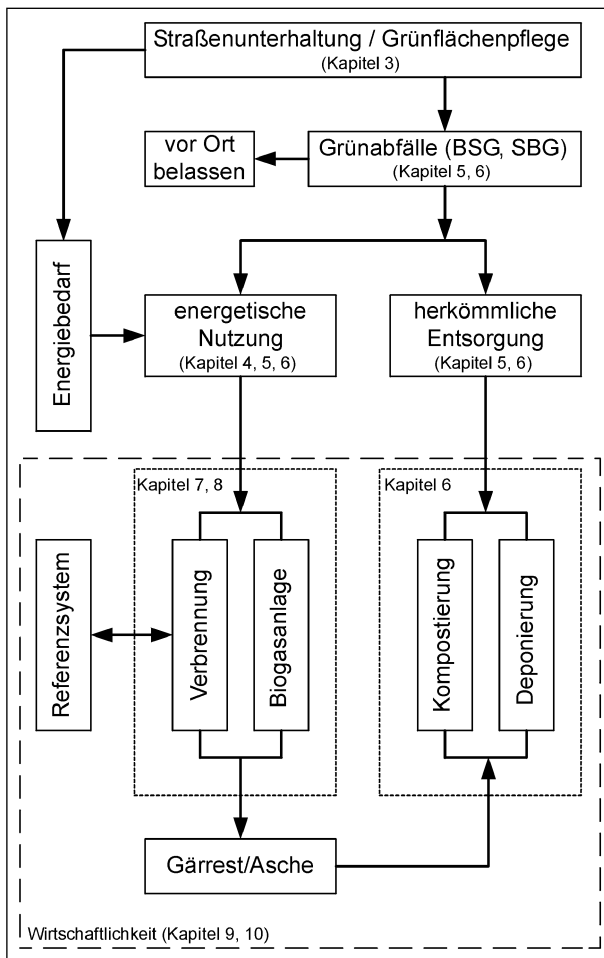
## 2 Methodik

Um Möglichkeiten einer energetischen Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst, d. h. Gras-, Gehölzschnitt und Bankettschälgut (BSG), darzustellen und zu bewerten, werden die wesentlichen Aspekte einer solchen Nutzung auf unterschiedlichen Ebenen analysiert und den herkömmlichen Nutzungspfaden gegenübergestellt (siehe Bild 1).

Einführend werden die Rahmenbedingungen des Straßenbetriebsdienstes in Deutschland sowie gesetzliche und administrative Rahmenbedingungen für Grünabfälle aus der Straßenpflege beschrieben. Das Augenmerk richtet sich hierbei auf die Struktur des Straßenwesens und -betriebsdienstes, einen Überblick über das grundsätzliche Vorgehen bei der Grünpflege (Kapitel 3) sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Förderprogramme für die energetische Verwertung (Kapitel 4).

Zur Beschreibung der Möglichkeiten der energetischen Nutzung erfolgt zunächst eine Analyse der Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften (Kapitel 5). Hierzu werden die aus dem Straßenbetriebsdienst erwarteten wie auch von der energetischen Nutzung geforderten Brennstoffqualitäten beschrieben. Diese basieren auf Literaturangaben und ergänzenden stichprobenartigen Laboruntersuchungen für Bankettschälgut.

Hinsichtlich der anfallenden Stoffströme und Entsorgungswege von Straßenbegleitgrün wurden



**Bild 1:** Bereitstellungskette von Grünabfällen

u. a. durch eine Umfrage das Mengenpotenzial der Grünabfälle für eine energetische Verwertung sowie die heutigen Entsorgungspfade und -kosten abgebildet (Kapitel 6). Die dabei gewonnenen Daten wurden mit MS Access verarbeitet. Weiterhin wurden Angaben zu den bestehenden Heizungsanlagen und dem Wärmebedarf generiert.

Die Beschreibung der Systemtechnik beinhaltet eine Übersicht über die Möglichkeiten einer energetischen Biomassenutzung sowie eine Darstellung der technischen Optionen unter Berücksichtigung der erwarteten Stoffströme (Kapitel 7).

Daraus abgeleitet werden konkrete Verwertungskonzepte für Straßen- und Autobahnmeistereien (Kapitel 8). Im Speziellen handelt es sich dabei um Technologien der Verbrennung und Techniken der Biogasnutzung. Zusätzlich werden exemplarisch drei Meistereien vertiefend betrachtet. Für eine energetische Nutzung von Bankettschälgut ist die Aufkonzentrierung der organischen Anteile die aus-

schlaggebende Vorbedingung. Daher wird zum Abschluss dieses Kapitels die stoffliche Aufbereitung des Materials diskutiert.

Bei der Analyse der Wirtschaftlichkeit werden die Kosten verschiedener Konzepte einer energetischen Nutzung von Straßenbegleitgrün dargestellt (Kapitel 9). Diesbezüglich werden Biomassegewinnungs- und Bereitstellungskosten sowie Entsorgungskosten für Gehölz- und Grasschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst entwickelt und diskutiert. Weiterhin werden die einzelnen Kostengrößen einer Nutzung in Holzfeuerungsanlagen und in Biogasanlagen beschrieben.

Zur Gegenüberstellung der Kosten werden verschiedene Szenarien entwickelt, die unterschiedliche Randbedingungen, wie die Höhe der Bereitstellungskosten für Gras- und Gehölzschnitt, Heizölpreise etc., berücksichtigen (Kapitel 10). Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erfolgten mit einem unter MS Excel entwickelten Algorithmus.

Zusätzlich wird die externe Bereitstellung des Materials für Biomasseheiz(kraft)werke oder Biogasanlagen betrachtet und anhand von Umfragen die Bereitschaft der Anlagenbetreiber für den Einsatz dieser Materialien, etwaiger Vorgaben an das Material und zu erwartender Preise/Entsorgungskosten abgeschätzt.

Abschließend werden aus den Untersuchungen Handlungsempfehlungen für eine energetische Verwertung von Straßenbegleitgrün in Meistereien abgeleitet (Kapitel 11). Für diese wird eine zusätzliche Handreichung für die einzelnen Straßenmeistereien vorgeschlagen, die eine zeitnahe und einfache Prüfung der grundsätzlichen Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Gehölzschnitt zur betriebseigenen Wärmeversorgung in den jeweiligen Einrichtungen ermöglichen soll.

### 3 Allgemeine Rahmenbedingungen des Straßenbetriebsdienstes

Der Straßenbetriebsdienst hat die betriebliche Erhaltung mittels Kontrollen, Wartungsarbeiten, des Winterdienstes und der Grünpflege sowie die bauliche Erhaltung mittels Instandhaltungs- und Instandsetzungsarbeiten zur Aufgabe [ELSNER, 2005].

### 3.1 Struktur des Straßenwesens

Das Gesamtstraßennetz in Deutschland ist mit ungefähr 627.000 km Streckenlänge eines der längsten Europas und lässt sich in fünf verschiedene Straßentypen unterscheiden: Bundesautobahnen (BAB) mit 12.000 km, Bundesstraßen (BS) mit 41.300 km, Landesstraßen mit 86.800 km, Kreisstraßen mit 91.400 km und Gemeindestraßen mit etwa 395.400 km Streckenlänge<sup>1</sup> [ELSNER, 2005].

Mit Ausnahme der Gemeindestraßen werden diese Straßentypen unter dem Begriff der überörtlichen Straßen zusammengefasst und bundesweit von 586 Straßenmeistereien (SM) und 182 Autobahnmeistereien (AM) betreut. Die Auftragsverwaltung erfolgt durch die Länder. Die durchschnittliche zu bewirtschaftende Streckenlänge für Straßenmeistereien beträgt 275 km und für Autobahnmeistereien 65 km [ELSNER, 2005].

Die Aufgaben des Straßenbetriebsdienstes lassen sich in zwei verschiedene Bereiche unterteilen: die bauliche Erhaltung und die betriebliche Erhaltung. Zum Aufgabenbereich der baulichen Erhaltung gehören Instandsetzungs- und Instandhaltungsarbeiten, während das Betätigungsfeld der betrieblichen Erhaltung Kontrollen, Wartungsarbeiten und den Winterdienst umfasst. In diesen Bereich fallen auch die Arbeiten der Grünpflege, welche im weiteren Kontext betrachtet werden.

### 3.2 Grünabfälle des Straßenbetriebsdienstes

Im Rahmen der Straßen- und Betriebsunterhaltung ist die Pflege der zur Straße gehörenden Rasenflächen, Gehölzpflanzungen und Bankette notwendig. Die durchzuführende Grünflächenpflege an Straßen und Autobahnen unterliegt speziellen Erfordernissen, die im Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen – veröffentlicht durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) [FGSV, 1988] – sowie im Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf

Bundesfernstraßen [VDStra, 2004] beschrieben werden.

Die Grünpflege des Straßenraums dient neben dem Schutz gegen Wind- und Wassererosion auch landschaftsgestalterischen Zielen, hat umweltdienende Funktionen, hilft den Verkehrsteilnehmern bei der optischen Orientierung am Straßenverlauf und verhindert Blendung und Schneeverwehungen [ELSNER, 2005].

Grundsätzlich unterschieden wird zwischen Straßenbegleitgrün, das bei der Grünpflege anfällt, und Bankettschälgut, das bei der Bankettpflege anfällt. In Tabelle 1 sind die Anforderungen an die Grünpflege aufgezeigt. Hierbei fallen Gras- und Gehölzschnitt an, sodass nachfolgend drei verschiedene Fraktionen an Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst unterschieden werden.

#### 3.2.1 Grasschnitt

Wesentliche Aspekte der Pflege sind die Lage der Rasenfläche im Verkehrsraum, die Erfordernisse der Verkehrssicherheit sowie die Aufgaben der Rasenflächen [FGSV, 1988]. So sind diese, z. B. aus Gründen des besseren Wasserabflusses oder auf Erholungsflächen von Rast- und Parkplätzen, niedrig und dicht zu halten. Daraus resultierend erfolgt eine Einteilung in Intensivflächen und Extensivflächen. Die intensiv zu pflegenden Flächen werden mehrmals jährlich gemäht und verschnitten und beinhalten folgende Bereiche [DINTER und MORITZ, 1987]:

- unbefestigte Seitenstreifen,
- Mittel- und Trennstreifen,
- Sichtflächen (insbesondere in Knoten und bei engen Kurvenradien),
- Mulden und Gräben zur Entwässerung und
- Rastanlagen.

Der Intensivbereich umfasst „Rasenflächen, die aus Gründen der Verkehrssicherheit, des Wasserabflusses oder des Erholungsbedarfes der Verkehrsteilnehmer niedrig und dicht zu halten sind. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um Landschaftsrasen auf unbefestigten Seitenstreifen (Bankett), Trennstreifen und Rastanlagen“ [GALLENKEMPER et al., 1992].

In der Regel werden diese Bereiche zwei- bis dreimal pro Jahr gemäht. Dabei sollte das Mähgut im

<sup>1</sup> Alle Bundesfernstraßen (Bundesstraßen und -autobahnen) werden durch die Länder im Auftrag des Bundes verwaltet. Ebenfalls im Verwaltungsbereich der Länder liegen die Landesstraßen. Kreisstraßen stehen in der Baulast der Kreise, die deren Unterhaltung teilweise den Landesstraßenbauverwaltungen übertragen haben. Die Verwaltung der Gemeindestraßen unterliegt den Gemeinden beziehungsweise in größeren Städten den Tiefbauämtern [ELSNER, 2005].

Intensivpflegebereich möglichst entfernt werden, um damit einer Nährstoffanreicherung und Erstickung der Untergräser vorzubeugen sowie ein Verstopfen der Entwässerungseinrichtungen durch Schnittgut und ein Verwehen auf die Fahrbahn zu verhindern.

Arbeitsintensiv ist das Aufsammeln von Grasnchnitt, zumal die Straßenbegleitflächen, anders als landwirtschaftliche Anbauflächen, „meist auch nur relativ schmal sind und Pfosten, Schilder und Hindernisse sowie räumliche Enge den Einsatz von Maschinen zum Teil erheblich erschweren“ [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001].

Zum Extensivbereich werden alle anderen Flächen gezählt. „Diese Rasenflächen sind nur in dem Maße zu mähen, wie es aus Gründen der Landschaftspflege, der Ingenieurbiologie oder des Nachbarschaftsrechtes erforderlich ist. Dabei schwanken die Mähintervalle zwischen 1-2 mal pro Jahr bei Mähwiesen und fünf bis fünfzehn Jahren bei Heideflächen“ [GALLENKEMPER et al., 1992].

Mit dem Begriff der Extensivflächen sind Gebiete gemeint, deren Pflege nur aus oben genannten Gründen erforderlich ist. Extensive Flächen umfassen [FGSV, 1988]:

Pflegeobjekte	Anforderungen	Erläuterungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rasenflächen auf</li> <li>- Mittelstreifen</li> <li>- Trennstreifen</li> <li>- Seitenstreifen</li> <li>- Sichtflächen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Freihalten der Sichtflächen</li> <li>- Erkennen von Verkehrszeichen und -einrichtungen</li> <li>- Beseitigen von Rasenschäden</li> <li>- Erhalten erosionsfester Rasendecken</li> <li>- Förderung von Artenvielfalt</li> <li>- Vermeiden von Krautbewuchs und Verbuschung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mäharbeiten zur Freihaltung von Sichtflächen und Leiteinrichtungen</li> <li>- Differenzierte Pflege der Rasenflächen durch Mähen</li> </ul>
Rasenplätze der Park- und Rastplätze	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhalten des Erholungswertes für Verkehrsteilnehmer</li> <li>- Fördern und Erhalten einer artenreichen Flora und Fauna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Differenzierte Pflege der Rasenfläche durch Mähen</li> </ul>
Übrige Rasenflächen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhalten und Standsicherheit der Böschungen</li> <li>- Fördern und Erhalten einer artenreichen Flora und Fauna</li> </ul>	
Entwässerungsgräben und -mulden, Regenrückhaltebecken und Ölabscheider in Erdbauweise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhalten funktionstüchtiger Entwässerungsanlagen</li> <li>- Erhalten des Grabenrandes und Ufers als Saumbiotop und Filter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mäharbeiten zur Funktionserhaltung der Anlagen und differenzierte Pflege der Flächen</li> </ul>
Gehölzflächen und Einzelbäume	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Freihalten des Lichtraumes und der Sichtflächen</li> <li>- Erhalten der Standsicherheit des Erdkörpers</li> <li>- Erhalten der Funktion als Blend-, Lärm-, Schnee- und Immissionsschutz</li> <li>- Erhalten von Ausblicken</li> <li>- Verkehrsführung und Verkehrsraumgestaltung</li> <li>- Langfristiges Sichern und Weiterentwickeln des Gehölzbestandes</li> <li>- Erhaltung von Planungszielen der Landschaftspflege</li> <li>- Artenschutz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gehölzpflege ist auch unter ökologischen Gesichtspunkten notwendig</li> <li>- Die unterschiedlichen Aufgaben der Gehölzflächen sind durch geeignete Maßnahmen der Unterhaltungspflege zu fördern und zu erhalten</li> <li>- Einzelbäume sind darüber hinaus regelmäßig auf ihre Standfestigkeit und sonstige Auffälligkeiten zu kontrollieren</li> </ul>
Biotope	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhalten gemäß landschaftspflegerischen Begleitplänen</li> </ul>	
Bepflanzte Sonderstandorte wie <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lärmschutzwälle</li> <li>- Hangsicherungen</li> <li>- Stützwände</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erhalten der Anlagen unter Berücksichtigung der besonderen Zielsetzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Art und Umfang der Pflege sind auf den Einzelfall abzustimmen</li> </ul>

**Tab. 1:** Anforderungsniveau der Grünpflege von Gras- und Gehölzschnitt [ELSNER, 2005]

- Seitenstreifen,
- Böschungen und
- Anschlussstellen.

Die durchschnittlichen Pflegeflächen für Grasflächen betragen bei SM 169 ha, bei AM 113 ha und bei SM/AM 166 ha. Bezogen auf die durchschnittlichen beschriebenen Streckenlängen bedeutet dies 0,62 ha/km für SM, 1,79 ha/km für AM und 0,75 ha/km für kombinierte Meistereien. Dabei ist zu berücksichtigen, dass darin anteilig extensive Pflegeflächen, die nur eingeschränkt gepflegt werden, enthalten sind [TUD, 2003].

### 3.2.2 Gehölzschnitt

Gehölzflächen umfassen sämtliches Busch- und Baumwerk, welches durch forstwirtschaftliche Maßnahmen zu unterhalten ist. Zur Erhaltung der speziellen Funktion der Gehölzflächen sind diese nach Lage und Aufgaben in unterschiedlicher Intensität zu pflegen. Regelmäßige Pflegemaßnahmen von Gehölzflächen sind zur Freihaltung der Sichtflächen und des Lichtraumprofils in den Bereichen des Straßenrandes (Fahrbahnrand, Trennstreifen, Sichtflächen und Mittelstreifen) erforderlich. Die Beschneidung der Bäume und Sträucher erfolgt durch die zuständigen Autobahnmeistereien, Straßenmeistereien oder über eigens beauftragte Fremdunternehmer und dient der Sicherung des öffentlichen Verkehrswesens, der Bestandssicherung der Vegetation, der Landespflege und der Erhaltung des Nachbarschaftsrechts [ELSNER, 2005].

In Tabelle 2 sind durchschnittliche Häufigkeiten für verschiedene Pflegemaßnahmen dargestellt. Gegenüber Rasenflächen erfolgt die regelmäßige Pflege von Gehölzflächen in längeren Zeitabständen.

Pflegemaßnahmen	AM	SM
	Ø Pflege/a	Ø Pflege/a
Rückschnitt Sichtflächen und Lichtraumprofil	0,2-0,7	0,2-1,0
Verjüngung Mittel- und Trennstreifen	0,2-0,3	0,2-0,6
Verjüngung bzw. Läuterung <sup>2</sup> Gehölzbestand	0,1-0,2	0,1-0,2
Rückschnitt außerhalb Straßenrand	0,01	0,01

**Tab. 2:** Durchschnittliche Pflegehäufigkeiten pro Jahr [STRAßEN NRW, 2005b]

Die Qualität des Gehölzschnittes wird maßgeblich von der Technik bzw. dem Verfahren bestimmt, mit denen die Bäume und Sträucher beschnitten werden. Die Menge des durchschnittlich anfallenden Gehölzschnittes ist im Wesentlichen von der Bepflanzungsdichte und der Grünstreifenbreite bzw. dem Straßentyp abhängig.

Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst ist z. B. durch einen geringen Kernholzanteil (innerer Holzteil im stehenden Stamm) oder Splintholzanteil (zwischen Kern und Rinde befindliches Holz) gekennzeichnet, stattdessen gibt es viele dürre Äste (Schlagabraum), wodurch im Vergleich zu Waldgebieten eine geringere Holzmenge pro Fläche erwirtschaftet werden kann.

### 3.2.3 Bankettschälgut

Neben Straßenbegleitgrün fällt im Straßenbetriebsdienst Bankettschälgut an. Die Pflege der Bankette erfolgt mit dem Ziel, dem Hochwachsen der Seitenstreifen entgegenzuwirken, und ist wie folgt definiert: „Unbefestigte begrünte Seitenstreifen sind etwa 3 cm tiefer an den Rand der befestigten Fläche anzuschließen“ [FGSV, 1987].

Die Bankette erhöhen sich durch Schwemmmaterial (Erdmaterial, Streugut, Reifenabrieb, Pflanzenwuchs, Staub), das sich am Rand der Straße ablagert und den Ablauf des Niederschlagwassers verhindert. Dieses muss in regelmäßigen Abständen bis zu einer Tiefe von ca. 5-10 cm [GALLENKEMPER, 1992] abgefräst (geschält) werden.

## 3.3 Entsorgungswege für Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst

Aus ökonomischen Gründen wird der Grasschnitt gemulcht bzw. geschlegelt und verbleibt mehrheitlich auf den Pflegeflächen. Die aufgenommenen und abtransportierten Mengen werden bisher hauptsächlich durch eine Kompostierung entsorgt.

Die Entsorgung der Pflegemassen, die aus den Gehölzflächen entnommen werden, erfolgt in wenigen Fällen in nahe liegenden Waldgebieten. Hauptsächlich wird der Gehölzschnitt direkt vor Ort durch spezielle Hackwerkzeuge (z. B. Buschholz-

<sup>2</sup> Pflegemaßnahme in jüngeren Waldbeständen, hier werden schlechte oder kranke Bäume, die unerwünscht sind, entnommen.



hacker) zu Hackschnitzeln verarbeitet, um sofort wieder in den Straßenrandbereich als „Bodenbedecker“ eingeblasen oder per Lkw abtransportiert zu werden. Transporte sind immer dann notwendig, wenn größere Mengen anfallen und/oder die örtlichen Bedingungen den Verbleib der Biomasse nicht gestatten (z. B. bei Gehölzflächen in Mittel- und Trennstreifen). Zum Teil erfolgt der Abtransport auch in Form von nicht gehacktem Ast- oder Stammholz.

Die Transporte erfolgen zu zentralen Lagerplätzen, sodass der Gehölzschnitt für weitere Prozesse zur Verfügung steht. Diese Prozesse können zum einen die Entsorgung durch Kompostierung sein, wodurch in den meisten Fällen Entsorgungskosten anfallen, zum anderen besteht die (energetisch sinnvollere) Möglichkeit der Aufbereitung (Trocknung) zu Energieholz, welches auf vorhandenen Brennstoffmärkten verkauft oder in eigenen Holzfeuerungsanlagen verfeuert werden kann. Diese energetische Nutzung hat sich z. B. in Österreich etabliert, i. d. R. als Eigennutzung des Brennstoffs in Meistereien (siehe Kapitel 8.3.4).

Aufgrund des Inkrafttretens der TA Siedlungsabfälle [TASi, 1993] am 01.06.2005 liegen bis heute keine ausreichenden Erfahrungen mit üblichen Entsorgungswegen von Bankettschälgut im Straßenbetriebsdienst vor (siehe Kapitel 6.3.3).

## 4 Gesetzliche Rahmenbedingungen der energetischen Nutzung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst

Die rechtlichen Rahmenbedingungen der energetischen Nutzung umfassen Regelungen zur Einordnung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst als Energieträger, Genehmigungsanforderungen für die Verwertungsanlagen sowie Regelungen für die Verwertung der Rückstände aus diesen Anlagen.

### 4.1 Straßenbegleitgrün und Bankettschälgut als Energieträger

Biomasse kann zur Wärme-, Strom- und Kraftstoffherzeugung eingesetzt werden. Die verschiedenen Biobrennstoffe werden typischerweise für unterschiedliche Anwendungen vorgesehen (z. B. feste Bioenergieträger zur Wärmeerzeugung, Biogas zur

Stromerzeugung, flüssige Bioenergieträger als Kraftstoffe).

Die verschiedenen Anwendungsbereiche werden außerdem unterschiedlich gefördert durch

- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) beim Einsatz zur Stromerzeugung,
- Investitionszulagen beim Einsatz zur Wärmeerzeugung,
- Mineralölsteuerbefreiung bei der Nutzung als Kraftstoff.

Da die Nutzung als Kraftstoff für Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst nicht relevant ist, wird auf diese Aspekte hier nicht näher eingegangen. Wegen des besonderen Stellenwertes des novellierten EEG für Biomassen aus der Landschaftspflege wird dieses u. a. nachfolgend ausführlicher dargestellt.

In diesem Sinne erfolgt die Einordnung von Grünabfällen als Energieträger bezüglich technischer und rechtlicher Rahmenbedingungen für die thermische Verwertung (Verbrennung) und die Verwertung in Biogasanlagen. Dies erfolgt anhand folgender Verordnungen:

- Biomasseverordnung (BiomasseV),
- Bioabfallverordnung (BioAbfV),
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG).

#### 4.1.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Das neue Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) vom 21. Juli 2004 ist am 1. August 2004 in Kraft getreten. Zweck des EEG ist es, den Anteil der erneuerbaren Energien an der gesamten Stromversorgung auf mindestens 12,5 % bis zum Jahr 2010 und auf mindestens 20 % bis zum Jahr 2020 zu steigern. Hierzu wurden die Rahmenbedingungen für die Einspeisung, Übertragung und Verteilung von Strom aus erneuerbaren Energien gegenüber dem Vorgängergesetz deutlich verbessert. Durch das Gesetz werden die Stromnetzbetreiber insbesondere verpflichtet, Strom aus erneuerbaren Energien vorrangig abzunehmen und dafür einen festgelegten Preis zu zahlen.

Die EEG-Novelle dient auch der Umsetzung der Richtlinie der Europäischen Union zur Förderung Erneuerbarer Energien im Strombereich vom September 2001 [EU, 2001]. Deshalb werden alle er-

neuerbaren Energien in den Anwendungsbereich des EEG aufgenommen. Das Ausschließlichkeitsprinzip wird jedoch im Rahmen des Vergütungsanspruchs beibehalten, d. h., eine Vergütung nach dem EEG ist auch zukünftig nur möglich, wenn der Strom ausschließlich aus Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien kommt. Dies bedeutet, dass z. B. Strom aus der Mitverbrennung des biologisch abbaubaren Anteils des Abfalls bezüglich des Anspruchs auf Abnahme und Übertragung in den Anwendungsbereich des neuen EEG fällt, für diesen Strom aber auch weiterhin kein Vergütungsanspruch nach dem EEG besteht. Für die Stromerzeugung aus Biomasse regelt die Biomasseverordnung den Anwendungsbereich des EEG, welche Stoffe als Biomasse gelten, welche technischen Verfahren zur Stromerzeugung aus Biomasse in den Anwendungsbereich des Gesetzes fallen und welche Umweltaforderungen bei der Erzeugung von Strom aus Biomasse einzuhalten sind.

Die geregelte Vergütung für Strom aus Biomasse, die auf Grund des EEG die Einspeisung ins Netz gewährt, setzt sich aus einer Mindestvergütung sowie einem möglichen zusätzlichen Brennstoff-, KWK- und Technologie-Bonus zusammen.

Die Mindestvergütungen sind vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme für die Dauer von 20 Kalenderjahren zu zahlen. Der für das Inbetriebnahmejahr der Anlage geltende Mindestvergütungssatz wird über den gesamten Vergütungszeitraum in unveränderter Höhe gewährt. Die Höhe der Vergütung ist von der Anlagenleistung und vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme abhängig. Die Mindestvergütungssätze werden jeweils zum 1. Januar eines Jahres für nach diesem Zeitpunkt neu in Betrieb genommene Anlagen um einen festen Prozentsatz abgesenkt (Vergütungsdegression) und auf zwei Stellen nach dem Komma gerundet. Für Biomasseanlagen beträgt die jährliche Degression 1,5 %. Bezugsgröße ist der im jeweils vorausgegangenen Jahr geltende Mindestvergütungssatz. Die erstmalige Absenkung erfolgte zum 1. Januar 2005. Die nachfolgend beschriebenen zusätzlichen Boni unterliegen keiner Degression.

Ein Nawaro-Bonus wird beim ausschließlichen Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen aus Land- und Forstwirtschaft, Gartenbau, Landschaftspflege und/oder Gülle gewährt. Die Mindestvergütung erhöht sich dadurch um:

- 6 ct/kWh für den Leistungsbereich bis 500 kW,

- 4 ct/kWh für den Leistungsbereich bis 5 MW,
- 4 ct/kWh (Nichtholz) bzw. 2,5 Cent/kWh (Holz) für den Leistungsbereich über 500 kW bis 5 MW.

Biomasse aus der Straßenbegleitpflege ist als nachwachsender Rohstoff (und damit brennstoffbonusberechtigt) im EEG nicht explizit aufgeführt. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geht jedoch davon aus, dass in Analogie zu Biomassen aus der Landschaftspflege auch hier der Nawaro-Bonus gewährt wird. Da das EEG zivilrechtlich gestaltet ist, kann eine abschließende Klärung streng genommen nur auf zivilrechtlichem Wege erfolgen [Mündliche Mitteilung BMU, 2005a].

Der KWK-Bonus (§ 8 Abs. 3 EEG) in Höhe von 2 ct/kWh für Strom aus Biomasse wird gezahlt, soweit es sich um KWK-Strom im Sinne von § 3 Abs. 4 des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes handelt. KWK-Strom ist das rechnerische Produkt aus Nutzwärme, Stromkennzahl der KWK-Anlage und Vergütungssatz. Dabei gilt als Nutzwärme die Wärme, die aus dem KWK-Prozess ausgekoppelt wird und außerhalb der KWK-Anlage zur Verfügung stehen kann. Diese Wärme kann beispielsweise für die Raumheizung, die Warmwasserbereitung oder für die Kälteerzeugung verwendet werden. Die Fermenterbeheizung bei Biogasanlagen ist in diesem Zusammenhang keine Wärmenutzung, da sie als Prozesswärme erforderlich ist.

Der Technologie-Bonus (§ 8 Abs. 4) wird gewährt, soweit es sich um nachfolgende Verfahren handelt. Zudem ist der Technologie-Bonus an den KWK-Bonus gekoppelt, d. h., ohne externe Wärmenutzung wird auch kein Technologie-Bonus gewährt:

- thermochemische Vergasung,
- Trockenfermentation (Feststoffvergärung),
- Biogasaufbereitung,
- Brennstoffzellen,
- Gasturbinen,
- Dampfmotoren,
- Organic-Rankine-Cycle (ORC),
- Mehrstoffgemischanlagen,
- Stirling-Motoren.

Mit dieser zusätzlichen Vergütung soll die Etablierung innovativer Verfahren bei der Biomassenut-

Berechnungsbeispiele:

a) Biogasanlage mit einer äquivalenten Leistung nach § 12 Abs. 2 Satz 2 von 300 kW, in der Kofermente aus der Nahrungsmittelindustrie eingesetzt werden (z. B. Fette, Backreste etc.); Inbetriebnahme im Jahr 2005.

- Mindestvergütung für den Leistungsanteil bis einschließlich 150 kW: 11,33 ct/kWh  
(entsprechend einem Leistungsanteil an der gesamten Leistung der Anlage von 50 %)
- Mindestvergütung für den Leistungsanteil ab 150 kW bis einschließlich 300 kW: 9,75 ct/kWh  
(entsprechend einem Leistungsanteil an der gesamten Leistung der Anlage von 50 %)

Durchschnittliche Mindestvergütung:  $0,5 * 11,33 + 0,5 * 9,75 = 10,54$  ct/kWh

b) Holz-Kraftwerk mit einer äquivalenten Leistung nach § 12 Abs. 2 Satz 2 von 5 MW, in dem Hölzer aus der Straßenbegleitpflege (Brennstoffbonus) eingesetzt werden; ohne KWK, Inbetriebnahme im Jahr 2005.

- Vergütung für den Leistungsanteil bis einschließlich 150 kW: 11,33 + 6 ct/kWh  
(entsprechend einem Leistungsanteil an der gesamten Leistung der Anlage von 3 %)
- Vergütung für den Leistungsanteil ab 150 kW bis einschließlich 500 kW: 9,75 + 6 ct/kWh  
(entsprechend einem Leistungsanteil an der gesamten Leistung der Anlage von 7 %)
- Vergütung für den Leistungsanteil ab 500 kW bis einschließlich 5 MW: 8,77 + 2,5 ct/kWh  
(entsprechend einem Leistungsanteil an der gesamten Leistung der Anlage von 90 %)

Durchschnittliche Vergütung:  $0,03 * 15,33 + 0,07 * 13,75 + 0,9 * 11,27 = 11,77$  ct/kWh\*

(\* Wert gerundet)

Tab. 3: Berechnungsbeispiele für EEG-Vergütungen

Instal- lierte Leistung	Grund- vergü- tung	Brennstoffbonus			KWK- Bonu- s	Techno- logie- Bonu- s
		Bio- gas	Feste Biomasse Holz	Feste Biomasse (Nichtholz)		
≤ 150 kW	11,33	6	6	6	2	2
≤ 500 kW	9,75	6	6	6	2	2
≤ 5 MW	8,77	4	2,5	4	2	2
> 5 MW	8,27	0	0	0	2	0

Tab. 4: Vergütung nach EEG für Strom aus Biomasse

zung unterstützt werden (ein Großteil der Verfahren ist zwar bereits mit anderen Brennstoffstoffen erprobt, jedoch technisch noch nicht hinreichend an den Einsatz von biogenen Brennstoffen angepasst). Zu beachten ist, dass der Technologie-Bonus nur für den Leistungsbereich bis 5 MW gilt. Er wird nur einmal gewährt, auch wenn mehrere in § 8 Abs. 4 genannte Verfahren oder Techniken zum Einsatz kommen.

Die Gewährung der Boni unterliegt mit Ausnahme der Kraft-Wärme-Kopplung den jeweils angegebenen Leistungsgrenzen (§ 8 Abs. 2, 3 und 4). Tabelle 4 zeigt, in Abhängigkeit von der Leistungskategorie, die Vergütung (Grundvergütung + Boni) für im Jahr 2005 in Betrieb genommene Stromerzeugungsanlagen auf Basis von Biomasse auf. Weiterhin sind in Tabelle 3 ausgewählte Berechnungsbeispiele aufgeführt.

#### 4.1.2 Biomasseverordnung

Die „Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse“, kurz BiomasseV [BiomasseV, 2005], definiert, welche Stoffe gemäß den Anwendungsbereichen des EEG als Biomassen gelten. Weiterhin regelt diese Verordnung, „welche technischen Verfahren zur Stromerzeugung aus Biomasse in den Anwendungsbereich des Gesetzes fallen und welche Umweltauflagen bei der Erzeugung von Strom aus Biomasse einzuhalten sind“.

In § 2 Abs. 1 werden anerkannte Biomassen allgemein definiert als: „Biomasse im Sinne dieser Verordnung sind Energieträger aus Phyto- und Zoомasse. Hierzu gehören auch aus Phyto- und Zoомasse resultierende Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle, deren Energiegehalt aus Phyto- und Zoомasse stammt.“

Nach § 2 Abs. 2 und 3 sind Biomassen im Sinne des Abs. 1 insbesondere:

- Pflanzen und Pflanzenbestandteile sowie aus diesen hergestellte Energieträger,
- Abfälle und Nebenprodukte pflanzlicher und tierischer Herkunft aus der Land-, Forst- und Fischwirtschaft,
- Bioabfälle im Sinne der Bioabfallverordnung (u. a. Straßenbegleitgrün),
- aus Biomasse durch Vergasung oder Pyrolyse erzeugte Gase,
- aus Biomasse erzeugte Alkohole,

- Altholz, mit Grenzwerten für Gehalte an PCB/PCT und Quecksilber sowie Einhaltung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes für die energetische Nutzung,
- Pflanzenölmethylester,
- Treibsel aus Gewässerpflege, Uferpflege und -reinhaltung,
- durch anaerobe Gärung erzeugtes Biogas.
- „Stoffe, Produkte und Gemische, deren Energiegehalt zum Teil nicht biogenen Ursprungs ist, sind grundsätzlich nicht als Biomasse anzusehen“ [BEGR, 2001].

In der Begründung des Gesetzgebers zur Biomasseverordnung heißt es, dass Verunreinigungen mit anderen Stoffen nur geduldet werden, wenn diese keine nennenswerten Auswirkungen auf den Heizwert haben. Diesbezüglich handelt es sich, bei Materialien, die dem § 2 Abs. 2 unterfallen, stets um Biomassen, auch wenn unvermeidbare Verunreinigungen enthalten sind. Gültig ist dies nur, wenn die jeweiligen Fremdstoffe in ihrer Art und ihrer Menge nach von der Definition des jeweils anzuwendenden Einzelmerkmals (hier: § 2 Abs. 2 Satz 1 Pflanzen und Pflanzenbestandteile) notwendig umfasst werden.

Bankettschälgut ohne Störstoffe ist (trotz hoher mineralischer Anteile) folglich als Biomasse anzusehen, da es biogenen Ursprungs ist. Ob Bankettschälgut mit Störstoffen ebenfalls als Biomasse anerkannt ist, wird nachfolgend diskutiert, da sich die BiomasseV bei der Einordnung von Bioabfällen (§ 2 Abs. 4) auf die Bioabfallverordnung, kurz BioAbfV [BioAbfV, 2003], bezieht.

Ein Exkurs zur energetischen Altholz- bzw. zur Recyclingholzverwertung in Biomasseanlagen nach BiomasseV zeigt, dass dieses gemäß der Güterrichtlinie RAL-GZ 428/5 des Deutschen Instituts für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. (RAL) [RAL-GZ, 1998; PRETZ et al., 2005] für vorzerkleinerte Recyclingbrennstoffe einen maximalen Störstoffanteil von höchstens 5 Ma.-% erlaubt.

#### 4.1.3 Bioabfallverordnung

Bioabfälle im Sinne von § 2 Abs. 1 („Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft“) der Bioabfallverordnung, kurz BioAbfV [BioAbfV, 2003], sind Biomassen im Sinne der Biomasseverordnung [Biomasse V, 2005]. Dies beinhaltet insbesondere nach Anhang 1 Nr. 1 der BioAbfV biologisch abbaubare

	Schwermetalle [mg/kg TM]						
	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
BioAbfV GW1 <sup>3</sup>	150	1,5	100	100	50	1	400
BioAbfV GW2 <sup>3</sup>	100	1	70	70	35	0,7	300
RAL GZ 251	75	0,75	50	50	25	0,5	200

Tab. 5: Nicht zu überschreitende Schwermetallgehalte nach BioAbfV § 4 Abs. 3 und RAL GZ 251

Abfälle (20 02 01) wie Garten- und Parkabfälle, Landschaftspflegeabfälle, Gehölzrückstände und pflanzliche Bestandteile des Treibels sowie explizit „Grün- und Strauchschnitt von Straßenrändern (Straßenbegleitgrün)“, zu denen auch das Straßenbegleitgrün zu zählen ist. Im Bezug auf eine Bewertung von Bankettschälgut als Bioabfall heißt es weiterhin in § 2 Abs. 1, dass Bodenmaterial ohne wesentliche Anteile an Bioabfällen nicht zu den Bioabfällen gehören. Der Begriff „wesentliche“ ist nicht weiter erklärt.

In der Begründung heißt es hierzu, dass im Bereich der Bioabfälle „gewisse Verunreinigungen nicht zu verhindern“ sind. Beispielweise werden als Verunreinigungen kleinere Papierreste im Küchenabfall genannt. Ausgeschlossen bleibt die Beimengung von Stoffen zur Energiegewinnung [BEGR, 2001].

Ergänzend wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass „Gras- und Strauchschnitt von Straßenrändern (...) nur dann einer Verwertung zugeführt werden darf, wenn durch Untersuchungen festgestellt worden ist, dass die in der Verordnung genannten Schwermetallgehalte nicht überschritten werden“. Für Stoffe, die nicht in Anhang 1 gelistet sind, wie Bankettschälgut, bedarf es der gesonderten Zulassung durch Genehmigungsbehörden.

Die herkömmliche Verwertung des Materials sieht z. T. eine Kompostierung vor. Bewertet wurde die Eignung von Straßenbegleitgrün nach der Güterrichtlinie für Komposte der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V., RAL GZ 251, in der u. a. Grenzwerte für Schwermetallgehalte angegeben sind (siehe Tabelle 5).

#### 4.1.4 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz

Nach dem Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und

<sup>3</sup> GW1: Ausbringungsmenge: 20 t TM/(ha\*3a) bzw. GW2: 30 t TM/(ha\*3a)

Abfallgesetz), kurz KrW-/AbfG, können Abfälle nach § 4 Abs. 1 Satz 2 stofflich oder energetisch verwertet werden. Vorrang hat jeweils die umweltverträglichere Verwertungsart.

Die Vorgabe des Heizwerts bei einer energetischen Verwertung von Abfällen von mindestens 11.000 kJ/kg (§ 6 Abs. 2 Satz 1) findet aufgrund eines Urteils des Europäischen Gerichtshofs (EuGH) keine Anwendung und muss auch von Bankettschälgut und Straßenbegleitgrün nicht eingehalten werden.

#### 4.1.5 Zusammenfassende Einordnung

##### **Straßenbegleitgrün**

Schlussfolgernd ist Straßenbegleitgrün (Gras- und Gehölzschnitt) insbesondere aufgrund der BioAbfV als anerkannte Biomasse nach BiomasseV anzusehen. Somit sind die Rahmenbedingungen für dessen Einsatz in Anlagen nach dem EEG gegeben.

##### **Bankettschälgut**

Zusammenfassend ist Bankettschälgut grundsätzlich gemäß der Biomasseverordnung als Energieträger einzuordnen und demzufolge eine anerkannte Biomasse nach EEG. Trotzdem erscheint es sinnvoll, bezüglich des Anteils von Störstoffen praxisnahe Regelungen und Lösungen zu finden. Nach Rücksprache mit dem BMU wurde bestätigt, dass für die energetische Nutzung von Bankettschälgut zur Stromgewinnung der Nawaro-Bonus gewährt wird (siehe EEG) [mündl. Mitteilung BMU, 2005a].

Abschließend wird angemerkt, dass das EEG zivilrechtlich gestaltet ist und eine abschließende Klärung streng genommen nur auf zivilrechtlichem Wege erfolgen kann [mündl. Mitteilung BMU, 2005a].

## 4.2 Anforderungen an die Verwertungsanlage

Für die energetische Nutzung von Straßenbegleitgrün sind die verschiedenen gesetzlichen Anforderungen an die Verwertungsanlage gegeben. Entsprechend werden die Nutzungsoptionen thermische Verwertung und Verwertung in Biogasanlagen nach folgenden rechtlichen Anforderungen untersucht:

- emissionsrechtliche Anforderungen an die Verbrennungsanlage,

- Hygienevorschriften an die Biogasanlage und
- Anforderungen an die Verwertung/Entsorgung der Rückstände.

### 4.2.1 Emissionsvorschriften

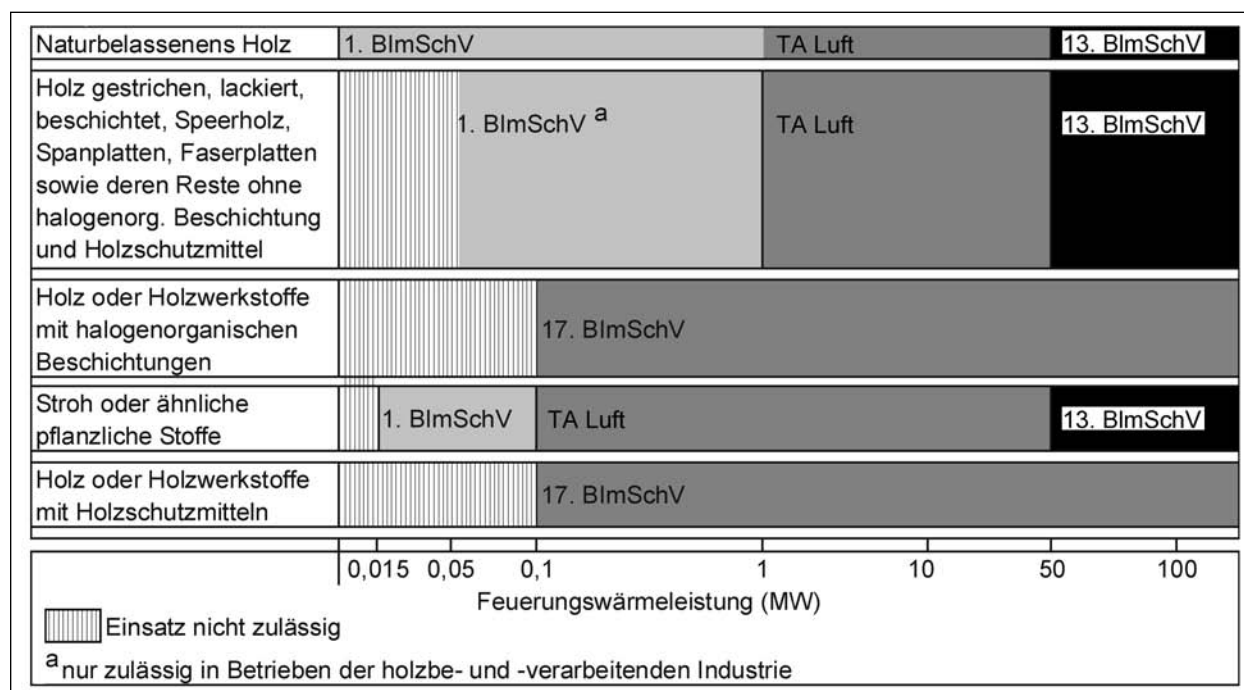
Auch in Hinblick auf die Emissionsvorschriften sind die Leistungsklassen der Anlage und der eingesetzte Brennstoff von Bedeutung. Für naturbelassenes Holz können – je nach Leistungsgröße – die 1. BlmschV, die TA Luft oder die 13. BlmschV zur Anwendung kommen (siehe Bild 2). Letztere gilt nur für sehr große Leistungsbereiche und ist damit für die Verwertung von Biomassen aus dem Straßenbetriebsdienst nicht relevant.

Bei einer Nutzung von Holz in betriebseigenen Anlagen dürfte in erster Linie die 1. BlmschV relevant sein, die vor allem CO- und Staubgrenzwerte beinhaltet (siehe Tabelle 6). Nach dem Stand der Technik werden diese gegenwärtig von über 100.000 Anlagen in Deutschland eingehalten. Die Überarbeitung dieser Verordnung wird gegenwärtig diskutiert. Perspektivisch wird insbesondere eine Verschärfung der Staubgrenzwerte erwartet [GRÜNE, 2004], sodass die gegenwärtig verfügbaren Holzessel gegebenenfalls mit einer zusätzlichen Staubabscheidung versehen werden müssen. Eine abschließende Einschätzung der Inhalte und des Zeitpunktes des Inkrafttretens der Novelle ist gegenwärtig jedoch noch nicht möglich.

Beim Einsatz von halmgutartigen Materialien (d. h. Stroh oder ähnlichen pflanzlichen Stoffen), in die auch Grasschnitt von Straßen einzuordnen ist, sind hingegen bereits ab einem Leistungsbereich von 100 kW die Anforderungen der TA Luft einzuhalten. Diese umfassen zum einen strengere Grenzwerte für Staub und CO sowie zusätzliche Grenzwerte für weitere Komponenten (u. a. HCl), zum anderen aber auch aufwändigere Mess- und Kontrollvorschriften, die bei der Kostenkalkulation zu berücksichtigen sind. Die thermochemische Nutzung von halmgutartigen Brennstoffen ist in Deutschland auch im landwirtschaftlichen Bereich nicht zuletzt aus diesem Grund bisher nicht etabliert [FNR, 2001b].

### 4.2.2 Hygienevorschriften

Grundsätzlich sind Bioabfälle vor einer Ausbringung oder Herstellung von Gemischen einer Behandlung zuzuführen. Für diese Stoffgruppen bestehen gesetzlichen vorgeschriebenen Kriterien die



**Bild 2:** Anwendungsbereich verschiedener Emissionsvorschriften

Nennwärmeleistung in kW	Kohlenmonoxid in g/m <sup>3</sup>	Staubförmige Emissionen in g/m <sup>3</sup>
bis 50	< 4	< 0,15
über 50 bis 150	< 2	< 0,15
über 150 bis 500	< 1	< 0,15
über 500	< 0,5	< 0,15

**Tab. 6:** Begrenzung von Emissionen für feste Brennstoffe nach 1. BImSchV

aus seuchen- und phytohygienischer Sicht eine thermische Behandlung notwendig machen, um die Unbedenklichkeit des Substrates vor der Ausbringung zu gewährleisten [FNR, 2005b]. Für Straßenbegleitgrün und Bankettschälgut ist die Notwendigkeit einer Vorbehandlung nicht gegeben, sodass auf eine weitere Detaillierung an dieser Stelle verzichtet wird.

### 4.3 Verwertung/Entsorgung der Rückstände

Die Gärrestverwertung ist unterschiedlichen Rechtsbereichen unterworfen, die abhängig von den eingesetzten Substraten sind.

Für Bankettschälgut gelten die schadstoffbezogenen Regelungen nach der oben beschriebenen BioAbfV. Nach dieser müssen die auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebrachten Gärreste die

Schwermetallgrenzwerte (siehe Kapitel 4.1.3) und maximal zulässigen Ausbringmassen in Tonnen Trockenmasse je Hektar innerhalb von drei Jahren einhalten.

Ausgehend von der organischen Belastung der Reststoffe nach der Vergärung können grundsätzlich drei verschiedene Strategien verfolgt werden:

1. Die flüssigen Reststoffe können als Düngemittel in der Landwirtschaft Verwendung finden.
2. Der Reststoffstrom wird separiert. Die festen separierten Bestandteile werden, in der Regel nach einer Kompostierung, als Düngemittel verwendet. Die Separationsflüssigkeit wird einer weitergehenden Reinigung und letztendlich einem Vorfluter zugeführt oder kann als Rezirkulat zum Anmischen der Eingangssubstrate eingesetzt werden.
3. Der flüssige Reststoffstrom wird vollständig einer weitergehenden Reinigung und letztendlich einem Vorfluter zugeführt.

Damit ergeben sich im Wesentlichen zwei mögliche Wege des Stoffflusses: die Abwasserableitung und die Verwendung als Düngemittel.

Ist eine energetische Verwertung der Grünabfälle nicht gegeben, fallen diese in den Geltungsbereich der TAsi und der Deponieverordnung [DepV, 2002].

## 4.4 Marktanreiz- und Förderprogramme

Auf Bundes- und Länderebene gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Förderprogramme, um die Nutzung biogener Festbrennstoffe zu unterstützen. Im Folgenden werden relevante Förderprogramme des Bundes und einiger Länder, im Speziellen für die energetische Nutzung von Straßenbegleitgrün in Straßen- oder Autobahnmeistereien, beschrieben.

### 4.4.1 Förderprogramme des Bundes

Die Förderung auf Bundesebene ist geregelt durch die „Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien“ [BMU, 2005]. Diese sieht u. a. Zuschüsse für Holzfeuerungen und Biogasanlagen vor.

Für den Betrieb von Holzfeuerungen in Meistereien kommen ausschließlich automatisch betriebene Anlagen in Frage, da nur diese vom Zeitaufwand bzw. Komfort mit bestehenden Erdgas- und Ölheizungen konkurrieren können.

Eine Übersicht der Zuschüsse je Anlagenleistung zeigt Tabelle 7. Demnach ist die Höhe der finanziellen Förderung für automatisch beschickte Holzfeuerungen abhängig von der Nennwärmeleistung. Die Vergabe der Fördergelder erfolgt durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA 2005). Ein weiteres Kriterium ist die Ausstattung der Anlagen mit einer Leistungs- und Feuerungsregelung und einer automatischen Zündung. Ferner muss es sich bei Anlagen bis 50 kW um eine Zentralheizungsanlage handeln. Die Art der Förderung erfolgt über eine Festbetragsfinanzierung, d. h., dass die Zuschüsse nicht zurückgezahlt werden müssen (so genannte Projektförderung).

Förderberechtigte sind u. a. Privatpersonen, kleine/mittlere Gewerbebetriebe, Kommunen und kommunale Betriebe.

Die Verfügbarkeit der Fördermittel hängt immer von den Haushaltsplänen des Bundes oder der Länder ab. So kommt es vor, dass in laufenden Förderprogrammen Mittel gekürzt werden oder dass durch eine Haushaltssperre keine Bewilligungen mehr genehmigt werden können.

Automatisch beschickte Holzfeuerungen	
Leistung	Förderung
8-100 kW	60,-- €/kW installierte Nennleistung, mind. 88 % Kesselwirkungsgrad, 1.700,-- € bei Anlagen mit mind. 90 % Kesselwirkungsgrad
> 100 kW	Teilschuldenerlass von 60,-- €/kW + Zinsverbilligtes Darlehen + max. 275.000,-- €
Biogasanlage	
< 70 kW <sub>el</sub>	Teilschuldenerlass 15.000,-- €
> 70 kW <sub>el</sub>	Zinsverbilligtes Darlehen

Tab. 7: Übersicht der Förderung des Bundes

### 4.4.2 Förderprogramme der Länder

Auf Länderebene gibt es zahlreiche Förderprogramme, die hier nicht im Einzelnen vorgestellt werden. Stattdessen werden diese für die Bundesländer, in denen sich ein nach Kapitel 8.3 ausgewählter Modellbetrieb befindet, beschrieben. Dies sind die Länder Sachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein.

#### Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen werden Biomasse- und Biogasanlagen durch die „Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Verbesserung der Verarbeitungs- und Vermarktungsbedingungen forstwirtschaftlicher Erzeugnisse und des Einsatzes von Holz bei der energetischen Verwertung (Holzabsatzförderrichtlinie – Hafö 2003 –)“ [HAFÖ, 2003] sowie durch das Förderprogramm „Rationelle Energieverwendung und Nutzung unerschöpflicher Energiequellen (REN)“ bezuschusst.

So werden Holzheizungen bis 25 kW mit 1.500 €, ab 25 bis 100 kW mit 55 €/kW und ab 100 kW mit einem Zuschuss von 25 % für gewerbliche Anlagen und mit 35 % für öffentliche Antragsteller gefördert, wobei der Kesselwirkungsgrad über 80 % liegen muss. Förderfähig sind u. a. öffentliche Dienste.

#### Sachsen

In Sachsen besteht die „Richtlinie des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über die Gewährung von Fördermitteln für Vorhaben des Immissions- und Klimaschutzes einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien“ [SMUL, 2001]. In den Merkblättern Anlage B2 und B5 ist die Errichtung von Anlagen zur energetischen Nutzung von fester Biomasse und Biogas

einschließlich der Anlagen zur Gewinnung von Biogas mit den Voraussetzungen und Randbedingungen für eine Förderung beschrieben. So werden Biomassefeuerungen bis 30 kW mit bis zu 80 €/kW und über 30 kW mit bis zu 40 €/kW gefördert. Für Biogasanlagen wird ein Zuschuss bis zu 30 % der zuwendungsfähigen Ausgaben gewährt.

Förderfähig sind natürliche und juristische Personen des öffentlichen Rechts sowie gemeinnützige, soziale, kirchliche und karitative Einrichtungen.

## Schleswig-Holstein

In der „Richtlinie zur Förderung der energetischen Nutzung von Biomasse im ländlichen Raum durch das Land Schleswig-Holstein“ wird die Errichtung von Anlagen zur energetischen Nutzung von Biomasse- und Biogas-Gemeinschaftsanlagen mit bis zu 40 % der förderfähigen Kosten bezuschusst. Förderfähig sind u. a. Träger öffentlicher Verwaltungen wie Gemeinden, Kreise, Ämter und Zweckverbände.

## 5 Brennstoffzusammensetzung und -eigenschaften

Die wesentlichen hier betrachteten Stoffströme aus dem Straßenbetriebsdienst, nämlich Grasschnitt, Gehölzschnitt und Bankettschälgut, unterscheiden sich z. B. in ihrer Transport- und Lagerfähigkeit wie auch in ihrem Energiegehalt und den möglichen energetischen Verwertungswegen.

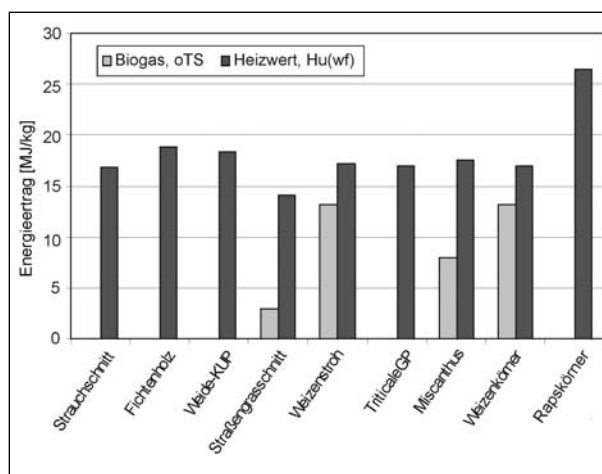
Zur Einordnung des zu erwartenden Qualitätsspektrums erfolgt eine Analyse der anfallenden Stoffströme u. a. hinsichtlich

- der energietechnischen Kenngrößen (Heizwert, Wassergehalt, Biogasertrag etc.),
- der Bandbreite von zu erwartenden Schad- und Störstoffen für unterschiedliche Straßentypen unter verschiedenen Randbedingungen und
- der Anforderungen an die Qualität der Brennstoffe und Substrate.

### 5.1 Energetische Kenngrößen

#### 5.1.1 Grasschnitt

Je nach Klima und Vegetationszeitpunkt liegt der Wassergehalt von Straßen-Grasschnitt zwischen 45 und 70 %.



**Bild 3:** Energieerträge verschiedener Biomassen im Vergleich zu Straßenbegleitgrün [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001; FNR, 2005b]

Der Biogasertrag von Gras- bzw. Rasenschnitt liegt zwischen 150 und 200 m<sup>3</sup>/t FM [FNR, 2005b]. Aufgrund der schlechteren Qualität des Grasschnitts von Straßen im Vergleich zu frischem Grasschnitt – bedingt durch eine extensive Pflege – wird jedoch der untere Gasertrag angenommen, mit einem durchschnittlichen Methangehalt des entstehenden Biogases von 55 %. Daraus ergibt sich über den Heizwert von Methan (9,97 kWh/m<sup>3</sup>) ein Energieertrag von ca. 3 MJ/kg (siehe Bild 3). Weitere charakteristische Größenordnungen wie Asche- und Stoffgehalte werden in Kapitel 5.3 beschrieben.

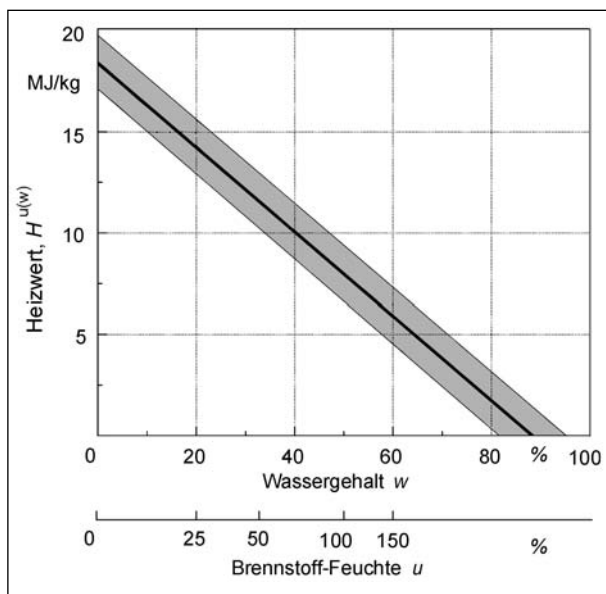
#### 5.1.2 Gehölzschnitt

Der Heizwert von biogenen Festbrennstoffen ist weniger von der Biomasseart, sondern vielmehr durch den Wassergehalt geprägt (siehe Bild 4). So nimmt der Heizwert von Holz mit zunehmendem Wassergehalt ab. Holzartige Biomassen mit einem Wassergehalt von 40-60 % werden als erntefrisch bezeichnet. Um einen höheren Heizwert von Holz zu erreichen, wird die Biomasse getrocknet.

Holz mit einem Wassergehalt von etwa 35 % wird als sommertrockenes Holz bezeichnet, Holz mit einem Wassergehalt von maximal 18 % als lufttrocken. Dieser Gehalt kann durch eine saisonale natürliche Trocknung oder durch technische Maßnahmen erreicht werden. Weiterhin zu beachten ist, dass Splintholz gegenüber Kernholz einen höheren Wassergehalt aufweist.

Der Heizwert von biogenen Festbrennstoffen bezogen auf die wasserfreie Masse ( $Hu_{(wf)}$ ) liegt zwischen 16,5 und 19,0 MJ/kg (siehe Bild 4). Allge-





**Bild 4:** Heizwert von Holz in Abhängigkeit vom Wassergehalt und Brennstoff-Feuchte [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001]

mein liegt der Heizwert von Nadelholz ungefähr 2 % über dem von Laubholz. Durchschnittlich liegen die spezifischen Heizwerte von Holzbrennstoffen 9 % über denen von Halmgütern wie z. B. Getreidestroh und -körnern sowie Heu und Gräsern. Einen je nach Ölgehalt deutlich höheren Heizwert besitzen ölhaltige biogene Brennstoffe (z. B. Rapskörner). Der Heizwert  $H_{u(wf)}$  für verschiedenen biogene Brennstoffe ist in Bild 3 dargestellt [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001].

### 5.1.3 Bankettschälgut

Bankettschälgut hat einen Wassergehalt zwischen 3 und 23 % FS, einen Glühverlust von 3-18 % TS und einem pH-Wert zwischen 6,7 und 9,6. Der Anteil organischer Substanzen (Pflanzen- und Wurzelmaterial), bezogen auf die Feuchtmasse, liegt zwischen 3 % und 5 % [GALLENKEMPER et al., 1992]. Bankettboden ohne Wurzel- und Pflanzenmaterial bis zu einer Schichttiefe von 10 cm weist einen TOC-Gehalt zwischen 2 M.-% und 5 M.-% auf [KOCHER und WIRTZ, 2004].

In Tabelle 8 sind die ermittelten Brennstoffparameter dargestellt (ausführliche Darstellung siehe Anhang A). Es zeigt sich, dass die Ergebnisse in Abhängigkeit des Bankettzustandes etwa um den Faktor zwei schwanken. Jedoch liegen auch die Höchstwerte in einem Bereich, der eine thermische Verwertung infolge der geringen Energieinhalte als wenig aussichtsreich erscheinen lässt. Zur Bestimmung der Heizwerte der Bankettschälgutproben war jeweils

Parameter	Einheit	Bewuchs stark	Bewuchs gering	Nach Mahd
No.		52216/18	52217/19	52220
oTS (ohne Humus)	% TM	5,9	3,1-4,1	3,0
Glühverlust 550 °C (mit Humus)	% TM	7,5-8,6	5,7-7,2	5,8
$H_u$ Gesamtprobe	kJ/kg TM	520-540	250-340	250

**Tab. 8:** Ergebnisse der energetischen Analyse von Bankettschälgut-Proben

eine Stützfeuerung notwendig, da das Material keine selbstständige Verbrennung ermöglichte.

Hinsichtlich einer Ablagerung auf Deponien sind die Ergebnisse mit geringem Bewuchs bzw. nach Mahd von Interesse, da diese z. T. nur knapp den Grenzwert der Deponieklasse II<sup>4</sup> des maximalen Glühverlusts überschreiten.

Auch das Gasbildungspotenzial ist bei allen Proben als sehr niedrig einzuschätzen und liegt zwischen 0,1 und 0,21 MJ/kg TM. Dabei zeigen die Proben 52216 und 52218 durch den relativ hohen Grasanteil erwartungsgemäß die höchste Gasbildungsrate. Hinsichtlich der Biogaserträge anderer Biomassen (siehe Bild 3) sind die Gaserträge von Bankettschälgut deutlich geringer, wodurch bei einer direkten Nutzung von Bankettschälgut in Biogasanlagen nur mit einer geringen Energieausbeute zu rechnen ist.

In der Literatur werden für Bankettschälgut Gas-mengen von ca. 0,5 Nm<sup>3</sup>/Mg TS bei einem Methangehalt von ca. 38 % genannt [GALLENKEMPER et al., 1996]. Im Vergleich zu den von der IfE Analytik GmbH durchgeführten Gasbildungen zeigen sich bei GALLENKEMPER geringere Gas-mengen und Methangehalte.

Da die energietechnischen Kenngrößen von Bankettschälgut in der Literatur nur unzureichend beschrieben sind, wurden im Rahmen des Projektes zusätzliche stichprobenartige Analysen durchgeführt. Untersucht wurden der organische Anteil in den Proben, der Heizwert und das Gasbildungspotenzial. Die Probenahme und die Laboruntersuchungen erfolgten durch die IfE Analytik GmbH.

Abgebildet wurden fünf repräsentative Stichproben (siehe Kasten). Diese beinhalten jeweils zwei Pro-

<sup>4</sup> Deponieklasse I: maximal 3-Masse-% bestimmt als Glühverlust oder 1-Masse-% bestimmt als TOC

Deponieklasse II: maximal 5-Masse-% Glühverlust oder 3-Masse-% TOC

No.:	Eigenschaften der BSG-Probe:
52216	Bankett rechts, Bewuchs stark
52217	Bankett rechts, Bewuchs gering
52218	Bankett links, Bewuchs stark
52219	Bankett links, Bewuchs gering
52220	Bankett links + rechts nach Mahd

ben mit einem erhöhten sowie einem niedrigen organischen Anteil. Erreicht wird dies durch die Probennahme an Banketten mit hohem Grasbewuchs, was einem erhöhten organischen Anteil entspricht, sowie demzufolge die Probennahme mit niedrigem Grasbewuchs.

Eine weitere Probennahme bildet die gegenwärtige Vorgehensweise bei der Bankettschälung – vorheriges Mähen der Bankette bzw. Probennahmestelle, um den organischen Anteil weitestgehend zu reduzieren – ab [Mitteilung DAHMEN]. Hintergrund für diese Vorgehensweise ist die Notwendigkeit der Begrenzung des organischen Gehalts von Abfällen bei der Deponierung nach der „Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen“, kurz AbfAbIV [AbfAbIV, 2002], bzw. nach „Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstige Entsorgung von Siedlungsabfällen“, kurz TA Siedlungsabfall [TASi, 1993].

Die Probennahme erfolgte im Großraum Leipzig an der Bundesstraße 2 in der Nähe der Ortschaften Krensitz und Krostitz, nach Vorgaben der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Teil III: Probennahme und Analytik“, kurz LAGA 20 Teil III [LAGA 20, 2003], sowie nach dem Stand der Arbeit im Arbeitskreis Bankettschälgut [mündl. Mitteilung: WIRTZ, 2005, und mündl. Mitteilung: KOCHER, 2005].

Um eine repräsentative Gesamtprobe, entsprechend den Vorgaben, zu erhalten, wurde für jede Probennahme jeweils eine Mischproben erstellt. Mischproben bestehen aus zehn Einzelproben zu jeweils ca. 300-400 g. Diese wurden jeweils in einem ca. 500 m langen Straßenabschnitt entnommen, der dementsprechend in gleichmäßige Abstände unterteilt wurde. Die Probennahme erfolgte mittig aus dem zu schälenden Bereich, in einer Entnahmetiefe zwischen 6 bis 10 cm. In der unmittelbaren Nähe von Schutzplanken wurde nicht beprobt. Für die weitere Behandlung und Analyse wurden die Mischproben konserviert.

Nachfolgende Analysen wurden durchgeführt:

Trockenmasse Erde + Bewuchs	DIN ISO 11465
oTS (105 °C)	In Anlehnung an DIN ISO 11465
Glühverlust/-rückstände DIN EN 12879	DIN EN 12879
Heizwerte $H_U$ und $H_O$	DIN 51900 T 2 und DIN V CEN/TS 14918
Gasbildung $GB_{21}$	AbfAbIV Anhang 4

Der Bereich Technische Hygiene des Instituts für Energetik und Umwelt gGmbH wurde mit der Durchführung von Vergärungsversuchen von verschiedenen Proben Bankettschälgut beauftragt.

Der Vergärungsversuch wurde nach VDI 4630 Nr. 5a durchgeführt. Dabei wurden jeweils 250 ml Laborimpf-schlamm verwendet. Es wurden jeweils 3 Parallelproben angesetzt sowie 2 Parallelproben Nullversuch (nur Impfschlamm) und 2 Referenzproben (1 g mikrokristalline Zellulose und Impfschlamm). Die Gärversuche wurden am 07.09.2005 angesetzt und liefen 28 Tage. Bei der Durchführung der Gärversuche zeigte sich, dass die Proben einen Gasbildungsverlauf praktisch ohne lag-Phase (Verzögerungsphase, in der nicht viel Gas gebildet wird) zeigen. Diese fehlende lag-Phase ist nicht unüblich, da die für die Gasbildung benötigten Mikroorganismen in vielen Proben bereits enthalten sind bzw. Verbindungen in der Probe enthalten sind, an die die Mikroorganismen des Impfschlamm bereits adaptiert sind.

## 5.2 Schad- und Störstoffe

Die Beschreibung der Schad- und Störstoffe erfolgt im Hinblick auf deren mögliche Auswirkungen auf eine energetische Verwertung. Betrachtet werden kritische Parameter, die einen Einfluss auf Emissionen, Verschlackung, Korrosion und Rückstandverwertung haben. Weiterhin werden die wesentlichen Verbindungen zu den gesetzlichen Rahmenbedingungen aus Kapitel 4 hergestellt.

Allgemein sind die Schwermetallgehalte in Pflanzen (Gras, Gehölz) von der Schwermetallkonzentration im Boden, den Bodeneigenschaften sowie den Pflegemaßnahmen und der Pflegehäufigkeit abhängig. Grundsätzlich sind die Schwermetalllöslichkeit, -mobilität und die Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen höher, je niedriger der pH-Wert des Bodens ist.

Für die zu untersuchende energetische Verwertung von Grünabfällen, im Speziellen für die thermochemische Verwertung des Materials, sind die Gehalte an Schwefel, Stickstoff, Chlor und Asche interessant, da diese an der Bildung von Schadstoffen wie SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, toxischen Chlorverbindungen (HCl) oder Staub beteiligt sind.

**5.2.1 Grasschnitt**

Nach SELING/FISCHER wurde bei einer saisonalen Betrachtung des Mähgutes (Sommer- und Herbstmahd, siehe Tabelle 9) nicht in allen Fällen ein Zusammenhang zwischen Schwermetallgehalten und Verkehrsdichte festgestellt. Allerdings wurde unabhängig von jahreszeitlichen Pflegeunterschieden der Einfluss des Verkehrsaufkommens auf die Schwermetallgehalte nachgewiesen.

Ferner sind bei der Maschinenmahd mit Absaugung die Gehalte an Cr, Cu, Ni, Pb, Pt und Zn im Vergleich zur Handmahd höher. Ursache ist, dass mit der Absaugung auch die Aufnahme von Staub und Bodenpartikeln, die gegenüber Pflanzenmaterial höhere Schwermetallgehalte aufweisen, erfolgt [SELING, 2003a].

Bestätigt wird dies durch Untersuchungen straßen naher Böden und Aufwuchs. Der Vergleich der

Schwermetallkonzentrationen zeigte, dass die Gehalte in Böden um ein Vielfaches höher sind als in den Pflanzenbeständen. Gleiches gilt für organische Schadstoffe, wobei Gehölzstreifen an Straßen zu einer Erhöhung der Bodenkonzentrationen und der Pflanzengehalte an Schwermetallen vor den Gehölzen sowie zu einer Reduzierung hinter diesen führen [UNGER und PRINZ, 1992].

Bei den Schwermetallkonzentrationen von Grasschnitt liegt der untere Mittelwert unter den Grenzwerten der Bioabfallverordnung (BioAbfV) und der RAL-GZ (s. Kapitel 4.1.3). Die maximalen Werte bleiben ebenfalls unter der BioAbfV. Somit werden die Grenzwerte für den Einsatz von Grasschnitt als Substrat in Biogasanlagen eingehalten (siehe Bild 5).

Schwermetalle [mg/kg]								
	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Pt	Zn
MW <sub>s</sub> <sup>5</sup>	0,13	6,3	18	0,05	2,1	17	6,4	80
max.	0,52	52	62	0,34	5,0	144	26	256
MW <sub>h</sub> <sup>6</sup>	0,25	11	27	0,04	4,1	21	4,4	94
max.	1,08	54	58	0,06	12,6	103	35	237

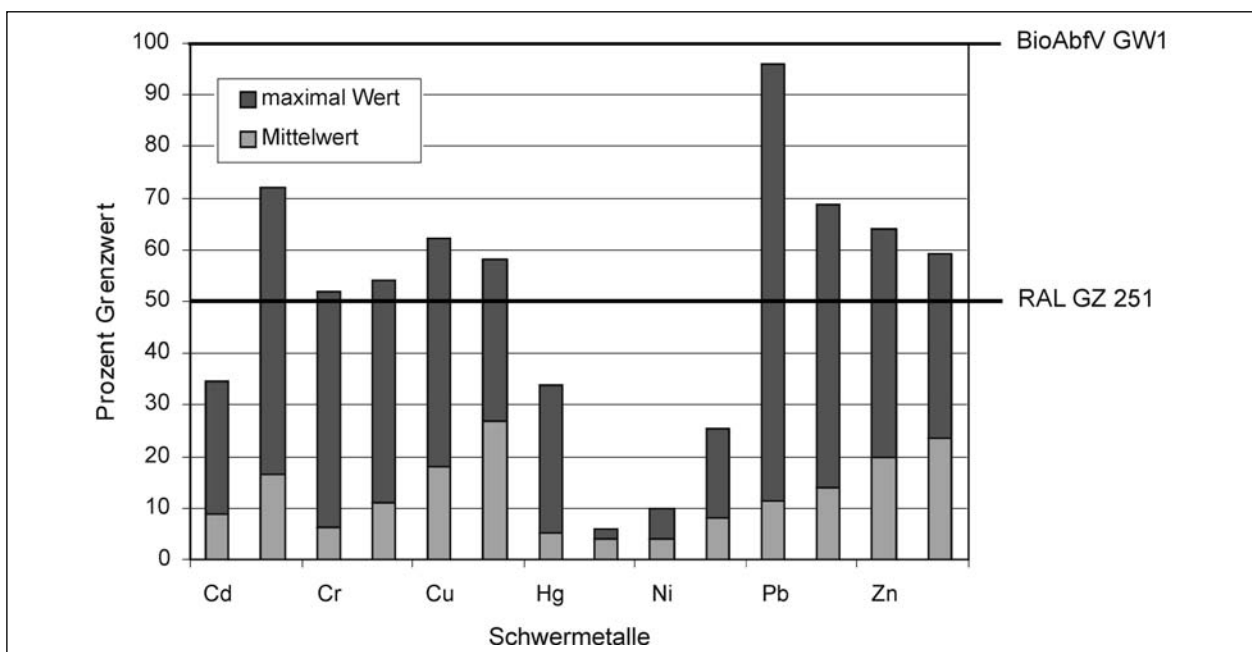
**Tab. 9:** Schwermetallgehalte für Mähgut (Werte beinhalten die zusammengefasste Sommer- und Herbstmahd)

organische Schadstoffe [µg/kg TM]			
	PCB	PAK	PCDD/F
MW <sub>s</sub>	13,8	846	1,2-1,4
MW <sub>h</sub>	15,9	530	

**Tab. 10:** Organische Schadstoffgehalte von Straßenbegleitgrün

<sup>5</sup> MW<sub>s</sub>: Mittelwert der Sommermahd

<sup>6</sup> MW<sub>h</sub>: Mittelwert der Herbstmahd

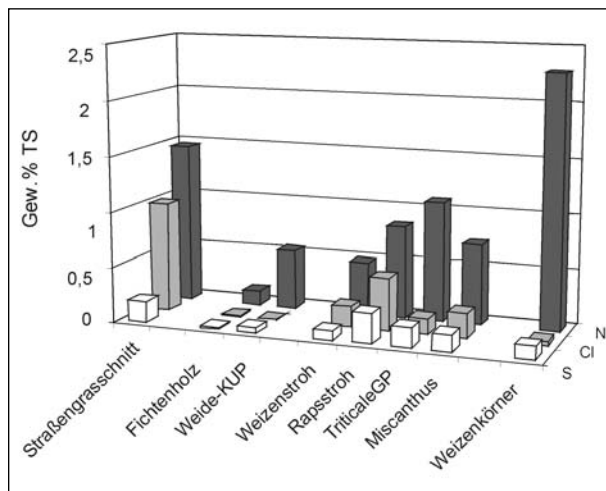


**Bild 5:** Prozentueller Grenzwert von Schwermetallgehalten in Mähgut

Hinsichtlich organischer Stoffe, wie Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB), Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/PCDF), wurde kein Zusammenhang zwischen Verkehrsbelastung und Schadstoffbelastung festgestellt. Bezüglich der PCDD/F liegen nur Schadstoffgehalte vor, die sich auf kompostiertes Straßenbegleitgrün stützen und einen angenommenen 50%igen Rotteverlust berücksichtigen (siehe Tabelle 10) [SELING und FISCHER, 2003a, b, c].

Weiterhin zeigen Untersuchungen von Straßengrasschnitt hohe Aschegehalte, die im Mittel bei 25 % TM liegen. Begründet wird dieses z. T. durch pflegebedingte Mitaufnahme von Staub- und Schmutzteilchen. Von den in Bild 3 dargestellten Biomassen erreicht Rapsstroh den höchsten Aschegehalt mit lediglich 6 % TM [HARTMANN et al., 2000].

Im Vergleich zu anderen Biomassen (siehe Bild 6) sind beim Straßengrasschnitt insbesondere die Chlorgehalte mit 1,0 % TM hervorzuheben. Weiterhin gehören auch die Schwefel- und Stickstoff-



**Bild 6:** Schadstoffgehalte verschiedener Biomassen

Werte gegenüber anderen Biomassen zu den hohen Werten.

Vor dem Hintergrund einer thermochemischen Verwertung des Materials sind die anlagentechnischen Auswirkungen dieser Stoffe, wie z. B. erhöhte Korrosion, zu berücksichtigen.

## 5.2.2 Gehölzschnitt

Ein Zusammenhang zwischen der Verkehrsbelastung und der Schadstoffkonzentration in Gehölzen wurde vermutet, konnte jedoch aufgrund von verschiedenen unberücksichtigten Faktoren, wie Bewuchsdichte, Stärke und Häufigkeit von Windstößen, nicht festgestellt werden [KRIEGER und BREITENSTEIN, 1996].

Weitere Einflüsse auf die Schadstoffkonzentration in den Straßenrand-Gehölzen sind die Bewuchsart und das Alter des Bewuchses. Der pH-Wert kann als verstärkender Eintragsfaktor für Schadstoffe ausgeschlossen werden, da durch den Salzeintrag des Winterdienstes von einem pH-Wert des Bodens zwischen 6 und 8 auszugehen ist [STOTTELE, 1994].

Abhängig von der Umtriebszeit können Gehölze Schadstoffe aus der Atmosphäre und aus dem Straßenbetrieb akkumulieren. Je nach Art der Bepflanzung zeigen sich unterschiedliche Schwermetalllöslichkeiten (siehe Tabelle 11). So werden z. B. Weiden aufgrund ihres spezifischen Aneignungsvermögens zur Melioration von cadmiumbelasteten Flächen verwendet [HARTMANN et al., 2000].

Nach STOTTELE sind 105 verschiedene Holzarten am westdeutschen Straßennetz zu finden [STOTTELE, 1994]. Daher ist eine spezifische Aussage über typische Schwermetallgehalte in Gehölzen des Straßenbegleitgrüns durch die hohe Artenvielfalt der Gewächse, eine z. T. hohe Anzahl von Pioniergehölzen und eine Vielzahl von nicht heimi-

	Schwermetalle [mg/kg]						
	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
SBH (Straßenbegleitholz bzw. Gehölzschnitt)	0,45	0,5	4,5	0,01	0,5	60	77
Kommunaler Strauchschnitt	0,15	4-29,5	5,5-9	0,005-0,045	2-5,2	7-11	45-65
Kaltschnitt	0,09-0,95	1-25	1-9	0,01-0,117	x	1-34,8	45-65

**Tab. 11:** Bandbreite der Schwermetallgehalte von Gehölzen an Straßen [KRIEGER und BREITENSTEIN, 1996; KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001; HARTMANN et al., 2000]

	CL	N	S
in mg/kg der TM			
Kommunaler Strauchschnitt	170-896	6.700-13.000	835-1.340
Holz nach Kaltschnitt	40-190	1.300-5.400	150-850

**Tab. 12:** Stoffgehalte von holzartigen Brennstoffen

schen, standortfremden Arten nur pauschal darstellbar. Tabelle 11 vergleicht Untersuchungen der Schadstoffkonzentrationen von Gehölzschnitt mit kommunalem Strauchschnitt und Literaturdaten, welche die Bandbreite einiger Arten, wie Fichte, Buche, Pappel, Weide und Rinde von Nadelhölzern beinhaltet, wobei Rinde bei den Gehalten an Cd, Hg, Pb und Zn eine Spitzenstellung einnimmt.

Generell hat Holz im Vergleich zu anderen biogenen Festbrennstoffen den geringsten Aschegehalt. Beim Gehölzschnitt von Straßen handelt es sich nicht nur um Kern- und Splintholz, sondern vielmehr um eine Mischung aus Holz- und Strauchschnitt. Aufgrund zyklischer Pflegemaßnahmen ist von einem jungen Bestand auszugehen, der durch seinen noch relativ hohen Anteil an Rinde einen höheren Ascheanteil hat. Demnach kann Gehölz an Straßen hinsichtlich seines jungen Bestands mit Kurzumtriebspflanzen wie Pappeln und Weiden verglichen werden, die einen Aschegehalt von ca. 2 % aufweisen [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001].

Vergleichbare Erkenntnisse ergaben stichprobenartige Untersuchungen von Strauchschnitt aus der Autobahnrandpflege, bei denen ein Aschegehalt von 2,5 % gemessen wurde [HARTMANN et al, 2000]. Demgegenüber lagen die Aschegehalte von kommunalem Strauchschnitt mit durchschnittlich 12 % deutlich höher. Eine Ursache könnten höhere mineralische Bestandteile, die durch die Pflegemaßnahmen mit aufgenommen werden, sein.

Hinsichtlich der Korrosion von technischen Anlagenteilen durch bestimmte Stoffgehalte ist Holz gegenüber Strauchschnitt vorteilhafter zu bewerten (siehe Tabelle 12).

### 5.2.3 Bankettschälgut

Als Eintragsquellen bzw. Einflussfaktoren auf die Schadstoffbelastung von Bankettschälgut wird zwischen verkehrsbedingten und verkehrsunabhängigen Emissionen unterschieden, Letztere entstammen landwirtschaftlichen und atmosphäri-

schen Schadstoffeinträgen [GALLENKEMPER et al., 1992]. Weiterhin sind auf den Banketten unerwünschte Störstoffe wie Plastikflaschen, Fahrzeugteile, Hausabfälle u. Ä. zu finden.

Die verkehrsbedingten Emissionen im Bankettschälgut sind durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Dies sind z. B. die Verkehrsbelastung bedingt durch den Anteil des Schwerlastverkehrs, der Abrieb von Fahrbahnen, Reifen und Bremsbelägen, Tropfverluste und Korrosionsprodukte, Korrosionsstoffe von Schutzplanken und Markierungsfarbe, Schadstoffe aus Unfällen sowie Emissionen von Straßenbaustoffen und Betriebsmitteln wie Streugut aus dem Winterdienst.

Ebenso haben die Art der Pflanzungen und die Häufigkeit der Pflegemaßnahmen (Schälung, Mähverfahren) einen Einfluss auf die Anreicherung des Bankettschälguts mit Schadstoffen.

Zusammenfassend ergeben sich aus den eingetragenen Emissionen nach [GALLENKEMPER et al. 1992 und DURTH-SACHS 1999] die relevanten Schadstofffraktionen:

- Schwermetalle: Arsen (Ar), Quecksilber (Hg), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Zinn (Zn),
- organische Schadstoffe: Kohlenwasserstoffe (KW), Polizyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD), Polychlorierte Dibenzofurane (PCDF).

Allgemeine Aussagen zu Schadstoffgehalten in Bankettschälgut stellen sich schwierig dar, weil eine Klassifizierung typischer Bodenzusammensetzungen des Straßenrandbereichs aufgrund der unterschiedlichen Standorte und Bodenschichten nicht möglich ist. Entsprechend zeigen sich zwischen Probenahmen gleicher Standorte deutliche Schwankungen in den Bodenbestandteilen bzw. Schadstoffgehalten [DURTH-SACHS, 1999].

Aufgrund der verschiedenen Eintragsmöglichkeiten für Schadstoffe, wie Herkunft und Verkehrsbelastung, ist von einer großen Variabilität der Merkmale auszugehen. Generell kann für Bundesautobahnen gegenüber anderen Straßenklassen von einer höheren Schadstoffbelastung ausgegangen werden. Ebenso ist bei einem hohen Bankettalter von hohen Schadstoffbelastungen auszugehen [DURTH-SACHS, 1999].

	Schwermetalle [mg/kg]								Organische Stoffe [mg/kg]			
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	KW	PAK	PCDD	PCDF
MW	6 (33,4)	0,5-1,7	52-74	41-107	0,1 (0,3)	36-71	40-256	88-281	85-333	5,7-17,9	X	X

Tab. 13: Schadstoffgehalte von Bankettschälgut an BSK/BLK [DURTH-SACHS, 1999 und GALLENKEMPER et al., 1992]

	Schwermetalle [mg/kg]								Organische Stoffe [mg/kg]			
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	KW	PAK	PCDD	PCDF
MW	X	2,6-3,6	127-134	118-454	X	50-91	353-491	130-1.293	431-451	1,3-11	X	X

Tab. 14: Schadstoffgehalte von Bankettschälgut an BAB [DURTH-SACHS, 1999 und GALLENKEMPER et al., 1992]

Die Bandbreite der Schadstoffgehalte von Bankettschälgut an Bundes-, Landes-/Staats- und Kreisstraßen (BLK, BSK) sowie an Bundesautobahnen (BAB) ist in Tabelle 13 und Tabelle 14 abgebildet sowie in Klammern der jeweilige maximale Wert.

Vorausgesetzt, für Bankettschälgut gelten die gleichen Grenzwerte wie für Grasschnitt (siehe Bild 5), ist die Nutzung in Biogasanlagen für die unteren Mittelwerte zulässig. Die oberen Mittelwerte überschreiten die Grenzwerte z. T. deutlich und widersprechen somit einer energetischen Nutzung. Um die Voraussetzung für Bankettschälgut als Substrat zu schaffen, muss das Material bezüglich seiner Schwermetallgehalte untersucht werden und kann erst bei Einhaltung der Grenzwerte verwendet werden.

Für die zu untersuchende energetische Verwertung von Bankettschälgut, im Speziellen für die thermochemische Verwertung des Materials, sind die Gehalte an Schwefel, Stickstoff, Chlor und Asche interessant, da diese an der Bildung von Schadstoffen wie  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , toxischen Chlorverbindungen (HCl) oder Staub beteiligt sind.

Im Bezug auf Bankettschälgut kann kein gesicherter Zusammenhang zwischen den Schadstoffgehalten von Straßengrasschnitt und Bankettschälgut gezogen werden. Vermutlich liegen die Schadstoffgehalte von Bankettschälgut eher höher als im Grasschnitt, da es durch Niederschläge zu einer Auswaschung bzw. Anreicherung dieser in den oberen Bodenschichten kommt. So zeigt die vertikale Schadstoffverteilung von Bodenprofilen für Schwermetalle im Bankettschälgut ein generelles Maximum in 0 bis 5 cm Bodentiefe [DURTH-SACHS, 1999].

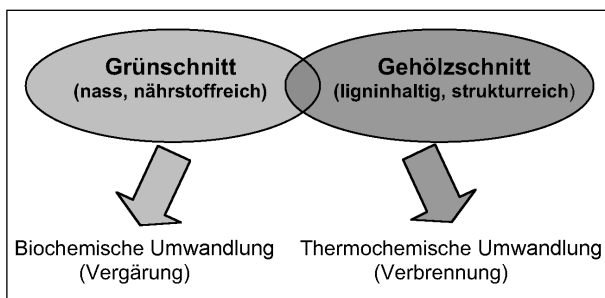
Bezüglich der Chlor-, Stickstoff- und Schwefel-Gehalte liegen keine Untersuchungen zu Bankettschälgut vor.

### 5.3 Brennstoff- und Substratqualitäten

Biomasse fällt – nicht nur im Straßenbetriebsdienst – in sehr unterschiedlichen Qualitäten an. Dies betrifft sowohl die chemische Zusammensetzung und den Wassergehalt als auch physikalische Eigenschaften (Dichte, Form und Stückigkeit, Fließverhalten etc.) sowie den Grad an Verunreinigungen mit Fremdmaterial. Dieser heterogenen Ausgangsqualität stehen bei der energetischen Verwertung klare Anforderungen der Verwertungstechnologie gegenüber, die einen störungsfreien Betrieb der Brennstoffzufuhr und der Anlage selbst, eine möglichst hohe Energieeffizienz sowie geringe Emissionen und schließlich einen reibungslosen Umgang mit den Reststoffen gewährleisten sollen. Zu diesen technisch bedingten Brennstoffeigenschaften zählen z. B.:

- Limitierung des Anteils an inertem Material bei allen Optionen der energetischen Verwertung.
- Limitierung des Nährstoffgehaltes bei Anlagen zur thermochemischen Nutzung, da diese sowohl in Hinblick auf die Staubemissionen als auch in Hinblick auf die Verschlackung des Brennraums (so genannte Ascheerweichung) nachteilig sind.
- Möglichst keine ligninhaltigen Substanzen für Vergärungsprozesse (da diese in der Vergärung nicht umgesetzt werden können).
- Definierte Größe der Brennstoffpartikel bei automatischer Beschickung (z. B. Limitierung von Strukturstoffen zur Sicherung der Pumpfähigkeit bei Nassverfahren).
- Definierter Wassergehalt (der z. B. bei ca. 90 % für die nassen Vergärungsverfahren und ca. 30 % bei ausgewählten Biomassekesseln liegen kann).

Aus diesen technisch bedingten Brennstoffanforderungen ergibt sich zum einen die Schlussfolge-



**Bild 7:** Nutzbarmachung von Biomassen des Straßenbetriebsdienstes

Die effiziente energetische Nutzung von Grünschnitt und Gehölzschnitt nur durch Verfolgung unterschiedlicher Technikoptionen gesichert werden kann. Der vergleichsweise nasse und nährstoffreiche Grünschnitt führt in Verbrennungsprozessen leicht zu Problemen und eignet sich eher zur Vergärung, während der ligninhaltige und strukturreiche Gehölzschnitt in einer Vergärung eher störend ist und daher thermochemisch nutzbar gemacht werden sollte (Bild 7). Zum anderen folgt daraus, dass – unabhängig von der geplanten Verwertungsoption (eigen- oder überbetrieblich) für einen störungsfreien Anlagenbetrieb die Sicherung der Brennstoffqualität stets zu gewährleisten ist.

### 5.3.1 Brennstoffspezifikationen für biogene Festbrennstoffe

Die Notwendigkeit von nachvollziehbaren Brennstoffspezifikationen für biogene Festbrennstoffe wird auch von der EU-Kommission als wesentliche Unterstützung für die Entwicklung eines europäischen Marktes gesehen. Entsprechend wurde 1998/99 mit Normungsaktivitäten auf europäischer Ebene begonnen und ein technisches Komitee „Solid Biofuels“ (CEN TC 335) gebildet, das bis Ende 2004 ca. 20 Normentwürfe zur Brennstoffspezifikation, Brennstoffprüfung und Qualitätssicherung vorgelegt hat [CEN, 2005]. Hierbei ergeben sich für die Normung der Eigenschaften biogener Festbrennstoffe die folgenden beiden wesentlichen praxisrelevanten Bereiche:

- Definition von Brennstoffart und -herkunft durch eine eindeutige und nachvollziehbare Terminologie im Bereich der Biomasseressourcen (d. h. Definition und inhaltliche Ausgestaltung der bisher nur als Oberbegriffe verwendeten Biomassearten, also z. B. strohartige Stoffe, Restholz, sonstige Biomasse).
- Identifikation und Quantifizierung der wesentlichen praxisrelevanten Brennstoffeigenschaften,

die einen kostengünstigen, reibungslosen und emissionsarmen Betrieb einer Konversionsanlage gewährleisten sollen.

Die Beschreibung der Brennstoffherkunft ist deswegen von zentraler Bedeutung, weil aus der Herkunft bereits umfassende Informationen über den Brennstoff abgeleitet werden können, die z. B. auch eine Minimierung des Untersuchungsaufwandes zur Brennstoffprüfung gestatten. Beispielsweise lässt sich der Heizwert eines Brennstoffs bekannter Herkunft bei Kenntnis des Wassergehaltes und Aschegehaltes mit Hilfe von brennstoffspezifischen Kennwerten berechnen und muss nicht aufwändig analysiert werden.

In Hinblick auf die Identifikation und Quantifizierung der zu definierenden Brennstoffeigenschaften werden in der Praxis vor allem die Kenngrößen

- Form und Größe,
- Dichte,
- Wassergehalt und
- Aschegehalt

als entscheidend eingeschätzt [u. a. HÄRDTLEIN, et al., 2004].

#### Form und Größe

Diese bestimmen die Transportmöglichkeiten und das Verhalten in der Konversionsanlage. Sie sind deshalb wesentliche verbrennungsrelevante Größen, die an die jeweiligen Anforderungen der Feuerungsanlage angepasst werden müssen (bzw. vice versa). Dabei können diese Kenngrößen in der Praxis erheblich variieren zwischen z. B. staubförmigen Brennstoffen (z. B. Holzstaub), pelletartigen Brennstoffen (z. B. Strohpellets), stückigen Brennstoffen (z. B. Hackschnitzel) und ballenartigen Brennstoffen (z. B. Strohballen). Jede Aufbereitungsform erfordert jeweils unterschiedliche Vorrichtungen bei Produktion, Transport, Lagerung und energetischer Nutzung. Beispielsweise werden für ein problemloses Handling von Hackschnitzeln im Verlauf der gesamten Bereitstellungskette u. a. Anforderungen an Form und Größe sowie an den Übergrößenanteil bzw. Fein- und Staubanteil gestellt. Ein möglichst homogener Brennstoff, der diese Kenngrößen innerhalb bestimmter Grenzen einhält, ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die in der Regel vollautomatische Brennstoffförderung und Feuerraumbeschickung gut regel- und dosierbar sind und möglichst verstopfungs- bzw. störungsfrei und mit gerin-

gem Verschleiß (d. h. niedrigen Wartungskosten) realisiert werden können. Ein hoher Anteil an Übergrößen im Brennstoff kann zur vermehrten Brückenbildung führen und hierdurch u. a. die Lagerbewirtschaftung und Brennstoffzuführung erschweren.

### Dichte

Bei der Dichte ist zu unterscheiden zwischen der Roh- und Einzeldichte sowie der Lagerdichte biogener Festbrennstoffe.

Die Roh- und Einzeldichte des Brennstoffs beschreibt die eigentliche Materialdichte (d. h. ohne Berücksichtigung der Hohlräume zwischen den Teilchen). Sie hat Auswirkungen auf bestimmte feuerungstechnisch relevante Eigenschaften (z. B. spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate), die Möglichkeiten der pneumatischen Förderung und Beschickung sowie auf die Lagerdichte. Diese Rohdichte kann nur bei der Herstellung hochverdichteter Presslinge beeinflusst werden. Daher wird sie vereinfachend auch als Merkmal für die Güte entsprechender Herstellungsprozesse verwendet. Eine hohe Rohdichte von Presslingen deutet beispielsweise auf eine große Härte der Presslinge hin.

Die Lagerdichte ist definiert als der Quotient aus der Masse des in einen Behälter eingefüllten Brennstoffs und dem Volumen dieses Behälters; sie bestimmt das erforderliche Lager- und Transportvolumen der Brennstoffe.

### Wassergehalt

Der Wassergehalt biogener Festbrennstoffe ist großen Schwankungen unterworfen. Bei Holz hängt er u. a. vom Erntezeitpunkt des Baumes, vom Lagerort, von der Lagerart (z. B. Freilager, überdachtes Lager, Lagerhalle) sowie von der Lagerdauer und der Brennstoffaufbereitung ab. Er reicht von einer oberen Spanne von 20 bis 50 % (und gegebenenfalls darüber, z. B. für Hackschnitzel aus dem Wald) bis zu einer unteren Spanne von 7 bis 17 % (und gegebenenfalls darunter, z. B. für Restholz aus Schreinereien). Der Wassergehalt beeinflusst nicht nur den Heizwert, sondern auch die Lagerfähigkeit, die Feuerraumtemperatur, die produzierte Abgasmenge und das Abbrandverhalten.

### Aschegehalt

Der Aschegehalt eines Biobrennstoffs hängt von Biomassetyp und -art sowie von den (minerali-

schen) Verunreinigungen ab. Er beeinflusst den Brennwert der Biomasse und ihre Einsatzmöglichkeiten in bestimmten Feuerungsanlagen.

Die Bedeutung der übrigen Kenngrößen zur Brennstoffcharakterisierung (z. B. Inhaltsstoffe, Aschezusammensetzung) hängt vielfach von der Art der eingesetzten Biomasse und von Größe, Feuerungsprinzip der Konversionsanlage und der Abgasreinigung ab. So variiert die Relevanz der chemisch-stofflichen Eigenschaften je nach Herkunft des Brennstoffs und ist bei den nicht-holzartigen Brennstoffen (z. B. Halmgüter, Körner etc.) wegen der vergleichsweise höheren Nährstoffgehalte grundsätzlich größer als bei den holzartigen Brennstoffen.

### 5.3.2 Spezifikationen für Biogassubstrate

Da die Lager- und Transportfähigkeit von Biogassubstraten in der Regel deutlich limitierter und die Entwicklung überregionaler Märkte damit weniger entscheidend für die weitere Entwicklung dieser energetischen Nutzungsoption sind, sind die Spezifikationen entsprechend weniger stark standardisiert. Jedoch gilt auch hier, dass die Substratqualität entscheidend für einen störungsfreien Betrieb ist; entsprechende Anforderungen werden in Kapitel 7.3 (Techniken der Biogasnutzung) dargestellt und im weiteren Verlauf im Hinblick auf den jeweiligen Anwendungsfall berücksichtigt.

## 6 Stoffströme – Datenanalyse

Entscheidend für die energetische Nutzung der Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst sind die Stoffströme, die im Rahmen der Pflegemaßnahmen freigesetzt werden und deren gegenwärtige Sammlung und Entsorgung, wie auch der Energiebedarf der Straßen- und Autobahnmeistereien, der durch diese Stoffströme ggf. gedeckt werden kann. Sowohl auf der Potenzialseite als auch auf der Nachfrageseite wurde daher eine detaillierte Datenanalyse durchgeführt, die nachfolgend dargestellt wird.

### 6.1 Datengrundlage

Die Datenbasis zur Beschreibung von Potenzialen, Sammlung und Entsorgung der Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst bildeten Literaturdaten sowie eine ergänzende Umfrage durch das Institut für Energetik und Umwelt gGmbH.



## Literaturdaten

Aus Literaturdaten war eine flächendeckende Befragung der deutschen Straßenmeistereien aus dem Jahr 2000 verfügbar, die im Rahmen der Erhebung „Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes für Abfälle im Bereich von Straßen- und Autobahnmeistereien“ der Technischen Universität Darmstadt [TUD, 2000] durchgeführt wurde. Damals betrug der Rücklauf der Erhebung (ein Fragebogen mit 40 Fragen) 86 %, sodass eine bundesweit nahezu flächendeckende Erfassung von Daten zu Anfall und Behandlung von Abfällen aus der betrieblichen Straßenunterhaltung vorliegt. Insgesamt fanden 730 Datensätze Eingang in eine Datenbank, die sich in 162 AM, 551 SM und 17 kombinierten AM/SM aufteilten. Die Datenbank wurde nach dem BAST-Hausstandard mit dem Programm Microsoft Access erstellt.

Inhaltliche Themenkomplexe dieses Fragebogens waren Abfälle an Straßenrändern und Parkplätzen, Grünschnitt (Mähgut) und Häckselgut (Holzhäcksel), Bankettschälgut<sup>7</sup>, Kehrgut und weitere Abfälle. Aufschluss gab die Datenbank über die Entsorgungsmethodiken der Meistereien. Eigenkompostierung, Fremdkompostierung, Verbrennung in Holzfeuerungen (extern), Verbrennung in Müllheizkraftwerken und das Hacken und Einblasen vor Ort in die Straßenränder waren dabei die häufigsten Verfahrensweisen der Entsorgung.

Jedoch waren Angaben zum Mengenanfall von Grün- und Gehölzschnitt, deren Beschaffenheit und konkrete Angaben zu Entsorgungskosten nicht in der erforderlichen Tiefe vorhanden.

Zusätzlich wurden weitere Datenquellen, welche primär regionale Gegebenheiten berücksichtigen und deren Ergebnis bzw. Ursprung reproduzierbar war, in die Auswertung mit aufgenommen. Dies sind:

- die „Untersuchungen zur Schnittgutbeseitigung“ [DINTER und MORITZ, 1987], ergänzt durch Untersuchungen des Landesbetriebs Straßenbau NRW „Turnus der Grünpflege“ [STRABEN NRW, 2005b],

- die „Untersuchungen zur Abfallentsorgung an Bundesfernstraßen – Teil III“ [KRIEGER und BREITENSTEIN, 1996] und
- ein „Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen – unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Baden-Württemberg“ [RÖSCH, 1996].

Bei den Daten aus der Literatur ist zu berücksichtigen, dass sie zum einen relativ alt sind [DINTER und MORITZ, 1987] und zum anderen lediglich regionale Verhältnisse abbilden.

## IE-Umfrage

Zusätzlich wurde, um die zeitliche Aktualität und die Verfügbarkeit der Datenauswertung zu verbessern, eine Umfrage vom Institut für Energetik und Umwelt durchgeführt [IE, 2005], die u. a. fehlende Daten ergänzt, die heutige Pflegestruktur berücksichtigt und gezielt Daten, die für eine energetische Nutzung von Interesse sind, erfasst.

Mit Ausnahme der Stadtstaaten, die durch ihre speziellen Rahmenbedingungen eine gesonderte Stellung bei der energetischen Verwertung von Straßenbegleitgrün aufweisen, wurde nach telefonischen Vorgesprächen (siehe Kontaktpersonen im Anhang) die Anfrage gezielt an die Länder geschickt, die eine Bearbeitung unterstützen konnten. Dies waren die zuständigen Straßenbauämter oder Regierungspräsidien der Bundesländer Baden-Württemberg, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Schleswig-Holstein. In den weiteren Bundesländern war eine Beantwortung durch den zu geringen Bearbeitungszeitraum, zu hohem Aufwand oder wegen fehlender Datenerfassung nicht möglich.

Eine Sonderstellung nahm dabei Thüringen ein, das eine Privatisierung des Straßenbetriebsdienstes vorgenommen hat. Die Straßenbauverwaltung Thüringen übernimmt nur noch die Leistungsbeauftragung und Kontrolle. Die Ausschreibungen erfolgen nach Stückkosten (z. B. Pflege eines Baumes), wodurch keine Mengenangaben möglich sind.

Die Umfrage erfolgte in Form eines Fragebogens an die oben genannten Bundesländer. Die Befragung sollte kurzfristig möglichst viele gut verwertbare Ergebnisse liefern. Aufgrund des jahreszeitlich bedingten Winterdienstes und der dadurch starken personellen Belastung konzentrierte sich der Fra-

<sup>7</sup> Schwemmmaterial (Erdmaterial, Streugut, Reifenabrieb, Biomasse etc.), das sich am Rand von Straßen ablagert und den Ablauf des Niederschlagswassers verhindert. Muss in regelmäßigen Abständen abgefräst (geschält) werden.

gebogen nur auf die wesentlichen Punkte im Umfang von einer Seite. Dies umfasste die Themengebiete

- Biomassemengen,
- Entsorgung und
- Heizungsanlage.

Unterschieden wurden bei den Biomassemengen zwischen Gras- und Gehölzschnitt sowie jeweils zwischen anfallenden und abtransportierten Mengen, wobei die anfallenden Mengen den jeweils gepflegten Flächen bzw. Mengen entsprechen sollten. Die abtransportierten Mengen entsprechen den Mengen, die ohne zusätzlichen Personal- und Transportaufwand einer energetischen Verwertung bereits heute zur Verfügung stehen. Als Ergebnis zeigte sich, dass die Vorgabe „anfallende Menge“ vielfach mit der gepflegten und aufgenommenen Menge verwechselt wurde, sodass diese z. T. mit den abtransportierten Mengen gleichzusetzen war. Eine eindeutigere Formulierung wäre hier besser gewesen. Abgefragt wurde der Zeitraum 2002 bis 2004. Es bestand aber auch die Möglichkeit, Informationen aus früheren Jahren zu geben.

Ferner wurde die Art der Entsorgung für Gehölzschnitt und Grasschnitt getrennt voneinander abgefragt. Als mögliche Beispiele wurden eine Lagerung, die Deponierung, der Verkauf oder der Verbleib vor Ort vorgegeben. Die durch die unterschiedlichen Entsorgungswege entstehenden Kosten wurden getrennt nach Biomassen erfasst sowie das Vorhandensein eines Häckslers als Ja/Nein-Option angegeben. Letztere Angabe ermöglicht die Einschätzung von potenziellen Brennstoffversorgungswegen für die Meistereien.

Abschließend wurden zur Abschätzung des Wärme-Energiebedarfs der Meistereien Angaben zur Heizungsanlage, wie Art des Brennstoffs, Anlagenleistung in kW, Alter der Anlage und Brennstoffverbrauch in den brennstoffspezifischen Einheiten l, m<sup>3</sup> oder kWh erfasst.

Insgesamt wurde der Fragebogen von 105<sup>8</sup> Meistereien beantwortet, die sich in 81 Straßenmeistereien, 20 Autobahnmeistereien und 4 kombinierte Straßen- und Autobahnmeistereien aufteilen.

## Daten der Länder

Von den Bundesländern Bayern und Brandenburg sowie Nordrhein-Westfalen wurden zusätzlich regionale Daten zur Verfügung gestellt.

### Brandenburg

Die „Erfassung der Mengen an Grünschnitt“ vom Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg [BRA, 2005] beschreibt die Grünschnitterfassung der brandenburgischen Autobahnmeistereien für die Jahre 2002 – 2004. Nach mündlicher Mitteilung handelt es sich bei den angegebenen Mengen um die im Straßenbetriebsdienst der einzelnen Autobahnmeistereien abtransportierten Mengen. Lediglich für eine Autobahnmeisterei sind keine Mengenangaben vorhanden, da diese das Material ausschließlich mulcht und in der Nähe des Anfallortes belässt [mündl. Mitteilung: BRA, 2005a].

### Bayern

Die Daten aus Bayern beruhen auf einer „Erhebung zum Grüngutaufkommen in Bayern“ [BAYERN, 1997] der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren aus dem Jahr 1997. Erfasst wurden Grünflächen und Mähflächen in m<sup>2</sup> sowie die liegen gelassenen und die aufgenommenen Grüngutmengen der 23 Straßenbauämter (SBA) mit 91 Straßenmeistereien und der beiden Autobahndirektionen (ABD) mit 40 Autobahnmeistereien in Bayern.

Die Auswertung der Daten stellte sich als schwierig heraus, da nicht zwischen Mähgut und Häckselgut unterschieden wurde. Weiterhin zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Angaben der Mähflächen, vor allem zwischen den ABD Nord- und Südbayern, die nur begrenzt nachvollziehbar sind.

Nach mündlicher Mitteilung der Baubehörde lässt sich die jährlich aufgenommene Menge von Häckselgut, sprich Gehölzschnitt, mit ungefähr 10-20 % für Autobahnmeistereien und mit 20-30 % für Straßenmeistereien [mündl. Mitteilung: BAYERN, 2005] angeben/beziffern.

### Nordrhein-Westfalen

In der Studie „Energetische Verwertung von Biomasseabfällen aus der Straßenunterhaltung“ des Landesbetriebs Straßenbau Nordrhein-Westfalen [STRABEN NRW, 2005] werden Biomassemengen (Holzhäcksel und Grasschnitt), die bei Grünpflege-

<sup>8</sup> Anzahl der Meistereien je Bundesland: Baden-Württemberg (8), Mecklenburg-Vorpommern (20), Sachsen (52), Schleswig-Holstein (25)

arbeiten anfallen, dokumentiert. In dieser werden Angaben zu anfallendem Überschussmaterial (abtransportierte Mengen) für die einzelnen Straßen- und Autobahnmeistereien gemacht, das extern entsorgt werden muss. Das übrige Material wird gemulcht bzw. gehackt und vor Ort belassen oder in den Straßenrandbereich eingeblasen (siehe Kapitel 6.2.3 und 6.3.2).

Unabhängig von der Studie wurden für ausgewählte Meistereien spezifische Heizungsanlagendaten wie Leistung, Verbrauch, Alter der Anlage und der eingesetzte Brennstoff zusätzlich nachgefragt [mündl. Mitteilung: NRW, 2005].

Bei der Übertragbarkeit der einzelnen aufgenommenen Daten für andere Bundesländer und Meistereien ist die Lage des Landes im Bundesgebiet zu berücksichtigen. So zeigt sich z. B. für Schleswig-Holstein, dass im Vergleich zu anderen Bundesländern viele Knicks<sup>9</sup> einer ständigen Pflege zum Freihalten der Sichtachsen bedürfen.

## 6.2 Mengenpotenziale von Grünabfällen

Eine wesentliche Randbedingung für die Deckung der Energienachfrage mit regenerativen Energieträgern stellt das verfügbare Energie- bzw. Energieträgerpotenzial dar.

### 6.2.1 Potenzialbegriffe

Unterschieden werden kann zwischen den theoretischen, den technischen, den wirtschaftlichen und den erschließbaren Potenzialen. Sie sind wie folgt definiert [KALTSCHMITT et al., 2003]:

Das theoretische Potenzial regenerativer Energien ergibt sich aus dem physikalischen Angebot der erneuerbaren Energiequellen (bei der Bioenergie also sämtliche Phyto- und Zoomassen) und stellt damit eine theoretische Obergrenze des verfügbaren Energieangebots dar.

Wegen grundsätzlich unüberwindbarer technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Schranken kann es zumeist nur zu kleineren Anteilen erschlossen werden und ist deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit des erneuerbaren Energieangebots i. Allg. nicht relevant.

Das technische Potenzial regenerativer Energien beschreibt den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der gegebenen technischen Restriktionen nutzbar ist. Zusätzlich dazu werden i. Allg. strukturelle und ökologische Restriktionen (z. B. Naturschutzgebiete, Flächen für die angestrebte Biotopvernetzung in Deutschland) und gesetzliche Vorgaben (z. B. Zulässigkeit von hygienisch bedenklichen organischen Abfällen für den Einsatz in Biogasanlagen) berücksichtigt, da sie letztlich auch – ähnlich den (ausschließlich) technisch bedingten Eingrenzungen – oft „unüberwindbar“ sind. Im Einzelnen werden bei der Berechnung die verfügbaren Nutzungstechniken, ihre Wirkungsgrade, die Verfügbarkeit von Standorten auch im Hinblick auf konkurrierende Nutzungen sowie „unüberwindbare“ strukturelle, ökologische (z. B. Naturschutzgebiete) und weitere nicht-technische Beschränkungen berücksichtigt. Es kann dabei unterschieden werden hinsichtlich der Bezugsgröße für die Energie in technische Primär- und Endenergiepotenziale; bei der Biomassenutzung wird unter dem technischen Primärenergiepotenzial das technische Brennstoffpotenzial verstanden, d. h. die aus technischer Sicht verfügbar zu machenden Brennstoffmengen (z. B. das technisch gewinnbare und energetisch nutzbare Stroh). Die Endenergiepotenziale umfassen die technischen Strom-, Wärme- und Kraftstoff-Endenergiepotenziale, die aus den technischen Brennstoffpotenzialen erzeugt werden können. Sie werden nachfolgend dargestellt.

Unter dem wirtschaftlichen Potenzial einer Option zur Nutzung regenerativer Energien wird der Anteil des technischen Brennstoff-Potenzials verstanden, der im Kontext der gegebenen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen wirtschaftlich genutzt werden kann. Um die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit des betrachteten regenerativen Energieträgers bzw. -systems beurteilen zu können, sind die innerhalb der jeweiligen Einsatzbereiche konkurrierenden anderen Energiebereitstellungssysteme zu definieren. Das wirtschaftliche Potenzial regenerativer Energien wird damit sowohl von den konventionellen Energiesystemen als auch den Energieträgerpreisen beeinflusst.

Das erschließbare Potenzial beschreibt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag einer Option zur Nutzung regenerativer Energien. Es ist in der Regel zumindest zeitweise geringer als das wirtschaftliche Potenzial, da dieses i. Allg. nicht sofort und vollständig nur sehr langfristig (z. B. wegen be-

<sup>9</sup> Wallhecken

grenzter Herstellkapazitäten oder mangelnder Information) erschließbar ist. Das erschließbare Potenzial kann aber auch größer als das wirtschaftliche Biomassepotenzial sein, wenn beispielsweise die betreffende Option zur Nutzung regenerativer Energien subventioniert wird (z. B. Markteinführungsprogramm).

Für das weitere Vorgehen werden Annahmen bezüglich Mengenumrechnungen von Holz- und Grasschnitt vorgenommen. So entspricht 1 m<sup>3</sup> Grasschnitt (Frischmasse) etwa 125 kg FM und 1 m<sup>3</sup> Gehölzschnitt (Frischmasse) etwa 250 kg FM. Bei diesen Annahmen ist zu berücksichtigen, dass vor allem bei Holz starke Schwankungen bezüglich der Holzarten bestehen und dass es sich bei dem beschriebenen Material nicht um „reines“ Holz, sondern vielmehr um ein Gemisch aus u. a. Kern- und Derbholz sowie Strauchschnitt handelt.

## 6.2.2 Technisches Mengenpotenzial

Das technische Potenzial von Straßenbegleitgrün basiert aufgrund einer angenommenen nachhaltigen Pflege, die in regelmäßigen Zeitabständen einen vorgegebenen Pflegestandard wiederherstellt, auf den Aufwuchsmengen für Gras- und Gehölzschnitt an Straßen.

### 6.2.2.1 Grasschnitt

Die Aufwuchsmenge von Grasschnitt wird zunächst bezogen auf die Fläche ermittelt. Die Umrechnung in spezifische Aufwuchsmengen pro Kilometer Streckenlänge erfolgt über die Pflegeflächen der Straßen- und Autobahnmeistereien (siehe Bild 8).

Demnach ergibt sich für Straßenmeistereien eine Bandbreite der Grasschnittpflegeflächen von 0,6 bis 0,7 ha/km sowie für Autobahnmeistereien von 1,2 bis 2,3 ha/km.

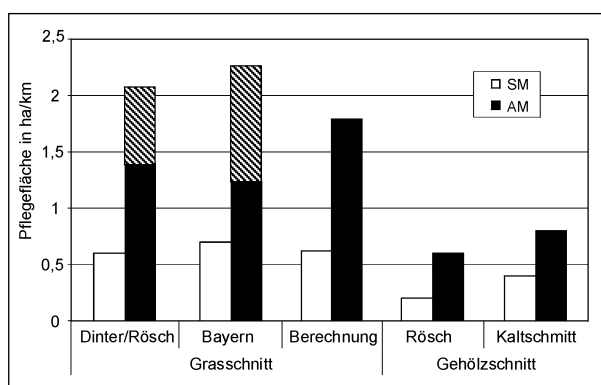
Die Pflegeflächen für Grasschnitt unterscheiden sich, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, in extensive und intensive Flächen. Diese Differenzierung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Potenziale, da bei intensiver Pflege mehr Material anfällt bzw. nachwächst.

In Bild 9 ist die Veränderung der Pflegeintensität für Grasschnitt zwischen 1996 und 2000 dargestellt. Auch wenn hier unterschiedliche Datenquellen zu Unsicherheiten im Ergebnis führen, zeigt sich doch recht deutlich, dass der Anteil der intensiven Pflegeflächen zurückgegangen ist. Dabei sind die eige-

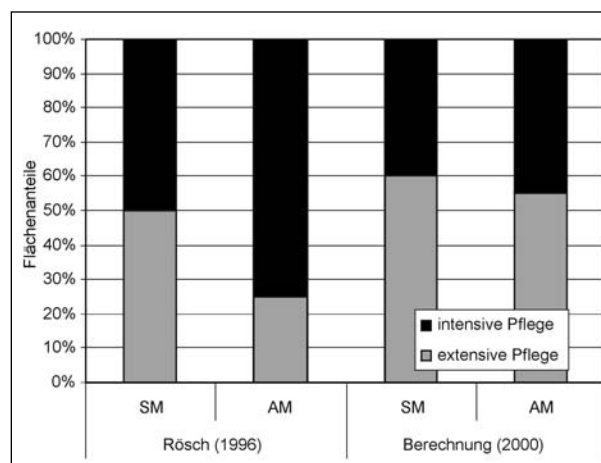
nen Berechnungen als repräsentativ für das gesamte Bundesgebiet anzusehen, wohingegen die Angaben nach [RÖSCH, 1996] nur für Baden-Württemberg charakteristisch sind. Dieser Trend dürfte sich aufgrund ökologischer und ökonomischer Pflegeempfehlungen weiter fortgesetzt haben.

Durch das größere zu betreuende bzw. zu pflegende Streckennetz ergeben sich für die durchschnittlichen Grasflächen in Straßenmeistereien mit 169 ha größere Pflegeflächen als für Autobahnmeistereien mit 113 ha.

Die Berechnung der Grasschnittmenge pro Kilometer Streckenlänge ist abhängig von den Pflegeflächen, der Pflegeintensität und der Aufwuchsmenge. Je nach Pflegeintensität beträgt die jährliche Aufwuchsmenge 8 t FM/ha (extensive Pflege) bzw. 13 t FM/ha (intensive Pflege). Zusammen mit den charakteristischen Pflegeflächen nach Bild 8 und der Pflegeintensität nach Bild 9 ergeben sich für Straßenmeistereien Grasschnittmengen zwischen 6,2 bis 6,3 t FM/km sowie für Autobahnmeistereien zwischen 16,5 bis 24,7 t FM/km [RÖSCH, 1996].



**Bild 8:** Größenordnung der Pflegeflächen für Gras- und Gehölzschnitt von Straßen- und Autobahnmeistereien



**Bild 9:** Veränderung der Pflegeintensität für Grasschnitt

Zur Nutzbarmachung muss die Biomasse zudem geerntet, gesammelt, transportiert und gelagert werden. Zur Bestimmung des technischen Brennstoffpotenzials sind daher auch Ernte- und Lagerverluste zu betrachten. Diese sind abhängig von der Wahl des Mähverfahrens bzw. der Intensität der Gehölzschnittaufnahme. Die Abschätzung der Ernteverluste bei Grasschnitt ist schwierig, weil zum einen Erfahrungen aus der landwirtschaftlichen Futtergrasernte durch die Charakteristik der Pflege- bzw. Ernteflächen nicht auf den Straßenbetriebsdienst übertragen werden können und zum anderen die Ernteverluste auch von den eingesetzten Pflegeverfahren abhängen.

Empfohlen werden zum Erhalt der ökologischen Bedeutung von Straßenrändern eine schwerpunktmäßige, großflächige, extensive Behandlung mit abschnittsweiser Pflege in mehrjährigen Intervallen und nur eine lokal und kleinräumig angewandte intensive Pflege. Weiterhin werden für regelmäßige Mulchschnitte Schnitthöhen empfohlen sowie bei der Aufnahme des Grasschnitts ein mehrtägiges Verbleiben des Materials auf den Schnittflächen [SAYER, 2002; STOTTELE 1994; LAMBERTZ und SCHMIDT, 2003; MEDERAKE et al., 1989, 1992]. Für den Fall der Aufnahme des Materials erfolgt dies in der Praxis unmittelbar nach dem Schneiden, da ansonsten der Aufwand zu hoch wäre.

Für das weitere Vorgehen wird der Ernteverlust pauschal mit 10 % des Grasschnitts abgeschätzt, da neben den Verlusten durch die Erntemethoden und veränderte Schnitthöhen zusätzlich Massenverluste durch ein Liegenlassen des Grasschnitts mit anschließender Aufnahme nach mehreren Tagen berücksichtigt werden müssen. Eine Unterscheidung der einzelnen Pflegeverfahren (wie Saugmäh, Mulchen oder konventionelle Mäh) zur Bestimmung der Ernteverluste ist aufgrund der nicht bekannten jeweiligen Anteile dieser Maßnahmen in der Praxis nicht möglich. Allgemein sollten die Ernteverluste bei der Absaugung des Mähguts geringer sein als bei einer manuellen Aufnahme.

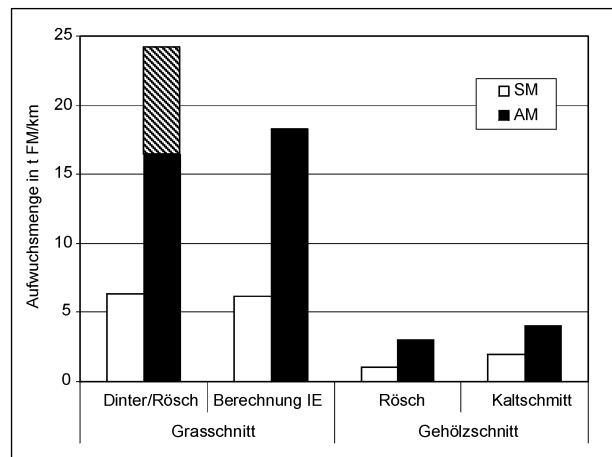
Zusätzliche Verluste treten durch die Silierung des Grasschnitts auf, sodass insgesamt von 15 % Verlusten ausgegangen werden kann. Eine Silierung des Materials ist für die spätere energetische Verwertung notwendig, um eine jahreszeitlich unabhängige Bereitstellung und die Lagerfähigkeit zu gewährleisten.

**6.2.2.2 Gehölzschnitt**

Gegenüber Rasenflächen erfolgt die regelmäßige Pflege von Gehölzflächen in längeren Zeitabständen. Daher und aufgrund des geringen Einflusses intensiver Pflege auf die Aufwuchsraten ist eine Unterteilung in intensive und extensive Bereiche nicht notwendig.

Die durchschnittliche jährliche Aufwuchsmenge von Gehölzschnitt an Straßen beträgt etwa 5 t FM/ha [RÖSCH, 1996; KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001]. Die Umrechnung der potenziellen Gehölzmenge pro Kilometer Streckenlänge erfolgt über die Pflegefläche, welche für Straßenmeistereien eine Bandbreite von 0,2 bis 0,4 ha/km sowie für Autobahnmeistereien von 0,6 bis 0,8 ha/km umfasst (siehe Bild 8). Demnach ergibt dies ein Potenzial von 1 bis 2 t FM/km im Bereich der Straßenmeistereien und 3 bis 4 t FM/km für Autobahnmeistereien (siehe Bild 10).

Im Einzelfall können sehr große Aufwuchsmengen anfallen. So wurden z. B. am Autobahnkreuz Meerbusch auf einer Fläche von 21 ha ca. 4.000 Bäume sowie 11 ha Hecken und Sträucher zurückgeschnitten. Die Bepflanzungen stammen aus den 70er Jahren und sind charakterisiert durch geringe



**Bild 10:** Jährliche Aufwuchsmenge für Gras- und Gehölzschnitt von Autobahn- und Straßenmeistereien

		maximales Potenzial [t FM/a]	technisches Potenzial [t FM/a]
Grasschnitt	SM	1.733	1.473
	AM	1.604	1.363
Gehölzschnitt	SM	550	509
	AM	260	241

**Tab. 15:** Jährliches maximales und technisches Mengenpotenzial an Straßenbegleitgrün

Abstände zwischen den Pflanzungen von z. T. nur 150 cm [mündl. Mitteilung: NRW, 2005b].

Erfahrungen aus dem Einschlag von Holz zeigen, dass in diesem Bereich Ernteverluste in Form von Waldrestholz und Nicht-Derbholz<sup>10</sup> von etwa 7,5 % erwartet werden können [IE, 2004].

Bezogen auf die durchschnittliche Streckenlänge für Straßen- und Autobahnmeistereien (siehe Kapitel 3.1) ergeben sich die in Tabelle 15 dargestellten maximalen und technischen Potenziale für Gehölz- und Grasschnitt. Dabei werden für Grasschnitt die Verluste der Silierung ebenfalls nicht berücksichtigt, da sie nur im Falle einer energetischen Nutzung anfallen würden.

### 6.2.2.3 Bankettschälgut

In der allgemeinen Fachliteratur, bezogen auf GALLENKEMPER, wird die jährliche abgeschälte Menge von überörtlichen Straßen (ausschließlich Gemeindestraßen) der alten Bundesländer auf 1,64 Mio. m<sup>3</sup> geschätzt. Angenommen wurden zehnjährige Schälintervalle beider Fahrbahnseiten mit einer mittleren Tiefe von 7 cm in einer Breite von einem Meter. Weiterhin wurde berücksichtigt, dass sich die Gesamtmenge durch Rinnen, Bordsteine, befestigte Seitenstreifen und Brücken, an denen nicht geschält werden muss, pauschal um ca. 30 Prozent verringert.

Nach eigenen Berechnungen ergibt sich aus den Angaben von GALLENKEMPER [1992], abzüglich der nicht zu schälenden Flächen, eine jährliche anfallende Bankettschälgutmenge von 9,8 m<sup>3</sup> pro Streckenkilometer [GALLENKEMPER et al., 1992].

Bezogen auf das überörtliche Streckennetz des gesamten Bundesgebiets von ca. 231.400 km [STAT, 2005] ergibt dies eine BSG-Menge von 2,27 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr. Schlussfolgernd ergeben sich für eine durchschnittliche Autobahnmeisterei und Straßenmeisterei Schälmenngen von ungefähr 640 m<sup>3</sup> bzw. 2.700 m<sup>3</sup> pro Jahr.

Die Schätzungen der Literatur bzw. die eigenen Berechnungen zeigen eine große Schwankungsbreite, wenn nach GALLENKEMPER [1992] die Einflussgrößen Schälbreite, Schäلتiefe und Schälintervalle geringfügig verändert werden. KOCHER und

WIRTZ [2004] halten bei einer realistischen Variation der Parameter Schwankungen von +/- 50 % für möglich.

Die Angabe der tatsächlich oder in Zukunft zu schälenden Mengen ist aufgrund fehlender Angaben und einer durch die unklare Entsorgungslage in den letzten Jahren reduzierten Schälung nicht möglich. So rechnen KOCHER und WIRTZ [2004] in den nächsten Jahren mit höheren Schälmenngen, um den aktuellen Rückstau zu beseitigen.

## 6.2.3 Erschließbare Potenziale

Als erschließbare Potenziale können die Stoffströme angenommen werden, die aufgrund der in Kapitel 3.2 beschriebenen Gründe für die Entsorgung an einem anderen Ort aufgenommen, gesammelt und transportiert werden.

Die Abschätzung dieser aufgenommenen und abtransportierten Mengen erfolgt auf der Basis von Literaturangaben [RÖSCH, 1996] und Erfahrungswerten aus den Bundesländern Bayern [Bayern, 1997], Nordrhein-Westfalen [STRABEN NRW, 2004] und Brandenburg [BRA, 2005] sowie Angaben aus der IE-Umfrage [IE, 2005]. Zusammenfassend ergeben sich die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Potenziale für die verschiedenen Fraktionen.

### 6.2.3.1 Grasschnitt

Bei Grasschnitt hängt der abtransportierte Anteil des anfallenden Materials von der Pflegeintensität ab. Nach Literaturangaben werden bei intensiver Pflege durchschnittlich drei Viertel und bei extensiver Pflege durchschnittlich ein Viertel des Mähauflkommens abtransportiert [RÖSCH, 1996].

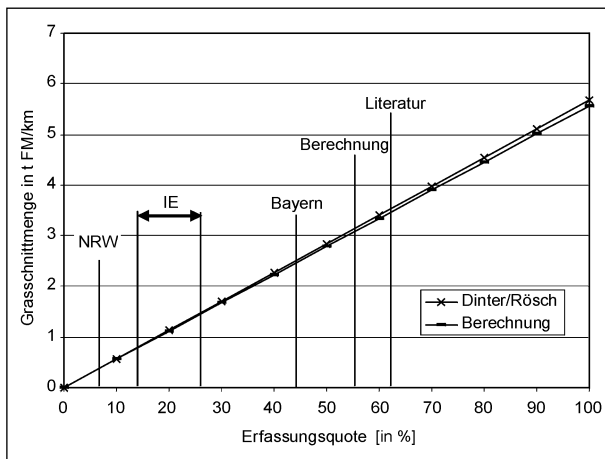
Die Art der Pflege im Straßenbetriebsdienst hat sich in den letzten Jahren gewandelt. So hat die extensive Pflege (siehe Bild 9) zugenommen und dementsprechend sind die abtransportierten Mengen zurückgegangen. Zur Einschätzung der heutigen, in der Praxis angewendeten Erfassungsquoten werden diese zusammen mit den Literaturdaten und bezogen auf die technischen Potenziale in Bild 11 für Straßenmeistereien und in Bild 12 für Autobahnmeistereien dargestellt. Dabei entsprechen 100 % dem gesamten technischen Potenzial an Grasschnitt, allerdings ohne die Silierungsverluste zu berücksichtigen, da diese erst im Falle der energetischen Verwertung auftreten würden.

<sup>10</sup> Derbholz: Holz mit einem Stammdurchmesser über 7 cm

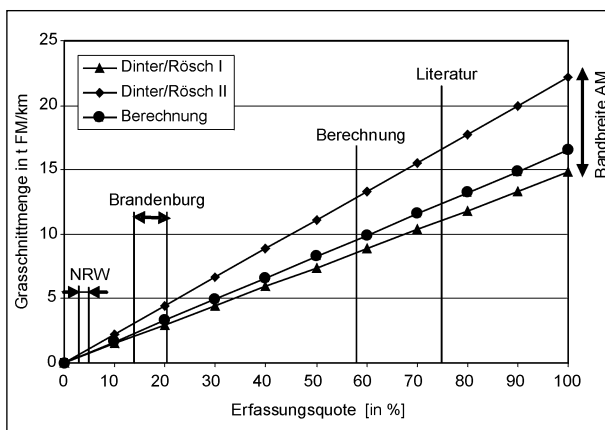
Wie beschrieben, zeigt Bild 11 einen deutlichen Unterschied zwischen den Erfassungsquoten der Literatur und denen der Praxis. So liegen die Angaben der Meistereien für NRW unter 10 % und für die befragten Meistereien um die 20 % des technischen Potenzials. Zurückzuführen ist die Bandbreite der vom IE befragten Meistereien u. a. auf die länderübergreifenden Datengrundlage.

Vergleichbar mit den Literaturangaben sind lediglich die Angaben aus Bayern. Auch wenn diese Daten aus dem Jahr 1997 stammen, hat sich die Größenordnung der abtransportierten Mengen zumindest bis 2002 nicht gravierend geändert [HACKL, 2002]. Nach Angaben aus dem Jahr 2002 erfolgt die Entsorgung weiterhin hauptsächlich über die Kompostierung.

Die Erfassungsquote von Grasschnittmengen bei Autobahnmeistereien – in Bild 12 dargestellt – ist vergleichbar mit der von Straßenmeistereien. Einziger Unterschied ist, dass in den Literaturdaten pro-



**Bild 11:** Darstellung der Erfassungsquote technischer Grasschnittmengen – Potenziale für Autobahnmeistereien



**Bild 12:** Darstellung der Erfassungsquote technischer Grasschnittmengen – Potenziale für Autobahnmeistereien

zentual größere Mengen für den Abtransport abgeschätzt werden und sich für die Praxisdaten, dazu entgegengesetzt, geringere Mengen ergeben.

Weiterhin zeigt sich für Grasschnittmengen von Autobahnmeistereien eine deutlich größere Bandbreite als für Straßenmeistereien. Aufgrund fehlender aussagekräftiger Angaben in der IE-Umfrage können für Autobahnmeistereien keine aktuellen Erfassungsquoten angegeben werden.

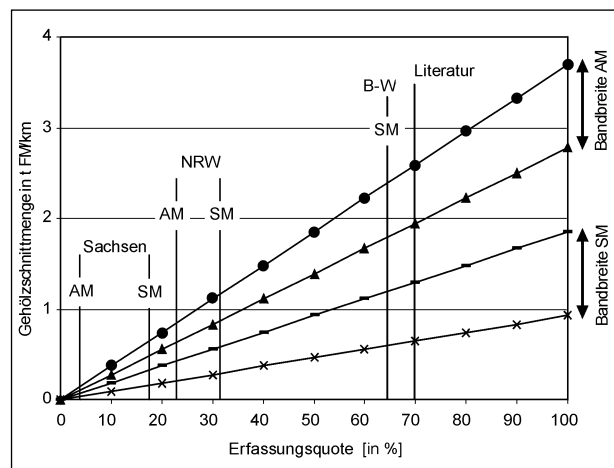
**6.2.3.2 Gehölzschnitt**

Für Gehölzschnitt werden die abtransportierten Mengen mit durchschnittlich 70 % angegeben [RÖSCH, 1996]; KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001]. Auch hier wird durch einen verstärkt kostenorientierten Pflegebetrieb das Material verstärkt gehackt und vor Ort belassen. Dies führt zu einer Reduzierung der Mengen, die abtransportiert werden müssen.

In Bild 13 sind die in der Literatur angenommene Erfassungsquote sowie Angaben verschiedener Bundesländer [STRABEN NRW, 2005; IE 2005] zu abtransportierten Gehölzschnittmengen, bezogen auf das technische Potenzial, dargestellt.

Es zeigen sich deutlich unterschiedliche Erfassungsquoten für Autobahn- und Straßenmeistereien. In der Regel wird von Autobahnmeistereien prozentual weniger Material abtransportiert als von Straßenmeistereien, obwohl diese pro Kilometer Streckenlänge ein größeres technisches Potenzial besitzen.

Auch zwischen den einzelnen Bundesländern zeigen sich deutliche Unterschiede in der Größenord-



**Bild 13:** Darstellung der Erfassungsquote technischer Gehölzschnittmengen – Potenziale für Straßen- und Autobahnmeistereien

nung der abtransportierten Mengen. Annähernd die Literaturdaten werden von Straßenmeistereien in Baden-Württemberg erzielt, die sich jedoch aus nur sieben Meistereien ergeben und somit als nicht repräsentativ angesehen werden können.

Die in Bild 13 dargestellten Erfassungsquoten für NRW stimmen ungefähr mit den Abschätzungen des Landesbetriebs überein, der von ca. 20 % abtransportiertem Material ausgeht [STRABEN NRW, 2005]. Die Erfassungsquote der Straßenmeistereien aus Mecklenburg-Vorpommern ist in Bild 13 nicht extra dargestellt, da sie in etwa deckungsgleich mit den Ergebnissen aus NRW ist.

Die abtransportierten Gehölzschnittmengen aus Schleswig-Holstein [IE, 2005] mit durchschnittlich 2,3 t FM/km für Straßenmeistereien und mit 4,15 t FM/km für Autobahnmeistereien liegen deutlich über den maximalen technischen Potenzialen. Vermutlich lassen sich diese Zahlen aber auf die für Schleswig-Holstein charakteristischen „Knicks“ (Wallhecken) zurückführen, die bei der Abschätzung des technischen Potenzials nicht quantifiziert werden konnten. Sie bedürfen zum Freihalten der Sichtachsen an Straßen einer ständigen Pflege (siehe Kapitel 6.1).

Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine breite Streuung, sodass die Ermittlung von durchschnittlichen Gehölzschnittmengen bzw. Erfassungsquoten für Straßen- und Autobahnmeistereien schwierig ist. Anhand der Ergebnisse und nach mündlicher Mitteilung [NRW, 2005a] werden für weitere Betrachtungen 20 % Erfassungs- bzw. Abtransportquote für Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst angenommen.

### 6.2.3.3 Bankettschälgut

Für Bankettschälgut liegen nur Abschätzungen bezüglich des Mengenaufkommens vor. Wie viel davon jährlich wirklich geschält und abtransportiert, also einer energetischen Verwertung zur Verfügung gestellt wird, kann nicht festgestellt werden.

## 6.3 Logistik und Entsorgung

Im vorherigen Abschnitt wurden die potenziellen Biomasse-mengen, die bei der Straßenpflege anfallen, beschrieben. Zur Einordnung dieser Angaben im Straßenbetriebsdienst werden im Folgenden die logistischen Strukturen sowie die Entsorgungsarten und -wege typischer Meistereien dargestellt.

### 6.3.1 Grasschnitt

Die Entsorgung von Grasschnitt erfolgt hauptsächlich über den Verbleib des gemulchten Materials vor Ort (vgl. Kapitel 3.2.1). Das Mulchen ist die wirtschaftlichste Art der Grasbeseitigung, da dadurch keine Kosten für die Entsorgung und den Transport des Materials anfallen [MK 6c, 1981].

In Bild 14 ist der Anteil von Grasschnitt, der gemulcht bzw. geschlegelt wird und vor Ort verbleibt, für die verschiedenen Datenquellen dargestellt. Die restlichen Mengen werden abtransportiert und anderweitig verwertet.

- Für Bayern kann, ausgehend von einem Gehölzschnittanteil von 10-30 % (vgl. Kapitel 6.1), die gemulcht und liegen gelassene Grasschnittmenge mit ungefähr 52 % der gesamten anfallenden Menge abgeschätzt werden.
- Demgegenüber wird nach Angaben des Landesbetriebs Straßenwesen Brandenburg in nur einer von 12 brandenburgischen Autobahnmeistereien der Grasschnitt gemulcht.
- In der IE-Umfrage machten 67 Meistereien (von insgesamt 82) Angaben zur Entsorgung von Grasschnitt. Von diesen gaben 49 Meistereien (ungefähr 73 %) an, dass sie die Biomasse gemulcht vor Ort belassen, wohingegen 18 einen Abtransport vorsahen.
- Wiederum ungefähr 51 % der Meistereien gaben nach der Erhebung der TU Darmstadt [TUD, 2003] an, dass sie den Grasschnitt ausschließlich mulchen und somit keine Entsorgung vornehmen. Zusätzlich wird in ungefähr 31 % der Meistereien der Grasschnitt eigenständig oder über Fremdfirmen kompostiert. In-

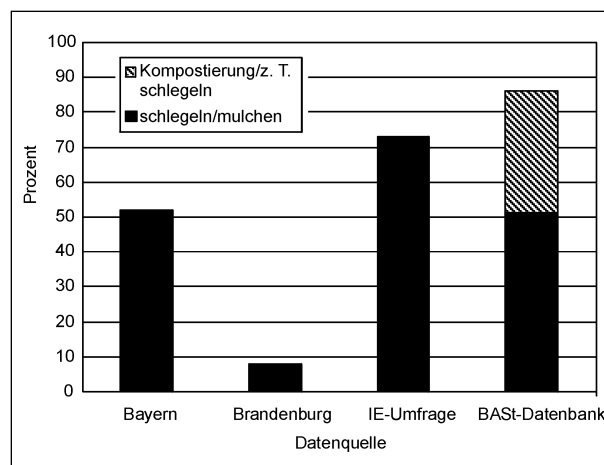


Bild 14: Anteil verschiedener Entsorgungswege für Grasschnitt



wieweit die kompostierenden Meistereien ihren Grasschnitt mulchen und vor Ort belassen war nicht auswertbar, da unter dem Mulchen auch eine direkte Flächenkompostierung vor Ort verstanden werden kann.

### 6.3.2 Gehölzschnitt

Die Entsorgung von Gehölzschnitt erfolgt hauptsächlich durch den Verbleib des Materials vor Ort. Ist dies nicht möglich, muss das anfallende Material eingesammelt und abtransportiert werden. Dies geschieht beim Großteil der Meistereien durch das Einblasen der Hackschnitzel aus dem Hacker in Ladewagen. Es entfallen also Arbeitsvorgänge, die bei einer manuellen Verladung notwendig wären. Die nachfolgende Entsorgung geschieht über Zwischenlager und Deponien, wo entsprechende Lager- und Entsorgungskosten anfallen. Eine Gefahr beim Verbleib des Mulchmaterials im Straßenbereich ist die Ausbreitung von Pilzkrankheiten, die den noch vorhandenen Bestand angreifen können [DINTER und MORITZ, 1987].

Die verschiedenen Entsorgungspfade der Meistereien werden in Bild 15 auf Grundlage der BAST-Datenbank und der IE-Umfrage dargestellt. Mehrfachnennungen waren möglich.

- Von 730 in der BAST-Datenbank erfassten Meistereien geben 621 (85 %) an, dass sie Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst häckseln und in den Straßenrandbereich verblasen (siehe Häckseln in Bild 15). In der Erfassung waren Mehrfachnennungen wie eigene oder Fremd-kompostierung sowie die Verbrennung des Materials möglich. Insgesamt rund 40 % der Meistereien nannten mehrere Arten der Entsorgung. Ausschließlich gehackt und verblasen wird von ungefähr 36 % der Meistereien. Weitere 17 % der Meistereien gaben neben „häckseln“ und „einblasen in den Straßenrandbereich“ bei den vorgegebenen Entsorgungswegen unter „sonstiges“ weitere Entsorgungsarten für Hackgut an. Einige davon sind z. B. die Entsorgung und der Übergang des Materials an Fremdunternehmen, die Abgabe an Privatpersonen oder Land- und Forstwirte zur thermischen Verwertung, die Zwischenlagerung und Abfuhr auf Häckselplätze des Landkreises, die Verbrennung, die Kompostierung oder das Mischen mit Bankettschälgut und das Andecken bei Neupflanzungen oder speziellen Grünflächen. Unter den weiteren vorgegebenen Entsorgungspfaden entfielen auf die eigene Kompostierung ungefähr

15 %, auf die Kompostierung durch Fremdunternehmen ungefähr 28 % und auf die Verbrennung des Materials ungefähr 8 % (u. a. erfolgt die Verbrennung in Müllkraftwerken).

- Bei der IE-Umfrage gaben rund 50 % der Meistereien an, das Häckselgut in den Randstreifen zu verblasen, wobei 11 % diese Methode ausschließlich anwenden. Der abtransportierte Gehölzschnitt wird bei einem Drittel der Meistereien hauptsächlich auf Lagerplätzen der Meistereien gesammelt, gehackt und für die Kompostierung oder bei Neupflanzungen wiederverwertet. Bei den Gehölzpflegemaßnahmen kommen bei ungefähr 33 % der Meistereien Fremdunternehmen zum Einsatz, in deren Eigentum der Gehölzschnitt übergeht und somit nicht durch die Meisterei entsorgt wird. Ein Teil des anfallenden Materials wird kostenlos an Privatpersonen oder an die eigenen Mitarbeiter abgegeben. Nur wenige Meistereien verbringen einen Teil des Pflegeholzes auf Deponien.

Nach Angaben des Landesbetriebs NRW kann der Gehölzschnitt teilweise auch kostenlos entsorgt werden, z. B. im Braunkohletagebau zur Abdeckung von Abraumhalden. Diese Meistereien sind jedoch in Bild 15 nicht berücksichtigt. Weitere

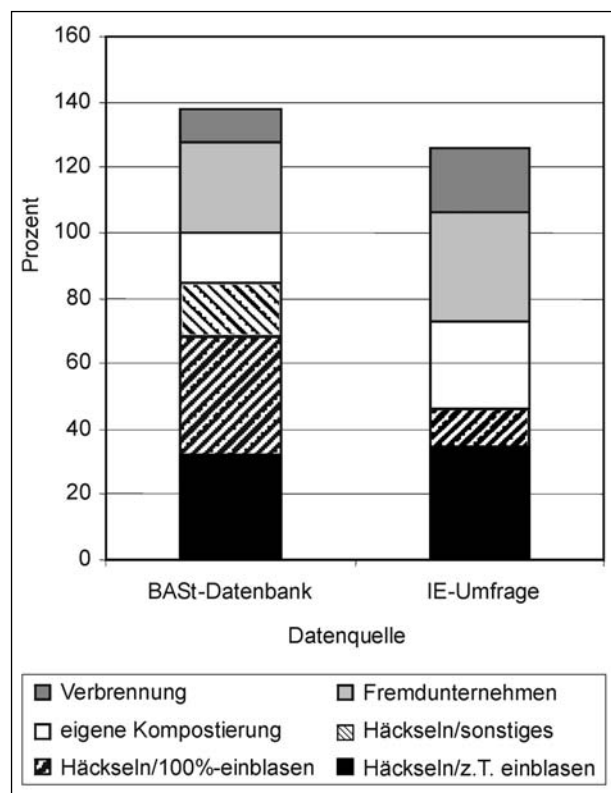


Bild 15: Verteilung der Entsorgungspfade von Gehölzschnitt

Entsorgungsarten für Hackschnitzel, die durch Meistereien angegeben wurden, sind

- der Einsatz der Hackschnitzel als Mulchmaterial bei Neupflanzungen,
- Abgabe als Heizmaterial an Gartenbaubetriebe und
- Verwendung anstelle von Platten oder Pflastersteinen, z. B. auf Zugängen zu Notrufsäulen und auf Park- und Rastplätzen.

Loses Astwerk wird nach Angaben der Meistereien entweder in angrenzende Waldstücke gefahren, wo es der Humusanreicherung der Waldböden dient, oder auf Lagerfeuerplätzen direkt verbrannt [DIN-TER und MORITZ, 1987].

### 6.3.3 Bankettschälgut

Der gesetzliche Status von Bankettschälgut ist nach heutiger Rechtslage nicht eindeutig geklärt. In der Fachliteratur [DURTH-SACHS, 1999] ist die bisherige Entsorgung bzw. der Umgang mit Bankettschälgut tiefgehend diskutiert worden.

Seit dem 1. Juni 2005 ist die TA Siedlungsabfall [TASi, 1993] in Kraft getreten. Für die dadurch veränderte Entsorgungspraxis liegen bis heute noch keine ausreichenden Erfahrungen vor.

## 6.4 Energiebedarf der Meistereien

### 6.4.1 Wärmebedarf

Neben der Verfügbarkeit des Brennstoffes Straßenbegleitgrün ist für die energetische Nutzung die Situation der Energienachfrage am Standort der Meisterei entscheidend. Sie wird nachfolgend dargestellt. Dazu werden verschiedene Quellen (mündl. Mitteilung BAST, 2005; IE, 2005; Angaben zu den einzelnen Ländern fehlen) zur Abschätzung des Energieverbrauchs und damit der notwendigen Kesselleistung in den Meistereien ausgewertet. Die Kesselleistung ist Grundlage für die Ermittlung der benötigten Brennstoffmengen, die Aufschluss über die Möglichkeiten einer unabhängigen Versorgung durch die Nutzung von Straßenbegleitgrün geben.

### Wärmebedarfsrechnung

Das Ministerium für Wohnungswesen, Städtebau und Verkehr Sachsen-Anhalt hat eine Richtlinie bzw. einen Maßnahmenkatalog (MK 11 Straßenunterhaltung und Betrieb) für Meistereien erarbeitet,

der Planungs- und Gestaltungsgrundsätze festlegt [MK 11, 1997]. In diesem Maßnahmenkatalog sind durchschnittliche Flächen angegeben, die einzelne Bereiche einer Meisterei beschreiben. Eine typische Meisterei wird nach MK 11 unterteilt in Verwaltung, Straßenunterhaltungsdienst, Betriebsräume, Lkw-Stände, Werkstattbereich, Kleinfahrzeug-Stände und Gerätelager. Die jeweiligen Bereiche sind durch gemittelte Flächen angegeben, die als Grundlage für die Wärmebedarfsrechnung genutzt werden. Als Hilfsmittel für die Berechnung dient ein Programm der Firma Heylo, das auf deren Internetseite<sup>11</sup> zugänglich ist.

Inputdaten für den Algorithmus waren die geometrischen Abmessungen der Räume und Hallen, die aus dem MK 11 entnommen wurden. Des Weiteren wurden folgende Werte zu Grunde gelegt: Die Raumtemperatur im Verwaltungsgebäude liegt bei 18-20 °C, die in den Hallen und Werkstattbereichen bei 5-10 °C. Die Außentemperatur wurde für mitteleuropäische Verhältnisse mit -8 °C festgelegt. Der k-Wert, welcher den Isolierzustand eines Gebäudes angibt, wurde mit 0,6-1,0 (gut bis normal isolierte Gebäude) angenommen. Die Berücksichtigung des Luftwechsels spielt eine große Rolle bei der Auslegung der Lkw- und Werkstatthallen und wurde mit 1-3 angenommen. Danach ergibt sich eine erforderliche Heizleistung von rund 204 kW (vgl. Anhang D).

### IE-Umfrage

Eine weitere Quelle für die Ermittlung der installierten Heizungsanlagenleistung in Meistereien ergibt sich aus dem IE-Fragebogen (siehe Kapitel 6.1). Von den insgesamt 105 Fragebögen konnten 69 in die Auswertung mit einbezogen werden, die vollständige und realistische Angaben enthielten. Die daraus ermittelten durchschnittlichen Werte ergeben eine durchschnittliche installierte Leistung von 160 kW.

Beachtet werden muss dabei, dass die IE-Umfrage – anders als die BAST-eigene Untersuchung [BAST, 2005] – hauptsächlich Straßenmeistereien aus drei Bundesländern berücksichtigt. Hierbei beträgt die minimale installierte Leistung 13, die maximale Leistung 430 kW. Diese Spannweite zeigt, dass die Größe der Meistereien sehr stark variiert.

<sup>11</sup> [www.heylo.de](http://www.heylo.de)

Mit etwa 62 % sind Gaszentralheizungen die am häufigsten installierten Kesselanlagen. Knapp 30 % der Meistereien werden durch Ölzentralheizungen beheizt. Die restlichen 8 % verteilen sich auf verschiedene Anlagensysteme, wie kombinierte Öl- und Gaskessel, Fernwärme, Flüssiggas und Wärmeerzeugungsanlagen durch Strom.

Aus der durchschnittlichen Anlagen-Leistung von 160 kW und dem durchschnittlichen Wärmebedarf von 200.000 kWh/a errechnet sich eine jährliche Volllaststundenzahl von 1.370 Stunden.

### BAST-Angaben

Um den Energiebedarf am Standort der Meistereien zu bestimmen, wurden von der BAST 35 zufällig ausgewählte Autobahnmeistereien befragt [BAST, 2005]. Es ergab sich ein Rücklauf von 27 Fragebögen, die zur Auswertung bereitstanden. Dies entspricht einem Anteil von 15 % aller bundesweiten Autobahnmeistereien (182). Die installierten Heizungssysteme ergaben folgende Unterteilung: 12 Ölzentralheizungen, 13 Gaszentralheizungen, eine Kombination aus Öl und Gas und eine Fernwärmanlage. Eine Biomasseanlage war in keiner der untersuchten Meistereien installiert.

Die durchschnittliche Kesselleistung beträgt 250 kW, wobei Anlagendimensionierungen von 85 bis 550 kW vorhanden sind. Das durchschnittliche Alter der Anlagen beträgt 11 Jahre. Als grobe Richtlinie kann der gemittelte Energiebedarf von 330.000 kWh/a angesehen werden [BAST, 2005]. Aus der durchschnittlichen Anlagen-Leistung und dem Wärmebedarf errechnet sich eine jährliche Volllaststundenzahl von 1.320 Stunden.

### Zusammenfassung

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse des Wärmebedarfs für durchschnittliche Meistereien zusammengefasst. Demnach beträgt die Heizungsanlagen-Leistung zwischen 160 und 250 kW, wobei nach eigenen Berechnungen 204 kW notwendig sind. Fer-

	n (Anzahl der Meistereien)	kW	kWh	Volllaststundenzahl
BAST	27	250	330.000	1.320
IE-Umfrage	69	160	200.000	1.370
Berechnung		204	Ø 285.600	Ø 1.400

Tab. 16: Zusammenfassung des durchschnittlichen Wärmebedarfs von Meistereien

ner ergeben sich zwischen 200 und 330 MWh Wärmebedarf sowie eine daraus berechnete Volllaststundenzahl zwischen 1.250 und 1.320 Stunden im Jahr.

### 6.4.2 Strombedarf

Zur Abschätzung des durchschnittlichen Strombedarfs von Meistereien liegen ausschließlich Daten des BAST-Fragebogens vor, der eine Bedarfsmenge von 72 MWh im Jahr ermittelt.

## 7 Analyse der Systemtechnik

Biomasse kann in unterschiedlichen Konzepten und Verfahren in Strom, Wärme oder Kraftstoff umgewandelt werden. Diese verschiedenen Wandlungsmöglichkeiten werden nachfolgend zunächst überblicksartig dargestellt, um in einem zweiten Schritt die für die Straßenmeistereien interessanten technischen Optionen vertiefend zu betrachten und Anwendungsbereiche sowie Vor- und Nachteile unterschiedlicher Anlagensysteme darzustellen.

### 7.1 Konversionsverfahren

Biomasse wird i. Allg. unterteilt in Energiepflanzen, Ernterückstände, organische Nebenprodukte und organische Abfälle. Unter Ersteren werden ausschließlich zur Energiegewinnung angebaute Pflanzen verstanden (z. B. Kurzumtriebspappeln, Chinaschilf). Ernterückstände fallen bei der land- und forstwirtschaftlichen Produktion in Koppelproduktion (z. B. Stroh, Waldrestholz) und organische Nebenprodukte bei der Weiterverarbeitung land- und forstwirtschaftlicher Produkte an (z. B. Gülle, Kappholz, Sägespäne). Organische Abfälle bezeichnet Abfälle organischer Herkunft wie z. B. Klärschlamm.

Diese Biomassen müssen für eine energetische Nutzung zunächst verfügbar gemacht werden (Bild 16). In den allermeisten Fällen ist dazu ein Ernte-, Sammel- und/oder Bereitstellungsprozess und im Regelfall zusätzlich ein Transportprozess notwendig. In vielen Fällen muss die Biomasse zusätzlich, bevor sie energetisch genutzt werden kann, mechanisch aufbereitet werden (u. a. Zerkleinerung, Verdichtung). Oft wird auch eine Lagerung realisiert, um einen Ausgleich zwischen Biomasseanfall und Energienachfrage zu ermöglichen.

Anschließend kann die Biomasse zur Wärme- und/oder Strombereitstellung bzw. zur Bereitstel-

lung von Kraftstoffen genutzt werden. Dazu ist sie in einen entsprechenden festen, flüssigen und/oder gasförmigen Energieträger zu überführen, der dann unter Energiefreisetzung oxidiert werden kann. Diese Bereitstellung der Bioenergieträger kann realisiert werden durch eine einfache mechanische Aufbereitung (z. B. von biogenen Festbrennstoffen als Hackschnitzel oder Pellets) und/oder durch eine aufwändige thermo-, physikalisch- bzw. bio-chemische Umwandlung. Bei letzteren werden durch entsprechende Veredelungsprozesse die Eigenschaften der Bioenergieträger hinsichtlich z. B. der Energiedichte, der Handhabung, der Speicher- und Transporteigenschaften, der Umweltverträglichkeit der energetischen Nutzung und/oder des Potenzials zur Substitution fossiler Energieträger verändert. Diese Bioenergieträger können dann durch eine Verbrennung in entsprechenden Anlagen in die letztlich gewollte Wärme und/oder den gewünschten Strom bzw. in Kraft (z. B. für den Traktionsbereich) überführt werden (Bild 16).

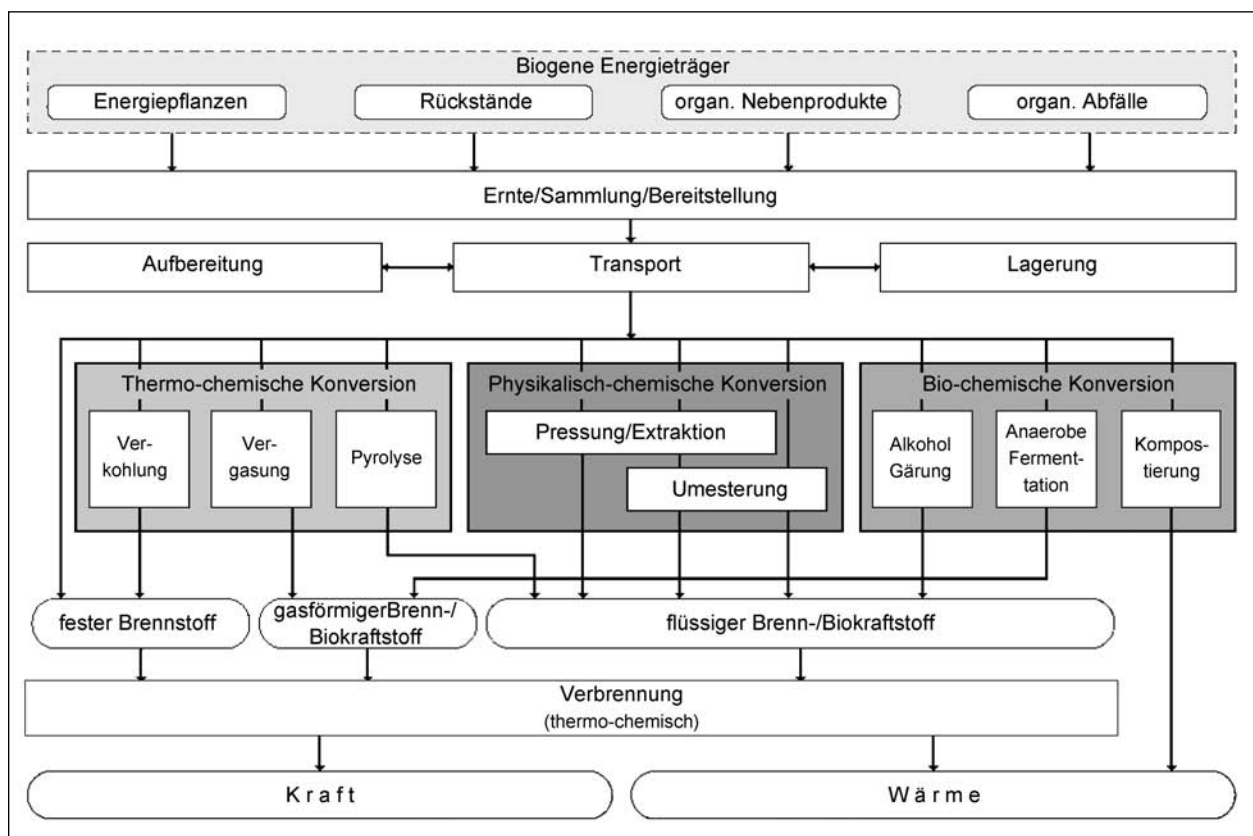
Da die thermo-, physikalisch- und bio-chemische Veredelung sinnvollerweise nicht unabhängig von der nachfolgenden Verbrennung der dadurch bereitgestellten Sekundärenergieträger betrachtet werden kann, werden nachfolgend die verschiedenen Ver-

edelungsverfahren jeweils einschließlich der nachfolgenden Umwandlung in End- bzw. Nutzenergie diskutiert. Unabhängig davon kann der biogene Festbrennstoff auch direkt – nach einer vergleichsweise einfachen mechanischen Aufbereitung – durch eine Verbrennung genutzt werden; dies ist einer der „klassischen“ Anwendungsfälle der energetischen Biomassenutzung. Diese verschiedenen Optionen werden nachfolgend dargestellt.

### 7.1.1 Thermo-chemische Umwandlung

Bei den thermo-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung der Biomasse primär unter dem Einfluss von Wärme, durch die aus biogenen Festbrennstoffen gasförmige, flüssige und/oder feste Sekundärenergieträger hergestellt werden können. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Vergasung, der Verkohlung und der Pyrolyse (Bild 16).

Bei der klassischen Verbrennung fester Biomasse in entsprechenden Feuerungsanlagen wird i. Allg. unterschieden zwischen dem Einsatz in Kleinst-, Klein- und Großanlagen zur Wärme- und/oder Strombereitstellung. Dabei ist die Wärmebereitstellung in allen Leistungsbereichen seit Jahrzehnten



**Bild 16:** Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse zu End-/Nutzenergiebereitstellung

im praktischen Einsatz. Die ausschließliche und/oder gekoppelte Stromerzeugung in Anlagen im MW-Bereich über konventionelle Dampfprozesse (Turbine) ist ebenfalls gängig und hat in Deutschland infolge des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) erheblich an Bedeutung gewonnen. Demgegenüber ist die Stromerzeugung im kW-Bereich mit hohen Stromwirkungsgraden bisher kaum technisch darstellbar; alle derzeit diskutierten Optionen zeigen mehr oder weniger starke technische (und ökonomische) Defizite. Daraus resultieren folgende Perspektiven für eine direkte Verbrennung biogener Festbrennstoffe:

- Wärme wird auch weiterhin durch Feuerungsanlagen aller Leistungsbereiche bereitgestellt werden; dies manifestiert sich auch durch die deutliche Aufwärts-Entwicklung auf dem Pelletmarkt.
- Eine Stromerzeugung in Anlagen der MW-Klasse wird weiter an Bedeutung gewinnen; durch die infolge des EEG veränderten energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die dadurch entstandenen Märkte wird auch die Anlagentechnik (und damit die Wirkungsgrade) zukünftig moderat verbessert werden.
- Eine Stromerzeugung im kW-Bereich besitzt aufgrund des dezentralen Biomasseanfalls hohe Potenziale, die aber bisher mangels verfügbarer Technik kaum erschlossen werden können; auch ist hier bisher kein signifikanter technischer Durchbruch erkennbar.

### 7.1.2 Physikalisch-chemische Umwandlung

Die Gewinnung von Pflanzenöl beispielsweise aus Raps- oder Sonnenblumensaat erfolgt durch Pressung und/oder Extraktion des in den organischen Stoffen enthaltenen Öls. Beim Pressen der ölhaltigen Biomasse (d. h. der Saat) wird die flüssige Ölphase mechanisch von der festen Phase, dem so genannten Presskuchen, getrennt. Bei der Extraktion dagegen wird der ölhaltigen Saat der Ölinhalt mit Hilfe eines Lösemittels entzogen; als Feststoff bleibt das so genannte Extraktionsschrot zurück. Hierdurch können im Vergleich zur Pressung deutlich niedrigere Restölgehalte erzielt werden. Daher wird insbesondere bei der für Deutschland wichtigsten Ölsaart, dem Raps, häufig auch eine Kombination aus Pressung und (nachgeschalteter) Extraktion gewählt. Dieses Pflanzenöl kann grundsätzlich in Reinform in Motoren und Heiz- bzw. Heizkraftwerken (d. h. BHKW) als Brennstoff energetisch

eingesetzt werden; problematisch ist jedoch die nur eingeschränkte Verfügbarkeit von pflanzenöltauglichen Motoren.

Durch einen nachfolgenden chemischen Umwandlungsprozess, der Umesterung, kann das gewonnene Pflanzenöl u. a. hinsichtlich Viskosität, Dichte und Zündwilligkeit an die Eigenschaften von konventionellem Dieseldieselkraftstoff angepasst werden. Der in Deutschland bekannteste Pflanzenölester ist Rapsölmethylester (RME). Er wird durch Umesterung von Rapsöl mit Methanol produziert und kann – bei einer entsprechenden Freigabe der Motorenhersteller – als Dieselerersatz genutzt werden. Alternativ ist auch ein Einsatz in Blockheizkraftwerken zur gekoppelten Wärme- und Strombereitstellung möglich. Dies ist Stand der Technik. Ausgehend davon können aus gegenwärtiger Sicht für die Pflanzenöl- bzw. RME-Gewinnung und Nutzung folgende Perspektiven abgeleitet werden:

- Pflanzenöl als Brenn- und Treibstoff für Motoren wird – infolge der nur eingeschränkt vorhandenen Technik und der in Deutschland relativ geringen vorhandenen Potenziale – auch zukünftig nur Nischenanwendungen finden.
- RME und andere Methylester werden ihre Marktpräsenz in den nächsten Jahren ausdehnen, zumal die vorhandenen Märkte infolge der einfachen Substitution von konventionellem Dieseldieselkraftstoff – und der für viele marktgängige Motoren vorliegenden Herstellerfreigabe – gewaltig sind. Aufgrund des durch die Anbaumöglichkeiten in Deutschland beschränkten technischen Potenzials und der grundsätzlich sehr hohen Kosten können aber auch derartige Treibstoffe immer nur einen relativ kleinen Beitrag zur Deckung der Nachfrage insbesondere im Verkehrssektor leisten, auch wenn zukünftig vermehrt Pflanzenöle importiert werden sollten.

### 7.1.3 Bio-chemische Umwandlung

Bei den bio-chemischen Veredelungsverfahren erfolgt die Umwandlung von Biomasse in einfacher nutzbare Sekundärenergieträger mit Hilfe von Mikroorganismen.

Beim anaeroben Abbau organischer Stoffe, d. h. dem Abbau unter Sauerstoffabschluss, entsteht in entsprechenden Reaktoren ein wasserdampfgesättigtes Mischgas (Biogas), das zu 55 bis 70 % aus Methan besteht. Es kann – gegebenenfalls nach einer entsprechenden Reinigung – in Motoren

zur Wärme-, Strom- und Kraftbereitstellung genutzt werden. Anlagen zur anaeroben Fermentation sind beispielsweise bei der Klärschlammstabilisation Stand der Technik; jede Kläranlage mit biologischer Klärstufe verfügt i. Allg. über eine Biogasanlage, deren Gas in einem Gasmotor oder einem Blockheizkraftwerk (BHKW) genutzt wird. Auch für die Vergärung von Gülle – gegebenenfalls in Kofermentation mit anderen organischen Abfällen (z. B. Speiseöl) – und die anschließende Gasnutzung in Motoren mit gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Anlagen – primär infolge des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) – errichtet. Dabei können die Gaserzeugung und -nutzung aus Gülle als am Markt verfügbar angesehen werden. Ausgehend davon können für die Biogas-Gewinnung und -Nutzung aus gegenwärtiger Sicht folgende Perspektiven abgeleitet werden:

- Aufgrund des EEG werden eine Biogasgewinnung und -Nutzung in den nächsten Jahren erheblich an Bedeutung gewinnen; dies gilt primär für den landwirtschaftlichen Bereich.
- Die vorhandene Technik insbesondere für den landwirtschaftlichen Bereich muss weiterentwickelt, kostengünstiger und insbesondere betriebssicherer gestaltet werden; erste derartige Entwicklungen sind bereits erkennbar.
- Der Einsatz von Biogas im Traktionsbereich könnte an Bedeutung gewinnen; dafür sind die technischen Voraussetzungen zu erarbeiten.
- Die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz erscheint unter energetischen Aspekten als potenziell viel versprechend. Wegen der technisch aufwändigen Aufbereitung und der oft schwer zu realisierende Netzanbindung ist – vor dem

Hintergrund der vorhandenen energiewirtschaftlichen Randbedingungen – zu erwarten, dass diese Option in den kommenden Jahren in erster Linie für Nischenanwendungen an Bedeutung gewinnen wird.

#### 7.1.4 Technische Optionen für Meistereien

Betrachtet man die verfügbaren Technologien und die in Straßenmeistereien anfallenden Biomassen, lassen sich für eine betriebsinterne Verwertung der Biomassen aus der Straßenpflege folgende Optionen ableiten:

- Bereitstellung von Wärme durch direkte Verbrennung holzartiger Biomassen und
- Bereitstellung von Wärme und/oder Strom durch bio-chemische Umwandlung (Vergärung) der nicht-holzhaltigen Biomassen.

Da diese Verfahren auf dem Markt eingeführt sind und entsprechend umfangreiche Erfahrungen vorliegen, lassen sich hierfür belastbare Kostenabschätzungen machen. Diese sind im weiteren Verlauf der Untersuchungen vorgesehen (siehe Kapitel 9 und 10).

## 7.2 Technologien zur Verbrennung

Nachfolgend dargestellt werden die Technologien zur Verbrennung von Gehölzschnitt in betriebseigenen Anlagen zur Wärmeerzeugung. Tabelle 17 gibt einen Überblick über die im relevanten Leistungsbereich von 50 bis 500 kW verfügbaren Technologien. Es wird unterschieden in handbesockelte Systeme und automatisch besockelte Systeme. Sie werden nachfolgend dargestellt und ihre Vor- und Nachteile zusammengefasst. Diese Zusammenstellung dient als Grundlage zur Auswahl ge-

Feuerungsart	Beschickung	Geeignete Biomassen	Wassergehalt	Feuerungswärmeleistung	Aschegehalt	Körnung
Schachtf Feuerung	Handbesockelt	Vorwiegend stückige Holzreste, Schelle, Hackschnitzel		20 bis 250 kW		100-1.000 mm
Vorofenfeuerung	Mechanisch	Späne, Pellets, Hackschnitzel	5 %-60 %	35 bis 6.000 kW	< 5 %	Querschnitt: 10 mm <sup>2</sup> Länge: 30 mm
Unterschubfeuerung	Mechanisch	Trockene und feuchte Späne, Hackschnitzel, max. 50 % Staubanteil	5 %-50 %	20 bis 5.000 kW	< 3 %	Querschnitt: 50 mm <sup>2</sup> Länge: 120 mm
Rostfeuerung	Mechanisch	Holz, Rinde, großstückige feuchte Brennstoffe mit hohem Aschegehalt	40 %-65 %	ab 150 kW	Vorschubrost < 50 % Treppenrost < 8 %	Querschnitt: 100 mm <sup>2</sup> Länge: 250 mm

Tab. 17: Systematik der Feuerungsanlagen

eigneter Systeme für die detaillierte ökonomische Analyse im weiteren Verlauf der Untersuchungen.

### 7.2.1 Handbeschickte Anlagen

Man unterscheidet bei den handbeschickten Feuerungsanlagen nach verschiedenenartigen Merkmalen:

- Bauartengruppen: Einzelfeuerstätte, erweiterte Einzelfeuerstätte oder Zentralheizungskessel.
- Zugbedingungen: Naturzug oder gebläseunterstützter Zug.
- Rost: rostlose Verbrennung oder Feuerungen mit Rost.
- Lage des Rostes: Flachfeuerung oder Füllfeuerung.
- Feuerungsprinzip: Durchbrand, oberer Abbrand oder unterer Abbrand.

Am häufigsten trifft man in der Praxis auf die Unterscheidung nach dem Feuerungsprinzip, da es signifikant für die jeweilige Klasse der Anlage ist. Bild 17 zeigt zwei Beispiele für Zentralheizungskessel, wie sie zahlreich im häuslichen Bereich Einsatz zu finden sind.

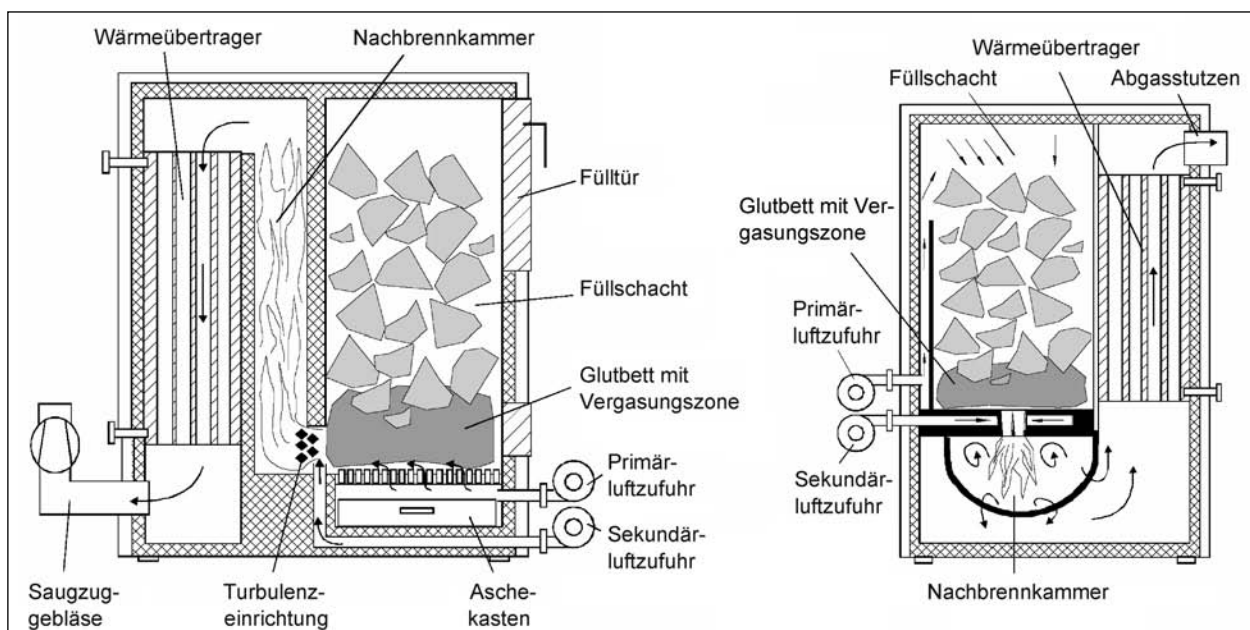
Bei diesen Kesselanlagen versucht man, die Wärmeabgabe an den umgebenden Raum weitgehend zu vermeiden, da sich der Aufstellort (z. B. Keller) meist außerhalb der thermischen Hülle befindet. Folglich sind Zentralheizungskessel mit Verkleidungen, Dämmungen und Wärmeüberträgermedien

auszustatten, um einen geregelten und möglichst verlustfreien Wärmetransport zu den jeweiligen Heizflächen sicherzustellen. Die Funktionsweise solcher handbeschickter Zentralheizungsanlagen beruht fast ausschließlich auf dem Prinzip der Unterbrandfeuerung

Das heißt, dass der durch Saug- oder Druckluftgebläse zugeführte Luftstrom unterhalb des Brennmaterials die Verbrennung vorantreibt und die Anlage entweder im Über- oder Unterdruck arbeitet. Naturzuganlagen, wie man sie aus Kaminen kennt, werden heutzutage kaum eingesetzt, da sie abhängig von den Umgebungsbedingungen sind und eine schlechte Regelbarkeit haben. Der Brennstoff, der in stückiger Form bis zu einem Meter je nach Anlagentyp vorliegen kann, muss über den Füllschacht manuell nachgelegt werden. Stückholzkessel mit zusätzlichen Verbrennungsluftregelungen erzielen bei dem gegenwärtigen technischen Stand Wirkungsgrade bis zu 90 %. Weiterhin bleiben aber die manuelle Befüllung mit dem Brennstoff Holz sowie die ständige Ascheaustragung aus dem Kessel ein großer Nachteil der handbeschickten Zentralheizungsanlagen.

#### Vorteile

- Nicht erforderliche Brennstoffaufbereitung.
- Einfache Feuerungstechnik.
- Geringe Anschaffungskosten.



**Bild 17:** Stückholzkessel mit seitlichem Unterbrand (links) und Sturzbrand (rechts) [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001]

### Nachteile

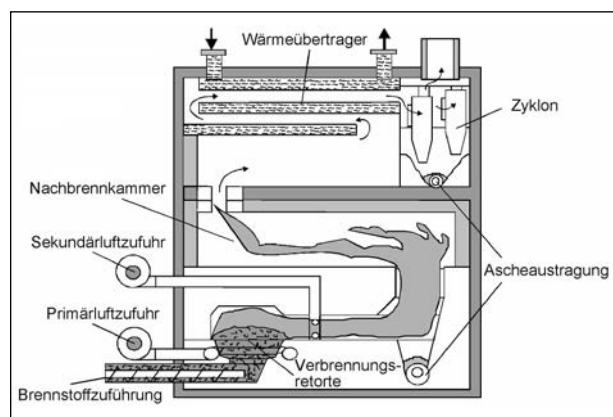
- Geringer Automatisierungs- und Regelungsgrad.
- Diskontinuierliche Befüllung.
- Häufig unvollständige Verbrennung.
- Regelvorgänge und Teillastbetrieb führen oft zu Kohlenwasserstoff- und Kohlenstoffmonoxidemissionen.

## 7.2.2 Automatisch beschickte Anlagen

### 7.2.2.1 Unterschubfeuerung

Unterschubfeuerungen sind für groben und nicht zu feuchten Brennstoff geeignet. Hauptsächlich werden Hackschnitzel, Pellets und Späne eingesetzt, wobei die Brennstoffqualität insbesondere an den Wassergehalt angepasst sein muss, der nicht mehr als 50 % betragen darf.

Besonders ist darauf zu achten, dass Feuerraum und Nachbrennkammer auf die jeweilige Brennstoffqualität eingestellt werden, um technische Störungen zu vermeiden und eine möglichst vollständige Verbrennung zu gewährleisten (Bild 18). Die Zuführung des Brennstoffes erfolgt über eine Stokerschnecke von unten in die Brennraummulde (Retorte). Die Primärluft wird direkt über die Seitenwände in das Brennstoffbett zugeführt. In der Brennraummulde „durchläuft“ der Brennstoff dann die Phasen der Trocknung und Entgasung, bevor er durch Zufuhr der Sekundärluft, über Düsen in den Brennkammerwänden, unter möglichst hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer ausbrennt. Anschließend geben die heißen Gase ihre Wärme an den Wärmeübertrager ab und passieren den Zyklon. Die Asche muss in regelmäßigen Abständen



**Bild 18:** Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001]

den aus der Retorte entfernt werden, außerdem werden durch die aufsteigenden Holzgase Aschepartikel mitgerissen, die sich in Bereichen niedriger Strömungsgeschwindigkeit ablagern und ebenfalls entfernt werden müssen (siehe Bild 18).

### Vorteile

- Automatische Beschickung direkt aus dem Silo.
- Gute Regelbarkeit durch abstimmbare Brennstoff- und Luftzufuhr.
- Niedrige Schadstoffemissionen.
- Automatische Ausbringung der Asche über eine Austragschnecke möglich.
- Einfache Bauweise der Anlage.

### Nachteile

- Aufwändige Sicherheitseinrichtungen am Feuerblock wegen Gefahr des Rückbrandes (Löschwasseranschluss, Sprinkleranlage, Thermostat).
- Begrenzte Brennstoffgröße durch Stokerschnecke → Verstopfungsgefahr.

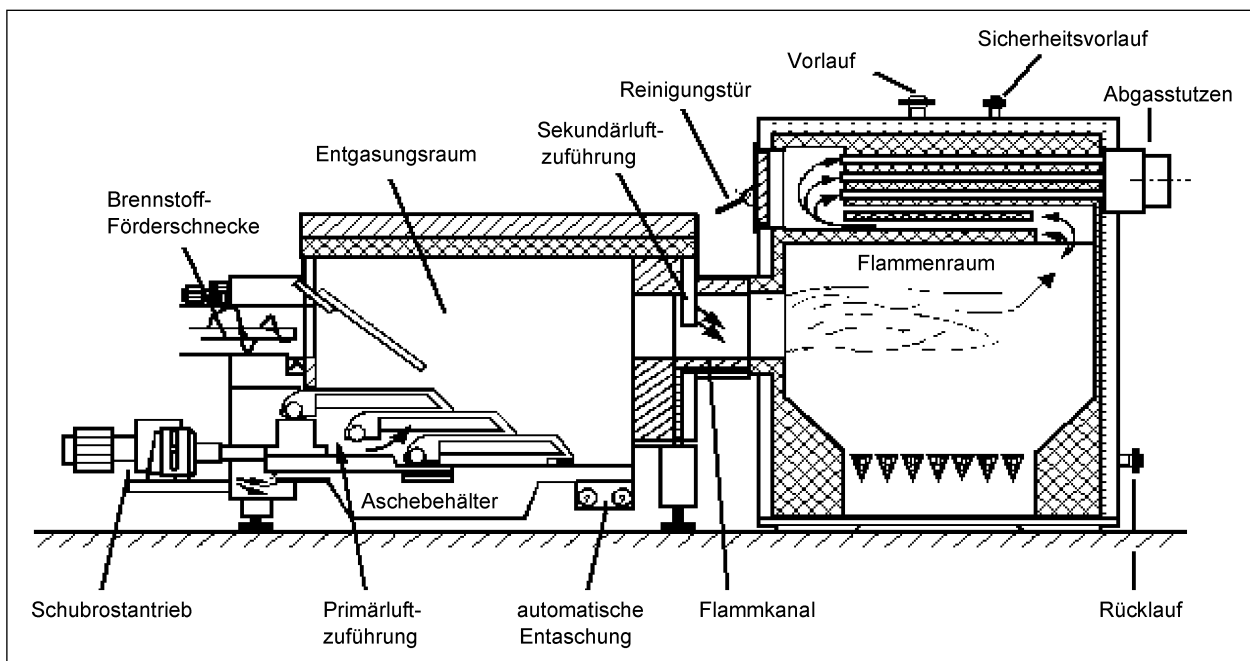
### 7.2.2.2 Vorofenfeuerung

Bei der Vorofenfeuerung wird das Brennmaterial räumlich in zwei getrennten Anlagenteilen, dem Entgasungsraum und dem Flammenraum, verbrannt (Bild 19). Das Holz wird dem ausschamotierten Entgasungsraum über einen Fallschacht oder (wie in Bild 19) über die Förderschnecke zugeführt. Bei dosierter Primärluftzuführung wird das Holz getrocknet, entgast und die entstandene Holzkohle zu Kohlenmonoxid vergast. Die heißen Schwelgase gelangen unter Beimischung von Sekundärluft durch den Flammenkanal in den Flammenraum (Kessel), wo die Nachverbrennung stattfindet. Dort wird die Energie an den Wärmetauscher abgegeben und in das Wärmeverteilungsnetz eingekoppelt. In Abhängigkeit vom Aschegehalt können verschiedene Roste installiert werden, so wird für aschereiche und feuchte Brennstoffe ein Vorschubrost oder für aschearme Brennstoffe ein Schrägrost bevorzugt.

### Vorteile

- Kontinuierliche Befüllung.
- Gute Regelbarkeit.
- Vollautomatischer Betrieb möglich.





**Bild 19:** Vorofenheizung, Entgasungsraum mit Schubrost (links) und Flammenraum (rechts) [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001]

- Kombination mit vorhandenem Öl- oder Scheitholzessel möglich.

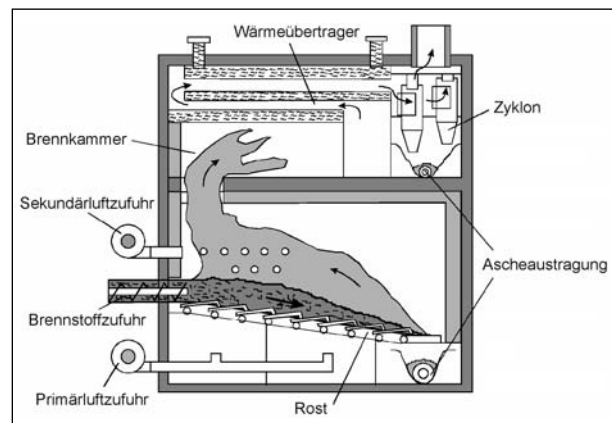
#### Nachteile

- Großer Platzbedarf durch zwei Module (Entgasungs- und Flammenraum).
- Ständige Leerung des Aschebehälters.
- Wärmeverluste im Entgasungsraum.

#### 7.2.2.3 Rostfeuerungen

Rostfeuerungen gehören zur Familie der Festbettfeuerungen, man unterscheidet in verschiedene Rostfeuerungs-systeme die da wären: Vorschubrost-, Treppenrost- und Rückschubrostfeuerungen. Das Spektrum dieser Anlagen beinhaltet im Wesentlichen großstückige und feuchte Holzreste sowie aschereiche Rindenabfälle. Probleme treten eher bei sehr feinen und trockenen Brennstoffen auf, die zu Schlierenbildung und Durchtritt von unverbranntem Brennstoffmaterial in den Ascheraum führen können.

Die Einbringung des Brennstoffes erfolgt meist über Schnecken, Hydraulikstoker oder einen Rutschkanal auf den Rost, von wo es auf den Rostelementen in den Brennraum weiterbefördert wird. Die relativ große Ausbreitung des Brennstoffbettes auf dem Rost und die damit verbundene intensivere Trocknung, Pyrolyse und Entgasung ermöglichen auch



**Bild 20:** Vorschubrostfeuerung nach dem Gegenstromprinzip (geeignet für nasse Brennstoffe) [KALTSCHMITT und HARTMANN, 2001]

den Einsatz von feuchterem Brennmaterial. Unterhalb des Rostes befinden sich Düsen, die die Primärluft der Verbrennung zuführen und gleichzeitig die Aufgabe haben, die Rostelemente zu kühlen. Das mindert das Risiko, dass es beim Einsatz kritischer Stoffe zu Schlackeanbackungen und Materialüberhitzung kommt. Probleme in der Betriebsführung können durch ungleichmäßige Brennstoffmengen auf dem Rost entstehen. Dies kann zur Folge haben, dass die Primärluft im unbedeckten Rostabschnitt austritt und nicht mehr da zur Verfügung steht, wo sich das Brennmaterial befindet. Dies führt zu einer unvollständigen Verbrennung und behindert die Lambda-Regelung der Anlage.

Die Sekundärluft wird oberhalb des Rostes oder vor Eintritt in die Brennkammer eingedüst. Durch die vibrierende oder rüttelnde Funktion des Rostes wird die Asche in den Aschekanal befördert und kann so automatisch mit Hilfe einer Ascheschnecke aus der Brennkammer ausgetragen werden.

Der Aufbau und die Funktionsweise von Treppenrosten und Vorschubrosten ist ähnlich. Wesentlicher Unterschied ist, dass beim Treppenrost durch die stufenweise Bauweise des Rostes das Brennmaterial intensiver umgewälzt und so intensiver getrocknet und entgast wird.

### Vorteile

- Gute Verbrennungseigenschaften selbst bei feuchten Holzresten, fester Biomasse sowie aschereichen Rindenabfällen.
- Anpassung der Verbrennungsluftströme an die Brennstoffeigenschaften möglich.
- Leistungsbereich größer als 1 MW möglich und effektiv.

### Nachteile

- Größere Brennstoffmengen erforderlich.
- Schlechte Regelbarkeit im Feuerraum.
- Nicht geeignet für schnelle Lastwechsel.
- Aufwändige Anlagentechnik.

### 7.2.3 Schlussfolgerung

Für die energetische Nutzung von Gehölzschnitt werden wie beschrieben Verbrennungsanlagen betrachtet. Vor dem Hintergrund der bisherigen zur Anwendung kommenden Erdgas- oder Heizöl-befeuerten Heizungsanlagen ist die Voraussetzung für die Nutzung des Gehölzschnitts in Holzfeuerungen ein vergleichbarer Komfort und ein ähnlicher Wartungs- und Betriebsaufwand. Deshalb sind handbeschickte Anlagen für die ökonomische Betrachtung von vornherein auszuschließen, zumal die manuelle Beschickung deutlich höhere Personalkosten verursacht. Diesbezüglich werden im Weiteren automatisch beschickte Feuerungsanlagen betrachtet.

## 7.3 Techniken der Biogasnutzung

Nachfolgend dargestellt wird der gegenwärtige technische Stand der Biogasnutzung von Grün-

massen, wie sie z. B. bei der Straßenpflege anfallen. Da diese Verfahren vergleichsweise komplex sind, wird zunächst eine kurze Übersicht über den anaeroben Prozess, die typischen Vergärungsverfahren sowie die Eigenschaften des erzeugten Biogases gegeben. Darauf aufbauend erfolgen eine Einordnung der Vergärung von festen organischen Rückständen sowie Zusammenstellung häufiger Schwachstellen bestehender Anlagen, die es bei etwaigen betriebseigenen Planungen zu vermeiden gilt, und Schlussfolgerungen für die Möglichkeiten der Nutzung von Biogasanlagen im Straßenbetriebsdienst.

### 7.3.1 Grundlagen der anaeroben Vergärung

Um die Grundlagen der anaeroben Vergärung zu erläutern und damit ein Grundverständnis für den Vergärungsprozess zu vermitteln, werden nachfolgend kurz die biologischen Grundlagen, die Möglichkeiten der technischen Umsetzung und die Besonderheiten bei der Nutzung des produzierten Biogases erläutert.

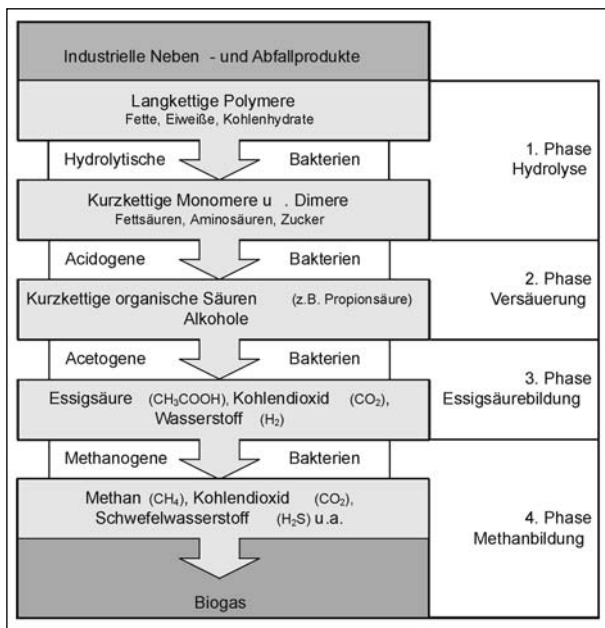
Biogas wird durch Mikroorganismen in einer anaeroben Stoffwechselkette gebildet. Daher muss bei der Betrachtung der Biogasgewinnung immer berücksichtigt werden, dass der Erfolg des Einsatzes von Anaerobverfahren immer von der Lebensfähigkeit von Mikroorganismen abhängt und damit gewährleistet werden muss, dass diesen Mikroorganismen immer möglichst günstige Lebensbedingungen geboten werden. Nach heutigem Wissensstand läuft der Vergärungsprozess prinzipiell in vier voneinander abhängigen Stufen ab, die jeweils durch die Anwesenheit von speziellen Bakterienstämmen gekennzeichnet sind (Bild 21).

In der Hydrolysephase werden langkettige organische Verbindungen (Polymere) durch Exoenzyme gespalten. Da hierbei feste Substanzen in Lösung gehen, nennt man diesen Schritt auch Verflüssigung bzw. Hydrolyse. Bei den entstehenden Produkten handelt es sich um niedermolekulare Verbindungen (Monomere und Dimere). Die Mono- und Dimere werden in der Versäuerungsphase durch strikt und/oder fakultativ anaerobe acidogene Bakterien zu kurzkettigen Fettsäuren sowie zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid abgebaut. In der Essigsäurephase werden die Stoffwechselprodukte, die nicht bereits von den in dieser Phase ebenfalls anwesenden Methanbakterien umgesetzt werden konnten, von acetogenen Bakterien zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid abge-

baut. In der Methanbildungsphase wird durch anaerobe, so genannte methanogene Bakterien aus den in den vorangegangenen Phasen gebildeten Produkten mit Hilfe molekularen Wasserstoffs Methan gebildet [IE, 2003a].

Die technische Umsetzung der Vergärung und Biogasgewinnung orientiert sich zwangsläufig an den biologischen Grundlagen dieses anaeroben Vergärungsprozesses. Dabei kommen, im Wesentlichen in Abhängigkeit der Eigenschaften der eingesetzten Substrate, verschiedene Technologien zum Einsatz. Trotzdem gibt es einen grundsätzlichen Verfahrensablauf, sodass sich alle Biogasanlagen hinsichtlich ihres systemtechnischen Aufbaus ähneln.

Eine Biogasanlage unterteilt sich grundsätzlich in vier Prozessstufen:



**Bild 21:** Schematisierter Ablauf der anaeroben Vergärung

- In der ersten Stufe wird das Substrat bereitgestellt, gelagert, je nach Anforderungen aufbereitet und in den Fermenter eingebracht.
- Als zweite Stufe folgt jeweils der eigentliche anaerobe Vergärungsprozess im Fermenter.
- Die dritte Stufe beinhaltet die Gasaufbereitung und die Gasnutzung.
- Als vierte Stufe, quasi parallel zur dritten, folgten die Lagerung, Verwertung und/oder Nutzung der Gärreste.

### 7.3.2 Konzepte

#### 7.3.2.1 Verfahrensübersicht

Für die anaerobe Vergärung werden im Wesentlichen Speicher-, Durchfluss- und Speicher-Durchflussanlagen eingesetzt. Bei Speicheranlagen dient der Fermenter gleichzeitig als Lagerbehälter. Durchfluss- und Speicher-Durchflussanlagen werden (quasi)kontinuierlich beschickt, wobei gleichzeitig die entsprechende Menge Gärrückstände ausgelesen wird. Während bei reinen Durchflussanlagen die Gärreste entweder in offenen Behältern gelagert oder sofort abgeleitet werden, ist bei Speicher-Durchflussanlagen (Gärreste werden weitergenutzt) der Lagerbehälter gasdicht ausgeführt, um das sich bei der Nachgärung bildende Biogas nutzen zu können. Zur Klassifikation der verschiedenen Verfahrensvarianten dienen signifikante Prozessparameter sowie bauliche Merkmale (Tabelle 18).

Bei nahezu allen Biogasanlagen wird als Basisverfahren die Nassvergärung eingesetzt. Anlagen mit Feststoffvergärung spielen bisher kaum eine Rolle. Die Feststoffvergärung ist größtenteils noch im Versuchs- bzw. Pilotstadium, kann aber perspektiv-

Kriterium	Unterscheidungsmerkmale
Art und Herkunft der Substrate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Landwirtschaftliche Mono- und Kovergärungsanlagen</li> <li>• Industrielle Mono- und Kovergärungsanlagen</li> <li>• Bioabfallvergärungsanlagen</li> <li>• Abwasserbehandlungsanlagen</li> </ul>
TS-Gehalt der Substrate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nassvergärung (pumpfähige Substrate)</li> <li>• Feststoffvergärung (stapelbare Substrate)</li> </ul>
Prozessstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• psychrophil (&lt; 25 °C)</li> <li>• mesophil (25-45 °C)</li> <li>• thermophil (≥ 45 °C)</li> </ul>
Prozessrealisierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ein-, zwei- und mehrstufig</li> </ul>
Beschickungsintervall	<ul style="list-style-type: none"> <li>• diskontinuierlich</li> <li>• semi- bzw. quasikontinuierlich</li> </ul>

**Tab. 18:** Merkmale zur Unterscheidung von Gärverfahren

visch für die Vergärung von festen Rückständen, zu denen auch der Grasschnitt aus der Straßenpflege zählt, durchaus eine Rolle spielen und aufgrund der Vergütung nach EEG auch wirtschaftlich interessant sein.

### 7.3.2.2 Verfahrenstechnik

Zur Realisierung der einzelnen Verfahrensschritte innerhalb der Prozessstufen werden verschiedene technische Anlagenkomponenten (Baugruppen und Aggregate) eingesetzt. Diese sind auf Grund ihrer Funktionen eng miteinander verbunden und voneinander abhängig. Die Wahl der verfahrenstechnischen Ausrüstung für eine Biogasanlage ist, wie auch schon die Auswahl des eigentlichen Gärverfahrens, in erster Linie von den zur Verfügung stehenden Substraten abhängig. Diese bestimmen durch ihre Quantität (anfallende Menge pro Zeiteinheit) die Dimensionierung von Behältervolumina usw. sowie durch ihre Qualität (TS-Gehalt, Struktur der Gärsubstrate u. a.) die Auslegung der Verfahrenstechnik. Die wesentlichen Anlagenkomponenten, Baugruppen und Aggregate einer Biogasanlage und ihre Verknüpfungen sind in Bild 22 dargestellt.

Die Basis- und Kosubstrate werden meist in einer Vorgrube gesammelt, zerkleinert und homogenisiert. Je nach Konsistenz können zusätzlich Anmischung und Abtrennung von Störstoffen stattfinden. Die Substrateinbringung in den Fermenter wird bei nassen Substraten meist durch elektrisch betriebene Pumpen realisiert, wenn kein natürli-

ches Gefälle gegeben ist. Die Einbringung von Feststoffen direkt in den Fermenter wird über Einspülschächte, Förderschnecken u. a. realisiert.

Hauptkomponente der Biogasanlage ist der Fermenter. Die verschiedenen verfügbaren Systeme unterscheidet man nach ihrer Form (Pfropfstromfermenter, Rührkessel), Bauweise (stehend, liegend), Art der Durchmischung (mechanisch, hydraulisch, pneumatisch) sowie Art der Temperierung (interne und externe Wärmetauscher) und nicht zuletzt nach den verwendeten Materialien (Stahl, Beton).

Grundanforderungen für alle Varianten sind Gasdichtheit, Einrichtungen zur Durchmischung sowie zum Ein- und Austrag von Substrat und Gas. Übliche Verweilzeiten im Fermenter betragen für die Vergärung von festen, organisch hochbelasteten Rückständen bis zu 40 Tagen, für die Abwasservergärung auch unter 12 Stunden. Mit steigender Substrattemperatur verkürzt sich generell die Verweilzeit, wobei die Gasausbeuten kaum wesentlich steigen. Der Prozess kann bei thermophilen Temperaturen jedoch weitaus anfälliger gegenüber Temperaturschwankungen sein. Zum Ausgleich von Schwankungen der Gasbildung erfolgt die Speicherung des gewonnenen Biogases in Niederdruckspeichern meist direkt über dem Fermenter (Folienhauben) oder extern in separaten Gebäuden bzw. Räumen (z. B. Folienkissen).

Verwertet wird das Biogas nach seiner Aufbereitung (Entwässerung und Entschwefelung) häufig in Blockheizkraftwerken (BHKW) zur gekoppelten Produktion von Strom und Wärme. Hierbei kommen hauptsächlich Gas-Ottomotoren und Zündstrahlmotoren zum Einsatz. Die aus dem Fermenter ausgetragenen Gärrückstände werden bei der Vergärung fester Substrate in geschlossenen oder offenen Nachgär- bzw. Gärrestbehältern gesammelt bzw. gelagert und in den dafür vorgesehenen Zeiträumen als Flüssigdünger auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht.

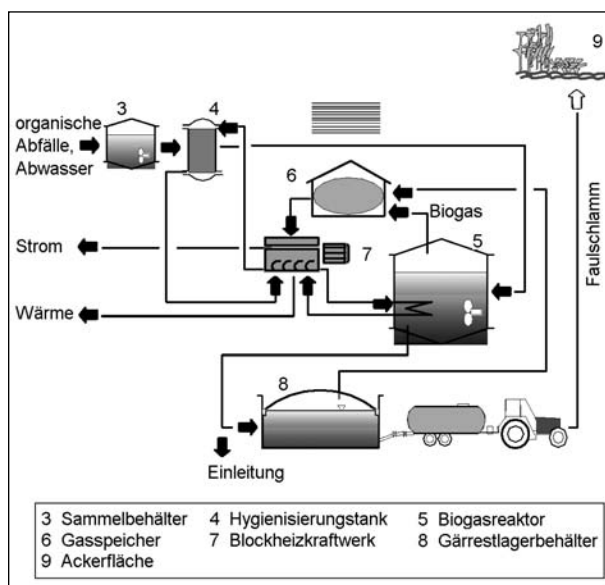


Bild 22: Schema einer Biogasanlage

### 7.3.3 Eigenschaften von Biogas

Das bei der Vergärung gebildete Gasgemisch (Biogas) besteht hauptsächlich aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und ist wasserdampfgesättigt. Methan stellt hierbei die energetisch nutzbare Fraktion dar, deren Anteil zwischen 55 % und 80 % liegen kann. Je nach Zusammensetzung der eingesetzten Gärsubstrate (z. B. Überschuss an Ei-

	Biogas	Erdgas
Substanz	Gehalte in Vol.-%	
Methan (CH <sub>4</sub> )	55 – 80	93
Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> )	20 – 40	1
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	< 3	1
Sauerstoff, Wasserstoff (O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> )	< 2	-
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S)	< 1	-
Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Spuren	-
Ethan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	-	3
Propan, Butan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	-	2
Weitere Eigenschaften		
Brennwert (MJ/Nm <sup>3</sup> )	20 – 28	30 – 45
Dichte (kg/Nm <sup>3</sup> )	1,05 – 1,20	0,6 – 0,9
Zündgrenze (%/Nm <sup>3</sup> Luft)	6 – 12	5 – 15
Zündtemperatur (°C)	650 – 750	650
Zündgeschwindigkeit, max. (m/s)	0,25	0,39

Tab. 19: Eigenschaften von Biogas im Vergleich zu Erdgas

weiß) entstehen geringe Mengen an Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>).

Der Heizwert (H<sub>U</sub>) von Biogas ist grundsätzlich proportional dem Methangehalt. Er schwankt bei einem Volumenanteil von 55 bis 80 % Methan im Biogas zwischen 19,8 und 28 MJ/m<sup>3</sup>. In Tabelle 19 sind die Eigenschaften von Biogas im Vergleich zu Erdgas dargestellt. Methan, Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und Sauerstoff sind farb- und geruchlose Gase. Schwefelwasserstoff hingegen besitzt den charakteristischen Geruch von faulen Eiern, hat ab einer Konzentration von 400 ppm toxische Eigenschaften und bildet in Verbindung mit Feuchtigkeit Säuren, die korrosiv wirken. Entsprechend sind gezielte Minderungsmaßnahmen Stand der Technik. Verbleiben Reste von Ammoniak im Biogas, so ist seine Wirkung als eher unbedenklich für die bisher praxisrelevanten Verwertungswege anzusehen.

Messungen an Biogasanlagen hinsichtlich weiterer luftverunreinigender sowie geruchsintensiver Stoffe wie z. B. PAK, BTX, Mercaptane, Cumol u. a. ergaben bis auf wenige Ausnahmen Konzentrationen unterhalb der jeweiligen Nachweisgrenze.

### 7.3.4 Besonderheiten der Nutzung fester organischer Stoffe

Zur energetischen Nutzung von Straßenbegleitgrün bieten sich aus technologischer Sicht nicht viele grundsätzlich verschiedene Verfahrensvarianten für die Biogasgewinnung an. Grundsätzlich ist die Feststoffvergärung für feste Rückstände mit hohen Trockensubstanzgehalten denkbar. Spezielle Fest-

stoffvergärungsanlagen sind in der Landwirtschaft bisher selten, allerdings seit der EEG-Novellierung von zunehmenden Interesse, da sie Feststoffe ohne aufwändige Aufbereitung in stapelfähiger Form und ohne Gülleeinsatz vergären können. Im Gegensatz zur Nassvergärung existieren auf dem Gebiet der Feststoffvergärung wenige anwendungsreife Verfahren für die Landwirtschaft. Erfahrungen mit der Vergärung von schüttfähigen bzw. stapelbaren Materialien basierten bislang hauptsächlich auf Verfahren der Bioabfallvergärung. Im Laufe der Jahrzehnte wurden verschiedene Verfahrensansätze zur Feststoffvergärung entwickelt und erprobt, wobei einige Verfahren kurz vor der Marktreife stehen. Darüber hinaus befindet sich derzeit eine Reihe von Biogasanlagen mit der Technik der Feststoffvergärung in der Planungsphase. Dennoch kann nicht bestritten werden, dass noch weiterer Optimierungsbedarf besteht.

Eine Vergärung fester Rückstände – vergleichbar mit der Vergärung nachwachsender Rohstoffe – kann auch in Nassvergärungsanlagen durchgeführt werden. Zur Vergärung in einer solchen Anlage sollten bei der Beschickung Trockensubstanzgehalte über 15 % vermieden werden. Daher muss der feste Rückstand meist angemischt werden. Zu diesem Zweck wird Prozesswasser, Wasser aus der Kreislaufführung oder vorhandenes Abwasser genutzt. Es ist auch die vollständige Kofermentation mit dem Abwasserstrom möglich.

Da die Substrate meist in Form größerer Partikel vorliegen, können die Mikroorganismen nicht sofort die gesamte Biomasse abbauen, da sie nur an Stoffsflächen aktiv sein können. Aus diesem Grund müssen die Aufenthaltszeiten des Substrates im Fermenter höher als bei flüssigen Substraten gewählt werden. Hier sind Aufenthaltszeiten zwischen 15 und 25 Tagen üblich. Zur Optimierung des biologischen Abbaues kann auch ein mechanischer oder thermischer Aufschluss der Substrate effektiv sein. Um einen gleichmäßigen Abbau der Biomasse im Fermenter zu erreichen, ist es notwendig, eine gleichmäßige Durchmischung zu erreichen. Diese Durchmischung kann bei den hohen Trockensubstanzgehalten im Fermenter nur durch leistungsfähige Rührwerke erreicht werden. Daher ist an dieser Stelle mit Energieaufwand und Verschleiß zu rechnen.

Um die Reststoffmengen zur Entsorgung oder weiteren betriebsexternen Verwertung nach der Biogasgewinnung möglichst gering zu halten, erfolgt

häufig eine Entwässerung mit Flüssigkeitsrückführung zur Anmaische. Hierzu wird der Gärrest mittels Dekanterzentrifugen oder Schneckenpressen maschinell entwässert. Das bei der Entwässerung anfallende Prozessabwasser ist mit einer Vielzahl von Stoffen befrachtet, sodass es bei einer vollständigen Rückführung in den Anlagenkreislauf zu einer deutlichen Aufkonzentrierung verschiedener Stoffe kommen kann. Zur weiteren Verwendung der abgetrennten flüssigen Phase als Prozesswasser für die Gärung muss es bestimmte Anforderungen erfüllen. Wichtig sind

- die Gehalte an flüchtigen Fettsäuren,
- die Salzkonzentration,
- der Ammoniumgehalt,
- der pH-Wert.

Da diese Parameter sich direkt auf die Stabilität der Gärung auswirken, sollten sie regelmäßig kontrolliert und zum Methanertrag der Biogasanlage in Bezug gesetzt werden. Daher muss das Prozesswasser bestimmte Anforderungen erfüllen, die im Wesentlichen von der Konzeption der Anlage abhängig sind. Es handelt sich in erster Linie um die Gehalte an Feststoffen und um Substanzen, die im Prozess kritische Ablagerungen bilden (z. B. Salze), sowie um biologisch leicht abbaubare organische Kohlenstoffverbindungen oder hemmende Inputsubstanzen oder Produkte. So können Feststoffe im Prozessabwassersystem Probleme bei Armaturen oder Düsen verursachen, Härtebildner nach Abfall des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks in der Wasserphase störende Niederschläge bilden und Rohrleitungen verstopfen, biologisch abbaubare, organische Kohlenstoffverbindungen zu relevanten Geruchsentwicklungen führen und hohe  $\text{NH}_x$ -N- oder Sulfid-Gehalte den anaeroben Abbau hemmen. Mitunter sind deshalb weitere Aufbereitungsschritte notwendig, wobei meistens physikalisch-chemische bzw. aerobe biologische Behandlungsschritte ausreichend sind.

Der bei der Entwässerung entstehende feste Gärrest kann meist nach einer Nachrotte als organisches Düngemittel in der Landwirtschaft oder im Gartenbau abgesetzt werden.

Gegenüber der Nassvergärung ist die Gasertragsausbeute bei der Feststoffvergärung i. d. R. geringer. Dafür sind jedoch die Methankonzentrationen höher, was demzufolge zu ähnlichen Energieerträgen beider Verfahren führt.

### 7.3.5 Häufige Schwachstellen der Biogasgewinnung und -nutzung

Aus der inzwischen mehr als 30-jährigen Erfahrung mit Anlagen zur Gewinnung von Biogas aus Reststoffen mit organischen Substanzen – insbesondere im Abwassersektor – haben sich viele für die Technologie „typische“ Schwachstellen gezeigt, die häufig durch Weiterentwicklungen ausgeräumt worden sind, oder aber aufgrund der Natur des biologischen Prozesses nicht ausgeräumt werden können. Die wesentlichen, bei der Investition in eine Biogasanlage zu beachtenden Schwachstellen werden nachfolgend dargestellt.

#### Schwachstelle Planung

Regelmäßig werden einige Planungsgrundsätze nicht beachtet. Im Einzelnen sind das a) ausreichend genaue Substratanalysen bezüglich Gehalt an organischer Substanz, Trockensubstanz und Gasbildungsrate, b) Analyse der real zu erwartenden Stoffströme einschließlich Jahresgang und geplanter betrieblicher Veränderungen bzw. Änderungen am Produkt, c) Kalkulation mit nicht abgesichert verfügbaren Kosubstraten, d) Auswahl ungeeigneter Förder- und Durchmischungseinrichtungen, e) sehr großzügige Anlagenauslegung und f) ungenaue Vorgaben für die bauausführenden Unternehmen.

#### Schwachstelle Bau

Es werden typische, jedoch weitgehend vermeidbare Baufehler begangen: a) Materialauswahl, die nicht der Vorgabenspezifikation genügt, b) mangelhafte Ausführung kritischer Details wie Rohrdurchführungen oder Dichtungen, c) mangelnder Korrosionsschutz, d) mangelhafte Rohrleitungsverlegung, z. B. falsches Gefälle, Verlegung mit nicht entleerbaren Tiefpunkten, zu viele Bögen, Rohrreduzierungen, Vereisungsgefahr bei außen liegenden Leitungen v. a. bei Gasleitungen, e) fehlende Schieber für Wartungsarbeiten, f) mangelnde Zugänglichkeit von Bauteilen zu Wartungszwecken.

#### Schwachstellen im Anlagenbetrieb

Viele der durch Schwachstellen beim Bau der Anlage verursachten Probleme treten erst im Regelbetrieb auf. Schwachstellen im Betrieb der Anlage können sein: a) mangelhafte Eigenwartung aller Bauteile und Komponenten, die aus ökonomischen Gründen durchgeführt werden sollte, jedoch

mangels exakter Aufgabenverteilung oder Terminierung nicht erfolgt, b) fehlende oder mangelhafte Messwerterfassung, c) mangelhafte Messwertauswertung, die die Früherkennung von Betriebsproblemen und Analyse von historischen Betriebsproblemen unmöglich macht, d) Zufuhr technisch oder biologisch ungeeigneter Substrate, e) hoher, vom Hersteller verschwiegener und vertraglich nicht vereinbarter Eigenverbrauch an Energie der einzelnen Substrate, e) Steuerungs- und Messtechnik-Ausfall aufgrund Blitzschlag und Überspannungen, f) Undichtigkeit sowie Korrosion und Lagerschäden an Rührwerken und Pumpen, g) Abriss bzw. Bruch von Rührwerken aufgrund von Materialmängeln oder Überlastung, h) Beschädigung von Heizungseinrichtungen durch Rührwerke, i) Schäden an Folienhauben aufgrund starker Windeinwirkung und Materialfehlern.

### Schwachstelle Prozessbiologie

Die Prozessbiologie ist für die Gaserzeugung verantwortlich, hängt aber extrem vom Betriebsregime und vor allem von der Substratzufuhr ab. Folgen der Missachtung der Anforderungen der Prozessbiologie können z. B. Schaumbildung, geringe Gasbildungsmengen, im Extremfall Überlastung oder biologisches Umkippen des Fermenters sein. Häufige Fehler sind: a) ungleichmäßige oder zu hohe Dosierung oder sehr wechselhafte Zufuhr von Substraten, b) Einstellung nicht optimaler Temperaturen, c) Eigendynamik der Mikroorganismen, d) mangelhafte Prozessanalytik und -überwachung, e) Zugabe von Desinfektionsmitteln, z. B. durch Ablauf von Spül- und Reinigungswässern

### Schwachstellen bei der Gasnutzung

Die Gasnutzung erfolgt in der Regel durch Verbrennung – z. B. in Motoren. Um die Ablagerung von Verunreinigungen zu vermeiden, ist eine Reinigung des Gases unerlässlich. Dabei und bei der Gasnutzung selbst treten regelmäßig folgende Probleme auf: a) zu hohe Schwefelgehalte aufgrund mangelhafter Entschwefelung, z. B. durch Lufteinblasung in den Fermenter, in dem nicht ausreichend Bewuchsfläche oder zu geringe Umgebungstemperaturen mangels Dämmung für die Schwefelbakterien vorhanden sind, b) Schaumeintrag in die Gasleitungen, c) zu lange Ölwechselintervalle, welche den Motor schädigen können, d) Betrieb des Motors in Teillast, was den Wirkungsgrad erheblich senkt, d) schwankende Methangehalte, welche

nicht durch kleine Speicher ausgeglichen werden können, e) mangelnde Messtechnik zur Beurteilung des real erreichten Wirkungsgrades, f) Kühlkreislaufverstopfung aufgrund mangelhafter Wartung.

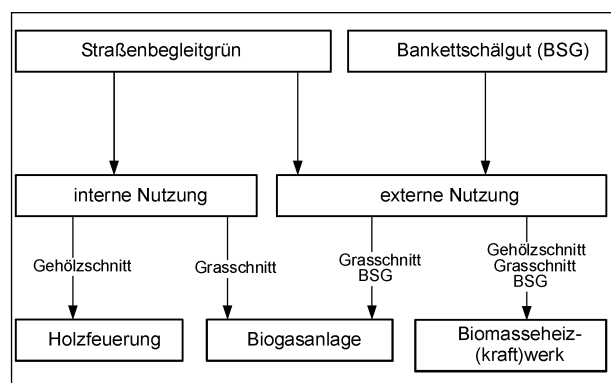
### 7.3.6 Schlussfolgerung

Die energetische Nutzung von Grasschnitt ist lediglich in Biogasanlagen sinnvoll. Tendenziell bietet sich bei Substraten mit hohen TS-Gehalten eher die Feststoffvergärung an, während bei Substraten mit hohen Wassergehalten die Nassvergärung zu empfehlen ist. Aufgrund der hohen Ligningehalte von Grasschnitt ist die Feststoffvergärung mit einem geringeren technischen Aufwand verbunden als die Nassvergärung.

## 8 Energetische Verwertungskonzepte für Grünabfälle in Meistereien

Ausgehend von den Ergebnissen der Stoffstromanalyse in Kapitel 6 und der Systemtechnik in Kapitel 7 können die Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst entweder intern in den Meistereien oder extern durch Fremdfirmen verwertet werden. Die Rahmenbedingungen und Möglichkeiten dieser beiden Verwertungsansätze werden nachfolgend dargestellt (siehe Bild 23).

Weiterhin werden für die vertiefende modellhafte Untersuchung geeignete Modellmeistereien, welche vor allem günstige Voraussetzungen für einen betrieblichen Ersatz bestehender durch Bioenergieanlagen zeigen, ausgewählt.



**Bild 23:** Nutzungsoptionen von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst

## 8.1 Interne Verwertung

Die energetische Nutzung von Straßenbegleitgrün kann intern und extern erfolgen. Entscheidend für die Machbarkeit der internen Verwertung ist die Verfügbarkeit ausreichender Brennstoffe bzw. Substrate zum Betrieb einer kostengünstigen Anlage. Diese Mengenabschätzungen werden nachfolgend durchgeführt.

### 8.1.1 Gehölzschnitt

Bei einer internen Verwertung zur Deckung des Wärmebedarfs in Meistereien sollten ausreichende Brennstoffmengen (im Straßenbetriebsdienst anfallender Gehölzschnitt) verfügbar sein. Die Größenordnung dieser Mengen ist bestimmt durch die bekannten Leistungs- und Verbrauchsdaten der bestehenden Heizungsanlage. Dies sind

- Anlagenleistung,
- Art des Brennstoffs und
- Brennstoffverbrauch.

Aus diesen Angaben lassen sich die benötigten Brennstoffmengen an Gehölzschnitt bestimmen. Ausgangsdaten sind die in Kapitel 6.4.1 identifizierten durchschnittlichen Anlagenleistungen von 160 bis 250 kW der Meistereien sowie die für die Wärmebedarfsrechnung typische Volllaststundenzahl von 1.400 h/a. Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher Wärmebedarf von 285.600 kWh/a (204 kW).

Bei der Bestimmung der benötigten Holz-Brennstoffmengen muss der Wassergehalt berücksichtigt werden. Daher wird zwischen waldfrischem und sommertrockenem Hackgut sowie Gehölzschnitt von Straßen unterschieden. Als sommertrocken wird Holz oder Hackgut bezeichnet, dass vom Frühjahr bis Spätsommer im Freien gelagert wird, wodurch sein Wassergehalt sinkt (siehe Tabelle 20). Für Gehölzschnitt ist von einem vergleichbaren Wassergehalt wie bei waldfrischem Hackgut auszugehen sowie von einer vergleichbaren Dichte, da das Material in gehackter Form abtransportiert wird. In nicht gehackter Form hat Straßenbegleitgrün eine geringere Dichte (geschätzt 250 kg/m<sup>3</sup>) als Waldholz, da es vielfach aus einer Mischung aus Kernholz und Strauchschnitt etc. besteht. Durch entsprechende Lagerung (z. B. Be- und Entlüftung

des Hackguts, siehe Kapitel 9.3.4) können Wassergehalte um die 20 % erreicht werden.

Der Brennstoffbedarf errechnet sich dann nach folgender Formel:

HHS: Holz-Hackschnitzelbedarf [kg/a]

Q: Wärmebedarf [kWh/a]

H<sub>U</sub>: Heizwert [kWh/kg]

η: Anlagenwirkungsgrad [%]

$$HHS = \frac{Q}{H_U \times \eta}$$

Für einen Wärmebedarf von 285.600 kWh im Jahr werden etwa 168 Tonnen waldfrisches bzw. 112 Tonnen Hackgut benötigt. Dabei wird ein Anlagenwirkungsgrad von 85 % angenommen<sup>12</sup> [KALTSCHMITT et. al., 2002].

Dementsprechend werden in etwa 672 m<sup>3</sup> (ca. 168 t) ungehacktes Gehölzschnitt benötigt. Wird diese Vorgehensweise für die Bandbreite der angegebenen Anlagenleistungen angewendet, ergeben sich die in Bild 24 dargestellten entsprechenden Holz- bzw. Straßenbegleitgrün-Brennstoffmengen für die verschiedenen Wassergehalte.

Dabei kann für „erntefrischen“ Gehölzschnitt ein mit waldfrischem Holz vergleichbarer Wassergehalt (ca. 50 %) angenommen werden. Dementspre-

	Hackgut (waldfrisch)	Hackgut (sommertrocken)	Gehölzschnitt
Heizwert	2 kWh/kg	3 kWh/kg	2 kWh/kg
Wassergehalt	50 %	35 %	50 %
Dichte	~400 kg/m <sup>3</sup>	~325 kg/m <sup>3</sup>	~250 kg/m <sup>3</sup>

Tab. 20: Energetische Kennwerte von Hackgut [FNR, 2005c; eigene Angaben]

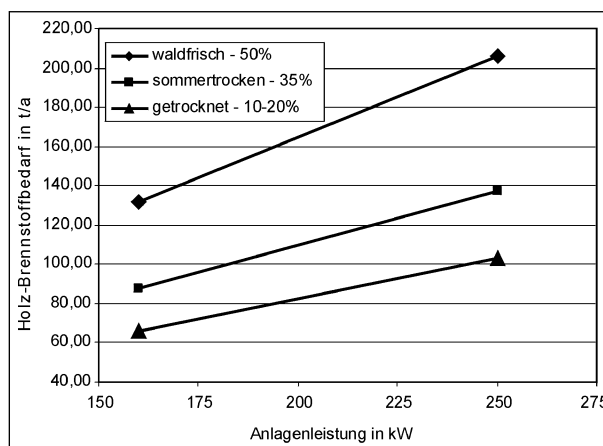


Bild 24: Darstellung des Brennstoffbedarfs in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Holzes

<sup>12</sup> Allgemein werden diese für Öl- und Gas-befeuerte Anlagen mit 95 % und für Holzfeuerungen mit 85 % abgeschätzt.



chend lassen sich die benötigten Brennstoffmengen für Gehölzschnitt aus denen für waldfisches Holz ableiten.

Nach Bild 24 sind für eine angenommene Meisterei mit 250 kW Anlagenleistung in etwa 200 t/a waldfisches Hackgut notwendig, um eine betriebseigene Nutzung zu ermöglichen. Bei der Abschätzung der möglichen Gehölzschnittmengen sollte berücksichtigt werden, dass durch die Verwendung des Materials auf Rast- und Erholungsflächen und für Neuanpflanzungen ebenfalls gewisse Mengen benötigt werden, sodass zusätzliche Zuschlagsfaktoren bei der Abschätzung der Brennstoffverfügbarkeit empfehlenswert sind. Inwieweit Lagerräume der Meisterei zur Hackschnitzel-Lagerung verwendet werden können oder ob zusätzliche Kosten der Lagerung anfallen (siehe Kapitel 9.3.4), sollte ebenfalls geprüft werden.

### 8.1.2 Grasschnitt

Grasschnitt kann in Biogasanlagen genutzt werden. Es wird Strom erzeugt, der mit EEG-Vergütung ins Stromnetz eingespeist wird, sowie Wärme, die ggf. zusätzlich genutzt werden kann. Die entscheidende Auslegungsgröße für Biogasanlagen ist daher nicht der Wärmebedarf, sondern der Leistungsbereich, in dem diese Anlagen kostendeckend betrieben werden können.

Als allgemeiner Richtwert für den wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage kann grob geschätzt eine Kapazität von 200 kW veranschlagt werden [interne Schätzung]. Nach standardmäßiger Wärmebedarfs-Auslegung sind für den maximalen Verbrauch eine Anlagengröße von etwa 50 kW und dementsprechend ungefähr 1.250 t Grassilage pro Jahr notwendig [FNR, 2005d].

Damit ist für eine kosteneffiziente Biogasanlage eine jährliche Rohstoffmengen von etwa 5.000 Tonnen Grasschnitt notwendig. Aus Kapitel 6.2 geht hervor, dass die erfassten, aber auch die potenziellen Grasschnittmengen pro Meisterei nicht ausreichend für den Betrieb einer solchen Anlage sind. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass für einen kontinuierlichen Betrieb u. a. eine Lagerung des Materials in Form einer Silierung zur Versorgungssicherung notwendig ist.

Gegenüber herkömmlichen Biogasanlagen besteht am Standort von Meistereien jedoch der Vorteil von Entsorgungskosten-Einsparungen, wodurch sich gegebenenfalls auch kleinere Anlagenkapazitäten

wirtschaftlich darstellen lassen. Alternativ muss geprüft werden, ob durch andere Meistereien oder durch Zukauf von Substrat die erforderlichen Inputmengen zusammen kommen können.

### 8.1.3 Bankettschälgut

Für die interne energetische Nutzung von Bankettschälgut bestehen keine Möglichkeiten.

## 8.2 Externe Verwertung

Die Möglichkeiten der externen Verwertung sind durch den regionalen bzw. überregionalen Brennstoffmarkt bestimmt, d. h., in wieweit die Grünabfälle dort untergebracht werden können und welche Preise dafür erzielbar sind.

Dazu werden Befragungen verschiedener Anlagenbetreiber (Biomasse(heiz)kraftwerke, Biogasanlagen), welche die Absatzmöglichkeiten von Straßenbegleitgrün auf dem Brennstoff- bzw. Substratmarkt abschätzen, dargestellt (siehe Bild 23).

### 8.2.1 Absatzmöglichkeiten in Biogasanlagen

Bisher wird Grasschnitt nicht überregional als marktgängiges Produkt gehandelt. Eine Preisfindung ist daher schwierig. Ausschlaggebend für die Bereitstellung von Grünschnitt sind dessen Qualität (Gasausbeute, Gasqualität, Verweilzeit) sowie Anteile an Fremdstoffen und Schadstoffen (z. B. Schwermetalle). Eine allgemeine Aussage über Nachfragestrukturen oder handelbare Grasschnittmengen ist nicht möglich. Im Folgenden werden daher die Absatzmöglichkeiten von Grasschnitt als Co-Substrat untersucht.

Für die energetische Verwertung von Grünabfällen in Biogasanlagen kommen ausschließlich Grasschnitt und Bankettschälgut infrage. Generell ist Grasschnitt in Form von Silage für den Einsatz in Biogasanlagen geeignet und auch laut Positivliste des Fachverbands Biogas e. V. ein nachwachsender Rohstoff, der den Nawaro-Bonus erhält [FVB, 2004].

Diesbezüglich wurden insgesamt 13 Biogasanlagenbetreiber sowie zwei Abfallanlagenbetreiber befragt. Neun Anlagenbetreiber setzten ausschließlich Substrate ein, die den Nawaro-Bonus erhalten (siehe Kapitel 4.1.1):

- Die Betreiber von Anlagen mit Nawaro-Bonus lehnen den Einsatz mit dem Argument ab, dass

sie für Straßenbegleitgrün erwarten, keinen Bonus zu erhalten. Weitere ablehnende Gründe für den Einsatz von Straßenbegleitgrün waren die geringen Potenziale von Gras, ausgeschöpfte Kapazitäten der Anlage sowie schlechte Erfahrungen beim Einsatz von Heu, welches technische Probleme bei der Zuführung verursacht.

- Lediglich zwei Biogasanlagenbetreiber erklärten sich bereit, Straßenbegleitgrün, mit Vorgaben bezüglich der Grasschnitthöhe von 5 bis 10 cm, einzusetzen.
- Nach Angaben der Biogasanlagenbetreiber, die Bioabfälle vergären, würde sich der Einsatz von Grasschnitt von Straßen nicht lohnen, da die Kapazitäten zu gering sind und die Entsorgung des Gärrestes problematisch ist.

Zusammenfassend erscheint nur ein geringes Potenzial für den Einsatz von Straßenbegleitgrün mit qualitativen Vorgaben in Biogasanlagen zu bestehen.

Die Befragungen ergaben aber auch, dass gegenwärtig große Unsicherheiten bezüglich der gesetzlichen Einordnung nach BiomasseV und EEG bestehen. Um die Potenziale von Straßenbegleitgrün zukünftig nutzbar zu machen, ist zum einen die Aufklärung der Betreiber bezüglich des gesetzlichen Status des Materials und zum anderen eine Diskussion über die erforderlichen qualitativen Vorgaben an das Material notwendig. Im letzteren Fall fehlen praktische, aber auch wissenschaftliche Erfahrungswerte weitgehend. Von Interesse hierbei wäre u. a., inwieweit der Straßenbetriebsdienst unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten (häufigere Graspflege etc.) auf qualitative Anforderungen von Seiten der Biogasanlagenbetreiber reagieren und dieses umsetzen kann. Dazu bedarf es jedoch einer genauen Definition, welche Qualitäten notwendig sind, und einer Abschätzung, auch unter Berücksichtigung möglicher eingesparter Entsorgungskosten, ob dies im Straßenbetriebsdienst gegenüber der bisherigen Praxis Kosten reduzieren könnte.

Vor dem Hintergrund der Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Grasschnitt in Biogasanlagen ist die Verwendung von Bankettschälgut, unabhängig von dessen energetischen Kenngrößen, in diesen Anlagen auszuschließen.

### 8.2.2 Absatzmöglichkeiten in Biomasseheiz-(kraft)werken

Im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst wurden in Bezug auf die Nutzung von Gehölzschnitt (22 Betreiber) und Grasschnitt (6 Betreiber) verschiedene Anlagenbetreiber von Biomasse-Heizwerken bzw. -Heizkraftwerken befragt.

Insgesamt acht Anlagenbetreiber lehnten die Annahme von Gehölzschnitt ab. Begründet wurde dies u. a. mit

- hohen strauchartigen Anteilen und dem hohen Wassergehalt des Gehölzschnitts, der in dieser Form von der Anlage nicht verwertet werden kann,
- bestehenden Zulieferverträgen, sodass kein zusätzlicher Bedarf an Brennstoffen besteht,
- kürzeren Wartungsintervallen durch die Verwendung von frischem Gehölzschnitt.

Die Anlagenbetreiber, die das Material annehmen, würden dieses auch vergüten, wobei über die Höhe der Vergütung keine Angaben gemacht wurden. Zwei Anlagenbetreiber würden sogar die Transportkosten übernehmen.

Zusammenfassend ist die Bereitschaft zur Annahme von Gehölzschnitt generell vorhanden. Unsicherheiten bezüglich der Herkunft bzw. der Schadstoffbelastung bestehen nicht. Anzumerken ist, dass bereits einer der Befragten Gehölzschnitt von Straßen verwendet.

Die von einigen Betreibern geforderte qualitative Aufbereitung (nach Vorgaben der Brennstoffklassen für Hackschnitzel) und Trocknung kann in Einzelfällen eine Alternative für Meistereien darstellen, um den Kreis der Abnehmer zu erweitern. Aufgrund von dadurch entstehenden Kosten und der ohnehin schon vorhandenen Bereitschaft zur Abnahme des Materials erscheint dies vorerst aber nicht empfehlenswert.

Ein einheitliches Bild zeigte die Nachfrage bezüglich der Verwertung von Grasschnitt, der grundsätzlich nicht in Verbrennungsanlagen eingesetzt wird. Ursache hierfür sind der hohe Wassergehalt sowie die technischen Auslegungsparameter der Verbrennungsanlagen. Vor diesem Hintergrund ist die Nutzung von BSG, das nur einen sehr geringen Energiegehalt besitzt, in Verbrennungsanlagen auszuschließen.

### 8.3 Verwertungsansätze für Modellmeistereien

Die zusätzliche Betrachtung ausgewählter Modellmeistereien erfolgte mit dem Ziel, durch eine vertiefende exemplarische Untersuchung mögliche energetische Verwertungsoptionen aufzuzeigen.

Daher wurden hierzu Meistereien vorgeschlagen, die mit den abtransportierten Gehölzschnittmengen eine interne Wärmebedarfsdeckung realisieren könnten. Unter diesen wurden über die zuständigen Straßenbauämter die folgenden drei Modellmeistereien ausgewählt, wobei entscheidend war, dass von den Verantwortlichen in der Meisterei ein großes Interesse an der untersuchten Thematik signalisiert wurde.

#### 8.3.1 Straßenmeisterei Wurzen (Sachsen)

Die insgesamt zu bewirtschaftende Grünfläche der SM beträgt 1,45 km<sup>2</sup>, davon entfallen 60 % auf zu pflegende Extensiv- (0,87 km<sup>2</sup>) und 40 % auf Intensivflächen (0,58 km<sup>2</sup>). Insgesamt ist ein zweispuriges Streckennetz von 295 km zu betreuen.

Im Durchschnitt der Jahre 2002 bis 2004 ergeben sich für die SM Wurzen eine abtransportierte Gehölzschnittmenge von etwa 250 m<sup>3</sup> und dementsprechend etwa 100 t FM pro Jahr bzw. 0,34 t FM/km im Jahr. Dazu wird – nach dem Beschneiden der Gehölzflächen – der Häcksler der Straßenmeisterei zum Häckseln des Ast- und Gehölzmaterials verwendet. Dieser bläst das Häckselgut direkt in einen Ladewagen. Mit diesem wird der Gehölzschnitt in die SM transportiert und zwischengelagert, wo er zur Abdeckung von Pflanzungen an Baumscheiben zur Verfügung steht. Größere Bäume und Äste, die nicht gehackt werden können, werden als Brennholz an Dritte abgegeben sowie in benachbarten Waldgebieten abgelegt. Dabei entstehen keine Entsorgungskosten.

Zur Heizungsanlage der SM Wurzen sind folgende Daten bekannt: Installiert ist eine Ölheizungsanlage mit einer Leistung von 171 kW. Diese Anlage ist seit 1992 im Betrieb. Als Brennstoff wird Heizöl eingesetzt mit einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 12.500 l im Jahr. Bei einem Heizwert von etwa 10 kWh/l (Heizöl EL) entspricht dies etwa 125 MWh/a. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 90 % der Ölheizungsanlage ergibt sich daraus eine Vollbenutzungsstundenzahl von etwa 730 h/a.

Der in der Meisterei anfallende Grasschnitt wird gemulcht und verbleibt auf den Pflegeflächen.

Mit den abtransportierten Gehölzschnittmengen kann der Wärme- bzw. Brennstoffbedarf (ungefähr 70 t/a) der Meisterei gedeckt werden. Ebenfalls positiv zu bewerten ist der Ersatzbedarf der bestehenden Anlage (Baujahr 1992). Vor diesem Hintergrund ist eine interne Nutzung des Gehölzschnitts als viel versprechend zu bewerten.

Allerdings verfügt die Meisterei am Hauptsitz nur über eine begrenzte Lagerkapazität. Durch den Ersatz der bestehenden Anlage (Heizöl) werden Brennstofflagerflächen frei, die ggf. für eine Hackschnittzellagerung zusätzlich verwendet werden können. Insgesamt sind die Lagerkapazitäten für eine mehrwöchige Brennstoffversorgung der Anlage ausreichend.

Die eigentliche Lagerung des Gehölzschnitts (zwecks der Luft-Trocknung) erfolgt auf meistereieigenen Lagerflächen, wo dieser bei Bedarf gehackt und zur Anlage transportiert werden kann. Für den Transfer Lagerplatz – Anlagenstandort ist zusätzlicher Personal- und Transportaufwand notwendig.

#### 8.3.2 Straßenmeisterei Elmshorn (Schleswig-Holstein)

In der Erhebung der TU Darmstadt [TUD, 2000] gab die SM Elmshorn eine zu pflegende Grünfläche von 35.000 m<sup>2</sup> an, die komplett als Extensivfläche bewertet wird, d. h. ungefähr einmal im Jahr gepflegt. Das Streckennetz ist zweispurig mit einer zu betreuenden Länge von 217 km.

Für die Jahre 2002 bis 2004 errechnet sich ein Holzaufkommen von durchschnittlich 2.550 m<sup>3</sup> FM pro Jahr (1.020 t/a) bzw. 4,7 t/km im Jahr, was ein vergleichsweise hohes Potenzial darstellt. Die Entsorgung des Gehölzschnitts erfolgt ähnlich wie in der zuvor beschriebenen SM Wurzen. Da die SM Elmshorn jedoch keinen Häcksler besitzt, fallen zusätzliche Ausleihkosten an bzw. Kosten für die gesamte Pflege inklusive Abtransport durch einen Auftragnehmer. Das Häckseln des Gehölzmaterials geschieht vor Ort am Straßenrand oder auf Lagerplätzen der Straßenmeisterei. Teilweise wird das gemulchte Material wieder in den Straßenrand eingebracht oder, wenn dies nicht möglich ist, kostenpflichtig entsorgt. Dabei fallen Kosten der Unternehmerleistungen für die Entsorgung in Höhe von etwa 9,20 €/m<sup>3</sup> an.

Die Heizungsanlage der SM Elmshorn ist eine Gasheizungsanlage, die 28 Jahre im Betrieb ist. Dabei

wurde vor drei Jahren in einen neuen Brenner investiert. Die Leistung der Anlage beträgt 275 kW. Der Brennstoffverbrauch wurde im Jahr mit 255 MWh angegeben. Bei einem Heizwert von 8,76 kWh/m<sup>3</sup> für Erdgas entspräche das einem Gasverbrauch von 28.912 m<sup>3</sup>/a. Bei einem Anlagenwirkungsgrad von 90 % ergibt sich daraus eine Vollbenutzungsstundenzahl von etwa 930 h/a.

Der in der Meisterei anfallende Grasschnitt wird gemulcht und verbleibt auf den Pflegeflächen.

Aufgrund des Alters der bestehenden Anlage ist ein Ersatzbedarf abzuleiten. Brennstoffseitig gehört die SM Elmshorn zu den Meistereien mit dem größten erhobenen Brennstoffpotenzial, sodass der Brennstoffbedarf (ungefähr 150 t/a) problemlos bereitgestellt werden kann.

Ebenso erscheint eine Lagerung auf dem Gelände möglich. Da die Meisterei an ein Wohngebiet angrenzt, bedarf es einer detaillierten Prüfung, inwieweit das Hacken des Gehölzschnitts vor Ort umzusetzen ist. Ansonsten würde ebenfalls zusätzlich Aufwand für den Transfer des Materials vom Lagerplatz zur Anlage notwendig.

### 8.3.3 Autobahnmeisterei Duisburg (Nordrhein-Westfalen)

Im Durchschnitt der Jahre 2001 bis 2004 ergibt sich für die AM Duisburg eine abtransportierte Gehölzschnittmenge von etwa 267 t pro Jahr. Insgesamt ist ein Streckennetz von 80,8 km zu betreuen.

Das Pflegematerial der Gehölzflächen der Autobahnmeisterei Duisburg kann kostenlos an den Zoo Duisburg abgegeben werden. Die Heizungsanlage der Meisterei stammt aus dem Jahr 1998 und hat eine Leistung von 140 kW. Als Brennstoff wurden im Durchschnitt der Jahre 2002 bis 2004 etwa 37.500 l Heizöl eingesetzt. Mit einem angenommenen Heizwert von 10 kWh/l entspricht dies etwa 375 MWh im Jahr und einer Volllaststundenzahl von etwa 2.700 h/a (angenommener Anlagenwirkungsgrad 90 %).

Im Durchschnitt der Jahre 2002 und 2003 fielen etwa 145 t FM Grasschnitt an, die nicht auf den Pflegeflächen verbleiben können und dementsprechend entsorgt werden müssen. Für eine interne Nutzung des Grasschnitts in einer Biogasanlage zur Deckung des Wärmebedarfs sind diese Mengen nicht ausreichend. Eine externe Verwertung erscheint aus den in Kapitel 8.2 beschriebenen Gründen ebenfalls nicht durchführbar.

Die Randbedingungen für eine interne Verwertung des Gehölzschnitts sind, bis auf den fehlenden Erneuerungsbedarf der Altanlage, gegeben. Weiterhin sind keine Entsorgungskosteneinsparungen zu erwarten.

### 8.3.4 Erfahrungen des Straßendienstes Niederösterreich

In Österreich wurde bereits vor 20 Jahren ein Programm zur Nutzung von Holzabfällen in Straßenmeistereien aufgestellt. Ziel war es, den Verbrauch von fossilen Brennstoffen zu minimieren und Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst zu entsorgen.

Seit 1986 wurden ungefähr 20 Holzheizungsanlagen in niederösterreichischen Straßenmeistereien gebaut sowie sieben an Biomasse-Fernwärme angeschlossen [NÖEB, 2003]. Damit entfällt der größte Teil von Holzheizungen in Straßenmeistereien auf NÖ. Zurückzuführen ist dies u. a. auf ein jahrelanges Engagement einiger Mitarbeiter des niederösterreichischen Straßendienstes [RAKOS und HACKSTOCK, 2000]. Vorausgegangen waren „Schulungs- und Motivationsarbeit“ zur arbeitssparenden Behandlung des Straßenrückschnitts und zum Betrieb von Hackgutfeuerungen. Der bei der Projektierung befürchtete Hackgutmangel blieb aus. Die gesammelten Erfahrungen wurden 1996 und 1999 umfassend ausgewertet [NÖEB, 1996; LIEHR, 1999].

#### Brennstoff-Logistik

Die Grünpflege des Straßenbetriebsdienstes in Österreich erfolgt wie in Deutschland. Ein Verbleib der holzartigen Biomasse in Böschungflächen ist die wirtschaftlichste Lösung, da keine Folgekosten für Transport, Lagerung und Hacken entstehen. Ist ein Abtransport der Biomasse notwendig, ergeben sich die Möglichkeiten

- Hacken und Deponierung,
- Zwischenlagerung und Hacken.

Im letzteren Fall kann das Material für Grünbaumaßnahmen oder zur energetischen Nutzung verwendet werden.

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass eine optimierte Hackguterzeugung aus den Arbeitsschritten Holzschnitt, Transport, Lagern, Trocknen und Hacken besteht. Beim Holzschnitt ist es je nach anfallender Menge sinnvoll, das Material entlang

des Fahrbahnrandes für den Abtransport zu „Bünden“ zusammenzulegen. Der Abtransport erfolgt mittels Holzgreifer am Autokran [LIEHR, 1999].

Zur Lagerung wird das Material auf Stöße geschichtet, um eine spätere rasche Beschickung der Häckselmaschine zu ermöglichen. Dabei muss eine gute Durchlüftung des Stoßes gegeben sein. Damit beim Hacken keine Steine oder andere Fremdkörper mit aufgenommen werden, ist auf eine geeignete Unterlage zu achten. Empfohlen wird eine Trocknungsdauer von mindestens sechs Monaten bzw. möglichst länger als ein Jahr, um den Heizwert des Holzes zu erhöhen.

Nach dem Trocknen erfolgt das Hacken. Aus ökonomischen Gründen ist der Einsatz von großen Hackmaschinen gegenüber manuell beschickten Hackern zu bevorzugen.

### Heizungsanlage

Verwendung fanden marktübliche Hackschnitzkessel mit Retortenfeuerung oder Stufenrost. Für größere Anlagen und bei hohem Rindenanteil des Hackgutes durch einen hohen Kleinastanteil ist eine automatische Entaschung sinnvoll.

Die durchschnittliche Heizungsanlage hat eine mittlere installierte Leistung von 300 kW, einen Wirkungsgrad von 80 % und ungefähr 1.500 Vollbetriebsstunden. Unter Berücksichtigung der geringeren Brennstoffkosten und der Kostenersparnis beim Holzrückschnitt amortisieren sich die höheren Investitionskosten einer durchschnittlichen Hackgutheizungsanlage nach ungefähr 5,25 Jahren.

Gegenüber Öl- und Gasheizungen zeigte sich, dass auch bei Neuanlagen mit einem höheren Betreuungsaufwand zu rechnen ist. Als wesentliche Voraussetzung für einen ökonomischen und störungsfreien Anlagenbetrieb werden die Schulung und Motivation des Personals des Straßendienstes genannt. Erzielt wurde dies durch Informationsblätter und praktische Schulung vor Ort.

### Kostenstruktur

Die Kosten für Hacken, Transport und Lagern liegen zwischen 11-65 €/Srm. In den Meistereien, in denen eine optimierte Hackgutbereitstellung erfolgt, liegen diese zwischen 11 bis 15 €/Srm deutlich im unteren Bereich. Damit lagen die Kosten unterhalb der Zukaufspreise für Fichte mit 17 €/Srm

und Buche mit 24 €/Srm [NÖEB, 1996]. Aktuelle Angaben zur Entwicklung der Bereitstellungskosten von Hackgut im niederösterreichischen Straßenbetriebsdienst liegen nicht vor.

Zum Vergleich: die aktuellen Hackschnitzelpreise in Deutschland liegen bei ungefähr 22 €/Srm (55 €/t) [CARMEN, 2005].

### Erfahrungen aus der Praxis

Hackgutheizungen in Meistereien lassen sich wirtschaftlich betreiben, wenn der Ablauf der Hackgut-erzeugung optimiert ist. Folgende Maßnahmen werden hierfür vorgeschlagen:

- Straffung des Ablaufs.
- Auch dicke Stämme müssen verwendet werden.
- Geordnete Lagerung des Holzes (dickes Ende an einer Seite und kein direkter Bodenkontakt).
- Möglichst lange Lagerung des Holzes vor dem Häckseln, mindestens 6 Monate, möglichst aber länger als ein Jahr; damit kann der Heizwert des Holzes verdoppelt werden.
- Hohe Bordwände bei den Transportfahrzeugen bzw. Anhängern.
- Informierte und eingespielte Hackmannschaft in der Meisterei.
- Sofortige Lagerung des Hackgutes für Heizzwecke in einem Lagerraum.
- Straffung der Abläufe bei der Wartung der Heizanlage.

Die Kosten für den Holzrückschnitt pro Jahr, einschließlich des Aufwands für die Manipulation des Hackgutes und die Heizungswartung, waren bei Meistereien mit Holzheizung gegenüber Meistereien ohne Holzheizung durchschnittlich 20 % geringer. Begründet wurde dies damit, dass mit der Nutzung des Rückschnitts in der eigenen Meisterei eine wirtschaftliche Organisation des Arbeitsablaufs „erzwungen“ wurde.

In Schulungen zum Umgang mit Hackgutheizungen erfolgte ein Austausch von Erkenntnissen und Anregungen durch Mitarbeiter der Meistereien. Weiterhin wurde dadurch ein Erfahrungsaustausch zwischen den Meistereien ermöglicht.

## 9 Typische Kostenstrukturen und Randbedingungen

Für die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Konzepte zur energetischen Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst werden nachfolgend die Kostenstrukturen analysiert und Kostenrechnungen durchgeführt.

Die Kostenuntersuchungen berücksichtigen dabei sämtliche Aufwendungen und Erlöse, die durch die Bereitstellung zur energetischen Verwertung und die energetische Verwertung selbst gegenüber den bisher praktizierten Verfahren entstehen. Hierzu zählen u. a.

- Kosten der Aufbereitung und Lagerung,
- Kosten und Erlöse bei Weitergabe zur energetischen Verwertung und
- Kosten der bisherigen Entsorgung des anfallenden Biomassematerials.

Standortspezifische Faktoren (z. B. Biomasseaufkommen und -qualität, Transportentfernungen, Wärmeabnahme) werden als Durchschnittswerte erhoben bzw. als Bandbreiten ausgewiesen, wenn die durch diese Faktoren zu erwartenden Effekte abgebildet werden.

Damit liegen als ein erstes Ergebnis dieses Kapitels Kostenkenngrößen für die einzelnen Prozessschritte vor, durch welche die jeweiligen Verwertungs- bzw. Energiebereitstellungskonzepte gekennzeichnet sind.

### 9.1 Kostenmodell

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Straßenbegleitgrüns erfolgt in Anlehnung an die VDI 2067 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenrechnung [VDI 2067, 2000]. Nach VDI 2067 werden folgende vier Kostenarten betrachtet:

- kapitalgebundene Kosten,
- verbrauchsgebundene Kosten,
- betriebsgebundene Kosten und
- sonstige Kosten.

Diese werden auf Basis der Annuitätenmethode<sup>13</sup> gemäß VDI 2067 durchgeführt, bei der die Kosten finanzmathematisch über die Nutzungsdauer als

jährliche Beträge aufgeteilt werden und damit der konkrete Vergleich von Investitionsalternativen möglich ist.

Die Annuitätenmethode ist ein Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung, welche ausgehend von Einzahlungs- und Auszahlungsströmen einer Investition bis zum Ende der Nutzungsdauer betrachtet wird. Dementsprechend werden die durchschnittlichen jährlichen Zahlungen (Ein- und Auszahlungen) unter Berücksichtigung der Zahlungszeitpunkte und Zinseszinsen in die so genannte Annuität (A) umgewandelt.

A: Annuität einer Investition

$K_0$ : Kapitalwert

i: Zinssatz

n: Nutzungsdauer

$$A = K_0 \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Nach der Annuitätenmethode ist die Vorteilhaftigkeit einer Investition gegeben, wenn die Differenz der Annuitäten (Einnahmen, Ausgaben) größer null ist. Vorteil dieser Methode ist eine einfachere Interpretierbarkeit der Ergebnisse, da aus periodengebundenen Größen der durchschnittliche Gewinn/Verlust ermittelt wird [WÖHE, 2005].

### 9.2 Allgemeine Annahmen

Für die weiteren Kostenrechnungen in dieser Arbeit werden nachfolgende Randbedingungen vorgegeben (siehe Tabelle 21):

- Kalkulationszins,
- Betrachtungszeitraum und
- Inflationsrate.

Dabei wird der Barwertfaktor (Tabelle 21) verwendet, um den Preis einer Komponente für eine vorgegebene Inflationsrate zu einem zukünftigen Zeitpunkt zu bestimmen. In Multiplikation mit dem An-

<sup>13</sup> Die Annuitätenmethode ist in die Kapitalwertmethode überführbar, welche auch durch die Bundeshaushaltsordnung, kurz BHO, als eine der bevorzugten Wirtschaftlichkeitsmethoden des öffentlichen Verwaltungswesens empfohlen wird. Vorteilhaft gegenüber der Kapitalwertmethode ist ihre relativ einfache Beurteilung der Zielgröße, Durchschnittsgewinn bzw. der -kosten pro Periode.

Betrachtungszeitraum	20	Grau:		Eingabefelder			
Kalkulationszinssatz $i$	3,70 %						
Annuitätenfaktor $a$	0,0716						
Zins (%)							
3,70 %	Aufzinsungsfaktor	$q$	1,037	Barwertfaktor		Preisdynamischer Annuitätsfaktor	Barwertfaktor $\times$ Annuitätsfaktor
3,00 %	kapitalgebundene Zahlungen	$r_K$	1,030	$b_K$	18,098	$ba_K$	1,297
3,00 %	verbrauchsgebundene Zahlungen	$r_V$	1,030	$b_V$	18,098	$ba_V$	1,297
2,00 %	betriebsgebundene Zahlungen	$r_B$	1,020	$b_B$	16,559	$ba_B$	1,186
2,00 %	sonstige Zahlungen	$r_S$	1,020	$b_S$	16,559	$ba_S$	1,186
3,00 %	Zahlungen für Instandhaltung	$r_{IN}$	1,030	$b_{IN}$	18,098	$ba_{IN}$	1,297
3,00 %	Einzahlungen	$r_E$	1,030	$b_E$	18,098	$ba_E$	1,297

Tab. 21: Rahmendaten der Wirtschaftlichkeitsrechnung für Feuerungsanlagen

nuitätenfaktor ergibt sich der „preisdynamische Annuitätenfaktor“, welcher die Annuität des Komponentenpreises auf den Betrachtungszeitraum ableitet.

### Kalkulationszins

Bei den kapitalgebundenen Kosten wird mit einem Kalkulationszins für das eingesetzte Kapital gerechnet (Mischzinssatz aus verfügbarem Eigen- und Fremdkapital). Der Kalkulationszinssatz von Kostenmodellen für den öffentlichen Dienst wird jährlich durch das Bundesministerium für Finanzen (BMF) zusammen mit Personalkostensätzen und Sachkostenpauschalen veröffentlicht. Für das Jahr 2005 wurde dieser mit 3,7 % p. a. real und 4,5 % p. a. nominal festgelegt [BMF, 2004]. Dies entspricht einem günstigen Zinssatz, wie er beispielsweise von der KfW derzeit häufig für Biogasprojekte gewährt wird.

### Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum ist abhängig von den eingesetzten bzw. geplanten Anlagenkonzepten.

Der Betrachtungszeitraum wird je nach Anlagentyp für Feuerungsanlagen auf 20 Jahre und Biogasanlagen auf 16 Jahre festgelegt. Die Nutzungsdauer der meisten technischen Komponenten der beiden Anlagenkonzepte ist auf die vorgegebenen Zeitspannen ausgelegt. Anlagenteile, die nach VDI 2067 eine niedrigere Nutzungsdauer besitzen, werden mit Ersatzinvestitionen berücksichtigt sowie gegebenenfalls der verbleibende Restwert berechnet bzw. bewertet.

### Inflationsrate

Nach den Vorgaben der VDI 2067 wird für die Inflationsrate von kapitalgebundenen und verbrauchsgebundenen Zahlungen sowie für Instandhaltung und Einzahlungen eine Preissteigerungsrate von 3 % angenommen. Die betriebsgebundenen und sonstigen Zahlungen unterliegen einer Preissteigerung 2 %.

## 9.3 Kostenstruktur Holzfeuerung

### 9.3.1 Kapitalgebundene Kosten

Die Investitionskosten der einzelnen Anlagen gehören zu den kapitalgebundenen Kosten. Diese lassen sich weiter unterteilen in Kosten der Bautechnik, der Maschinentechnik, der Elektro- und Leittechnik und sonstige Kosten.

Um eine aussagekräftige Datengrundlage zu erhalten, werden sowohl allgemeine Vorgaben der Literatur [FNR, 2001/2005; HAF, 2004; ASUE, 2003] als auch konkrete Investitionskosten von installierten Holzfeuerungen [FRANZEN und PALZER, 2000] sowie Angebote verschiedener Anlagenhersteller<sup>14</sup>, die für die in Kapitel 8.3 beschriebenen Modellmeistereien erhoben wurden, herangezogen.

In der Literatur werden für automatisch beschickte Holzfeuerungsanlagen zur Wärmeerzeugung, einschließlich Beschickung, Entaschung, Luft- und Rauchgasreinigung, mit thermischen Leistungen von 100-500 kW spezifischen Kosten von 150-250 €/kW angegeben [FNR, 2001/2005].

Es wird angenommen, dass im kleinen Leistungsbereich (100 kW) höhere spezifische Kosten anfallen als in größeren Leistungsbereichen (500 kW) (Kostendegression des „scale-up“).

<sup>14</sup> Siehe Kontaktpersonen Angebot Zentral-Heizungsanlagen

Zur Darstellung marktüblicher Kosten werden daher zusätzlich Informationen bereits installierter Anlagen sowie Angaben aus aktuellen Angeboten herangezogen. Diesbezüglich wird die installierte Leistung in Abhängigkeit der Investitionskosten dargestellt, sodass sich daraus spezifische Kosten in Euro pro kW ergeben.

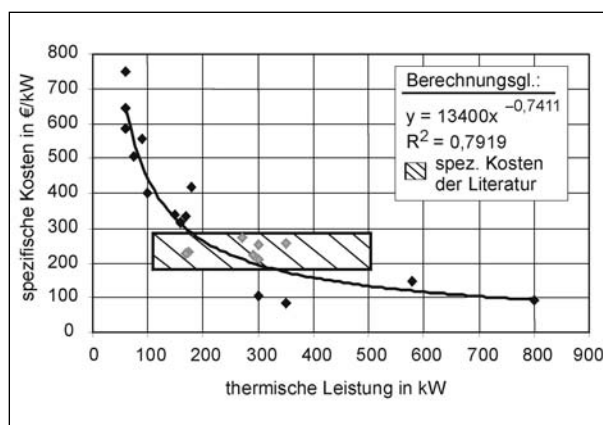
Dies wird in Bild 25, in Form der einzelnen spezifischen Kosten der Feuerungsanlagen, dargestellt, aus denen eine Gleichung entwickelt wird, die eine charakteristische Abschätzung von Kosten ermöglicht. Das Bestimmtheitsmaß<sup>15</sup> der Variablen (spezifische Kosten und thermische Leistung) beträgt 0,79. D. h. dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,79 der lineare Zusammenhang der Gleichung in Bild 25 abgebildet wird.

Für die Angebote ist eine problemlose Zuordnung von Nutzungsdauer und Anlagenteil möglich. Für die Literaturdaten und die bereits installierten Anlagen zeigt sich jedoch die Schwierigkeit, dass diese Zuordnung nicht möglich ist. Daher erfolgt eine prozentuale Aufteilung der Investitionskosten in Bautechnik, Wärmeerzeugung/Maschinentechnik, Elektro-/Leittechnik, Brennstoffversorgung und sonstige Kosten. Letztere enthalten etwaige Nebenkosten (wie Planung, Gutachten und dergleichen), die Mehrwertsteuer und unvorhergesehene Kosten [FNR, 2001].

- Bautechnik 12,5 %
- Wärmeerzeugung/Maschinentechnik 50,0 %
- Elektro-/Leittechnik 12,5 %
- Brennstoffversorgung 15,0 %
- Sonstige Kosten 10,0 %

Die Zuordnung erfolgt dabei nach der Art der Anlagenteile, deren Nutzungsdauer und den kapitalgebundenen Instandhaltungskosten aus den Tabellen A2-A4 der VDI 2067.

Investitionskosten für mit Heizöl oder Erdgas befeuerte Anlagen können erfahrungsgemäß mit etwa der Hälfte der mit Hackschnitzeln befeuerten Heizanlagen angenommen werden. Das heißt, für die in



**Bild 25:** Spezifische Investitionskosten bestehender Hackschnitzelfeuerungen

Anlagenleistung	Kosten
15-60 kW	80 €
75-100 kW	150 €
120-150 kW	200 €
200-300 kW	300 €
400-500 kW	400 €
650-850 kW	500 €

**Tab. 22:** Übersicht der Elektroinstallationskosten

dieser Arbeit betrachteten Referenzanlagen werden die Investitionskosten für Heizölheizanlagen mit 50 % und für Erdgasheizanlagen mit 60 % niedrigeren Investitionskosten gegenüber Hackschnitzel-Anlagen angenommen [BUNK, 2003; FNR, 2001].

Beispielhaft ist in Anlage G eine Investitionskostenrechnung für Feuerungsanlagen dargestellt.

Zu den weiteren kapitalgebundenen Kosten gehören die Inbetriebnahmekosten, die sich aus den Fracht-, Montage-, Betriebnehmungskosten und der Elektroinstallation zusammensetzen. Die Frachtkosten werden pauschal mit 500 € angenommen, wogegen die Elektroinstallationskosten gestaffelt nach Anlagenleistung festgelegt werden (siehe Tabelle 22).

Für den Betriebnehmungspreis werden pauschal 1.500 € [Angebote Holzheizungen] veranschlagt sowie für die Montage der Kesselanlage 10 % der Investitionssumme.

Zudem wird für die Betrachtung der Heizungsanlagen festgelegt, dass sich diese auf dem Hof der Straßen- bzw. Autobahnmeisterei befinden und gegebenenfalls Einsatzfahrzeuge (Unimog, Radlader

<sup>15</sup> Das Bestimmtheitsmaß wird in der Statistik verwendet und wird anstelle des Korrelationskoeffizienten angegeben. Es gilt, je näher das Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) an 1 liegt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit des linearen Zusammenhangs der hier dargestellten Gleichung.



u. a.), die für die Installation der Heizungsanlage notwendig werden könnten, kurzfristig genutzt werden können. Demzufolge werden nur in diesem Fall die Anschaffungs- bzw. Leasingkosten für Fahrzeuge etc. nicht berücksichtigt. Davon sind die benötigten Maschinenkosten bzw. Anschaffungskosten von Transportfahrzeugen, die für die Bereitstellung des Gehölzschnitts notwendig sind, nicht betroffen. Diese werden ausdrücklich für die Biomassegewinnungs- und Bereitstellungskosten in Kapitel 9.5.2 berücksichtigt.

### 9.3.2 Verbrauchsgebundene Kosten

#### Brennstoff

Die spezifischen Brennstoffkosten der einzelnen Brennstoffträger sind der Tabelle 23 zu entnehmen. Diese entsprechen für Erdgas und Heizöl einem Mittelwert der letzten 10 Jahre sowie für Hackschnitzel einem Mittelwert der letzten 5 Jahre (siehe Bild 26). Der Gaspreis ist zuzüglich eines Grundpreises des Energiebereitstellers, der mit 220 €/a abgeschätzt wird, zu sehen [BMW, 2005; BS, 2005; TECSON, 2005].

Die Höhe der fossilen Brennstoffkosten für Erdgas und Heizöl sind in Abhängigkeit von den Rohölpreisen zu sehen. Der entsprechende Rohölpreis liegt in etwa bei 25 \$/barrel. Langfristige Prognosen sehen verschiedene Zielbereiche für die Entwicklung des Rohölpreises. Die OPEC<sup>16</sup> definiert diesen zwischen 22 und 28 US\$/barrel. Für mittel- und langfristige Lieferungen wird Rohöl aktuell mit etwa 60\$/barrel (Oktober 2005) gehandelt.

Vor diesem Hintergrund können die hier angenommenen Brennstoffpreise als realistische Marktpreise, die eher im unteren Band angesiedelt sind, gesehen werden [IE, 2005a].

Der marktübliche Hackschnitzelpreis ist stark abhängig vom Wassergehalt des Holzes. Der in Tabelle 23 dargestellte Hackschnitzel-Mittelwert entspricht einem Wassergehalt von 35 % und Bild 26. Diese Hackschnitzelpreise kommen lediglich zur Anwendung, wenn die im Rahmen des Straßenbetriebsdienstes anfallenden Mengen nicht ausreichend sind.

Die ausführliche Darstellung erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

Energie-träger	Bezugs-einheit (BE)	Heizwert in kWh/BE	Brennstoffpreis in €/BE	spez. Brennstoffpreis in Ct/kWh
Hackschnitzel	kg	3,0	0,050	1,60
Erdgas	m <sup>3</sup>	10,00	0,334	3,34
Heizöl	l	9,97	0,311	3,12

Tab. 23: Spezifischer Brennstoffpreise verschiedener Energieträger der letzten Jahre

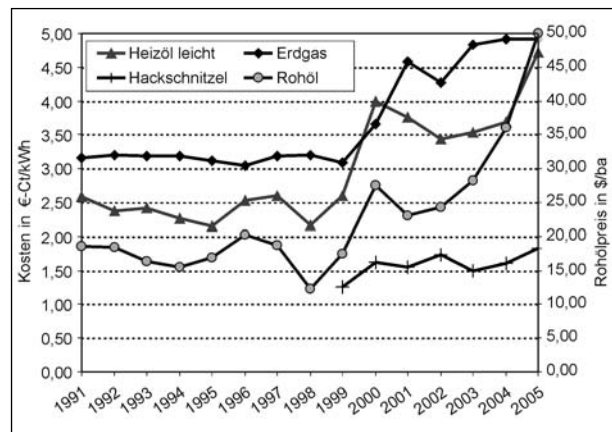


Bild 26: Brennstoffkostenvergleich verschiedener Brennstoffe

#### Hilfsenergie

Neben den Brennstoffkosten zählen auch die Hilfsenergiekosten zu den verbrauchsgebundenen Kosten. Die darunter fallenden Stromkosten werden mit 0,7 % der thermischen Leistung und mit einem Strompreis von 0,16 €/kWh angesetzt. Dies gilt für alle untersuchten Anlagentypen.

Bei Hackschnitzelfeuerungen entstehen zusätzliche Kosten für Hilfsenergie, da das Material nicht rieselfähig ist und somit elektrisch betriebene Beschickungsanlagen notwendig sind. Angenommen wird ein zusätzlicher Stromverbrauch von 10 kWh je Kubikmeter Hackschnitzel. Daraus ergeben sich 1,6 €/m<sup>3</sup> bzw. 0,64 €/t.

### 9.3.3 Betriebsgebundene Kosten

Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören Wartungs- und Reinigungskosten sowie Schornsteinfegergebühren. Diese werden im Nachfolgenden beschrieben.

#### Wartungs- und Reinigungskosten

Die Kosten der Wartung und Reinigung liegen aufgrund der aufwändigeren Technik (Brennstoffversorgung) höher als für vergleichbare mit Heizöl

<sup>16</sup> OPEC: Organization of the Petroleum Exporting Countries

oder Erdgas befeuerte Heizungen. Insgesamt werden die Wartungs- und Reinigungskosten mit 1,5 % der Investitionskosten abgeschätzt, wodurch auch die beschriebenen Kostendifferenzen durch die höheren Investitionskosten der Hackschnitzelanlage berücksichtigt werden. Angemerkt wird, dass die Instandhaltungskosten der Anlagen bereits in den kapitalgebundenen Kosten berücksichtigt werden

### Schornsteinfegergebühren

Die Höhe der Schornsteinfegergebühren ist abhängig von den jeweiligen Vorgaben der Kehrverordnung der einzelnen Bundesländer und des jeweiligen Brennstoffes der Feuerungsanlage.

Nach Angaben des Landesinnungsverbandes des Schornsteinfegerhandwerks Sachsen [LIV Sachsen] belaufen sich die Gebühren für Heizöl- und Erdgaszentralheizungen im kleinen Leistungsbereich auf 50-60 € und für automatisch beschickte Holzfeuerungsanlagen auf 155 €. Diese Angaben gelten ausschließlich für Sachsen und können für andere Bundesländer schätzungsweise bis zu 20 % höher liegen.

### 9.3.4 Sonstige Kosten

Zu den sonstigen Kosten gehören etwaige Kosten für Lagerkapazitäten, sofern sie nicht bereits als Brennstoffbehälter in den Investitionskosten berücksichtigt sind, Versicherungs- und bauseitige Kosten. Die für die baulichen Maßnahmen vorgesehenen Hilfskräfte sind bauseitig bereitzustellen, sodass diese ebenfalls dieser Kostengröße zugeordnet werden.

### Lagerkapazität und -kosten

Die Lagerung der Biomasse ist zur Überbrückung der Zeitspanne zwischen dem Anfall und ihrer energetischen Nutzung erforderlich. Im Falle von Meistereien ist sie auch notwendig, um einen für die Verbrennung optimalen Wassergehalt des Gehölzschnitts zu erreichen [FNR, 2001].

Für die kurzfristige Brennstoffversorgung ist eine Lagerung direkt an der Heizungsanlage sinnvoll. Je nach Anlagenhersteller sind hierfür unterschiedlich dimensionierte Behälter oder die Austragung aus entsprechenden Lagerräumen vorgesehen, sodass die Kapazität ausreichend für die Brennstoffversorgung über mehrere Tage ist.

Die Gestaltung der Lagerflächen ist abhängig von der Struktur der Biomasse (Hackschnitzel oder Gehölzschnitt), der Zeitspanne zwischen Einlagerung und Nutzung und dem Wassergehalt. Zur Reduzierung des Wassergehalts der Biomasse kann eine Nachtrocknung durch Belüftung des Lagers notwendig sein.

In Abhängigkeit vom Wassergehalt oder der Materialstruktur kann eine Zwangsbelüftung erforderlich sein.

Für Meistereien bieten sich daher folgende Lagerungen an der Holzfeuerungsanlage an [FNR, 2001]:

- oberirdisches Rundsilos,
- oberirdische Lagerhalle oder
- unterirdischer Lagerraum.

Dementsprechend umfassen Brennstofflager die Komponenten [FNR, 2001]

- Lager mit Be- und Entlüftungseinrichtung,
- Lagerbeschickung bzw. -eintragung (Kran, Radlader, Fördereinrichtungen etc.),
- Messeinrichtung,
- Lageraustragungseinrichtung und
- Überwachungseinrichtung.

Die Kosten der Fördertechnik der Lagerbeschickung des kurzfristigen Lagers an der Anlage sind bereits in den Investitionskosten enthalten.

Weiterhin sind für die Gehölzschnitzaufbereitung Hacker erforderlich, die nur z. T. bereits im Gerätepark von Meistereien enthalten sind und in diesen Fällen nur kleine Stammdurchmesser verarbeiten können. Daher ist die Erweiterung des Geräteparks, das kurzfristige Anmieten entsprechender Geräte oder die Kooperation in Form von Maschinenringen verschiedener Meistereien vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Daher werden diese Kosten für Maschinenteknik für die Bereitstellungskosten von Gehölzschnitt berücksichtigt (siehe Kapitel 9.5.2).

Vorzusehen sind möglichst kurze Brennstoff-Wege vom Lager zum Kessel.

Als Kenngröße für die Lagerkapazität können nach eigenen Berechnungen rund 0,625 m<sup>2</sup> pro kW angenommen werden. Werden die Hackschnitzel vor Ort produziert, ist hierfür ein zusätzlicher Flächenbedarf von etwa 100 m<sup>2</sup> notwendig [FNR, 2005].

## Versicherung

Kosten für die Versicherung werden für Heizölanlagen geringfügig höher liegen als die der Erdgas- und Hackschnitzelanlagen. Dies ist bedingt durch einen höheren Risikofaktor, den Versicherungsgesellschaften bei solchen Anlagen festlegen. Diesbezüglich werden die Versicherungskosten mit 0,5 % der Investitionskosten bzw. mit 1 % für Heizölanlagen abgeschätzt.

## Bauseitige Kosten

Es wird davon ausgegangen, dass die Holzfeuerungsanlage sowie das kurzfristige Brennstofflager bzw. der Brennstoffbehälter – durch den Ersatz von Altanlagen – in bestehenden Gebäuden mit passiver Trocknung unterzubringen sind. Insbesondere für Heizölanlagen erscheint dies realistisch, wohingegen der Ersatz von Erdgasheizungen gegebenenfalls – bei entsprechendem Kapazitätsmangel – nicht möglich ist. Insgesamt wird angenommen, dass diesbezüglich keine zusätzlichen baulichen Kosten entstehen.

Für die Zwischenlagerung des Gehölzschnitts bieten sich gegebenenfalls bestehende Gebäude wie Fahrzeug- oder Gerätehallen an.

Ist dies nicht möglich oder die räumliche Nähe zur Feuerungsanlage bzw. zum kurzfristigen Lager nicht gegeben, ist ein Neubau notwendig. Die Kosten hierfür liegen je nach technischer Ausstattung (z. B. mit Zwangstrocknung oder Fördertechnik) zwischen 35-65 €/m<sup>3</sup> für die Hackschnitzzellagerung (siehe Kapitel 8.1.1) [FNR, 2001].

Alternativ ist auch je nach Art der Materialstruktur eine Lagerung auf Freiflächen möglich. Zur Vermeidung von unnötiger Schmutz- oder Fremdstoffaufnahme ist hierfür ein fester Untergrund sinnvoll. Dies entspricht den Erfahrungen des Straßenbetriebs in Niederösterreich, wo der Gehölzschnitt zur Trocknung zwischengelagert wird, um ihm bei Bedarf zu hacken (siehe Kapitel 8.3.4). Diese Vorgehensweise wird für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angenommen, sodass lediglich eine Erweiterung des kurzfristigen Brennstofflagers ohne zusätzliche Trocknungstechnik notwendig ist.

Dabei wird das kurzfristige Lager durch eine Neubauhalle mit einem Lagervolumen, das dem halbjährlichen Brennstoffbedarf einer durchschnittlichen Meisterei von ungefähr 84 t bzw. 210 m<sup>3</sup> (Jah-

resbedarf 168 t/a) entspricht, ersetzt. Angenommen werden mittlere Kosten von 50 €/m<sup>3</sup> inklusive entsprechender Fördertechnik.

Weitere bauseitige Leistungen für die Installation der Holzfeuerungsanlage, wie z. B. Stemm- oder Maurerarbeiten, werden nicht berücksichtigt, da sie ebenfalls in ähnlicher Größenordnung bei Heizöl- oder Gasheizungsanlagen anfallen würden.

## Hilfskräfte

Für die Montage der Feuerungsanlage sind vom Auftraggeber zusätzlich erforderliche Hilfskräfte auf Anforderung des Monteurs zur Verfügung zu stellen. Die Kosten der zu erbringenden Arbeiten der Hilfskraft können mit ca. 25 % der Kosten für den Fachmonteur abgeschätzt werden. Dies deckt auch die Kosten für das Einbringen in den Heizraum und das Abladen der Anlage, welche mit dem vor Ort vorhandenen Gerät bewerkstelligt werden können.

## 9.4 Kostenstruktur Biogasanlage

### 9.4.1 Kapitalgebundene Kosten

Zu den kapitalgebundenen Kosten gehören die Investitionskosten, nötige Ersatzinvestitionen von Anlagenteilen sowie die Kosten für die Instandhaltung der Biogasanlage.

Die Biogasanlagen werden gemäß den amtlichen Afa-Tabellen [Afa, 2005] mit 16 Jahren abgeschrieben. Bei Technikkomponenten und BHKW wird mit einer Abschreibungsdauer von 8 Jahren gerechnet, sodass der Kostenanteil für Technikkomponenten nach 8 Jahren ersetzt werden muss [MAURER, 1999]. Aufgrund der hohen Ligningehalte von Grasnchnitt ist die Feststoffvergärung besser geeignet als die Nassvergärung. Die Investitionskosten werden zur Vereinfachung der wirtschaftlichen Berechnung in 75 % Kosten für bauliche Teile und 25 % für Technik und BHKW aufgeteilt und orientieren sich an Richtpreisangeboten von Anlagenplanern.

- Die Investitionskosten für bauliche Anlagenteile beziehen sich sowohl auf die Fertigungskosten der Fermenter, Gebäude, Torsysteme oder Biofilter als auch auf die notwendigen Erdarbeiten und Fundamentkosten.
- Unter der Kostenposition Technik werden die maschinellen Komponenten sowie die Gastechnik der Biogasanlagen zusammengefasst.

Ferner wird davon ausgegangen, dass am Ende der Abschreibungsdauer von 16 Jahren kein Restwert der Anlagen vorliegt. Der Wert der Anlage wird also bis auf null gemindert. Es wird kein Unterschied zwischen direkten (Sachgütern) und indirekten Investitionsausgaben (Planung und Inbetriebnahme) gemacht.

Zudem wird für die Betrachtung der Modellbiogasanlagen festgelegt, dass sich die Biogasanlagen auf dem Hof der Straßenmeisterei befinden und Einsatzfahrzeuge (Unimog, Radlader u. a.) mitgenutzt werden können. Demzufolge werden lediglich die Investitionskosten der Biogasanlage inkl. Substratlager (Fahrsilo) betrachtet, nicht aber die Anschaffungskosten für Transportfahrzeuge.

Zur Berechnung der Instandhaltungskosten werden für bauliche Komponenten 1 % und für technische Komponenten 2 % der Investitionssumme angenommen.

#### 9.4.2 Verbrauchsgebundene Kosten

##### Substrat

Für die Bereitstellung des Grasschnitts sind das Schneiden, das Aufsammeln sowie der Transport des Grünmaterials zu den Straßenmeistereien und schließlich die Silierung des Substrates erforderlich.

Da das Schneiden des Grünmaterials durch die Pflege der Straßenmeistereien ohnehin notwendig ist, wurden lediglich die Kosten für das Aufsammeln des Grünguts berücksichtigt. Wird das Grünmaterial der einzelnen Straßenmeistereien zentral zu einer Gemeinschaftsbiogasanlage transportiert, so fallen zusätzlich sog. Transferkosten an. Während die Höhe der Kosten für das Aufsammeln und den Transport des Grasschnitts je nach Szenario variieren (s. Kapitel 9.2), wurden die Silagekosten und die Einbringung des Substrates mittels Radlader in das Substratsilo für alle betrachteten Anlagenvarianten einkalkuliert.

Aufgrund der unterschiedlichen Anlagenvarianten sowie Anlagengrößen und der damit verbundenen Jahreskapazitäten an Grünmaterialien fallen unterschiedliche Kosten für die Bereitstellung der Biomasse an. Die einzelnen Szenarien und Anlagenvarianten werden im Abschnitt Szenarien im folgenden Kapitel detaillierter beschrieben.

##### Hilfsenergie

Des Weiteren sind die Kosten für die Hilfsenergie zu berücksichtigen, die beim Betrieb der Anlage er-

forderlich ist. Die benötigte elektrische Energie der Anlagen wird aus wirtschaftlichen Gründen extern eingekauft, wohingegen die benötigte thermische Energie durch die produzierte Abwärme gedeckt wird.

#### 9.4.3 Betriebsgebundene Kosten

##### Personal

Bei größer dimensionierten Anlagen können die Personalkosten einen großen Teil der Stromgestehungskosten ausmachen. Die Personalkosten richten sich nach dem Arbeitszeitaufwand (gemessen in Arbeitskraftstunden Akh) und damit verbunden nach der Größe der Anlage. Die Kosten für den personellen Aufwand wurden anhand von Richtpreisangeboten der Anlagenplaner ermittelt. Für die Modell-Biogasanlagen unter 4.500 t Grasschnitt im Jahr wurde ein Personalaufwand von 3 Akh/d angenommen, während die größeren Anlagen (> 6.000 t/a) mit 4 Akh/d berechnet wurden. Der Personalaufwand ergibt sich aus der Fermenterbeschickung und -entleerung, einfachen Installations- und Wartungsarbeiten sowie Kontrollgängen. Die Lohnkosten für das Anlagenpersonal wurden mit 25 € pro Arbeitskraftstunde festgelegt (inkl. Arbeitgeber-Anteil).

##### Wartung und Reinigung

Für die Berechnung der Wartungskosten werden für bauliche Komponenten 1 % und für technische Komponenten 4 % der Netto-Investitionssumme angenommen [MAURER, 1999].

#### 9.4.4 Sonstige Kosten

Sonstige Kosten sind meistens Positionen, in denen unzuordenbare Aufwendungen verbucht werden. Dazu zählen in erster Linie Versicherungs- und Verwaltungskosten.

##### Lagerkapazitäten und -kosten

Die Kosten der Substratlagerung sind in den kapitalgebundenen Kosten berücksichtigt, da in allen Fällen ein Neubau des Lagers notwendig ist und nicht auf bestehende Gebäude zurückgegriffen werden kann.

##### Versicherung

Die Versicherungskosten umfassen i. d. R. die Aufwendungen für die Haftpflicht- und Maschinenver-

sicherungen sowie sonstige Versicherungen gegen Elementarschäden. Die Kosten für die Versicherung sind vom Versicherungsangebot abhängig und variieren in der Praxis zwischen 0,5 und 1,5 % der Investitionskosten. In den Anlagenvarianten wurden Versicherungskosten von 1 % der Nettoinvestitionen angenommen.

### Bauseitige Kosten

Alle bauseitigen Kosten werden bereits bei den kapitalgebundenen Kosten berücksichtigt.

### Hilfskräfte

Kosten für Hilfskräfte fallen nicht zusätzlich an bzw. sind als Personalkosten in den betriebsgebundenen Kosten berücksichtigt worden.

### 9.4.5 Biogaserträge und -erlöse

Als Gasertrag für Grasschnitt wurde 150 m<sup>3</sup>/t FM angenommen. Gemäß FNR-Handreichung für Biogas [FNR, 2005b] liegt der Gasertrag für Grasschnitt zwischen 150-200 m<sup>3</sup>/FM. Aufgrund der schlechteren Qualität des Straßenbegleitgrüns im Vergleich zu frischem Grasschnitt wird jedoch der untere Gasertrag angenommen. Der durchschnittliche Methangehalt des entstehenden Biogases beträgt 55 %.

### BHKW

Hinsichtlich der Leistung des BHKW kann von etwa 7.500 Betriebsstunden ausgegangen werden. Dies entspricht einer Anlagenverfügbarkeit von 86 %. Der elektrische und thermische Wirkungsgrad des BHKW richtet sich nach der Größe der Biogasanlage. Je größer die installierte Motorleistung des BHKW, desto höher ist der elektrische Wirkungsgrad. In Tabelle 24 sind die Wirkungsgrade der BHKW-Module im Überblick dargestellt.

Biogasanlagen-Kapazität [t/a]	Anzahl der SM	Elektr. Wirkungsgrad [%]	Thermischer Wirkungsgrad [%]
1.500	1	30	54
3.000	2	30	54
4.500	3	32	52
6.000	4	34	50
7.500	5	34	50
9.000	6	36	48

Tab. 24: Überblick über die betrachteten Anlagengrößen mit Wirkungsgraden des BHKW

### Stromvergütung

Als Grundvergütung für den erzeugten Strom aus Biogas werden für Anlagen bis 150 kW installierter Leistung 11,33 Cent/kWh im Bezugsjahr 2005 gewährt. Für innovative Technologien wie die Feststoffvergärung sieht das EEG zusätzlich zur Grundvergütung einen sog. Technologie- bzw. Innovationsbonus von 2 Cent/kWh vor. Zusätzlich kann für Straßenbegleitgrün bzw. für Grüngut aus der Landschaftspflege der Nawaro-Bonus von 6 Cent/kWh gemäß der Positivliste des Fachverbandes Biogas e. V. gewährt werden [FVB, 2004]. Demnach ergibt sich eine Stromvergütung von 19,33 Cent/kWh.

Größere Anlagen und Anlagen, die nach 2005 in Betrieb genommen werden, erhalten eine um wenige Prozente reduzierte Vergütung.

## 9.5 Biomassegewinnungs- und Bereitstellungskosten

Nachfolgend werden typische Biomassegewinnungs- und Bereitstellungskosten für Gras- und Gehölzschnitt ermittelt.

Unabhängig von den beschriebenen Pflegemaßnahmen des Straßenbetriebsdienstes (siehe Kapitel 4) werden für Gras- und Gehölzschnitt Biomassegewinnungs- und Bereitstellungskosten ermittelt. Damit wird eine Berechnungsgrundlage gelegt, die unabhängig von den tatsächlichen anfallenden Mengen bzw. den für eine energetische Verwertung zur Verfügung stehenden Mengen ist. Somit ist es möglich, die Brennstoff- bzw. Substratkosten für eine interne energetische Verwertung des Straßenbegleitgrüns am Standort der Meisterei abzuschätzen.

### 9.5.1 Grasschnitt

Für die Bereitstellung von Grasschnitt sind das Schneiden, das Aufsammeln sowie der Transport des Grünmaterials zu den Straßenmeistereien und schließlich die Silierung des Substrates erforderlich.

Laut Angaben des Landesbetriebs Straßenbau NRW Niederlassung Krefeld [RHODE] betragen die Kosten für Schneiden und Mulchen der Grünfläche etwa 0,10 €/m<sup>2</sup>. Diese Angaben decken sich mit den Aussagen der Unternehmen im Landschafts- und Pflegebereich, die im Rahmen einer telefo-

275 km/a, 15 d (Touren) = 18,2 km/d (Tour)		
Maschinenkosten Traktor	19,71	€/h
Maschinenkosten Anhänger	16,23	€/h
Arbeitslohnkosten	20	€/h
Gesamt	55,9	€/h
Beladung geschätzt	10	t
Geschwindigkeit	25	km/h
Tour/Tag	18,2	km
Beladungszeit (Hin/Rück)	1,46	h
Beladungsmenge t/h	6,9	t/h
Kosten €/t	8,1	€/t
Kosten/t (km)	0,4	€/t (km)

Tab. 25: Ermittlung der Transportkosten

nischen Umfrage Kosten zwischen 0,08 und 0,15 €/m<sup>2</sup> angaben. Bei einem durchschnittlichen Grasschnittertrag von 6,3 t/km und einer durchschnittlich zu bearbeitenden Fläche von 0,6 ha/km ergeben sich Kosten für das Schneiden und Mulchen in der Höhe von 95 €/t.

Unter der Annahme, dass der Großteil der Kosten auf das Schneiden des Grünmaterials zurückzuführen ist und dieser Arbeitsschritt durch die Pflege der Straßenmeistereien ohnehin notwendig ist, wurden lediglich 25 % der Kosten für das Aufsammeln des Grasschnitts berücksichtigt. Die abgeschätzten Kosten für das Aufsammeln des Grasschnitts betragen demnach etwa 24 €/t.

Für die Ermittlung der Transportkosten wird angenommen, dass die Grasschnittmengen mit einem Standardtraktor inkl. Anhänger mit einer Ladekapazität von 18 t bzw. 33 m<sup>3</sup> zur Straßenmeisterei transportiert werden. Aufgrund der Dichte von Grasschnitt können bei der angegebenen Ladekapazität von 33 m<sup>3</sup> etwa 10 t Grasschnitt transportiert werden. Die Daten für die Maschinenkosten basieren auf den Angaben der KTBL [KTBL, 2005]. Ferner wird angenommen, dass durchschnittlich 275 km je Straßenmeisterei bearbeitet werden (siehe Kapitel 3.1). Wird des Weiteren unterstellt, dass die Pflege (extensiv und intensiv) der zu bearbeitenden Streckenlängen in Touren von 18 bis 20 km erfolgt, so entspricht dies einer Anzahl von etwa 15 Tagen im Jahr.

Bei einer Geschwindigkeit des Transportfahrzeuges von 25 km/h wird für die Hin- und Rückfahrt mit 10 t Beladung rund 1,5 h benötigt. Dies entspricht etwa 6,9 t je Stunde. Anhand der zugrunde gelegten Maschinenkosten für den Traktor und An-

Menge t/ha	Kosten €/ha	Kosten €/t
3	6,72	2,24
6	8,49	1,42
7,5	9,58	1,28
9,45	13,75	1,46
12	17,82	1,49
15	21,27	1,42

Tab. 26: Silagekosten inkl. Radladereinsatz in Abhängigkeit vom Hektarertrag [Datengrundlage KTBL, 2005]

hänger von insgesamt 35,94 €/h und der Arbeitslohnkosten von 20 €/h ergibt sich ein Transportpreis von rund 8,10 €/t. Der Transport mit einem Unimog wurde nicht weiter betrachtet, da die Beladungsmengen lediglich 1,5 t betragen und sich im Falle eines 90%igen Abtransports des Grasschnitts die Anzahl der Fahrwege und damit verbunden die Transportkosten deutlich erhöhen würden.

Die Berechnung der Silage-Kosten basiert auf der Annahme, dass durchschnittlich etwa 1.650 t/a Grünmaterial bei Pflege der Straßenränder durch die Straßenmeistereien anfallen. Des Weiteren wurde eine Aufwuchsmenge von 10,5 t FM/ha zu Grunde gelegt. Die Kosten für die Silierung inkl. Radladereinsatz zur Einbringung in das Substratlager entsprechen den Angaben der KTBL [KTBL 2005].

Der Abtransport von 90 % Grünmaterial entspricht etwa 9,45 t FM/ha. Die Kosten für die Silierung betragen rund 13,75 €/ha bzw. 1,46 €/t.

### 9.5.2 Gehölzschnitt

Die Kosten zur Bereitstellung des Energieträgers Hackschnitzel beinhalten Bergungs-, Transport- und Lagerkosten, wobei die entsprechenden Personalkosten in den jeweiligen Bereichen eingerechnet sind. Diese wurden mit 14,6 €/h für einen Traktorfahrer bzw. mit 25 €/h als Lohnkosten für Spezialmaschinen angenommen [FNR, 2005].

### Bergungskosten

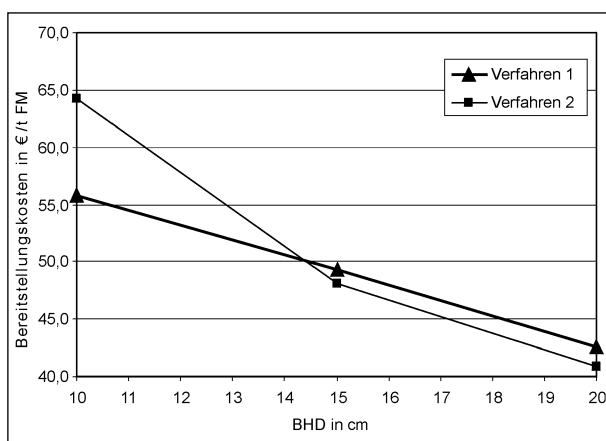
Die Bergungskosten lassen sich infolge unterschiedlicher Gehölzarten, Bewuchsdichten, Strauchanteile (und damit Anteil an Kern- und Splintholz) sowie Böschungswinkel nur eingeschränkt verallgemeinern. Weiterhin kann z. T. aufgrund zyklischer Pflegemaßnahmen von einem jungen Bestand ausgegangen werden, der durch

einen geringen Stammdurchmesser gekennzeichnet ist (siehe Kapitel 6.2).

Da keine Leistungs- und Kostendaten vorliegen, werden die Bereitstellungskosten für Gehölzschnitt von denen für Waldhackschnitzeln abgeleitet. Hierfür liegen Berechnungen der Bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft vor [WITTKOPF et al., 2003].

Im Wesentlichen werden Waldhackschnitzeln durch die Arbeitsschritte Fällen, Aufbereiten (Entasten, Ablängen), Vorliefern, Rücken und Hacken des Holzes bereitgestellt. Generell trifft dies auch für Gehölzschnitt von Straßen zu, wobei nicht in allen Fällen am Ende der Pflegemaßnahme das Material gehackt wird, sondern auch der direkte Abtransport von Gehölzschnitt erfolgt. Für eine vereinfachte Darstellung wird diese Konstellation vernachlässigt, zumal für eine energetische Verwertung in automatisch betriebenen Holzfeuerungen (siehe Kapitel 7.2) eine Aufbereitung des Materials in Form von Hackschnitzeln notwendig ist und daher der Ort der Aufbereitung des Materials (direkt an der Pflegestelle oder zeitversetzt am Lagerplatz) zweitrangig ist.

Als vergleichbare Ernteverfahren kommen für den Straßenbetriebsdienst motormanuelle und teilmechanisierte Verfahren in Frage. Als Referenzverfahren, die die Arbeitsgänge bei der Gehölzpflege von Meistereien widerspiegeln, kommen das Vorliefern von Hand<sup>17</sup>(Verfahren 1) bzw. teilmechanisierte Fällen<sup>18</sup> und Vorliefern (Verfahren 2) sowie das für beide Verfahren angewendete anschließende Hacken und Einblasen zum Abtransport (s. Bild 27) in Frage.



**Bild 27:** Bereitstellungskosten für Hackschnitzeln aus Gehölzschnitt des Straßenbetriebsdienstes (BHD – Brusthöhendurchmesser)

Die Bereitstellungskosten bzw. Bergungskosten werden für die beiden Verfahren jeweils in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (BHD) dargestellt. Diese werden für BHD-Stufen von 10, 15 und 20 cm angegeben [WITTKOPF et al., 2003].

Ein Zusammenhang bzw. ein Rückschluss vom BHD auf die potenziell damit verbundene Holzmenge und somit die Ableitung der Aufwuchsraten und Pflegezyklen sind nicht möglich. Die in Bild 27 dargestellten Bereitstellungskosten liegen im Mittel um die 50 €/t FM. Weiterhin beinhalten die in Bild 27 dargestellten Kosten auch die anteiligen Investitionskosten für den Maschinenpark.

### Transportkosten

Nach der Literatur werden Transportkosten hauptsächlich bestimmt durch die Transportdistanz zwischen dem Ort des Gehölzschnittanfalls und der Konversionsanlage sowie den benutzten Transportmitteln [DINTER und MORITZ, 1987].

In der Tabelle 27 sind Durchschnittsentfernungen für den Transport von Straßenbegleitgrün zu unterschiedlichen Entsorgungspfaden dargestellt. Die Daten beruhen auf einer Erhebung aus dem Jahr 1987, wodurch Veränderungen gegenüber heutigen Transportentfernungen wahrscheinlich sind.

Für die Abschätzung von ungefähren Größenordnungen der Transportkosten können die Angaben der durchschnittlichen Transportentfernungen für die heutige Betrachtung übernommen werden. Eine genauere Betrachtung der heutigen Gegebenheiten ist vor dem Hintergrund einer veränderten Anzahl von Meistereien gegenüber 1987 und im

<sup>17</sup> Kurzbeschreibung der Arbeitsabläufe: Fällen mit der Motorsäge, Vorliefern von Hand, Hacken und Abtransport

<sup>18</sup> Kurzbeschreibung der Arbeitsabläufe: Fällen und Vorliefern teilmechanisiert mit Motorsäge und Kranwagen, Hacken und Abtransport

	AM			SM		
	Min.	Max.	Ø	Min.	Max.	Ø
Mülldeponie	9	40	23	5	30	17
Zwischenlager	5	25	18	6	6	6
Zwischenlager zur Deponie	10	20	15	15	30	23
Kompostierung	7	11	8	25	35	28

**Tab. 27:** Durchschnittliche Transportwege in km je Meisterei [DINTER und MORITZ, 1987]

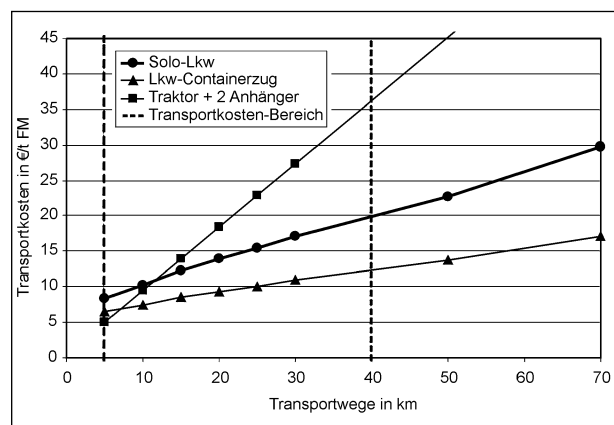
Wesentlichen durch die unbekanntenen Deponie- oder Kompostierungsstandorte nicht darstellbar.

Für den Transport werden landwirtschaftliche Gespanne (Traktor mit 2 Anhängern) und Container-Lkw (Solo-Lkw und Lkw-Containerzug) berücksichtigt. Die Beladung des Transportmittels erfolgt, entsprechend den Annahmen der Bereitstellung, durch Hacken und direktes Einblasen auf die Ladeflächen. Die Kosten der jeweiligen Transportmittel beziehen sich auf angenommene variable Entfernungen von 5 bis 70 km vom Hof/Lager zur Feuerungsanlage. Auf den Straßenbetrieb übertragen entspricht dies den Entfernungen zwischen dem Standort der Pflegemaßnahme – bezogen auf die durchschnittlichen Entfernungen der Tabelle 27 – und dem Standort der Meisterei bzw. der Konversionsanlage [FNR, 2005].

Die Kosten der landwirtschaftlichen Gespanne werden entsprechend den landwirtschaftlichen Verrechnungssätzen berechnet sowie die Lkw-Kosten entsprechend den an die Kostensätze für Gülletransport Straße angelehnten Kalkulationskosten [FNR, 2005].

Die sich daraus ergebenden Transportkosten je Transportweg sind in Bild 28 dargestellt. Dieses zeigt ebenfalls die nach Tabelle 27 angegebenen minimalen und maximalen Transportentfernungen zusammengefasst für alle Entsorgungspfade. In diesen ist auch der investive Anteil für die Aufwendungen des Transports zur Meisterei enthalten.

Durchschnittliche Transportentfernungen für AM werden mit der Vorgabe, dass der Standort im Zentrum der zu betreuenden Strecke (durchschnittlich 65 km) liegt, auf ungefähr 16 km berechnet. Daraus ergeben sich Transportkosten in Abhängigkeit der Transportmittel von 8,5 bis 14 €/t FM.



**Bild 28:** Transportkosten für Hackschnitzel

Für Straßenmeistereien wird als durchschnittliche Transportentfernung der Maximalwert der Tabelle 27 festgelegt, da zum einen die Betreuungstreckenlänge seit der Erhebung zugenommen hat und zum anderen nach Rücksprache mit den Modellmeistereien (siehe Kapitel 7.3) diese Größenordnung bestätigt wurde, was jedoch als nicht repräsentativ anzusehen ist. Dementsprechend liegen die Transportkosten für den Lkw-Transport zwischen 11,5 und 18,5 €/t FM. Die Kosten für den Transport per Traktor liegen mit etwa 32 €/t FM deutlich höher und werden im Nachfolgenden, auch aufgrund der nicht gegebenen Vergleichbarkeit mit den Arbeitsverfahren im Straßenbetrieb, vernachlässigt.

### Lagerkosten

Die Lagerkosten sind abhängig von der Art der Lagerung und evtl. verwendeten technischen Komponenten, wie Entlüftungseinrichtungen. Nach eigenen Berechnungen sind bei einer vorgegebenen Stapelhöhe von 3 m ungefähr 1,3 m<sup>2</sup> Grundfläche für 1 t Hackschnitzel FM notwendig.

Ausgegangen wird von einem Lager am Standort der Meisterei, wobei neben den bauseitigen Kosten (siehe Kapitel 9.3.4) lediglich Kosten für die Lagerbeschickung von 2,6 €/t FM anfallen [FNR, 2005].

Die wesentliche Kostengröße bei der Lagerung von frischen Hackschnitzeln entfällt auf die Massenverluste, bei einer angenommenen Lagerung von sechs Monaten. Ursache sind die veränderten Wassergehalte, die bei der Einlagerung etwa 50 % und der Auslagerung etwa 35 % betragen. Folglich müssen für die massenmäßig geringeren Auslagerungsmengen die gleichen Bereitstellungs- und Transportkosten der Einlagerung angenommen werden. D. h., die Kosten pro kg ausgelagerter Menge sind höher als die der Einlagerung, da diese massenbezogen sind und nicht den Energiegehalt des Holzes berücksichtigen. Diese Differenz wird als Lagerverlust bezeichnet. Je nach Art der Lagerung (Freilagerung, Altgebäude, Rundholzhalle) können diese zwischen 10,8 und 29,1 €/t FM liegen<sup>19</sup>.

Für die energetische Nutzung von Gehölzschnitt wird eine Lagerung in bestehenden Gebäuden oder Lagerhallen mit passiver Trocknung angenommen.

<sup>19</sup> Diese Kostengröße entfällt bei Betrachtung von Trockenmassen bzw. Energiegehalten als Bezugsbasis.



Die dadurch entstehenden Lagerverlustkosten belaufen sich auf 10,8 bis 13,4 €/t FM [FNR, 2005].

### Gesamtkosten der Bereitstellung

In Tabelle 28 sind die Bereitstellungskosten der energetischen Nutzung von Hackschnitzeln aus Gehölzschnitt von Straßen dargestellt.

Nach Angaben des Straßenbetriebs NRW belaufen sich die Kosten nach aktuellen Grünpflegeverträgen für das Auf-Stock-setzen von Gehölzen auf etwa 2,5 €/m<sup>2</sup>, wobei der Schlagabraum gehackt wird und vor Ort verbleibt.

Ab einem Durchmesser von 10 cm wird das Material abtransportiert. Die Kosten hierfür werden pauschal mit 20 € (10-30 cm), 40 € (30-50 cm), 75 € (50-70 cm) und 120 € (ab 75 cm) veranschlagt. Bis zu 200 € können die Kosten in speziellen Fällen betragen, wenn z. B. der Kraneinsatz bei Lärmschutzwänden notwendig ist [mündl. Mitteilung RHODE].

Ein Umrechnen bzw. Ableiten vom Stammdurchmesser der Pflanzung auf deren Masse bzw. Schüttraummeter (Srm) ist nicht möglich.

Der Energiegehalt der Hackschnitzel nach dem Lagerzeitraum von sechs Monaten, bei einem Wassergehalt von 35 %, liegt bei etwa 3 kWh/kg. Übertragen auf die Bereitstellungskosten können so spezifische Kosten der Bereitstellung in Abhängigkeit des Energiegehaltes der Hackschnitzel berechnet werden. Demnach ergeben sich für AM spezifische Kosten von 2,4 bis 2,7 ct/kWh und für Straßenmeistereien von 2,5 bis 3,3 ct/kWh.

Der größte Kostenanteil der Bereitstellung entfällt auf die Bergung des Materials. Hierbei wird darauf hingewiesen, dass in gewissen Größenordnungen die hier beschriebenen Bereitstellungspfade Bergung und Transport vom Straßenbetriebsdienst in dieser bzw. ähnlicher Form durchgeführt werden (siehe Kapitel 3.2 und 6.2). D. h., vor dem Hintergrund einer energetischen Nutzung ist zwischen Arbeiten bzw. Kosten zu unterscheiden, die zusätz-

Kosten	Einheit	AM	SM
Bergung	€/t FM	50	50
Transport	€/t FM	8,5-14	11,5-18,5
Lagerbeschickung	€/t FM	2,6	2,6
Lagerverluste	€/t FM	10,8-13,4	
Bereitstellung	€/t FM	72-80	75-84,5

Tab. 28: Bereitstellungskosten für Gehölzschnitt

lich für die Bereitstellung ausreichender Brennstoffmengen anfallen, und denen die bereits zum Aufgabenbereich von Meistereien gehören, wodurch in diesen Fällen keine zusätzlichen Bergungs- und Transportkosten anfallen. Letzteres bezieht sich selbstverständlich nur auf Gehölzschnittmengen, die nach Vorgaben des Straßenbetriebsdienstes abtransportiert werden (siehe Kapitel 6.2).

Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 10 in Form von Sensitivitätsanalysen wieder aufgegriffen und diskutiert.

### 9.5.3 Entsorgungskosten von Grünabfällen

Ein wesentlicher Punkt für die Vollkostenbetrachtung in Meistereien ist das Einsparungspotenzial an Entsorgungskosten für den Gehölzschnitt und Grasschnitt. Diese werden nachfolgend als Mittelwerte dargestellt und diskutiert.

#### Grasschnitt

Zu den Entsorgungskosten von Grasschnitt liegen Daten der IE-Umfrage [IE, 2005], der Erhebung der TU Darmstadt [TUD, 2003] und des Landesbetriebs NRW [STRAßEN NRW, 2004] vor. Die Datenmengen der einzelnen Erhebungen setzten sich wie folgt zusammen, nach:

- IE-Umfrage auf 15 Meistereien, die Angaben zu den Entsorgungskosten von Grasschnitt machten.
- TU Darmstadt fallen bei der Entsorgung bzw. Kompostierung durch Fremdfirmen Kosten für die Biomasse ohne Verunreinigung und mit Verunreinigung an. Insgesamt wurde ein Datensatz von 184 Meistereien, bestehend aus 6 kombinierten Straßen- und Autobahnmeistereien, 69 AM und 109 SM betrachtet.
- Landesbetrieb Straßenbau NRW berücksichtigt alle SM und AM in NRW im Mittel für die Jahre 2002 und 2003.

Tabelle 29 zeigt eine Übersicht der einzelnen Entsorgungskosten inklusive der Bezugsjahre.

Kosten	NRW	BAST-Datenbank		IE-Umfrage
		ohne Verunreinigung	mit Verunreinigung	
in €/t	52,4	25	35	46,6
in €/m <sup>3</sup>	15,72	7,5	10,5	14
Jahr	2002/03	2000	2000	2005

Tab. 29: Übersicht der Entsorgungskosten für Grasschnitt

Die angegebenen Kosten der Entsorgung der TUD-Erhebung differieren zwischen 5 € und 200 € pro Tonne. Auffällig hierbei sind die hohen mittleren Entsorgungskosten bei Mischmeistereien, die durchschnittlich 54,3 €/t betragen. Ursache könnte die geringe Datenmenge sein. Schlussfolgernd zeigt sich, dass einzelne Meistereien trotzdem relativ hohe Entsorgungskosten aufwenden müssen. Als wesentliche Kostenfaktoren sind hierbei die Entsorgung über öffentliche Mülldeponien oder der benötigte Personalaufwand für eine interne Kompostierung zu sehen. Durch das Umsetzen der Mieten und die ordnungsgemäße Wartung der Kompostierungsanlage muss zusätzlicher Aufwand geleistet werden.

### Gehölzschnitt

Die Abschätzung der Entsorgungskosten erfolgt nach Auswertung der IE-Umfrage [IE, 2005] und nach Angaben des Landesbetriebs Straßenbau NRW für die Jahre 2002 und 2003 [STRABEN NRW, 2005]. Der Anfall der Entsorgungskosten bezieht sich lediglich auf die abtransportierten Gehölzschnittmengen in €/t FM. Für Gehölzschnitt, das in den Straßenrandbereich verblasen bzw. abgelegt wird, fallen diese Kosten nicht an (siehe Kapitel 6.3).

Tabelle 30 zeigt eine Übersicht der durchschnittlichen Entsorgungskosten der ausgewerteten Quellen. Die Spannweite der Angaben der IE-Umfrage beläuft sich hierbei auf 2 bis 22 €/m<sup>3</sup> FM (8 bis 88 €/t FM).

Teilweise werden die Gehölzschnittmengen auch kostenlos entsorgt, z. B. im Braunkohletagebau zur Abdeckung von Abraumhalden oder an Privathaushalte. Diese Entsorgungspfade werden in der Kostendarstellung nicht berücksichtigt, da diese Einzelösungen darstellen.

### Bankettschälgut

Für Bankettschälgut kommen unterschiedlichste Entsorgungspfade zur Anwendung (siehe Kapitel 6.6.3). Als Vergleichsgröße für die Höhe der Entsor-

Kosten	IE-Umfrage	NRW
€/t FM	29,5	31,8
€/m <sup>3</sup> FM	7,4	8,0

Tab. 30: Kosten der Gehölzschnittentsorgung

gungskosten wird hier lediglich die Entsorgung auf Deponien herangezogen.

Seit Inkrafttreten der TASI liegen noch keine ausreichenden Erfahrungen mit der veränderten Entsorgungsstruktur für Bankettschälgut vor. Durchschnittliche Entsorgungskosten aus dem Jahr 2000 für Bankettschälgut betragen auf Hausmülldeponien 16 €/t und auf Sondermülldeponien 88 €/t [TUD, 2003].

Nach Angaben der TSI GmbH belaufen sich diese für Bankettschälgut der Zuordnungsklasse Z2 auf Sondermülldeponien auf 10 bis 30 €/t. Unbedenkliches Material (siehe Kapitel 6.1) kann bereits für 6 bis 8 €/t entsorgt werden.

Neben den Entsorgungskosten fallen zusätzliche Kosten durch die Beprobung und die Schadstoffuntersuchung des Materials an. Diese werden mit 5 bis 10 €/t je nach Aufwand der Untersuchung abgeschätzt [KOCHER und WIRTZ, 2004].

## 9.6 Entsorgungskosten nach energetischer Verwertung

Bei einer energetischen Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst fallen Kosten für die Entsorgung von Umwandlungsprodukten wie Gärrest, Asche und Schlacke an. Diese Kosten werden zu den verbrauchsgebunden Kosten gezählt, da sie abhängig von den eingesetzten Brennstoff- oder Substratmengen sind.

Die Kosten der Asche- und Schlackeentsorgung werden mit 15 bzw. 30 €/t abgeschätzt. Wobei eine alternative Aufbringung oder Verwendung der Biomassenaschen als Dünger möglich ist, wodurch keine Kosten entstehen würden.

Ist die Asche so stark belastet, dass sie einer Sondermülldeponie zugeführt werden muss, können die Entsorgungskosten höher liegen. Andererseits kann die anfallende Asche, bei Unbedenklichkeit, als Düngemittel o. Ä. eingesetzt werden, was wiederum kostenneutral wäre.

Eine abschließende Darstellung der Kosten für Gärreste kann nicht pauschal erfolgen, da es keinen „Substratmarkt“ für diese Stoffe gibt. Allgemein ist davon auszugehen, dass im landwirtschaftlichen Betrieb genutzte Gärreste ein im Wert gesteigertes Düngemittel darstellen. Daher wird eine Entsorgung dieser als kostenneutral angesehen. Lediglich die Transportkosten für die Entsor-

gung bzw. Ausbringung der Gärreste werden nach Kapitel 9.5.1 berücksichtigt.

## 10 Kosten-Nutzen-Analysen und Kostenvergleiche

Aufbauend auf den modellhaften Konzepten und Kostenanalysen werden nun umfassende Kosten-Nutzen-Analysen und Kostenvergleiche durchgeführt. Diese Kostenuntersuchungen berücksichtigen dabei sämtliche Aufwendungen und Erlöse, die durch eine energetische Verwertung gegenüber den bisher praktizierten Verfahren entstehen. Hierzu zählen u. a.

- Kosten der Bereitstellung (Sammlung und Transport des anfallenden Biomassematerials) sowie Kosten der Aufbereitung und Lagerung (siehe Kapitel 9.5),
- Kosten und Erlöse der energetischen Nutzung (siehe Kapitel 4.1.1),
- Kosten der Entsorgung potenziell anfallender Rückstände, Nebenprodukte und/oder Abfälle (siehe Kapitel 9.6) sowie
- Kosten der bisherigen Entsorgung des anfallenden Biomassematerials (siehe Kapitel 6.3 und 9.5.3).

Ausgehend davon werden die entsprechenden Energiegestehungskosten berechnet, die zusätzlich als spezifische Verwertungskosten pro Mg Grünabfall bzw. Kosten pro km Straße darstellbar sind.

Vergleichend betrachtet werden die Kosten der Grünabfallentsorgung ohne energetische Nutzung, die im Rahmen der derzeitigen und der steigenden gesetzlichen Anforderungen erwartet werden, und die Kosten bei energetischer Nutzung unter Berücksichtigung der Erfolg versprechenden Nutzungspfade.

Für die ermittelten Verwertungskosten werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die u. a. folgende Aspekte berücksichtigt

- Mengenschwankungen der Pflegemassen des Straßenbetriebsdienstes,
- unterschiedliche Entsorgungskosten für die potenziell anfallenden Rückstände, Nebenprodukte und/oder Abfälle,
- unterschiedliche Energiepreise von Heizöl- und Erdgas für Referenzsysteme von Zentralheizungsanlagen,
- unterschiedliche Entsorgungs- bzw. Verwertungskosten für die nicht-energetische Verwertung der anfallenden Biomassen.

Anlage	Durchschnittliche Meisterei	SM Wurzen	AM Duisburg	SM Elmshorn
Leistung	204 kW	75 kW	140 kW	275 kW
Kapitalgebundene Kosten				
Investitionskosten	siehe Bild 25, S. 63	spezifische Angebote		
Fracht	Pauschal 500 €			
Elektroinstallation	spezifische Kosten nach Anlagenleistung (siehe Tabelle 22, S. 63)			
Betriebnahme	Pauschal 1.500 €			
Montage	10 % der Investitionssumme			
Verbrauchsgebundene Kosten				
Brennstoff	Abhängig vom jeweiligen Gehölzschnitt-Potenzial der Meisterei (ansonsten Tabelle 23, S. 64) sowie Kapitel 9.5.2, Bereitstellungskosten Gehölzschnitt			
Hilfsenergie	0,7 % der thermischen Leistung zu 0,16 €/kWh <sub>el</sub> (Holzfeuerungen + 10 kWh/m <sup>3</sup> HHS)			
Betriebsgebundene Kosten				
Wartung- und Reinigung	1,5 % der Investitionssumme			
Schornsteinfeger	50-60 € Erdgas/Heizöl; 155 € Holz			
Sonstige Kosten				
Versicherung	0,5 bis 1 % der Investitionssumme			
bauseitige Kosten	50 €/m <sup>3</sup> bezogen auf die halbjährlich benötigte Brennstoffmenge (siehe S. 66)			
Hilfskräfte	25 % der Montage			

Tab. 31: Kennwerte der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Zentralheizungsanlagen

Diese Parameter werden sowohl einzeln als auch in Kombination variiert. Damit liefern die Sensitivitätsuntersuchungen auch Hinweise, welche ökonomischen Effekte sich bei veränderten Rahmenbedingungen ergeben. Weiterhin werden die spezifischen Strom- und/oder Wärmegestehungskosten abgeleitet, die eine Einordnung der Grünabfälle aus dem Straßenbetriebsdienst in das gegenwärtige und zukünftige Kostenspektrum der Energiebereitstellung aus Biomasse ermöglichen.

Für die Analyse werden keine Fördermöglichkeiten für Autobahn- und Straßenmeistereien berücksichtigt.

## 10.1 Zentralheizungsanlagen (Gehölzschnitt)

Die Wärmegestehungskosten in Gehölzschnitt-Zentralheizungen (Raumwärme- und Warmwasserbereitung) werden den Gestehungskosten aus Heizöl (leicht) und Erdgas gegenüber gestellt. Die auf diesen Brennstoffen basierenden etablierten Heizungsanlagentechniken bestimmen entscheidend den heutigen Wärmemarkt. Ihr hoher Technisierungsgrad lässt Wirkungsgrade von etwa 95 % zu. Auch durch ihre hohe Energiedichte und ihre damit gute Transportfähigkeit gegenüber biogenen Festbrennstoffen sind Heizöl und Erdgas günstige Energieträger.

Die Wärmebereitstellung aus diesen Energieträgern erfolgt bei dem heutigen Stand der Technik über Spezialkessel, nämlich Niedertemperatur- und Brennwertkessel. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Kesseltypen mit einer konstanten Kesselwassertemperatur von 80-90 °C werden Niedertemperaturkessel mit gleitenden Kesselwassertemperaturen von 75 bis hinunter auf 40 °C betrieben. Dadurch lassen sich besonders bei der Warmwasserbereitung in den Sommermonaten Abgas- und Bereitschaftsverluste verringern und es wird ein deutlich erhöhter Jahresnutzungsgrad erreicht.

Bei Heizölanlagen muss darauf geachtet werden, dass ähnlich wie bei Hackschnitzelanlagen ein größerer Lagerbereich (Tankraum) zur Verfügung steht. Dies ist bei einer Erdgasheizung mit Hausanschluss nicht notwendig und erspart bauliche Maßnahmen. Im Folgenden werden die Wärmegestehungskosten der drei unterschiedlichen Anlagenkonzepte berechnet und gegenübergestellt.

### 10.1.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse – Beschreibung der Szenarien

Grundlegende Rahmenbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung für Zentralheizungsanlagen beziehen sich auf eine durchschnittliche Meistereier mit 204 kW Wärmeleistung und einer angenommenen Volllaststundenzahl von 1.400 h/a (siehe Kapitel 6.4.1). Daraus ergibt sich ein Brennstoffbedarf von etwa 285.600 kWh/a, was bei einem Wassergehalt von 50 % (erntefrischer Gehölzschnitt) einer Menge von etwa 168 t/a Holzhackschnitzeln entspricht. Für Heizöl- und Erdgasheizungen werden die in Tabelle 20 beschriebenen Heizwerte angenommen und darauf aufbauend der Brennstoffbedarf bestimmt. Bei dieser Berechnung wird für mit fossilen Brennstoffen befeuerte Anlagen ein Wirkungsgrad von 95 % und für holzbefeuerte Anlagen von 85 % angenommen.

Mittels verschiedener Szenarien<sup>20</sup> werden unterschiedliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Holzhackschnitzel-Heizungen in Meistereien untersucht. Diese umfassen unterschiedliche Annahmen für die verbrauchsgebundenen Kosten:

- Basic-Szenario für AM und SM,
- Best-1-Szenario,
- Best-2-Szenario und
- Worst-Szenario.

Dabei kommt das Basic-Szenario der aktuellen Vorgehensweise im Straßenbetriebsdienst am nächsten. Die beiden Best-Szenarien sollen die günstigsten Fälle des Anlagenbetriebs und das Worst-Szenario den kostenintensivsten Fall repräsentieren. Dabei haben die Szenarien Best und Worst eher theoretischen Charakter zur Abgrenzung von Schwankungsbreiten.

Für das Basic-Szenario wird weiterhin angenommen, dass die in Kapitel 6.2 identifizierten erfassten Gehölzschnittmengen, diese entsprechen etwa 20 % der technischen Potenziale, ohne Bergungs- und Transportkosten bereitgestellt werden können. Für SM sind dies 101,8 t/a und für AM 48,2 t/a (siehe Kapitel 6.2.3). Diese Vorgehensweise beruht

<sup>20</sup> Mittels Szenarien werden zukünftige Entwicklungen bei alternativen Rahmenbedingungen beschrieben. Dabei werden von einer heutigen Situation aus mögliche zukünftige Situationen aufgezeigt.

auf der Annahme, dass diese Mengen auf Pflegemaßnahmen beruhen, die grundsätzlich von Meistereien durchzuführen sind, und so die entsprechenden Mengen für eine energetische Verwertung „kostenlos“ genutzt werden können. Um die für den Betrieb, die identifizierten Anlagenleistungen bzw. den Wärmebedarf notwendigen Brennstoffmengen bereitzustellen, sind die angenommenen Mengen aus dem Betriebsdienst nicht ausreichend. Diese werden nun mit den ermittelten Kosten für Bergung und Transport zusätzlich bereitgestellt (siehe Kapitel 9.5.2). Einsparungen der Entsorgungskosten für energetisch genutzten Gehölzschnitt werden in diesem Fall nicht berücksichtigt.

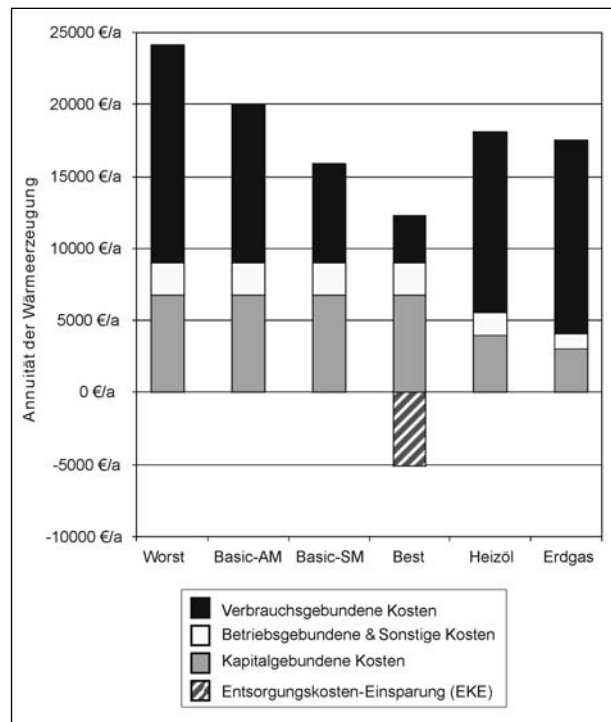
Im Best-Szenario werden die komplett benötigten Brennstoffmengen im Rahmen des Straßenbetriebsdienstes bereitgestellt bzw. angenommen, wodurch keine Bergungs- und Transportkosten anfallen. D. h., es sind nur die Lagerbeschickungs- und Lagerverlustkosten zu berücksichtigen. Dabei werden im Best-1-Szenario keine Entsorgungskosten betrachtet, im Best-2-Szenario werden Entsorgungskosteneinsparungen angenommen. Dieses Szenario dient dazu, den günstigsten Fall zu simulieren und somit einen unteren Grenzwert festzulegen.

Das Worst-Szenario berücksichtigt alle in Kapitel 9.5.2 berechneten Bereitstellungskosten und keine Einsparungen von Entsorgungskosten. Es simuliert daher die kostenintensivste Betrachtung einer Holzfeuerungsanlage in einer Meisterei und somit den oberen Grenzwert.

### Wärmegestehungskosten Zentralheizungsanlagen

Für die identifizierten Szenarien werden in Bild 29 die Jahreskosten der Wärmeerzeugung in die Kostenarten kapitalgebundene, verbrauchsgebundene, betriebsgebundene und sonstige Kosten sowie Erlöse unterteilt. Die kapitalgebundenen Kosten sind hauptsächlich geprägt durch die Investitionskosten, welche für Hackschnitzelanlagen in etwa doppelt so hoch wie für die beiden fossilen Energieträgersysteme sind. Gleiches gilt für die betriebsgebundenen und sonstigen Kosten, die im Wesentlichen aufgrund höherer Kosten für Wartung und Reinigung für Holzfeuerungen höher sind.

Einen ähnlichen Effekt zeigt das Basic-Szenario der AM: Ist der Anteil der erfassten technischen Potenziale von Gehölzschnitt (siehe Kapitel 6.2) re-



**Bild 29:** Darstellung der Kostenstruktur verschiedener Heizungssysteme und der Jahreskosten der Wärmeerzeugung

lativ gering und muss zusätzlich Material bereitgestellt werden, kann zunächst kein wirtschaftlicher Betrieb erreicht werden. Bei Straßenmeistereien, wo geringerer Wärmebedarf oder größere Gehölzschnittmengen (oder beides) erwartet werden können, ist dieser Effekt vergleichsweise geringer und damit schon ein kostengünstiger Betrieb möglich.

Im Ergebnis liegen die Gesamtkosten im Worst-Szenario deutlich über denen der mit Heizöl und Erdgas befeuerten Anlagen. Damit ist eine alleinige Bereitstellung von Gehölzschnitt, unabhängig von den Aufgaben des Straßenbetriebsdienstes, mit dem Ziel der Brennstoffversorgung einer Meisterei nicht wirtschaftlich.

In den Best-Szenarien erfolgt die komplette Bereitstellung des Brennstoffs im Rahmen von Maßnahmen des Straßenbetriebsdienstes (siehe Bild 29). D. h., für diese Mengen fallen keine Bergungs- und Transportkosten an, da sie im Rahmen der Straßenpflege erwirtschaftet werden. Im Endergebnis werden dadurch die geringsten Wärmeerzeugungskosten erzielt, da lediglich Kosten für die Lagerbeschickung und die Lagerverluste berücksichtigt werden. Hinzu kommen noch weitere Erlöse bzw. Einsparungen der nicht zu entsorgenden Gehölzschnittmengen, wodurch in Summe deutlich geringere Gesamtkosten anfallen.

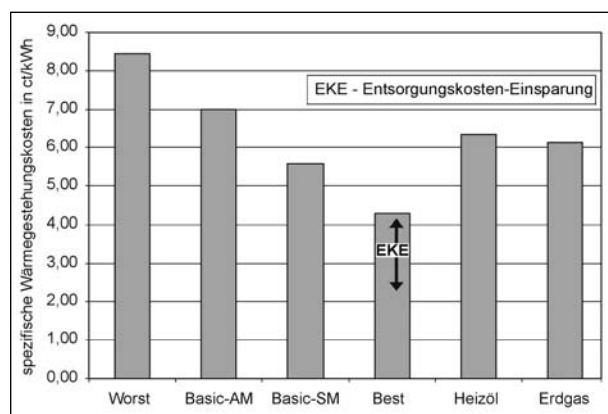


Bild 30: Spezifische Wärmegestehungskosten

Insgesamt ist die Annahme einer kostenlosen Bereitstellung des Gehölzschnitts eher unwahrscheinlich. Dieses Szenario begrenzt die kostengünstigsten wirtschaftlichen Annahmen.

Bezogen auf die Wärmeerzeugung ergeben sich die in Bild 30 dargestellten spezifischen Wärmegestehungskosten. Für das Best-Szenario sind die möglichen Entsorgungskosten-Einsparungen (EKE) mit einem Pfeil in der Abbildung gekennzeichnet.

### Wärmegestehungskosten der Modellmeistereien

Exemplarisch werden für die in Kapitel 8.3 spezifizierten Modellmeistereien Wärmegestehungskosten, basierend auf Angeboten für Holzfeuerungsanlagen, berechnet. Diesbezüglich werden die beiden Szenarien Basic und Best dargestellt. Dabei werden die für die jeweiligen Meistereien erfassten Gehölzschnittmengen und die spezifischen Entsorgungskosten zu Grunde gelegt. Weiterhin werden zur Bestimmung der Brennstoffleistung die tatsächlichen bzw. bisherigen Verbrauchsmengen von Erdgas und Heizöl herangezogen.

In allen Fällen sind diese Gehölzschnittmengen größer als die benötigten Brennstoffmengen. Entsorgungskosten fallen nur in der SM Elmshorn an, sodass für die beiden anderen Meistereien im Best-Szenario keine Entsorgungskosten-Einsparungen berücksichtigt werden können. Wie im bisherigen Kapitel werden für die Brennstoffmengen, unabhängig von den erfassten Mengen, Kosten für Lagerbeschickung und Lagerverluste berücksichtigt.

Die minimalen und maximalen Wärmegestehungskosten der Szenarien der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind in Bild 31 dargestellt. Die Unterschiede der jeweiligen Szenarien (min/max) sind

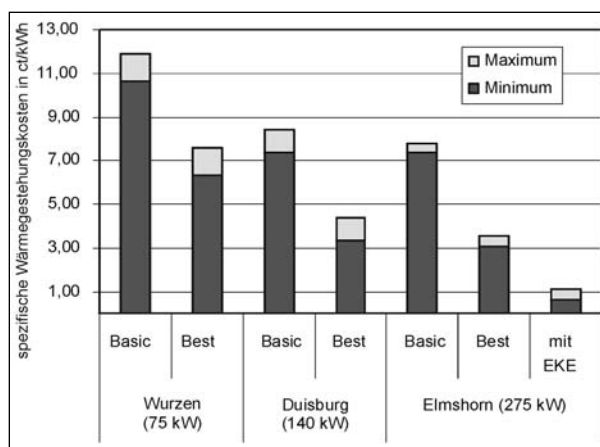


Bild 31: Wärmegestehungskosten der Modellmeistereien

auf die verschiedenen Angebote bzw. Investitionskosten zurückzuführen.

Wie in Kapitel 9.3.1 ergibt sich eine Kostendegression mit steigender Anlagenleistung. Werden die Entsorgungskosten berücksichtigt, ergeben sich Einsparungen (EKE) für die SM Elmshorn, die zusammenfassend zu Wärmegestehungskosten von knapp 1 Ct/kWh führen.

### 10.1.2 Sensitivitätsanalyse

Im Weiteren wird eine Sensitivitätsanalyse der in Kapitel 9.3 dargestellten durchschnittlichen Anlagengröße einer Meisterei durchgeführt. Dabei werden die nachfolgenden Parameter variiert:

- Erdgas- und Heizölpreis,
- Bereitstellungskosten,
- Entsorgungskosten-Einsparungen und
- Anlagengröße.

Die Variation der Heizöl- und Erdgaspreise berücksichtigt dabei die Schwankungen der an den Rohölpreis gekoppelten fossilen Brennstoffe. Der Heizölpreis variierte dabei zwischen 0,22 €/l (Mittelwert 1995) und 0,48 €/l (Mittelwert bis Sept. 2005) sowie der Erdgaspreis zwischen 0,27 €/m<sup>3</sup> (Mittelwert 1996) und 0,43 €/m<sup>3</sup> (Mittelwert bis Sept. 2005). Allerdings liegt das Maximum der Variation des Heizölpreises unter dem aktuellen Marktpreis, der am 22./23. Oktober 2005 mit etwa 0,61 €/l angegeben wurde [www.tecson.de/pheizoel.htm], da lediglich Jahresmittelwerte abgebildet werden.

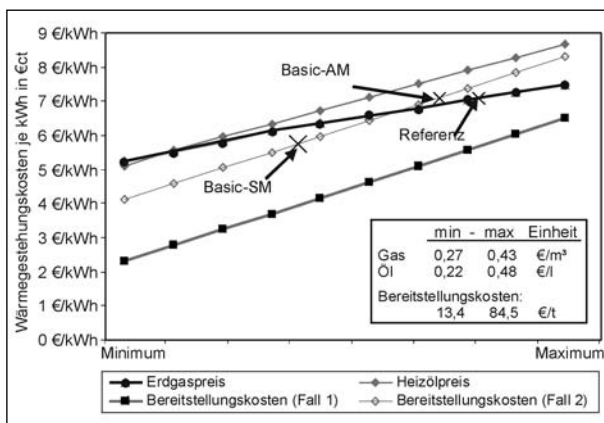
Die Variation der Bereitstellungskosten ermöglicht eine Einordnung der tatsächlichen im Straßenbetriebsdienst anfallenden Kosten der Gehölzpflege.

Das Minimum der Bereitstellungskosten wird bei den Kosten für die Lagerbeschickung und Lagerverluste gesetzt (13,4 €/t), da diese im Falle einer energetischen Nutzung generell anfallen würden. Das Maximum liegt bei den höchsten berechneten Bereitstellungskosten (84,5 €/t) nach Kapitel 9.5.2 (siehe Bild 32). Die Interpretation der Abbildung ist zwischen jedem Punkt der Geraden und nicht nur ausschließlich senkrecht möglich.

In Bild 32 sind die Wärmegestehungskosten für die typisch berechnete Anlagengröße in Meistereien unter Variation der Erdgas- und Heizölpreise sowie der Bereitstellungskosten für Gehölzschnitt dargestellt.

Diesbezüglich wird die Sensitivität der Bereitstellungskosten mit Berücksichtigung der durchschnittlichen Entsorgungskosten-Einsparungen nach Kapitel 9.5.3 (Fall 1) und ohne diese Erlöse (Fall 2) betrachtet. Weiterhin gilt für beide Fälle, dass der Gehölzschnitt vollständig bereitgestellt werden muss.

Zur Interpretation der Abbildung wird beispielhaft das Basic-Szenario betrachtet. Nach dessen Definition fallen für die nach Kapitel 6.2 identifizierten Gehölzschnittmengen – etwa 20 % der technischen Potenziale – keine Bergungs- und Transportkosten an. Dementsprechend können für Straßenmeistereien 101,8 t/a und für Autobahnmeistereien 48,2 t/a, lediglich unter Berücksichtigung der Lager- und Lagerverlustkosten (13,4 €/t), bereitgestellt werden. Wird weiterhin angenommen, dass für die Differenz aus benötigten Brennstoffmengen (168 t/a) und der vorhandenen Potenziale (101,8 t/a bzw. 48,2 t/a) die maximalen Bereitstellungskosten (84,5 €/t) anfallen, können daraus durchschnittliche Bereitstellungskosten für die gesamte Brennstoffmenge berechnet werden.



**Bild 32:** Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten für durchschnittliche Anlagenleistungen von Meistereien

Dementsprechend werden für eine Straßenmeisterei 101,8 t/a zu 13,4 €/a und 66,2 t/a zu 84,5 €/t bereitgestellt. Daraus ergeben sich durchschnittliche Bereitstellungskosten von 41,4 €/t (siehe Basic-SM in Bild 32). Nach Definition des Basic-Szenarios werden keine Entsorgungskosten berücksichtigt, sodass der Basic-SM-Punkt auf der Geraden Fall 2 liegt. Daraus abgeleitet ergeben sich Wärmegestehungskosten von etwa 5,8 ct/kWh (vgl. Bild 30). Bei gleicher Vorgehensweise ergeben sich für Autobahnmeistereien durchschnittliche Bereitstellungskosten von 64,1 €/t bzw. Wärmegestehungskosten von etwa 7,1 Ct/kWh (siehe Basic-AM in Bild 32).

Zum Vergleich wird als Referenz-Punkt die Wärmeerzeugung mittels Erdgas-Zentralheizung zu gleichen Wärmegestehungskosten wie beim Basic-AM-Beispiel (7,1 Ct/kWh) betrachtet (siehe Referenz in Bild 32). Die entsprechenden Brennstoffkosten für Erdgas ergeben sich demnach zu etwa 0,39 €/m³ bzw. 3,9 Ct/kWh.

Mit dieser Vorgehensweise ist es möglich, anhand spezifischer Rahmenbedingungen von Meistereien (anfallende Gehölzschnittmengen und Bereitstellungskosten) durchschnittliche Bereitstellungskosten und somit die entsprechenden Wärmegestehungskosten für Holzfeuerungen zu bestimmen. Weiterhin sind diese, zur ökonomischen Einordnung, mit den Wärmegestehungskosten bestehender Anlagen (Erdgas, Heizöl) und deren Brennstoffkosten zu vergleichen.

Im Ergebnis zeigt sich, dass je nach Höhe der berücksichtigten Bereitstellungskosten (z. B. Fall Basic-SM) die Wärmegestehungskosten für Holzfeuerungsanlagen niedriger als die für mit Erdgas bzw. Heizöl befeuerten Anlagen sind. Unter der Annahme maximaler Bereitstellungskosten ist eine Holzfeuerung, bei Berücksichtigung der Entsorgungskosten-Einsparungen (Fall 1) und aktuellen Brennstoff-Marktpreise für Heizöl bzw. Erdgas, gegenüber den Alternativen wirtschaftlich. Gleiches gilt im Fall 2 nur gegenüber Heizölheizungen, wohingegen Erdgasheizungen in diesem Fall niedrigere Wärmegestehungskosten zeigen (siehe Bild 32).

Als weiterer Sensitivitätsfaktor werden die Entsorgungskosten in Abhängigkeit der spezifischen Wärmegestehungskosten analysiert (siehe Bild 33). Dabei ist wie in Abschnitt 9.5.3 beschrieben darauf zu achten, dass es sich für die Meisterei um eingesparte Kosten der Entsorgung handelt. Demzufolge ist es ein Einsparungspotenzial, welches mit wach-

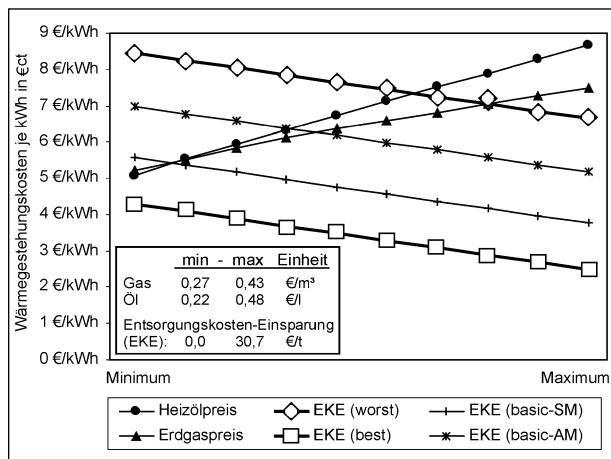
senden Entsorgungskosten die spezifischen Wärmegestehungskosten senkt, also eine bessere Wirtschaftlichkeit abbildet. Im Falle der Modellmeistereien wurde aufgezeigt, dass Entsorgungskosten nicht pauschal angenommen werden können bzw. bei vielen Meistereien Entsorgungswege vorhanden sind, in denen eine kostenlose Abgabe des Materials möglich ist (siehe Kapitel 6.3.2). Vor diesem Hintergrund erfolgt die Variation der Entsorgungskosten bzw. der bei einer energetischen Verwertung eingesparten Kosten (siehe Bild 33). Im Folgenden werden diese als Entsorgungskosten-Einsparungen (EKE) identifiziert und für verschiedene Szenarien betrachtet. Die anzurechnende Höhe der EKE richtet sich nach den in Kapitel 8.1.1 errechneten Brennstoffmengen.

Tabelle 32 stellt die wesentlichen Charakteristika der hier dargestellten Szenarien nochmals übersichtlich dar, wobei in den Bereitstellungskosten, in allen Fällen, die Lagerbeschickungs- und Lagerverlustkosten enthalten sind.

Unter Verwendung der aktuellen Brennstoffpreise für Heizöl und Erdgas zeigt sich im Ergebnis (siehe Bild 33), dass im Falle maximaler EKE alle Szenarien der Holzfeuerungen wirtschaftlicher gegenüber herkömmlichen Anlagen sind. Mit Ausnahme des worst-case gilt dies auch für die anderen Szenari-

Szenario	Bereitstellungskosten	EKE (vorher)	EKE (neu)
Basic (SM/AM)	20 % tech. Pot. kostenlos	teilweise	ja
Best	100 % kostenlos	teilweise	ja
Worst	komplett berücksichtigt	nein	ja

**Tab. 32:** Wesentliche Charakteristika der Szenarien der Sensitivitätsanalyse

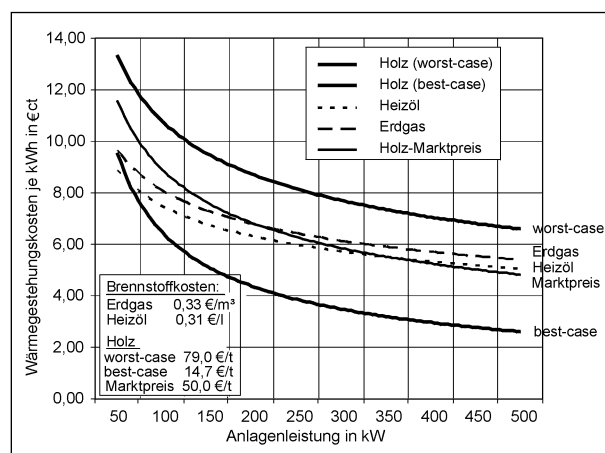


**Bild 33:** Sensitivitätsanalyse der Entsorgungskosten-Einsparungen verschiedener Szenarien für Holzfeuerungen gegenüber Erdgas- und Heizölheizungen

en, wenn keine EKE berücksichtigt werden, aber die aktuellen Brennstoffkosten zu Grunde gelegt werden. Mit Hilfe dieser Abbildung ist eine individuelle Einordnung von Meistereien möglich. So kann für eine Meisterie mit hohen Bereitstellungskosten eine Hackschnitzelanlage trotzdem wirtschaftlich sein, wenn sie für den zu entsorgenden Gehölzschnitt hohe Entsorgungskosten aufwenden müsste, die eingespart werden könnten.

Die bisherige Betrachtung beruht auf einer für Meistereien berechneten typischen Anlagenleistung von 204 kW. Wie die Wärmegestehungskosten von der installierten Leistung abhängen, soll daher im Weiteren betrachtet werden. Für Holzfeuerungen werden dabei die Szenarien worst- und best-case betrachtet sowie zusätzlich das Verhalten bei reinem Zukauf der Holz hackschnitzel zu marktüblichen Preisen von 50 €/t (siehe Kapitel 9.3.2). Als Referenzanlagen werden wiederum die bereits identifizierten Heizöl- und Erdgasanlagen mit durchschnittlichen Brennstoffkosten (siehe Kapitel 9.3.2) verwendet.

In Bild 34 sind die spezifischen Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit von der installierten Leistung dargestellt. Grundlage für diese Darstellung bilden die Parameter, die in vorangegangenen Kapiteln erarbeitet wurden. Allein die Investitionskosten wurden mit Hilfe der in Bild 25 dargestellten Kostendegressionskurve und deren berechneter Formel variiert. Als Resultat zeigt die „worst case“-Hackschnitzel-Kurve in Bild 34 maximale Wärmegestehungskosten von etwa 13,5 Ct/kWh im Bereich von 50 kW. Mit zunehmender Anlagengröße bzw. -leistung reduzieren sich die spezifischen Wärmegestehungskosten. Die „best case“-Kurve verläuft von etwa 9,5 Ct/kWh (50 kW) auf unter 3



**Bild 34:** Spezifische Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit von der installierten Leistung



Ct/kWh (500 kW). Für Heizöl- sowie Erdgasanlagen liegen die Wärmegestehungskosten bei ungefähr 9 Ct/kWh im kleinen Leistungsbereich (50 kW). Weiterhin ist in Bild 34 zu erkennen, dass diese mit größer werdenden Leistungen sich nicht so stark reduzieren, wie dies im Falle der Kosten der Hack-schnitzelanlage ist.

Generell zeigt sich, dass bereits im kleinen Leistungsbereich eine Holzfeuerung die wirtschaftlichste Anlagentechnik darstellt, wenn die Grundlagen des Best-Szenarios berücksichtigt werden. Wiederum erreicht das Worst-Szenario mit steigender Leistung zwar eine Annäherung an die „fossilen“ Referenzanlagen, jedoch nie einen Schnittpunkt mit diesen. Werden marktübliche Preise für Holzhackschnitzel angenommen, sind diese Anlagen bei etwa 200 kW gegenüber Erdgas-Anlagen bzw. bei etwa 350 kW gegenüber Heizöl-Anlagen wirtschaftlich.

Nicht zuletzt vor dem Hintergrund veränderter Brennstoffkosten für Heizöl und Erdgas würden sich beide Kurven zu höheren Wärmegestehungskosten verschieben, wodurch sich gleichzeitig die Schnittpunkte von Holzfeuerungen hin zu niedrigeren Anlagenleistungen verschieben würden.

Ausdrücklich wird darauf hingewiesen, dass diese Werte Tendenzen für die hier unterstellten Annahmen aufzeigen, von denen der Einzelfall deutlich abweichen kann.

## 10.2 Biogasanlagen (Grasschnitt)

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Biogasanlagen werden 3 Szenarien betrachtet:

- Basic-Szenario,
- Best-1-Szenario und
- Best-2-Szenario.

Zudem werden für alle drei Szenarien verschiedene Anlagengrößen betrachtet (Tabelle 24).

Das durchschnittliche Potenzial an Grasschnitt einer Straßenmeisterei beträgt ca. 1.650 t/a. Wird davon ausgegangen, dass etwa 90 % des Grasschnittaufkommens aufgesammelt werden, so können rund 1.500 t Grasschnitt pro Jahr in einer kleinen Biogasanlage verwertet werden. Derzeit wird jedoch nur ein kleiner Teil von rund 20 % des Grasschnitts abtransportiert, während der überwiegende Teil an Ort und Stelle verbleibt und eingemulcht wird.

Da die Mengen einer einzelnen Straßenmeisterei nicht ausreichen, um eine Biogasanlage wirtschaftlich zu betreiben, werden zusätzlich Gemeinschaftsanlagen betrachtet, bei denen die Grasschnittmengen mehrerer Straßenmeistereien verwertet werden (3.000 t/a bis 9.000 t/a). Es wird angenommen, dass diese Gemeinschaftsbiogasanlage auf dem Gelände einer Straßenmeisterei steht, sodass für alle Szenarien lediglich der Wärmebedarf dieser einen Meisterei berücksichtigt werden kann. Zusätzlich fallen so genannte Transferkosten an, um die eingesammelten Grasschnittmengen von den Straßenmeistereien zur Gemeinschaftsbiogasanlage zu transportieren (abzüglich der Straßenmeisterei, auf der sich die zentrale Biogasanlage befindet).

Es wird angenommen, dass der Wärmeverbrauch einer durchschnittlichen Straßenmeisterei mit 265.000 kWh/a durch die Abwärme der Biogasanlage gedeckt werden kann. Für die Deckung des Wärmebedarfs der Straßenmeisterei wird in der Regel Erdgas einkauft, das im Fall der Abwärmennutzung der Biogasanlage eingespart werden kann. Die Differenz aus dem eingesparten Einkauf von Erdgas zum Preis von 6 Cent/kWh und dem Verkaufspreis von Biogas zu 4 Cent/kWh wird zusätzlich vergütet. Demnach werden für den Wärmebedarf der Straßenmeisterei von 265.000 kWh 2 Cent/kWh als Erlös gutgeschrieben.

Darüber hinaus wird angenommen, dass die restliche Abwärme (abzüglich des Eigenbedarfs der Biogasanlage) mit 4 Cent/kWh verkauft werden kann. Für die externe Wärmenutzung (Wärmeverbrauch SM, Wärmeverkauf) wird der KWK-Bonus gewährt. Für diese externe Wärmenutzung infolge der Biogasverwertung im BHKW wird der KWK-Bonus (2 Cent/kWh) berücksichtigt.

Für das Basic-Szenario werden sowohl Aufsamme- als auch Transportkosten für das Grasschnittmaterial angenommen, wobei 20 % der jeweiligen Kosten nicht berücksichtigt werden, da etwa 20 % des Grasschnitts auch ohne Biogasanlage aufgesammelt und abtransportiert werden müssen. Dies entspricht einer Menge von etwa 330 t/a bei einer durchschnittlichen Straßenmeisterei. Ebenso werden für 20 % des anfallenden Grasschnitts die ersparten Entsorgungskosten von 30 €/t gutgeschrieben, da diese Mengen ohnehin abtransportiert und entsorgt werden müssen. Die Silagekosten werden für alle Szenarien gleichermaßen berücksichtigt.

Im Best-Szenario I werden weder Transportkosten noch Kosten für das Aufsammeln des Grasschnitts angenommen, da vorausgesetzt wird, dass rechtliche Vorschriften einen vollständigen Abtransport der Grasmengen vorgeben. Als Bereitstellungskosten werden demnach lediglich die Silagekosten mit 1,50 €/t einkalkuliert.

Des Weiteren werden die eingesparten Entsorgungskosten (30 €/t) für die gesamte abtransportierte Menge berücksichtigt

Das Best-Szenario II bewegt sich hinsichtlich der Annahmen zwischen Basic- und Best-Fall I. Hier werden keine Kosten für das Aufsammeln des Grasschnitts betrachtet, wohl aber die Transportkosten für das Grasschnittmaterial abzüglich der Mengen, die auch ohne Vorhandensein einer Biogasanlage hätten transportiert werden müssen (20 % = 330 t/a). Die eingesparten Entsorgungskosten werden für 20 % der anfallenden Grasschnittmenge berücksichtigt, da diese ohnehin abtransportiert und entsorgt werden müssen.

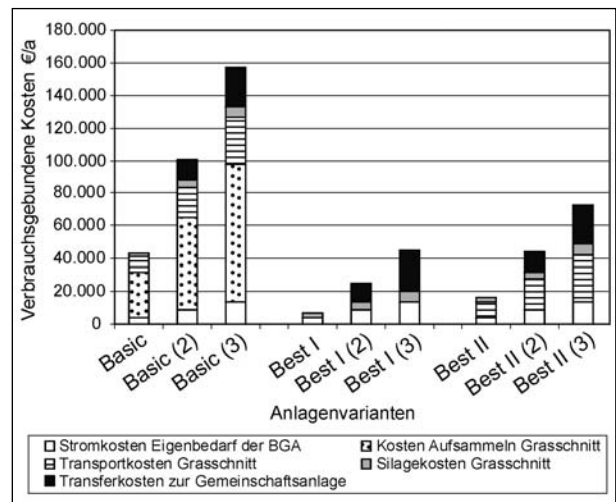
**10.2.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse**

Im Ergebnis der verbrauchsgebundenen Kosten der einzelnen Szenarien zeigt sich, dass diese mit der Anzahl der Meistereien steigen (siehe Bild 35). Unabhängig von den Szenarien fallen die Transfer-, Silage- und Stromkosten in gleicher Höhe an, wobei die Transferkosten für die Zusammenfassung der Grasschnittmengen erst ab zwei Meistereien anfallen, da sich die betrachteten Biogasanla-

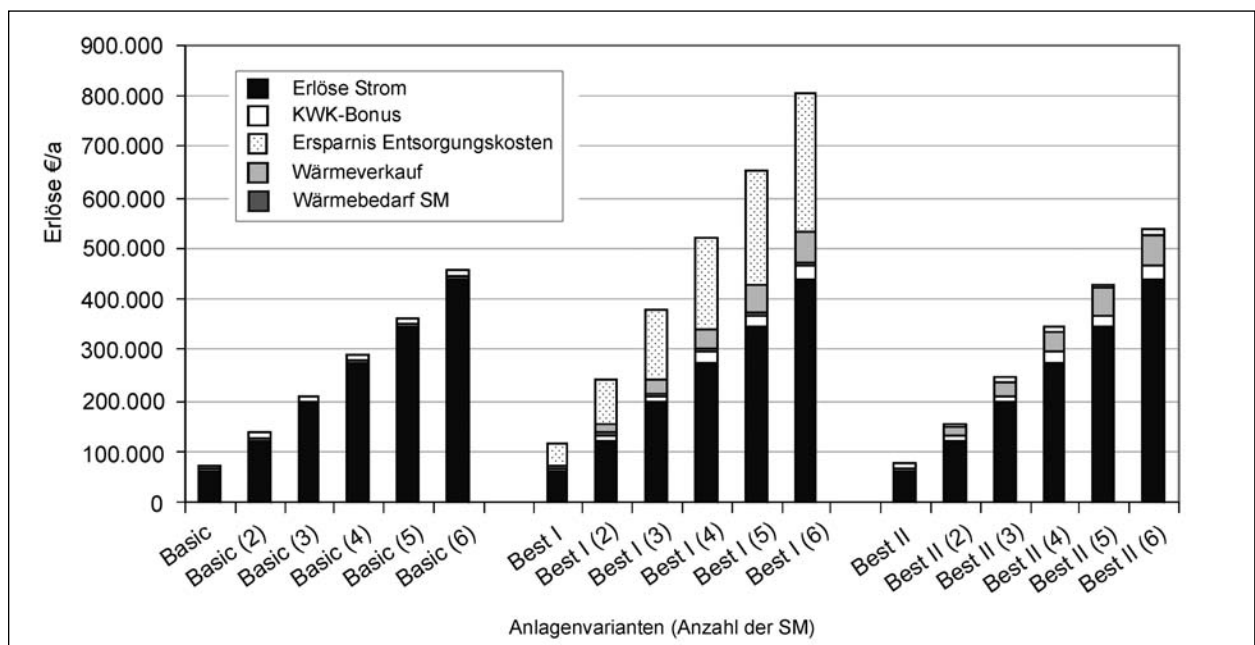
gen immer am Standort einer Meisterei befinden und somit für die zusätzlich beliefernden Meistereien Transferkosten anfallen.

Bei der Berücksichtigung der Kosten für das Aufsammeln des Grasschnitts (Basic-Fall) ergeben sich deutlich höhere verbrauchsgebundene Kosten als in den anderen Szenarien.

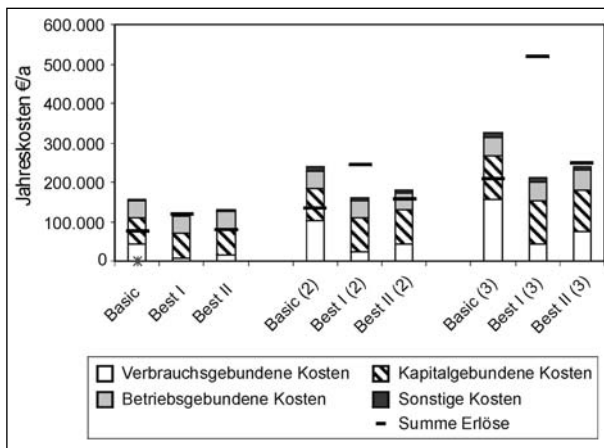
Die Erlöse der verschiedenen Szenarien setzen sich hauptsächlich aus den Stromerlösen zusammen (siehe Bild 36). Für das Szenario Best-Fall I werden zusätzlich noch sämtliche Entsorgungskostenersparnisse berücksichtigt.



**Bild 35:** Verbrauchsgebundene Kosten verschiedener Biogasanlagen-Varianten (in Klammern () – Anzahl der Meistereien)



**Bild 36:** Erlöse verschiedener Biogasanlagen-Varianten



**Bild 37:** Jahreskosten verschiedener Biogasanlagen-Varianten

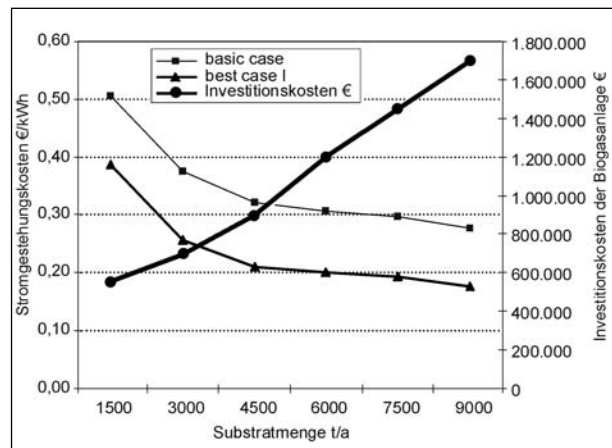
Zusammenfassend werden die Jahreskosten der verschiedenen Biogasanlagen-Szenarien mit der Summe der Erlöse in Bild 37 dargestellt. Dabei werden die betrachteten Szenarien jeweils für die gleiche Anzahl von Meistereien gegenübergestellt.

Es zeigt sich, dass eine Biogasanlage für eine einzelne Meisterei nicht wirtschaftlich ist. Mit der Anzahl der Meistereien, d. h. mit zunehmender Grasschnittmenge und Biogasanlagengröße, zeigen sich deutliche Unterschiede in den einzelnen Szenarien. Für das Basic-Szenario ist auch mit größeren Anlagen kein wirtschaftlicher Betrieb möglich. Dieser wird in den beiden Best-Szenarien bereits ab zwei bzw. ab drei Meistereien erreicht.

Für die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Anlagen sind folglich auf der Einnahmenseite die Berücksichtigung der Entsorgungskosten-Einsparungen und auf der Ausgabenseite die Kosten der Bereitstellung entscheidend. Vor dem Hintergrund der aktuellen Praxis im Straßenbetriebsdienst ist davon auszugehen, dass den durch den zusätzlichen Bedarf in Biogasanlagen entstehenden Bereitstellungskosten keine gleichwertigen Einsparungen der Entsorgungskosten gegenüberstehen, da diese nur im Falle eines Abtransports der Grasschnittmengen anfallen.

### 10.2.2 Sensitivitätsanalyse

Im Weiteren wird eine Sensitivitätsanalyse der Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der Substratmengen und dementsprechend auch größeren Anlagenleistungen durchgeführt. Dabei setzen sich die Stromgestehungskosten aus dem Verhältnis der Summe aller Kosten und der erzeugten elektrischen Energie zusammen.



**Bild 38:** Stromgestehungskosten abhängig von der eingesetzten Substratmenge

Erwartungsgemäß nehmen die Investitionskosten mit steigender Substratmenge, was gleichbedeutend mit größeren Anlagenleistungen ist, zu (die spezifischen Investitionskosten dagegen i. d. R. ab) (siehe Bild 38). Demgegenüber verhalten sich die Stromgestehungskosten in beiden dargestellten Szenarien (Best-I und Basic-Fall) logarithmisch. Bei der Betrachtung der durch das EEG festgeschriebenen Erträge aus dem Stromverkauf (siehe Kapitel 9.4.5) von 19,33 Ct/kWh wird ersichtlich, dass das Best-I-Szenario etwa ab einer Substratmenge von 6.000 t/a die Grenze der Wirtschaftlichkeit erreicht, was das Basic-Szenario in keinem der Fälle schafft.

D. h., unter den gegebenen Rahmenbedingungen ohne Berücksichtigung zusätzlicher Bereitstellungskosten durch das Aufsammeln des Materials und Entsorgungskosten-Einsparungen, aber inklusive Transport- und Transferkosten kann die Investition in eine Biogasanlage, die durch mehrere Meistereien mit Substraten versorgt wird, wirtschaftlich sein.

## 11 Zusammenfassung und Empfehlungen

Hintergrund dieses Forschungsvorhabens ist es, Möglichkeiten einer energetischen Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst, d. h. Gras-, Gehölzschnitt und Bankettschälgut (BSG), zu untersuchen.

Das Augenmerk richtet sich hierbei auf die Struktur des Straßenwesens und -betriebsdienstes, einen Überblick über das grundsätzliche Vorgehen bei

der Grünpflege des Straßenbetriebsdienstes sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die energetische Verwertung und Entsorgung. Diese sehen Grünabfälle als nachwachsende Rohstoffe (EEG) und stellen hohe Anforderungen an die Entsorgung. Damit ist eine energetische Nutzung künftig attraktiv.

Diesbezüglich wurden die Brennstoffzusammensetzungen und -eigenschaften der Grünabfälle analysiert. Hierzu werden die aus dem Straßenbetriebsdienst erwarteten wie auch von der energetischen Nutzung geforderten Brennstoffmengen und -qualitäten beschrieben. Diese basieren auf Literaturangaben, vielfältigen Umfragen und ergänzenden stichprobenartigen Laboruntersuchungen für Bankettschälgut.

Die Brennstoffqualität der unterschiedlichen Fraktionen variiert jedoch stark; während Gehölzschnitt gute feuerungstechnische Eigenschaften aufweist, kann der in der Regel feuchte Grasschnitt in Biogasanlagen genutzt werden; Bankettschälgut zeigt insgesamt sehr geringe Energiedichten. Die gemeinsame Verwertung der Fraktionen ist daher nicht zu empfehlen.

Die relevanten Stoffströme und Entsorgungswege von Grünabfällen wurden u. a. durch eine Umfrage, die das Mengenpotenzial für eine energetische Verwertung sowie die heutigen Entsorgungspfade und -kosten abbildet, ermittelt. Im Allgemeinen hängen die Mengen und Qualitäten der Grünabfälle von den Pflegeflächen und der Pflegeintensität ab.

Zur Eingrenzung von Verwertungsverfahren erfolgte eine Beschreibung der Systemtechnik, insbesondere für holzgeführte Wärmeerzeugungsanlagen und Biogasanlagen zur Strom- und Wärmebereitstellung.

Daraus wurden konkrete Verwertungskonzepte für Straßen- und Autobahnmeistereien abgeleitet. Es erfolgt eine separate Betrachtung von Grasschnitt, Gehölzschnitt und Bankettschälgut. Zusätzlich werden exemplarisch drei Meistereien vertiefend betrachtet.

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit umfasst die Kosten der Biomassegewinnung, der Bereitstellung und Entsorgung für Gehölz- und Grasschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst sowie die Kosten des Baus und Betriebs der Verwertungsanlagen.

Zur Einordnung der Gesamtkosten der energetischen Nutzung von Grünabfällen aus dem Straßen-

betriebsdienst werden fossilen Wärmesystemen verschiedene Szenarien gegenübergestellt. Diese berücksichtigen unterschiedliche Randbedingungen, wie die Höhe der Bereitstellungskosten für Gras- und Gehölzschnitt, Heizölpreise etc.

Zusätzlich wird die externe Bereitstellung des Materials für Biomasseheiz(kraft)werke oder Biogasanlagen betrachtet und anhand von Umfragen die Bereitschaft der Anlagenbetreiber für den Einsatz dieser Materialien, etwaige Vorgaben an das Material und zu erwartende Preise/Entsorgungskosten, abgeschätzt.

Betrachtet man die Mengenströme der verschiedenen Grünabfälle getrennt und stellt deren Energiegehalte dem Wärmebedarf einer Straßenmeisterei oder Autobahnmeisterei gegenüber, zeigt sich:

- Für Gehölzschnitt: Technisch ist das Potenzial an Gehölzschnitt zum Betrieb einer Holzfeuerungsanlage in der Regel ausreichend.

Wirtschaftlich ist es vor allem dann darstellbar, wenn große Mengen zusätzlich abgefahren werden müssen und so Entsorgungskosten entstehen. Kann das Material vor Ort verbleiben, stellt dies gegenüber einer energetischen Nutzung in der Regel die kostengünstigere Alternative dar. Zusätzlich kann das Material über den Brennstoffmarkt abgesetzt werden.

- Für Grasschnitt: Technisch ist das Potenzial zum Betrieb kleiner (kostenintensiver) Biogasanlagen in der Regel ausreichend.

Wirtschaftlich ist die gemeinsame Nutzung des Grasschnitts aus mehreren Meistereien vorteilhafter. Insgesamt ist die Wirtschaftlichkeit nur bei sehr günstigen Rahmenbedingungen gegeben (hohe Bergungsmengen, gemeinsame Nutzung, gute Anlagenausnutzung etc.). Einem Absatz auf dem Brennstoffmarkt stehen zurzeit noch große Vorbehalte entgegen.

- Für Bankettschälgut ist eine energetische Nutzung in der Regel nicht möglich.

Höhere Kosten für fossile Brennstoffe machen insbesondere die meistereieigenen Wärmebereitstellung aus Gehölzschnitt attraktiv.

Abschließend werden aus den Untersuchungen Handlungsempfehlungen für eine energetische Verwertung von Straßenbegleitgrün in Meistereien abgeleitet. Für diese wird eine zusätzliche Handreichung (Leitfaden) für die einzelnen Straßenmeistereien

reien vorgeschlagen, die eine zeitnahe und einfache Prüfung der grundsätzlichen Möglichkeiten der energetischen Nutzung von Gehölzschnitt zur betriebseigenen Wärmeversorgung in den jeweiligen Einrichtungen ermöglichen soll.

Eine energetische Nutzung von Bankettschälgut ist nicht möglich. Daher wird empfohlen, vor der Schälung der Bankette diese zu mähen, um den organischen Anteil weitestgehend zu reduzieren.

Der Einsatz von Holzfeuerungsanlagen ist auch bei meistereigener Brennstoffbereitstellung durch den Straßenbetriebsdienst gegenüber herkömmlichen Erdgas- oder Heizöl-Zentralheizungen eine Alternative und kann zu Kosteneinsparungen führen. Voraussetzungen, die gegeben sein müssen, sind

- ausreichend Lagerraum,
- verantwortliche und aufgeschlossene Mitarbeiter vor Ort und
- notwendige Ersatzinvestitionen.

Daher ist eine Prüfung insbesondere bei Ersatzinvestitionen immer zu empfehlen.

Eine Nutzung von Grasschnitt in betriebseigenen Biogasanlagen bzw. in Gemeinschaftsanlagen hat Pilotcharakter und sollte als solche realisiert werden.

Vorgeschlagen wird daher, insbesondere für Grasschnitt, aber auch für Gehölzschnitt, eine Informationskampagne bzw. eine Aufklärung der Anlagenbetreiber über die Begriffe und die brennstofftechnischen bzw. Substrat-Eigenschaften von Straßenbegleitgrün. Durch Veröffentlichungen in entsprechenden Fachpublikationen können die Potenziale von Straßenbegleitgrün einem breiteren Fachpublikum vorgestellt werden.

## 12 Leitfaden

Der nachfolgende Leitfaden soll eine Hilfestellung bzw. eine Vorprüfung für die Entscheidungsträger liefern, um Erfolg versprechende energetische Verwertungsoptionen für Gehölzschnitt zu identifizieren. Dabei werden ausschließlich vollautomatische Holz hackschnitzel-Kessel betrachtet.

Im Abschluss des Leitfadens liegen dann auch erste Ergebnisse hinsichtlich Anlagendimensionierung und Wirtschaftlichkeit vor. Die Grobdimensionierung und Wirtschaftlichkeit beruhen auf der Basis erfasster Daten und Durchschnittskennwerte des Straßenbetriebsdienstes. Dabei werden Ausschlusskriterien definiert nach denen eine betriebseigene Nutzung nicht weiter verfolgt werden sollte. Inhaltliche Schwerpunkte sind die Einordnung von Standortrahmenbedingungen, die Abschätzung benötigter Brennstoffmengen, die Wirtschaftlichkeit und die Darstellung von Wärmeentstehungskosten gegenüber bisher genutzten Systemen. Zielgruppe sind Straßen- und Autobahnmeistereien.

Für eine schnelle Übersicht werden wichtige Ergebnisse, Erkenntnisse sowie durchzuführende Berechnungen durch Symbole hervorgehoben. Diese sind im Folgenden dargestellt:



Durchzuführende Berechnungen



Optionaler Berechnungsweg, wenn die „Durchzuführende Berechnung“ nicht möglich ist



Wichtige Information



Berechnungsbeispiele



Zusätzliche Hintergrundinformationen

### 12.1 Glossar

**AUFWUCHSMENGE:** Bezeichnet die durchschnittliche jährlich hinzukommende (zuwachsende) Gewichtseinheit pro Fläche an pflanzlichen Materialien.

**BRUSTHÖHENDURCHMESSER:** Bezeichnet den Stammdurchmesser auf ca. 1,3 m Höhe über dem Boden.

**DERBHOLZ:** Bezeichnet die oberirdischen Baumteile ab einem mindest Durchmesser von 7 cm.

**FRISCHMASSE:** Biomasse, nach der Ernte, ohne dass diese getrocknet oder umgewandelt wurde. Abgekürzt mit FM.

**GEHÖLZSCHNITT:** Beinhaltet sämtliches Material von Strauch- und Baumbeständen, die durch Pflegemaßnahmen an Straßen anfallen. Dies beinhaltet bodendeckende Strauchflächen, Gehölzflächen, Feldhecken, geschlossene Gehölzflächen, Straßenbäume und bepflanzte Sonderstandorte.

**HEIZWERT:** Bezogen auf die eingesetzte Brennstoffmenge ist der Heizwert die bei der Verbrennung nutzbare Wärmemenge. Angegeben wird dieser mit KJ/kg oder üblicherweise in der Haustechnik mit kWh/BE (BE-Brennstoffeinheit, wie kg, l oder m<sup>3</sup>).

Die in dieser Arbeit übliche Bezeichnung des Heizwertes bezieht sich auf  $H_u(wf)$  (Heizwert eines wasserfreien Brennstoffs).

HHS: Holzhackschnitzel

HOLZARTIGE BIOMASSE: stammt von Bäumen, Büschen und Gesträuch [CEN, 2005]<sup>21</sup>; hier gleichbedeutend mit GEHÖLZSCHNITT.

KERNHOLZ: Bezeichnet den nicht mehr wasserführenden Teil eines Baumes. Gegenüber dem SPLINTHOLZ ist es meist trockener und schwerer.

SCHLAGABRAUM: Bezeichnet primär das Kronenderholz.

SCHÜTTRAUMMETER: Ein Schüttraummeter, kurz Srm, entspricht einem Kubikmeter Schüttgut (z. B. Hackgut oder Sägespäne). Ein Srm Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst entspricht etwa 0,25 t FM bis 0,4 t FM.

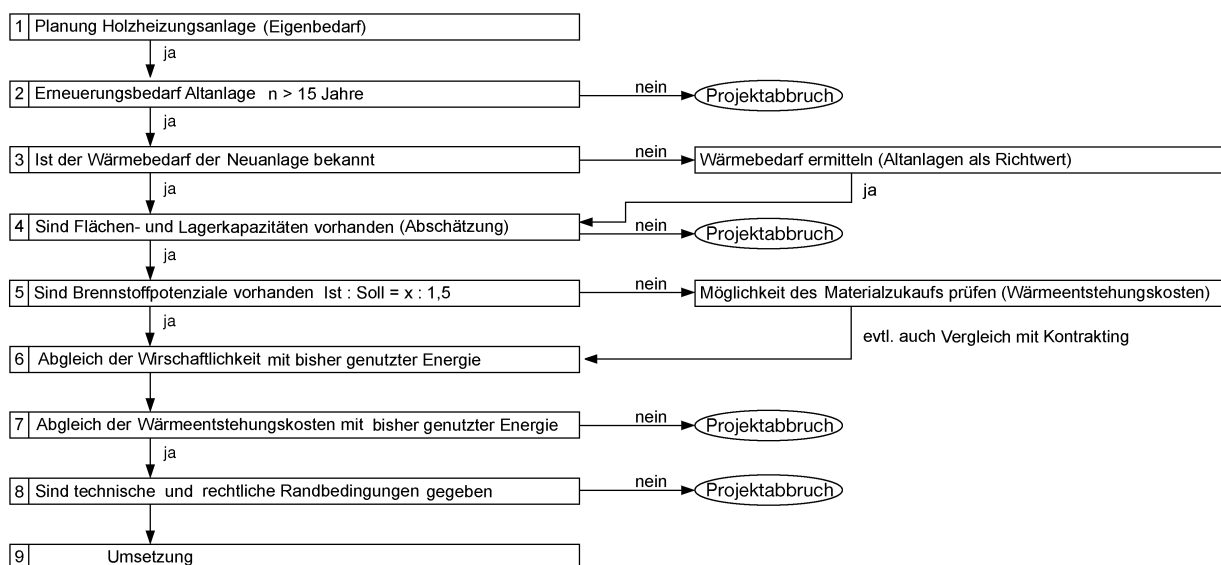
SCHWACHHOLZ: Bezeichnet die bei Durchforstungsmaßnahmen entnommenen konkurrierenden, kranken oder minderwertigen Bäume. Meistens mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von etwa 7 bis 20 cm.

SPLINTHOLZ: Bezeichnet die Zone zwischen Kern und Rinde. Dient der Wasserleitung am stehenden Baum.

TROCKENMASSE: Der bei der Trocknung eintretende Massenverlust wird als Trockenverlust bezeichnet. Neben einem Großteil des enthaltenen Wassers verdampfen auch andere flüchtige Bestandteile. Die Trockenmasse wird über standardisierte Verfahren ermittelt (i. d. R. bei 105 °C). Bezogen auf Biomasse, wie Holz, wird darunter das Gewicht des Materials mit einem Wassergehalt von 0 % verstanden. Abgekürzt mit TM.

## 12.2 Vorgehensweise

Die folgende Darstellung zeigt das schrittweise Vorgehen des Leitfadens. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte werden zur besseren Übersicht jeweils in die rechte Spalte übertragen. Es wird empfohlen, das enthaltene Beiblatt zum Eintragen der Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitsschritten zu nutzen.



<sup>21</sup> CEN (2005): Europäisches Komitee für Normung (CEN), Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen. Unterlagen des DIN NMP 582 zur Sitzung am 3. Februar 2005. Das DIN NMP 582 ist das nationale deutsche Spiegelkomitee zur Begleitung des CEN TC 335.

Kapitel	No.	Ergebnisse	Einheit
12.2	Erg. 1.: Anlagenleistung		kW
12.2	Erg. 2.: Wärmebedarf		kWh pro Jahr
12.2	Erg. 3.: Brennstoffbedarf		t FM pro Jahr
12.3.2	Erg. 4.: Lagerkapazität		m <sup>2</sup>
12.1	Erg. 5.: Brennstoffpotenzial (Ist)		t FM pro Jahr
12.2	Erg. 6.: Brennstoff Sicherheitsfaktor		
Wirtschaftlichkeitsdaten			
12.1	Erg. 7.: Investitionskosten		€
12.1	Erg. 8.: Weitere kap. Gesamtkosten		€
12.2	Erg. 9.: Bergungskosten		€/t FM
12.2	Erg. 10.: Transportkosten		€/t FM
12.2	Erg. 11.: Gesamtkosten der Bereitstellung		€/a
12.2	Erg. 12.: Hilfsenergie:		€/a
12.3	Erg. 13.: Betriebsgebundene Kosten		€/a
12.4	Erg. 14.: Bauseitige. Kosten		€
12.4	Erg. 15.: Summe Versicherung und Hilfskräfte		€/a
12.5	Erg. 16.: Einsparung Entsorgung		€/a

**Tab. 33:** Beiblatt des Leitfadens



## 12.3 Planung Holzheizungsanlage

Im Folgenden werden die entscheidenden Rahmenbedingungen für den Einsatz von Holzfeuerungsanlagen in Meistereien beschrieben. Die vorgestellten Kennwerte und Ergebnisse beruhen auf Durchschnittswerten des Straßenbetriebsdienstes, die im Forschungsvorgaben zur „Energetischen Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst“ ermittelt wurden.

### 12.3.1 Erneuerungsbedarf

Als erstes Auswahlkriterium wird der Erneuerungsbedarf der bestehenden Heizungsanlagen auf 15 Jahre festgelegt. Vor diesem Hintergrund ist zu beachten, dass diese Größenordnung für verschiedene Anlagen auch niedriger bzw. höher ausfallen kann.

**Erneuerungsbedarf der Altanlage ist vorhanden, wenn diese in etwa älter als 15 Jahre sind. Ansonsten ist kein Bedarf vorhanden und folglich Projektabbruch.**

### 12.3.2 Brennstoffbedarf

Im Folgenden werden die für eine energetische Verwertung von Gehölzschnitt entscheidenden Randbedingungen bestimmt. Dazu wird jeweils, anhand des Brennstoffbedarfs der Altanlage:

- der Wärme- und Holzbrennstoffbedarf der Neuanlage und
- die benötigte Flächen- und Lagerkapazität bestimmt.

**Hinweis: Die Anlagenleistung sowie der Brennstoffbedarf kann bei entsprechender Wärmesanierung reduziert werden.**

Bei einer internen Verwertung zur Deckung des Wärmebedarfs in Meistereien sollten ausreichende Brennstoffmengen (im Straßenbetriebsdienst anfallender Gehölzschnitt) verfügbar sein. Die Größenordnung dieser Mengen ist bestimmt durch die bekannten Leistungs- und Verbrauchsdaten der bestehenden Heizungsanlage. Diese sind:

- Anlagenleistung (Größenordnung der bestehenden Anlage),
- Art des Brennstoffs und
- Brennstoffverbrauch.

#### **Berechnung Wärmebedarf:**

Ist der Wärmeverbrauch bzw. der Wärmebedarf der Meisterei nicht bekannt, kann dieser wie folgt abgeschätzt werden.

$$\text{Wärmebedarf [kWh]} = \text{Anlagenleistung [kW]} \times \text{Volllaststundenzahl [h/a]}$$

#### **Beispiel:**

Beispielsweise liegen typische Anlagenleistungen in Meistereien etwa zwischen 160 und 250 kW.

Für die Wärmebedarfsrechnungen werden typische **Volllaststundenzahlen** von **1.400 h/a** angenommen. Daraus ergibt sich ein mittlerer Wärmebedarf von **287.000 kWh pro Jahr (205 kW)**.



Erg. 1:



Anlagenleistung

---- kW

Erg. 2:



Wärmebedarf

---- kWh



**Berechnung Brennstoffbedarf:**

Bei der Bestimmung der benötigten Holz-Brennstoffmengen wird zwischen waldfriischem, sommertrockenem Hackgut oder Gehölzschnitt von Straßen unterschieden. Als sommertrocken wird Holz oder Hackgut bezeichnet, dass vom Frühjahr bis Spätsommer im freien gelagert wird, wodurch sein Wassergehalt sinkt (siehe Tab. 34). Für Gehölzschnitt ist von einem vergleichbaren Wassergehalt, wie bei waldfriischem Hackgut auszugehen sowie von einer vergleichbaren Dichte, da das Material in gehackter Form abtransportiert wird. In nicht gehackter Form hat Straßenbegleitgrün eine geringere Dichte (geschätzt 250 kg/m<sup>3</sup>) als Waldholz, da es vielfach aus einer Mischung von Kernholz und Strauchschnitt etc. besteht.

	Hackgut (waldfriisch)	Hackgut (sommertrocken)	Gehölzschnitt (ungehackt)	Gehölzschnitt (gehackt)
Heizwert	2,2 kWh/kg	3 kWh/kg	2,2 kWh/kg	2,2 kWh/kg
Wassergehalt	50 %	35 %	50 %	50 %
Dichte	~400 kg/m <sup>3</sup>	~325 kg/m <sup>3</sup>	~250 kg/m <sup>3</sup>	~400 kg/m <sup>3</sup>

Tab. 34: Energetische Kennwerte von Hackgut [FNR (2005c); eigene Angaben].

**Berechnung:**

Der Brennstoffbedarf wird auf einen Wassergehalt von 50 % (entspricht der Frischmasse – FM) bezogen. Anhand des Wärmebedarfs errechnet sich der Brennstoffbedarf nach folgender Formel:

- HHS<sub>50</sub>: Holz-Hackschnitzelbedarf mit 50 % Wassergehalt (FM-Frischmasse) [kg FM/a]  
 Q: Wärmebedarf [kWh/a] (siehe Erg. 2)  
 H<sub>U</sub>: Heizwert Hackgut mit 50 % Wassergehalt [2,2 kWh/kg] (siehe Tab. 1)  
 η: Anlagenwirkungsgrad [%]

$$HHS_{50} = \frac{Q}{2,2 \times \eta}$$

Der typische Anlagenwirkungsgrad von Holzfeuerungsanlagen liegt bei 85 %.

**Beispiel:**

Für den beispielhaften Wärmebedarf von 287.000 kWh im Jahr werden etwa 153 Tonnen waldfriisches Hackgut (FM) oder Gehölzschnitt bzw. 113 Tonnen sommertrockenes Hackgut benötigt. Entsprechend der Dichte von ungehacktem Gehölzschnitt (~250 kg/m<sup>3</sup>) ergibt dies eine benötigte Menge von etwa 614 m<sup>3</sup> FM im Jahr gegenüber waldfriischem bzw. sommertrockenen Hackgut mit 384 bzw. 346 m<sup>3</sup> im Jahr.

**Faustformel:**

- 1 m<sup>3</sup> Erdgas ≈ 5 kg FM (waldfriischer Gehölzschnitt)  
 1 l Heizöl ≈ 5 kg FM (waldfriischer Gehölzschnitt)

Die Bedeutung von Anlagengröße und Brennstoffwassergehalt für den Brennstoffbedarf zeigt Bild 39.

Erg.3:

Brennstoff-  
bedarf

----- t FM



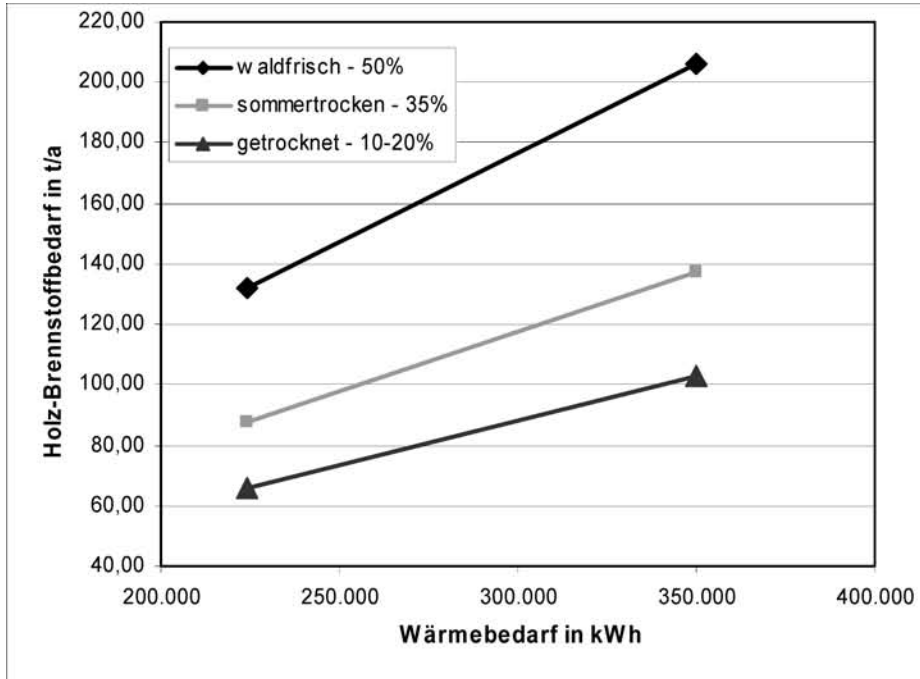


Bild 39: Brennstoffbedarf in Abhängigkeit von Anlagenleistung und Brennstoffwassergehalt.

### 12.3.3 Flächen- und Lagerkapazitäten

Inwieweit Lagerräume der Meisterei zur Hackschnitzel-Lagerung verwendet werden können und welcher Flächenbedarf zur Lagerung notwendig ist wird im Folgenden untersucht.

#### 12.3.3.1 Anlagenfläche

Generell wird für eine Holzheizung etwa ein gleicher Platzbedarf wie bei einer fossil befeuerten Zentralheizung benötigt. Grundsätzlich ist bei einer Anlagenleistung von 50 bis 500 kW ein Flächenbedarf zwischen 1,3 bzw. 5 m<sup>2</sup> und eine benötigte Höhe zwischen 1,4 bzw. 3 m anzunehmen. In diesen Angaben ist der Flächenbedarf für den Pufferspeicher und das Brennstofflager noch nicht enthalten.

#### 12.3.3.2 Lagerkapazität

Anlagenseitig ist für die kurzfristige Brennstoffversorgung eine Lagerung direkt an der Heizungsanlage sinnvoll. Je nach Anlagenhersteller sind hierfür unterschiedlich dimensionierte Behälter oder die Austragung aus entsprechenden Lagerräumen vorgesehen, so dass die Kapazität ausreichend für die Brennstoffversorgung über mehrere Tage ist.

Für die langfristige Brennstoffversorgung sind entsprechende Lagerflächen vorzusehen. Gegebenenfalls können freie Lagerkapazitäten (Fahrzeug- oder Salzhallen) am Standort der Meisterei verwendet werden.

Als Kenngröße für die Lagerkapazität können 0,625 m<sup>2</sup> pro kW angenommen werden. Werden die Hackschnitzel am Standort der Meisterei produziert, ist hierfür ein zusätzlicher Flächenbedarf von etwa 100 m<sup>2</sup> notwendig [FNR, 2005].

$$\text{Lagerkapazität [m}^2\text{]} = 0,625 \text{ [m}^2\text{/kW]} \times \text{Anlagenleistung [kW]} + 100 \text{ [m}^2\text{]}$$

Die entsprechende Lagerkapazität muss am Standort der Meisterei für die ausschließliche energetische Nutzung zur Verfügung stehen.

Erg.4:   
Lagerkapazität

----- m<sup>2</sup>



**Beispiel:**

Bei einer Anlagenleistung von 205 kW wird eine Lagerkapazität von ca. 128 m<sup>2</sup> benötigt. Bei entsprechendem Hacken vor Ort werden zusätzlich 100 m<sup>2</sup> benötigt.

Insgesamt also etwa 228 m<sup>2</sup>.

**12.4 Brennstoffpotenziale**

Bei der Abschätzung der nutzbaren Gehölzschnittmengen sollte berücksichtigt werden, dass durch die Verwendung des Materials auf Rast- und Erholungsflächen und für Neuanpflanzungen ebenfalls gewisse Mengen benötigt werden, so dass zusätzliche Zuschlagsfaktoren bei der Abschätzung der Brennstoffverfügbarkeit empfehlenswert sind.

**12.4.1 Bestimmung der Gehölzschnittmengen-Potenziale**

Sind die Gehölzschnittmengen im Straßenbetriebsdienst nicht bekannt können diese nach folgenden Vorgaben abgeschätzt werden. Ansonsten ist dieser Schritt zu überspringen und auf der rechten Seite entsprechend einzutragen:

- Pflegefläche in ha,
- Aufwuchsmenge in t pro ha und
- Länge des Streckennetzes in km.

**Berechnung:**

Die Berechnung der Brennstoffpotenziale erfolgt durch Multiplikation der einzelnen Kriterien (Pflegefläche, Aufwuchsmenge, Streckenlänge). Als Hilfsvorgaben können dabei typische Durchschnittswerte des Straßenbetriebsdienstes genutzt werden. Soweit bekannt sollten die aktuellen Daten der zu untersuchenden Meisterei verwendet werden (IST-Werte).

	Straßenmeisterei		Autobahnmeisterei	
	Vorgabe	Ist	Vorgabe	Ist
Pflegefläche	0,2 – 0,4 ha/km		0,6 – 0,8 ha/km	
Aufwuchsmenge	5 t FM/ha		5 t FM/ha	
Streckenlänge	Variabel		Variabel	
Ergebnis				

Erg.5:



Brennstoff-  
potenzial  
(IST)

----- t FM/a



Ist die Angabe der Gehölzschnittmenge aus Pflegemaßnahmen nur in m<sup>3</sup> möglich, ist die Abschätzung über die Dichte möglich:

Dazu müssen die vorhandenen/erwarteten Pflegemengen und deren Qualität berücksichtigt werden. Folgende Tabelle stellt diesen Zusammenhang dar.

	Anteil am Potenzial in %	Nutzbare Menge in m <sup>3</sup>	Dichte in t/m <sup>3</sup> FM	Ergebnis in kg/a
Kernholz			0,4	
Splintholz			0,4	
Strauchschni			0,25	
Summe				



### 12.4.2 Zuschlagsfaktor der Potenziale

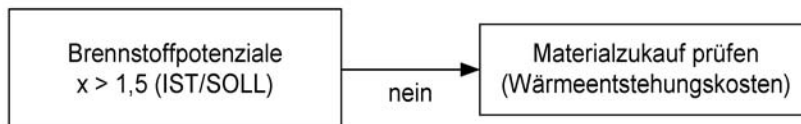
Um eine ausreichende Brennstoffmenge zu garantieren wird die vorhandene Gehölzschnittmenge mit einem Sicherheitsfaktor gewichtet.

**SOLL:** benötigte Gehölzschnittmenge der energetischen Verwertung (siehe Erg.3)

**IST:** vorhanden Gehölzschnittmengen aus dem Straßenbetriebsdienst (siehe Erg. 5).

$$x = \frac{IST \text{ [kg FM / a]}}{SOLL \text{ [kg FM / a]}}$$

Als Sicherheitsfaktor wird die 1,5fache Brennstoffpotenzialmenge empfohlen.



#### Generell gilt:

- x < 1** Das Brennstoffpotenzial der Meisterei ist zu gering. Bei der Wirtschaftlichkeits-Untersuchung ist der Materialzukauf von Holz-Hackschnitzeln (HHS) zu berücksichtigen.
- 1 < x < 1,5** Brennstoffpotenziale sind grundsätzlich ausreichend. Bei mittelfristigen Schwankungen in der Gehölzpflege kann zeitweise jedoch der Materialzukauf von HHS notwendig sein.
- x > 1,5** Generell ausreichende Brennstoffpotenziale.



Erg. 6.

**Brennstoff-  
Sicherheit**

x = \_ \_ \_ \_ \_



## 12.5 Kostenbetrachtung

Ziel der nachfolgenden Kostenuntersuchungen ist die Abschätzung aller Kosten, wie Aufwendungen und Erlöse, die durch die Bereitstellung zur energetischen Verwertung gegenüber den bisher praktizierten Verfahren entstehen. Hierzu zählen u. a.

- Kosten der Aufbereitung und Lagerung,
- Kosten und Erlöse bei Weitergabe zur energetischen Verwertung und
- Kosten der bisherigen Entsorgung des anfallenden Biomassematerials.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Straßenbegleitgrüns erfolgt in Anlehnung an die VDI 2067 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenrechnung [VDI 2067, 2000]. Nach VDI 2067 werden folgende vier Kostenarten betrachtet:

- kapitalgebundene Kosten,
- verbrauchsgebundene Kosten,
- betriebsgebundene Kosten und
- sonstige Kosten.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Straßenbegleitgrünmaterials basiert auf der Annuitätenmethode gemäß VDI 2067. Erklärungen zu den Rahmenbedingungen der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind dem Anhang (siehe Kapitel 12.9) zu entnehmen.

### 12.5.1 Kapitalgebundene Kosten

Die kapitalgebundenen Kosten umfassen **Investitionskosten** und weitere kapitalgebundene Kosten. Die Investitionskosten von Holzhackschnitzelanlagen sind abhängig von der Anlagengröße. Erfahrungswerte zeigt Bild 2. Die daraus ableitbare Gleichung kann zur Abschätzung des Investitionssumme herangezogen werden.

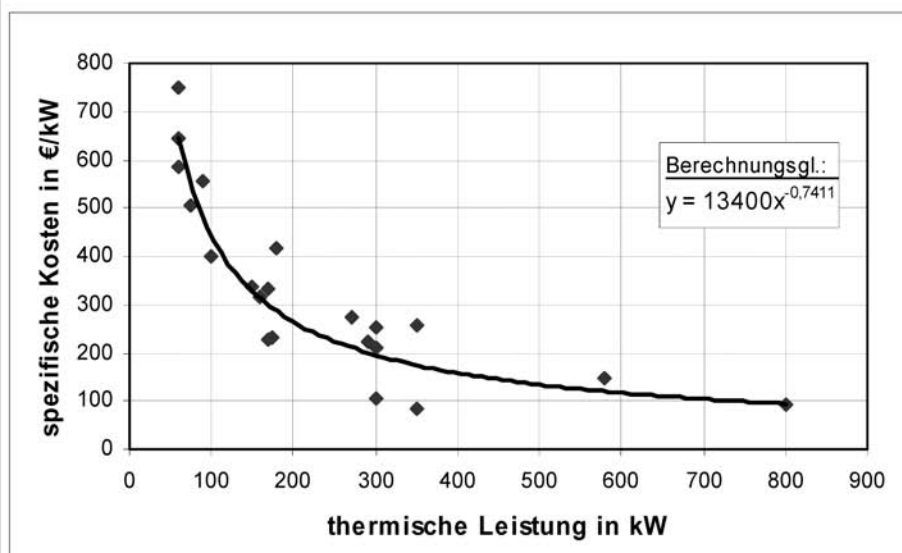


Bild 40: Spezifische Investitionskosten bestehender Hackschnitzelfeuerungen [FNR, 2001/2005; eigene Angaben]

Erg. 7:



Invest.-  
Kosten

----- €

**Berechnung der spez. Kosten: Berechnung der Investitionssumme:**

x: Anlagenleistung [kW] (siehe Erg.1)

$$I = (13400 \times x^{-0,7411}) \times x$$

**Beispiel:**

Für eine Anlagenleistung von 205 kW berechnen sich die spezifischen Kosten zu 259,34 €/kW. Dementsprechend ergibt die Investitionssumme 53.164 €.



**Hintergrundinformation:**

Investitionskosten für fossil befeuerte Anlagen können erfahrungsgemäß bisher für Heizölheizanlagen mit 50 % und für Erdgasheizanlagen mit 60 % niedrigeren Investitionskosten gegenüber Hackschnitzel-Anlagen angenommen werden (Momentaufnahme Stand 2006).



Zu den weiteren kapitalgebundenen Kosten gehören:

- 1.) Die **Frachtkosten** werden pauschal mit **500 €** angenommen.
- 2.) **Elektroinstallationskosten** werden gestaffelt nach Anlagenleistung festgelegt (siehe Tab. 22).

Anlagenleistung in kW	15 – 60	75 - 100	120 - 150	200 - 300	400 - 500	650 - 850
Kosten in EUR	80,-	150,-	200,-	300,-	400,-	500,-

Tab. 35: Übersicht der Elektroinstallationskosten (eigene Angaben).

- 3.) Für den **Inbetriebnahmepreis** werden pauschal **1.500 €** veranschlagt.
- 4.) Die **Montage** der Kesselanlage beträgt **10 %** der Investitionskosten (siehe Erg. 7).

Anschaffungskosten für Transportfahrzeuge oder Leasingkosten für sonstige Gerätschaften werden im Folgenden bei den Bereitstellungskosten betrachtet.

Frachtkosten	500,-
Elektroinstallation	
Inbetriebnahmepreis	1.500,-
Montage	
<b>Summe</b>	

Tab. 36: Sonstige kapitalgebundene Kosten

**12.5.2 Verbrauchsgebundene Kosten**

Zu den verbrauchsgebundenen Kosten zählen die:

- Biomassegewinnung- und Bereitstellungskosten
- Hilfsenergiekosten.

**Biomassegewinnung- und Bereitstellungskosten:**

Die Biomassegewinnung umfasst: Ernteverfahren, Hacken, Einblasen, Transport und Lagerung.

Die Kostenwerte können sehr unterschiedlich sein. Daher erfolgt hier nur eine Abschätzung der Größenordnung, wobei die entsprechenden Personalkosten in den jeweiligen Bereichen eingerechnet sind. Diese setzen sich zusammen aus:

- 1.) **Bergungskosten:** liegen im Mittel um die **50 €/t FM** (50 % Wassergehalt) inklusive dem Einblasen in Transportbehälter etc., allerdings ohne anfallende Transportkosten zur Konversionsanlage.

Erg. 8:   
 Weitere kap.  
 Gesamtkosten  
 ----- €

Erg. 9:   
 Bergungs-  
 kosten  
 ----- €/t FM

Erg. 10:   
**Transportkosten**  
 ----- €/t FM

2.) **Transportkosten:** werden über die **durchschnittlich** anzunehmenden Transportwege und die verwendeten Transportmittel geschätzt (siehe Bild 3), soweit diese nicht durch vorhandene Kostengrößen aus dem Betriebsdienst darzustellen sind.

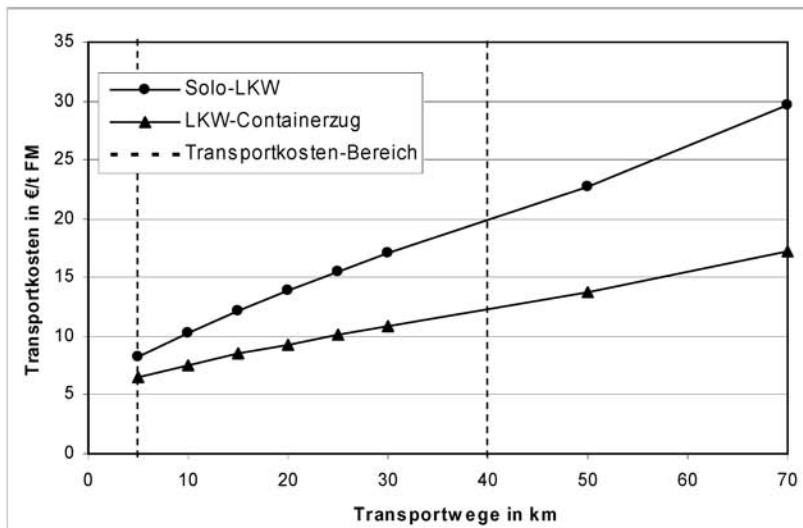


Bild 41: Transportkosten für Hackschnitzel [FNR, 2005]



**Beispiel:**

Durchschnittlich Transportentfernungen für **Autobahnmeistereien** werden mit der Vorgabe, dass der Standort im Zentrum der zu betreuenden Strecke (durchschnittlich 65 km) liegt, mit ungefähr 16km angenommen. Daraus ergeben sich Transportkosten in Abhängigkeit der Transportmittel von **8,5 bis 14 €/t FM**.

Für **Straßenmeistereien** mit durchschnittlichen Transport-Entfernungen von 35 km, ergeben sich Transportkosten für den LKW-Transport zwischen **11,5 und 18,5 €/t FM**.

3.) **Lagerkosten:** Neben den bauseitigen Kosten (siehe im Folgenden „sonstige Kosten“) fallen Kosten für die **Lagerbeschickung** von **2,6 €/t FM** an.

**Gesamtkosten der Bereitstellung:**

In Tab. 4 sind die Bereitstellungskosten-Vorgaben der energetischen Nutzung von Hackschnitzel aus Gehölzschnitt von Straßen dargestellt.

Erg. 11:   
**Gesamtkosten Bereitstellung**  
 ----- €/a

Kosten	Einheit	AM	SM	Berechnung
Bergung	€/t FM	50		
Transport	€/t FM	8,5-14	11,5-18,5	
Lagerbeschickung	€/t FM	2,6		
<b>Bereitstellung</b>	<b>€/t FM</b>	<b>61,1-66,6</b>	<b>64,1-71,1</b>	
<b>Bereitstellung * Brennstoffbedarf (Erg. 3) in €/a</b>				

Tab. 37: Bereitstellungskosten für Gehölzschnitt (50 % Wassergehalt)



**Hilfsenergiekosten:**

Die Hilfsenergiekosten sind ebenfalls verbrauchsgebundenen Kosten. Diese ergeben sich zu ungefähr 0,7 % der thermischen Leistung (siehe Erg. 2) mit einem Strompreis von 0,16 €/kWh<sub>el</sub>. Bei Hackschnitzelfeuerungen entstehen zusätzliche Kosten für Hilfsenergie (elektrische betriebene Beschickungsanlagen) mit ca. 8,2 kWh je Kubikmeter Hackschnitzel (50 % Wassergehalt). Die Gesamtkosten der Hilfsenergie berechnen sich nach:

Q: Wärmebedarf [kWh/a] (siehe Erg.2)

HHS<sub>50</sub>: Brennstoffbedarf [t/a FM] (siehe Erg. 3)

ρ: Dichte waldfrisches Hackgut = 0,4 t/m<sup>3</sup> (siehe Tab. 1)

$$\text{Hilfsenergiekosten} = \left( 0,007 \times Q + 8,2 \times HHS_{50} \times \frac{1}{\rho} \right) \times 0,16 \text{ [€ / kWh}_{el}\text{ ]}$$

**Beispiel:**

Für eine Anlagenleistung von 205 kW mit einem Wärmebedarf von 287.000 kWh sowie einem Brennstoffbedarf von 384 m<sup>3</sup> FM (153 t/a FM) ergeben sich Hilfsenergiekosten von etwa 823 €/a.

**12.5.3 Betriebsgebundene Kosten**

Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören:

- 1.) Wartung- und Reinigungskosten:** liegen aufgrund der aufwändigeren Technik (Brennstoffversorgung) höher als für vergleichbare Heizöl oder Erdgas befeuerte Heizungen. Insgesamt werden die Wartungs- und Reinigungskosten mit 1,5 % der kapitalgebundenen Kosten (siehe Erg. 7 und 8) abgeschätzt.
- 2.) Schornsteinfegergebühren:** belaufen sich für Heizöl- und Erdgaszentralheizungen im kleinen Leistungsbereich auf 50 – 60 € und für automatisch beschickte Holzfeuerungsanlagen auf 155 €. Diese Angaben gelten ausschließlich für Sachsen und können für andere Bundesländer schätzungsweise bis zu 20 % höher liegen.

**Beispiel:**

Entsprechend den Investitionskosten (205 kW Anlagenleistung) von 53.164 € ergeben sich für die Wartung- und Reinigung Kosten von ca. 798 €.

**12.5.4 Sonstige Kosten**

Zu den sonstigen Kosten gehören:

- 1.) Versicherungskosten:** werden mit 0,5 % bzw. mit 1 % für Heizölanlagen der Investitionskosten (Erg. 7) abgeschätzt.
- 2.) Bauseitige Kosten:** Für die Zwischenlagerung des Gehölzschnitts können gegebenenfalls bestehende Gebäude, wie Fahrzeug- oder Gerätehallen genutzt werden. Ist dies nicht möglich ist ein **Neubau** notwendig. Hierfür werden mittlere Kosten von **125 €/t** inklusive entsprechender Fördertechnik angenommen. Als Größenordnung wird der halbjährliche Brennstoffbedarf (siehe Erg. 3) angenommen.

**Beispiel:**

Die Neubauhalle entspricht dem halbjährlichen Brennstoffbedarf der Beispielanlage (205 kW) von 76,5 t/a (siehe Erg. 3). Daraus ergeben sich Kosten von 9.563 €.

Erg. 12: 

Hilfsenergiekosten:  
----- €/a



Erg. 13: 

Betriebsgeb. Kosten:  
----- €/a



Erg. 14: 

Bauseitige Kosten:  
----- €



Erg. 15:   
**Summe**  
**Versicherung**  
**Hilfskräfte:**  
 ----- €

Erg. 16:   
**Einsparung:**  
 ----- €

3.) **Kosten für Hilfskräfte:** Für die Montage der Feuerungsanlage sind vom Auftraggeber zusätzlich erforderliche Hilfskräfte auf Anforderung des Monteurs zur Verfügung zu stellen. In anbetracht des zu erbringenden Zuarbeitens der Hilfskraft, können die dadurch entstehenden Kosten in etwa mit 25 % der Kosten für den Fachmonteur (siehe Kapitel 6.1) abgeschätzt werden. Dies deckt auch die Kosten für das Einbringen in den Heizraum und das Abladen der Anlage.

### 12.5.5 Entsorgungskosten

Ein wesentlicher Punkt für die Vollkostenbetrachtung in Meistereien ist, dass Einsparungspotenziale an Entsorgungskosten für Gehölzschnitt bestehen.

### 12.5.6 Berechnungsformel aller Kosten

Kostenübersicht	Einheit	Beispiel 205 kW	Ergebnisse (siehe Beiblatt)
<b>Kapitalgebundene Kosten</b>			
Investitionskosten (Erg. 7)	EUR	53.164,-	
Fracht (500,-)	EUR	500,-	
Elektroinstallation (Tab. 2)	EUR	300,-	
Inbetriebnahme (1.500,-)	EUR	1.500,-	
Montage (10 % von Erg.7)	EUR	5.316,-	
Summe (Erg. 8)	EUR	60.780,-	
<b>Verbrauchsgebundene Kosten</b>			
<i>Bergungskosten (Erg. 9)</i>	<i>EUR/t FM</i>	50,-	
<i>Transportkosten (Erg. 10)</i>	<i>EUR/t FM</i>	18,5,-*	
<i>Lagerbeschickung (Tab. 4)</i>	<i>EUR/t FM</i>	2,6,-	
Bereitstellung x Brennstoffbedarf ** (Erg.11)	EUR/a	10.878,-	
Hilfsenergie (Erg. 12)	EUR/a	823,-	
Summe	EUR/a	11.701,-	
<b>Betriebsgebundene Kosten</b>			
Wartung- und Reinigung (1,5 % von Erg. 7 und 8)	EUR/a	1.094,-	
Schornsteinfegergebühren (155,-)	EUR/a	155,-	
Summe (Erg. 13)	EUR/a	1.249,-	
<b>Sonstige Kosten</b>			
Versicherung (0,5 % von Erg. 7)	EUR/a	266,-	
Bauseitige Kosten (Erg. 14)	EUR	9.563,-	
Hilfskräfte (25 % von Montage)	EUR	1.329,-	
<b>Einsparungen</b>			
Entsorgungskosten	EUR/a	keine	

(\*) maximale Transportkosten einer Straßenmeisterei nach Tab. 37

(\*\*) Brennstoffbedarf nach Erg. 3

## 12.6 Wirtschaftlichkeitsprognose

Ziel ist die Zusammenführung der dargestellten Kosten für die Berechnung der Wärmegestehungskosten. Die im Folgenden verwendeten Faktoren (Barwertfaktor, Annuitätenfaktor) beruhen auf angenommenen Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung (siehe Kapitel 12.9) und werden hier nicht dargestellt.

Bei der **Annuitätenmethode** werden die durchschnittlichen jährlichen Zahlungen (Ein- und Auszahlungen), unter Berücksichtigung der Zahlungszeitpunkte und Zinsseszinsen, bei einer Investition gleichmäßig auf die Nutzungsjahre verteilt.



### Annuität der kapitalgebundenen Kosten:

Die Berechnung der Annuität der Investition erfolgt, wie im Folgenden dargestellt. Berücksichtigt werden zusätzlich Instandhaltungskosten von 1,5 % der Investitionssumme sowie der Barwertfaktor der Instandhaltung und der Annuitätenfaktor.

$I_0$ : Investition = Erg. 7 + Erg. 8 + Erg. 14 (bauseitige Kosten) [€]

$fK$ : Instandhaltung (1,5 % von  $I_0$ )

$bin$ : Barwertfaktor = 16,559

$a$ : Annuitätenfaktor = 0,0716



$$A_K = (I_0 + fK \times bin) \times a$$

$$A_K = \text{-----} \text{ €/a}$$

### Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten:

$bav$ : Barwertfaktor = 1,2966

Erg.11: Bereitstellungskosten pro Jahr [€]

Erg.12: Hilfsenergiekosten pro Jahr [€]



$$A_V = (Erg.11 + Erg.12) \times bav$$

$$A_V = \text{-----} \text{ €/a}$$

### Annuität der betriebsgebundenen Kosten:

$bab$ : Barwertfaktor = 1,2966

Erg.13: Summe der betriebsgebundenen Kosten [€]



$$A_B = Erg.13 \times bab$$

$$A_B = \text{-----} \text{ €/a}$$

### Annuität der sonstigen Kosten:

$bas$ : Barwertfaktor = 1,1863

Erg.15: Summe sonstige Kosten [€]



$$A_S = Erg.15 \times bas$$

$$A_S = \text{-----} \text{ €/a}$$

### Annuität der Einsparungen:

$bae$ : Barwertfaktor = 1,1863

Erg.16: Entsorgungskosten-Einsparungen [€]



$$A_E = Erg.16 \times bae$$

$$A_E = \text{-----} \text{ €/a}$$

### 12.6.1 Wärmeentstehungskosten

$W_E$ : Wärmeentstehungskosten [€/kWh]

$A_\Sigma$ : Summe der Annuitäten [€]

Erg.2: Wärmebedarf [kWh]



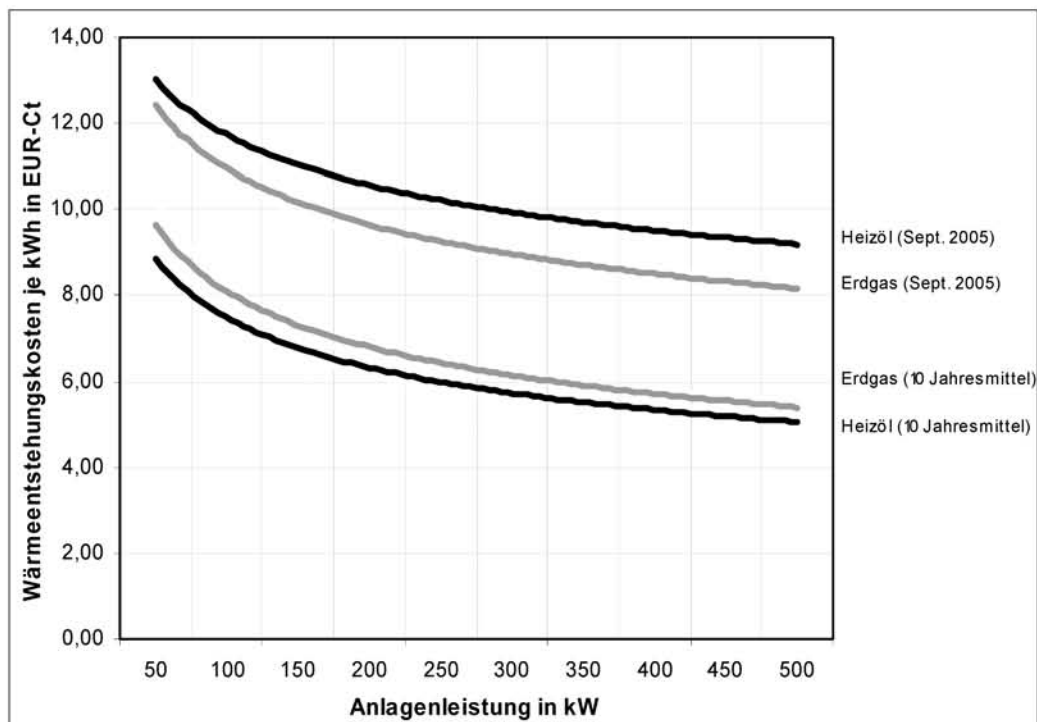
$$A_\Sigma = A_K + A_V + A_B + A_S - A_E \quad A_\Sigma = \text{-----} \text{ €/a}$$



$$W_E = \frac{A_\Sigma}{\text{Erg2}}$$

$$W_E = \text{-----} \text{ €/kWh}$$

Die Ergebnisse der Wärmeentstehungskosten sind in Bild 4 einzutragen und vorher von € in €Ct umzurechnen. Die Wärmeentstehungskosten von fossil betriebenen Heizungsanlagen in Abhängigkeit von den Brennstoffkosten werden in Bild 4 gezeigt. Für die Brennstoffkosten werden 10 Jahresmittelwerte sowie deren Bezugskosten im September 2005 berücksichtigt.



### 12.7 Vergleich mit fossilen Energieträgern

$$\frac{W_{\text{fossil}}}{W_{\text{Holz}}} \geq 1$$

dann ist die energetische Nutzung von Gehölzschnitt gegenüber den bisher verwendeten Energieträgern wirtschaftlich nutzbar.

## 12.8 Technische und rechtliche Randbedingungen

Die folgenden Punkte sind nach einer positiven Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Vorüberlegungen für eine Holzfeuerungsanlage zu klären. Da diese einer genaueren Detailanalyse bedürfen werden sie nur kurz dargestellt.

- Genehmigungsrechtliche Aspekte (1. BImSchV)
- Brennstoffversorgung
  - Brennstoffqualität
  - Brennstoffpreis
  - Brennstoffpotenziale
- Brennstoffaufbereitung
  - Selbstversorgung
  - Ankauf aufbereitetes Material
  - Aufbereitung durch Dritte
  - Lagerung
- Brennstofflieferverträge
- Örtliche Gegebenheiten

Hier sind vielfältige Infos verfügbar, die kostenlos bezogen werden können, z. B.:

**BAFA Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle:** <http://www.bafa.de>

- Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien – Biomasseanlagen bis 100 kW.

**FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.:** <http://www.fnr.de>

- Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen (2005).

**Holzabsatzfonds, Absatzförderungsfonds der deutschen Forst- und Holzwirtschaft:**  
<http://www.infoholz.de>

- Hintergrundinformationen zum Energieträger Holz.
- Holzenergie für Kommunen, Industrie & Gewerbe.
- Weiterführende Informationen.

**KfW-Förderbank:** <http://www.kfw-foerderbank.de/>

- Programm zur Förderung Erneuerbarer Energien: Verfeuerung fester Biomasse zur Wärmeerzeugung ab 100 kW (Förderbedingungen, Praktische Tipps, Beispiele).
- CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm.

## 12.9 Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Für die Kostenrechnungen in dieser Arbeit werden nachfolgende Randbedingungen vorgegeben:

- Kalkulationszins,
- Betrachtungszeitraum und
- Inflationsrate.

### Kalkulationszins:

Der Kalkulationszinssatz von Kostenmodellen für den öffentlichen Dienst wird jährlich durch das Bundesministerium für Finanzen (BMF) zusammen mit Personalkostensätzen und Sachkostenpauschalen veröffentlicht. Für das Jahr 2005 wurde dieser mit 3,7 % p.a. real und 4,5 % p.a. nominal festgelegt [BMF, 2004].

### Betrachtungszeitraum:

Der Betrachtungszeitraum ist abhängig von den eingesetzten bzw. geplanten Anlagenkonzepten.

Der Betrachtungszeitraum wird je nach Anlagentyp, für Feuerungsanlagen auf 20 Jahre festgelegt. Die Nutzungsdauer der meisten technischen Komponenten der beiden Anlagenkonzepte ist auf die vorgegebenen Zeitspannen ausgelegt. Anlagenteile die nach VDI 2067 eine niedrigere Nutzungsdauer besitzen werden mit Ersatzinvestitionen berücksichtigt sowie gegebenenfalls der verbleibende Restwert berechnet bzw. bewertet.

### Inflationsrate:

Nach den Vorgaben der VDI 2067 wird für die Inflationsrate von kapitalgebundene und verbrauchsgebundene Zahlungen sowie für Instandhaltung und Einzahlungen eine Preissteigerungsrate von 3 % abgenommen. Die betriebsgebundene und sonstige Zahlungen unterliegen einer Preissteigerung 2 %.

## Kostenmodell

Die Annuitätenmethode ist ein Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung, welche ausgehend von Einzahlungs- und Auszahlungsströmen einer Investition, bis zum Ende der Nutzungsdauer betrachtet wird. Dementsprechend werden die durchschnittlichen jährlichen Zahlungen (Ein- und Auszahlungen), unter Berücksichtigung der Zahlungszeitpunkte und Zinseszinsen, in die so genannte Annuität (A) umgewandelt.

A: Annuität einer Investition

$K_0$ : Kapitalwert

i: Zinssatz

n: Nutzungsdauer

$$A = K_0 \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Nach der Annuitätenmethode ist die Vorteilhaftigkeit einer Investition gegeben, wenn die Annuität größer Null ist. Vorteil dieser Methode ist eine einfachere Interpretierbarkeit der Ergebnisse, da aus periodengebundenen Größen der durchschnittliche Gewinn/Verlust ermittelt wird [WÖHE, 2005].

## 12.10 Erfahrungen des Straßendienst Niederösterreich

In den 1980er Jahren arbeitete ein österreichweiter Fachausschuss an einem Programm zur Nutzung von Holzabfällen in Straßenmeistereien. Ziel war es, den Verbrauch von fossilen Brennstoffen zu minimieren und Gehölzschnitt aus dem Straßenbetriebsdienst zu entsorgen.

Diesbezüglich erfolgte eine offizielle Erhebung in einzelnen Bundesländern. So ergaben sich für die steirischen Autobahnmeistereien zu geringe Mengen an Holzabfällen für eine energetische Verwertung. Zurückzuführen war dies auf die häufige Biomassenutzung von Mitarbeitern für den privaten Eigenbedarf. Womit sich die geringen Angaben oder die „Leermeldungen“ auf den erhobenen Rest bezogen [RAKOS und HACKSTOCK, 2000].

Demgegenüber wurden in Niederösterreich (NÖ) seit 1986 Hackgutanlagen zur Beheizung von Meistereien errichtet. Vorausgegangen waren „Schulungs- und Motivationsarbeit (...) zur arbeitssparenden Behandlung des Straßenrückschnitts (...) und zum Betrieb von Hackgutfeuerungen“. Der vorausgesagte Hackgutmangel blieb aus. Bei der Detailanalyse der Modellmeistereien werden die guten Erfahrungen des niederösterreichischen Straßendienstes berücksichtigt.

Bisher wurden ungefähr 20 Holzheizungsanlagen in niederösterreichischen Straßenmeistereien gebaut sowie sieben an Biomasse Fernwärme angeschlossen [NÖEB, 2003]. Damit entfällt der größte Teil von Holzheizungen in Straßenmeistereien auf NÖ. Zurückzuführen ist dies u.a. auf ein jahrelanges Engagement einiger Mitarbeiter des niederösterreichischen Straßendienstes [RAKOS und HACKSTOCK, 2000].

Die Erfahrungen beim Betrieb von Hackgutanlagen in Straßenmeistereien wurden in den Berichten „Spezialerhebung Hackgut“ von 1992 bis 1996 sowie „Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit von Hackgutheizungen in den Straßenmeistereien Niederösterreichs“ von 1999 betrachtet.

Wichtigstes Kriterium bei der Bereitstellung von Hackgut ist, dass der Rückschnitt nicht zur Brennstoffversorgung erfolgt, sondern im Rahmen der Grünpflege und zur Verkehrsicherung stattfindet. Wirtschaftlich sinnvoll ist ein Verbleib des Materials auf der Böschung. Ist dies nicht möglich wird eine energetische Nutzung des Materials als Entsorgungsmöglichkeit angesehen [NÖEB, 1996].

### Brennstoff-Logistik:

Die Grünpflege des Straßenbetriebsdienstes in Österreich erfolgt, wie in Deutschland (vgl. Kapitel 2.2.2). Ein Verbleib der holzartigen Biomasse in Böschungsflächen ist die wirtschaftlichste Lösung, da keine Folgekosten für Transport, Lagerung und Hacken entstehen. Ist ein Abtransport der Biomasse notwendig ergeben sich die Möglichkeiten:

- Hacken und Deponierung
- Zwischenlagerung und Hacken

Im letzteren Fall kann das Material für Grünbaumaßnahmen oder zur energetischen Nutzung verwendet werden.

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass eine optimierte Hackguterzeugung aus den Arbeitsschritten Holzschnitt, Transport, Lagern, Trocknen und Hacken besteht. Beim Holzschnitt ist es je nach anfallender Menge sinnvoll, das Material entlang des Fahrbahnrandes für den Abtransport zu „Bündeln“ zusammen zulegen. Der Abtransport erfolgt mittels Holzgreifer am Autokran.

Zur Lagerung wird das Material auf Stöße geschichtet, um eine spätere rasche Beschickung der Häckselmaschine zu ermöglichen. Zu beachten ist dabei, dass eine gute Durchlüftung des Stoßes gegeben ist. Damit beim Hacken keine Steine oder andere Fremdkörper mit aufgenommen werden, ist auf eine geeignete Unterlage zu achten. Empfohlen wird eine Trocknungsdauer von mindestens sechs Monaten bzw. möglichst länger als ein Jahr, um den Heizwert des Holzes zu erhöhen.

Nach dem Trocknen erfolgt das Hacken. Aus ökonomischen Gründen ist der Einsatz von großen Hackmaschinen gegenüber händisch beschickten Hackern zu bevorzugen.

Heizungsanlage:

Verwendung fanden marktübliche Hackschnitzelkessel, mit Retortenfeuerung oder Stufenrost. Für größere Anlagen und bei hohem Rindenanteil des Hackgutes, durch einen hohen Kleinastanteil, ist eine automatische Entaschung sinnvoll.

Gegenüber Öl- und Gasheizungen zeigte sich, dass auch bei Neuanlagen, mit einem höheren Betreuungsaufwand zu rechnen ist. Als wesentliche Voraussetzung für einen ökonomischen und störungsfreien Anlagenbetrieb wird die Schulung und Motivation des Personals des Straßendienstes genannt. Erzielt wurde dies durch Informationsblätter und praktischer Schulung vor Ort.

Kostenstruktur:

Die Kosten für Hacken, Transport und Lagern liegen zwischen 11-65 €/Srm. In den Meistereien in denen eine optimierte Hackgutbereitstellung erfolgt liegen diese zwischen 11 bis 15 €/Srm deutlich niedriger. Damit befindet liegen die Kosten unterhalb der Zukaufspreise für Fichte mit 17 €/Srm und Buche mit 24€/Srm [NÖEB, 1996].

Zum Vergleich: die aktuellen Hackschnitzelpreise in Deutschland liegen bei ungefähr 22 €/Srm (55 €/t) [CARMEN, 2005].

Vor- und Nachteile:

Die Kosten für den Holzurückschnitt pro Jahr, einschließlich des Aufwands für die Manipulation des Hackgutes und der Heizungswartung, sind bei Meistereien mit Holzheizung durchschnittlich 20 % geringer. Unter Berücksichtigung der geringeren Brennstoffkosten und der Kostenersparnis beim Holzurückschnitt amortisieren sich die höheren Investitionskosten einer durchschnittlichen Hackgutheizungsanlage nach ungefähr 5,25 Jahren. Die durchschnittliche Heizungsanlage hat eine mittlere installierte Leistung von 300 kW, einen Wirkungsgrad von 80 % und ungefähr 1.500 Vollbetriebsstunden.

Durch die Nutzung des Rückchnitts in der eigenen Meisterei wird eine wirtschaftliche Organisation des Arbeitsablaufs „erzungen“. In Schulungen zum Umgang mit Hackgutheizungen erfolgte ein Austausch von Erkenntnissen und Anregungen durch Mitarbeiter der Meistereien. Weiterhin wurde dadurch ein Erfahrungsaustausch zwischen den Meistereien ermöglicht.

Erfahrungen aus der Praxis:

Hackgutheizungen in Meistereien lassen sich wirtschaftlich betreiben, wenn der Ablauf der Hackgutzeugung optimiert ist. Folgende Maßnahmen werden hierfür vorgeschlagen:

- Straffung des Ablaufs.
- Auch dicke Stämme müssen verwendet werden.
- Geordnete Lagerung des Holzes (dicke Ende an einer Seite und kein direkter Bodenkontakt).
- Möglichst lange Lagerung des Holzes vor dem Häckseln, mindestens 6 Monate, möglichst aber länger als ein Jahr; damit kann der Heizwert des Holzes verdoppelt werden.
- Hohe Bordwände bei den Transportfahrzeugen bzw. Anhängern.
- Informiert und eingespielte Hackmannschaft in der Meisterei.
- Sofortige Lagerung des Hackgutes für Heizzwecke in einem Lagerraum.
- Straffung der Abläufe bei der Wartung der Heizanlage .



## Literatur

- AbfAbIV (2002): AbfAbIV – Abfallablagerungsverordnung: Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen vom 20. Februar 2001 im BGBl I 2001, 305, geändert durch Art. 2V v. 24.07.2002
- AfA (2005): Tabellen für die Bemessung der Absetzung für Abnutzung (AfA-Tabellen); siehe <URL: [www.urbs.de/afa.htm](http://www.urbs.de/afa.htm)>, Juni 2005
- ASUE (2003): ASUE-Ratgeber: Wärmeversorgung im Neubau – Heizung, Warmwasser, Lüftung, Kostenvergleich. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (Hrsg.), Kaiserslautern 2003
- BAFA (2005): Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien – Biomasseanlagen. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), Eschborn, <URL: [www.bafa.de](http://www.bafa.de)>, (30.08.2005)
- BAST (2005): Mündliche Mitteilung bezüglich der thermischen Verwertung von Straßenbegleitgrün: WIRTZ, H., Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach 2005
- Bayern (1997): Erhebung zum Grüngutauflkommen in Bayern. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren, München 1997 (unveröffentlicht)
- Bayern (2005): Mündliche Mitteilung Herr LANDGRAF, H. (Oberamtsrat), Frau WEBER, B. (Baudirektorin), Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren, München 31.03.2005
- BEGR (2001): Begründung zur Biomasseverordnung vom 21.06.2001
- BioAbfV (2003): BioAbfV – Bioabfallverordnung: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden. Vom 21. September 1998 im BGBl I 2003, 2373
- Bioflamm (2005): Bioflamm, Angebot Feuerungsanlage. Wirtschaftliche Verbrennungs-Technik GmbH (WVT), Ansprechpartner B. KUNZE, Overath
- BiomasseV (2005): BiomasseV – Biomasseverordnung: Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse. Vom 21. Juni 2001 im BGBl I 2001, 1234, geändert durch V v. 9. 8.2005 I 2419
- BMF (2004): Personalkostensätze, Sachkostenauspauschale und Kalkulationssätze 2004. Bundesministerium der Finanzen (BMF), Berlin 2005
- BMU (2003): Nutzung von Biomasse in Kommunen – Ein Leitfaden. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin 2003
- BMU (2005): Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, 17. Juni 2005
- BMU (2005a): mündliche Mitteilung bezüglich der Gewährleistung des Bonus für Nachwachsende Rohstoffe für Bankettschälgut nach EEG. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 12. Januar 2005
- BMWA (2005): Zahlen und Fakten – Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Referat IX A 2, Berlin 2005
- BS (2005): Brennstoffspiegel Branchendaten – Preisvergleich Heizöl EL – Erdgas. Ceto-Verlag GmbH (Hrsg.), Leipzig 2005
- BUNK, H. (2003): Holzenergie – Fibel, Holzenergienutzung – Technik, Planung und Genehmigung. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart 2003
- BRA (2005): Erfassung der Mengen an Grasschnitt. Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg – Niederlassung Autobahn, Hohen Neuendorf 2005 (unveröffentlicht)
- BRA (2005a): mündliche Mitteilung Frau KUPLIN: Straßenbauverwaltung Brandenburg Ministerium für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr, Brandenburgisches Autobahnamt, Stolpe an der Autobahn A 111, Hohen Neuendorf, 24.02.2005
- CARMEN (2005): Kosten für Waldhackschnitzel. Centrale-Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk (Carmen e. V.), <URL: [www.carmen-ev.de](http://www.carmen-ev.de)>, 2005
- CEN (2005): Europäisches Komitee für Normung (CEN), Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen. Unterlagen des DIN NMP 582 zur Sitzung am 3. Februar 2005. Das

- DIN NMP 582 ist das nationale deutsche Spiegelkomitee zur Begleitung des CEN TC 335
- DepV (2002): DepV – Deponieverordnung: Verordnung über Deponien und Langzeitlager. Vom 24. Juli 2002 im BGB I 2002, 2807
- DINTER, S., MORITZ, K. (1987): Untersuchungen zur Schnittgutbeseitigung, Teil I. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach 1987
- DIW (2001): Verkehr in Zahlen. Ausgabe 2001. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Berlin, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin 2001
- DURTH-SACHS, I. (1999): Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes für Bankettschälgut von Straßen. Dissertation am Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Darmstadt, München 1999
- EEG (2004): EEG-Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz). Vom 21. Juli 2004 im BGBl I 2004, 1918
- ELSNER (1999): Der Elsner (Hrsg. KNOLL, E.) – Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg 1998
- ELSNER (2005): Der Elsner (Hrsg. KNOLL, E.): Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg 2005
- EU (1997): Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger. Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan. Mitteilung der Kommission: KOM(97)599 endg
- EU (2001): Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. September 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, L 283/33 vom 27.10.2001
- FGSV (1987): Richtlinie für die Anlage von Straßen; RAS, Teil: Entwässerung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbauten, Köln 1987
- FGSV (1988): Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil: Grünpflege. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., FGSV-Verlag, Köln 1988
- FNR (2001): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2001
- FNR (2001b): Gülzower Fachgespräch Band 17: Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse. Tautenhain, 8./9. Mai 2001, Gülzow 2001
- FNR (2004): Marktübersicht – Scheitholzvergaserkessel, Scheitholz-Pellet-Kombinationskessel. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2004
- FNR (2005a): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2005
- FNR (2005b): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2005
- FNR (2005c): Basisdaten Bioenergie Deutschland. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2005
- FNR (2005d): Basisdaten Biogas Deutschland. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2005
- FNR (2005e): Heizen mit Holz – Technik, Brennstoffe, Förderung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow 2005
- FRANZEN, B., PALZER, S. (2000): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben – Vergleichende Analyse ausgeführter Holzhackschnitzelfeuerungen in Rheinland-Pfalz. Fachhochschule Trier, Trier 2000
- FVB (2004): Beispielhafte Liste von Stoffen, die zum Bezug des Nawaro-Bonus berechtigen. Fachverband Biogas e. V., Freising 2004
- GALLENKEMPER, B., FRITSCHKE, M., BECKER, G. (1992): Schadstoffgehalte von Bankettschäl- und Kehrgut und deren umweltverträgliche Entsorgung. Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 664, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg 1992
- GALLENKEMPER, B., FRITSCHKE, M., SOWA, A., WALTER, G. (1996): Eignung von Bankettschälgut für Erdbauten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Verkehrstechnik, Heft V 34, Bergisch Gladbach 1996

- GRÖSINGER, M. (1999): Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit von Hackgutheizungen. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, NÖ Straßendienst, St. Pölten 1999 (unveröffentlicht)
- GRÜNE (2004): Anhörung der Grünen im Bundestag zur geplanten Novellierung der 1. BImSchV im Dezember 2004
- HACKL, J. (2002): Möglichkeiten der Abfallvermeidung bei der Grünpflege im Straßenunterhaltungs- und Betriebsdienst. Fachtagung – Abfallvermeidung bei der Landschafts- und gartenpflege – 01./02. Oktober 2002, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München 2002
- HAF (2004): Pelletheizungen – Technik und bauliche Anforderung, Holzbau-Handbuch, Reihe 6, Teil 10, Folge 2. Holzabsatzfonds – Absatzförderung der deutschen Forst- und Holzwirtschaft (Hrsg.), Bonn 2004
- HAFÖ (2003): Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Verbesserung der Verarbeitungs- und Vermarktungsbedingungen forstwirtschaftlicher Erzeugnisse und des Einsatzes von Holz bei der energetischen Verwertung (Holzabsatzförderrichtlinie – Hafö 2003). Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes NRW, Düsseldorf, 27. März 2003
- HÄRDTLEIN, M., ELTROP, L., THRÄN, D. (Hrsg.) (2004): Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 23, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Landwirtschaftsverlag, Münster 2004
- HARTMANN, H., BÖHM, T., MAIER, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussgrößen. Bayerisches Staatsministerium für Landentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, 2000, Reihe „Materialien“, Nr. 154
- Heizomat (2005): Heizomat GmbH – Angebot Feuerungsanlagen. Vertrieb über Roth GmbH, Ansprechpartner J. ROTH, Waltershausen
- IE (2003): Monitoring zur Biomasseverordnung auf Basis des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) aus Umweltsicht. Endbericht, Institut für Energetik und Umwelt (IE), Leipzig, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Dezember 2003
- IE (2003a): Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebaute Biomasse. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig, im Auftrag Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Leipzig 2003
- IE (2004): Nachhaltige Biomassenutzungsstrategien im europäischen Kontext – Analyse im Spannungsfeld nationaler Vorgaben und der Konkurrenz zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Bioenergieträgern. 2. Zwischenbericht, Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2004
- IE (2005): Umfrage zum Gras- und Gehölzschnittaufkommen, Entsorgungs- und Heizungsanlagenparametern von deutschen Meistereien. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig 2005 (intern)
- IE (2005a): Risiken bei Energierohstoffen. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig März 2005
- ILS NRW (2005): Rationelle Energieverwertung und Nutzung unerschöpflicher Energiequellen (REN). Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung und Bauwesen des Landes Nordrhein-Westfalen, Dortmund 2005
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H. (2001): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin 2001
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., LEWANDOWSKI, I., SCHNEIDER, S., WEISKE, A. (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow 2002
- KALTSCHMITT, M., WIESE, A., STREICHER, W. (Hrsg.) (2003): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer, Berlin, Heidelberg 2003, 3. Auflage
- KOCHER, B. (2005): Mündliche Mitteilung bezügliche Probenahme von Bankettschälgut. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach 2005
- KOCHER, B., WIRTZ, H. (2004): Untersuchungen zur Abfallentsorgung an Bundesfernstraßen Teil: Bankettschälgut. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach 2004

- KRIEGER, B., BREITENSTEIN, J. (1996): Untersuchungen zur Schnittgutverwertung, Teil III: Erhebung und Bewertung der anorganischen Schadstoffbelastung. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 29, Bergisch Gladbach 1996
- KTBL (2005): KTBL – Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/2005, Darmstadt 2005
- LAGA 20 (2003): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln. Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20, Mainz 2003
- LAMBERTZ, B., SCHMIDT, W. (2003): Veränderung der Straßenvegetation durch Pflegemaßnahmen – Dauerflächenversuche zur Sukzessionslenkung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 867, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr (Hrsg.), Bonn 2003
- LIEHR, E. (1999): Thermische Verwertung von Rückschnitt von Straßengehölzen. Kolloquium Straßenbetriebsdienst 5./6. Oktober 1999 Darmstadt, Tagungsband, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.)
- LIV Sachsen: Landesinnungsverband des Schornsteinfegerhandwerks Sachsen, Pirnaer Landstraße 40, 01237 Dresden; persönliche Mitteilung 2005
- LOHMANN, U. (1998): Holzhandbuch. DRW-Verlag, Rosenheim 1998
- MAURER, K. (1999): Ermittlung des Investitionsbedarfs und der Verfahrenskosten von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Abschlussbericht Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen, Universität Hohenheim, 1999
- MEDERAKE, R., SCHMIDT, W. (1992): Pflegeversuche zur Sukzessionslenkung auf Straßenbegleitflächen – Untersuchungszeitraum 1984-1989 – Möglichkeiten und Grenzen standortmäßiger Vegetationsentwicklung unter dem Einfluss extensiver Pflegemaßnahmen – 2. Teil. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 570, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg 1992
- MEDERAKE, R., SCHMIDT, W., STOTTELE, T. (1989): Pflegeversuche zur Sukzessionslenkung auf Straßenbegleitflächen – Untersuchungszeitraum 1984-1986 – Möglichkeiten und Grenzen standortmäßiger Vegetationsentwicklung unter dem Einfluss extensiver Pflegemaßnahmen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 570, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.), Bonn-Bad Godesberg 1989
- MFE (2001): Richtlinie zur Förderung der energetischen Nutzung von Biomasse im ländlichen Raum durch das Land Schleswig-Holstein. Ministerium für Finanzen und Energie des Landes Schleswig-Holstein (MFE), Kiel 20. April 2001
- MK 6 c (1981): Optimierung von Einsatzverfahren – Pflege von Grünanlagen. Maßnahmenkatalog Straßenunterhaltung und Betrieb (MK 6 c), Stand: 1981
- MK 11 (1997): Maßnahmenkatalog Straßenunterhaltung und Betrieb (MK 11), Baukonzeption für Autobahn- und Straßenmeistereien – Richtlinie für die Anlage von Meistereien (RAM). Bearbeitung unter Federführung: Ministerium für Wohnungswesen, Städtebau und Verkehr Sachsen-Anhalt, 1997
- NICKEL, W. (1996) (Hrsg.): Recycling-Handbuch: Strategien – Technologie – Produkte. VDI-Verlag, 1996
- NÖEB (1996): Bericht Spezialerhebung Hackgut. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Gruppe Straße – Abteilung Straßenbetrieb, St. Pölten 1996 (unveröffentlicht)
- NÖEB (2003): NÖ Energiebericht – Bericht über die Lage der Energieversorgung in Niederösterreich. Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Baudirektion, Abteilung Allgemeiner Baudienst, Geschäftsstelle für Energiewirtschaft (Hrsg.), St. Pölten 2003
- NOLTING (2005): Nolting Holzfeuerungsstechnik GmbH – Angebot Feuerungsanlage. Vertrieb Ost/Polen, Ansprechpartner F. WOLF
- NRW (2005a): Mündliche Mitteilung SCHMIDT, R., DAHMEN, G.: Landesbetrieb Straßenbau NRW, Gelsenkirchen, 2005
- NRW (2005b): Mündliche Mitteilung Herr RHODE: Grünverträge, Landesbetrieb Straßenbau NRW, Niederlassung Krefeld

- Öko (2004): Öko-Institut e. V. und Partner: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse. Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Endbericht. Darmstadt Mai 2004
- PRETZ, T., UEPPING, R., ISAAC, E. (2005): Brennstoffgewinnung aus Kompostrohstoffen? – Dokumentation und Forschungsbericht. Dokumentation 8, EdDE e. V., Köln 2005
- RAKOS, C., HACKSTOCK, R. (2000): Untersuchungen zum Einsatz von Holz als Energieträger am Wärmemarkt. Energieverwertungsagentur (E. V. A.), Wien 2000
- REKA (2005): Maschinenfabrik Reka A/S – Angebot Feuerungsanlage. Vertrieb über Bio-Energetechnik Nord GmbH, Ansprechpartner C.-H. KÜHL, Ellingstedt
- RAL-GZ (1998): RAL-Güterrichtlinie RAL-GZ 428 für die Überwachung von Recyclingprodukten aus Gebrauchtholz. Beuth Verlag, Berlin 1998
- RL (2001): Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt vom 27. September 2001, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 27. Oktober 2001, L 283/33 ff.
- RÖSCH, C. (1996): Vergleich stofflicher und energetischer Wege zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Baden-Württemberg. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1996
- SAYER, M. (2002): Einfluss von Pflegemaßnahmen auf die Entwicklung der Tierwelt in Straßenbegleitflächen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 850, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr (Hrsg.), Bonn 2002
- SCHEITHAUER, M.: Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz – Tätigkeitsbericht 2000, München 2001
- SCHNEIDER, S. (2002): Potenziale regenerativer Energien in Deutschland. In: HARTMANN, H., KALTSCHMITT, M. (Hrsg.): Die Stellung der Biomasse im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern aus ökologischer, ökonomischer und technischer Sicht, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 3, Landwirtschaftsverlag, Münster 2002
- SELING, S., FISCHER, P. (2003a): Schadstoffbelastung von Straßenbegleitgrün. Teil I. Gehalte des Mähgutes an Schwermetallen (Cd, Cr, CU, HG, Ni, Pb, Pt, Zn). Müll und Abfall 35, Heft 6, 289-293; 2003
- SELING, S., FISCHER, P. (2003b): Schadstoffbelastung von Straßenbegleitgrün. Teil II. Gehalte des Falllaubs an Schwermetallen (Cd, Cr, CU, HG, Ni, Pb, Pt, Zn). Müll und Abfall 35, Heft 8, 410-413; 2003
- SELING, S., FISCHER, P. (2003c): Schadstoffbelastung von Straßenbegleitgrün. Teil III. Gehalte des Böschungsmähgutes und Falllaubs an organischen Schadstoffen (PAK, PCB, PCDD/F). Müll und Abfall 35, Heft 10, 542-546; 2003
- SMUL (2001): Richtlinie des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über die Gewährung von Fördermitteln für Vorhaben des immissions- und Klimaschutzes einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energien im Freistaat Sachsen. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL), Dresden 28. November 2001
- Stat (2005): Verkehrsinfrastruktur. Statistisches Bundesamt Deutschland, Wiesbaden 2005
- STOTTELE, T. (1994): Vegetation und Flora am Straßennetz westdeutscher Landschaften – Standorte, Naturschutzwert, Pflege. Dissertation, Universität Göttingen, 1994
- STRÄßEN NRW (2005): Energetische Verwertung von Biomasseabfällen aus der Straßenunterhaltung. Datenerhebung des Landesbetriebs Straßenbau NRW, Gelsenkirchen 2005 (unveröffentlicht)
- STRÄßEN NRW (2005b): Turnusse der Grünpflege. Hausinterne Auswertung des Landesbetriebs Straßenbau NRW, Gelsenkirchen 2005 (unveröffentlicht)
- TASI (1993): Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von

- Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993, BAnz. Nr. 99a vom 29.05.1993
- Tecson (2005): Tecson – Der aktuelle Heizölpreis. <http://www.tecson.de>
- THRÄN, D. et al. (2004): Nachhaltige Biomassennutzungsstrategien im europäischen Kontext. Untersuchung im Auftrag des BMU; 2. Zwischenbericht
- THRÄN, D., KALTSCHMITT, M. (2005): Energiereserve aus Biomasse. Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen-Lippe vom 10. Februar 2005, Veröffentlichung in Vorbereitung
- TUD (2003): BALD, S., JAGER, J., CYPRA, Th., SCHÜLER, D., HARTARD, S., DETTE, B., HERMANN, A., BARTH, R. (2003): Entwicklung eines Entsorgungskonzeptes für Abfälle im Bereich von Straßen- und Autobahnmeistereien. TU Darmstadt 2003, Datenbank mit Ergebnissen des FE 03.334/2000/LGB, überarbeitet durch BAST, Bergisch Gladbach 2003
- UNGER, H. J., PRINZ, D. (1992): Verkehrsbedingte Immissionen in Baden-Württemberg – Schwermetalle und organische Fremdstoffe in straßen nahen Böden. Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg, Luft, Boden, Abfall, Heft 19, 1992
- VDI 2067 (2000): VDI 2067 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung. VDI – Gesellschaft Technischer Gebäudeausrüstung, Düsseldorf 2000
- VDStra (2004): Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen – Leistungsbereich 2: Grünpflege. Verband Deutscher Straßenwärter (VDStra), Version 1.1, April 2004
- WIRTZ, H., SIEBERTZ, I., HABERMANN, M. (2003): Untersuchungen zur Abfallentsorgung an Bundesfernstraßen – Teil III. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach 2003 (unveröffentlicht)
- WIRTZ, H. (2005): Mündliche Mitteilung. Probenahme von Bankettschälgut. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), 2005
- WITTKOPF, S., HÖMER, U., FELLER, S. (2003): Bereitstellungungsverfahren für Waldhackschnitzel – Leistungen, Kosten, Rahmenbedingungen. Bayrische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.), LWF-Bericht 28, Freising 2003
- WÖHE, G. (2005): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 22. Auflage, Verlag Franz Vahlen GmbH, München 2005

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2001

- V 79: Bedarf für Fahrradabstellplätze bei unterschiedlichen Grundstücksnutzungen**  
Alrutz, Böhle, Borstelmann, Krawczyk, Mader, Müller, Vohl € 15,50
- V 80: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 1998**  
Lensing € 13,50
- V 81: Emissionen beim Erhitzen von Fahrbahnmarkierungsmaterialien**  
Michalski, Spyra € 11,50
- V 82: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 1999 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen**  
Laffont, Nierhoff, Schmidt € 19,50
- V 83: Verkehrssicherheit in Einbahnstraßen mit gegengerichtetem Radverkehr**  
Alrutz, Gündel, Stellmacher-Hein, Lerner, Mättig, Meyhöfer, Angenendt, Draeger, Falkenberg, Klöckner, Abu-Salah, Blase, Rühle, Wilken € 17,00
- V 84: Vereinfachtes Hochrechnungsverfahren für Außerorts-Straßenverkehrszählungen**  
Lensing, Mavridis, Täubner € 16,00
- V 85: Erstellung einer einheitlichen Logik für die Zielführung (Wegweisung) in Städten**  
Siegener, Träger € 14,50
- V 86: Neue Gütekriterien für die Beleuchtung von Straßen mit gemischtem Verkehr und hohem Fußgängeranteil**  
Carraro, Eckert, Jordanova, Kschischenk € 13,00
- V 87: Verkehrssicherheit von Steigungsstrecken – Kriterien für Zusatzfahrstreifen**  
Brilon, Breßler € 18,50

## 2002

- V 88: Tägliches Fernpendeln und sekundär induzierter Verkehr**  
Vogt, Lenz, Kalter, Dobeschinsky, Breuer € 17,50
- V 89: Verkehrsqualität auf Busspuren bei Mitnutzung durch andere Verkehre**  
Baier, Kathmann, Schuckließ, Trapp, Baier, Schäfer € 13,50
- V 90: Anprallversuche mit Motorrädern an passiven Schutzeinrichtungen**  
Bürkle, Berg € 16,50
- V 91: Auswirkungen der Umnutzung von BAB-Standstreifen**  
Mattheis € 15,50
- V 92: Nahverkehrsbevorrechtigung an Lichtsignalanlagen unter besonderer Berücksichtigung des nichtmotorisierten Verkehrs**  
Friedrich, Fischer € 14,00
- V 93: Nothaltemöglichkeiten an stark belasteten Bundesfernstraßen**  
Brilon, Bäumer € 17,00
- V 94: Freigabe von Seitenstreifen an Bundesautobahnen**  
Lemke, Moritz € 17,00

- V 95: Führung des ÖPNV in kleinen Kreisverkehren**  
Topp, Lagemann, Derstroff, Klink, Lentze, Lübke, Ohlschmid, Pires-Pinto, Thömmes € 14,00
- V 96: Mittellage-Haltestellen mit Fahrbahnanhebung**  
Angenendt, Bräuer, Klöckner, Cossé, Roeterink, Sprung, Wilken € 16,00
- V 97: Linksparken in städtischen Straßen**  
Topp, Riel, Albert, Bugiel, Elgun, Roßmark, Stahl € 13,50
- V 98: Sicherheitsaudit für Straßen (SAS) in Deutschland**  
Baier, Bark, Brühning, Krumm, Meewes, Nikolaus, Räder-Großmann, Rohloff, Schweinhuber € 15,00
- V 99: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2000 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen**  
Laffont, Nierhoff, Schmidt € 21,00

## 2003

- V 100: Verkehrsqualität unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage**  
Brilon, Miltner € 17,00
- V 101: Straßenverkehrszählung 2000 – Ergebnisse**  
Lensing € 13,50
- V 102: Vernetzung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen**  
Kniß € 12,50
- V 103: Bemessung von Radverkehrsanlagen unter verkehrstechnischen Gesichtspunkten**  
Falkenberg, Blase, Bonfranchi, Cossé, Draeger, Kautzsch, Stapf, Zimmermann € 11,00
- V 104: Standortentwicklung an Verkehrsknotenpunkten – Randbedingungen und Wirkungen**  
Beckmann, Wulfhorst, Eckers, Klönne, Wehmeier, Baier, Peter, Warnecke € 17,00
- V 105: Sicherheitsaudits für Straßen international**  
Brühning, Löhe € 12,00
- V 106: Eignung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen gemäß den Anforderungen nach DIN EN 1317**  
Ellmers, Balzer-Hebborn, Fleisch, Friedrich, Keppler, Lukas, Schulte, Seliger € 15,50
- V 107: Auswirkungen von Standstreifenumnutzungen auf den Straßenbetriebsdienst**  
Moritz, Wirtz € 12,50
- V 108: Verkehrsqualität auf Streckenabschnitten von Hauptverkehrsstraßen**  
Baier, Kathmann, Baier, Schäfer € 14,00
- V 109: Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf auf b2+1-Strecken mit allgemeinem Verkehr**  
Weber, Löhe € 13,00

## 2004

- V 110: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2001 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen**  
Laffont, Nierhoff, Schmidt, Kathmann € 22,00
- V 112: Einsatzkriterien für Betonschutzwände**  
Steinauer, Kathmann, Mayer, Becher vergriffen
- V 113: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden**  
Schweig, Keuchel, Kleine-Wiskott, Hermes, van Acken € 15,00
- V 114: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing**  
Loose, Mohr, Nobis, Holm, Bake € 20,00
- V 115: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen**  
Kathmann, Laffont, Nierhoff € 24,50

- V 116: Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen – Zentralrechner/Knotenpunktgerät und Zentralrechner/Ingenieurarbeitsplatz  
Kroen, Klod, Sorgenfrei € 15,00
- V 117: Standorte für Grünbrücken – Ermittlung konfliktreicher Streckenabschnitte gegenüber großräumigen Wanderungen jagdbarer Säugetiere  
Surkus, Tegethof € 13,50
- V 118: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer  
Steinauer, Maier, Kemper, Baur, Meyer € 14,50

## 2005

- V 111: Autobahnverzeichnis 2004  
Kühnen € 21,50
- V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren  
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00
- V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung  
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50
- V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko  
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50
- V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum  
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50
- V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik  
Lensing € 15,50
- V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten  
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simović, Bozkurt, Buchmann, Roeterink € 15,50
- V 125: PM<sub>10</sub>-Emissionen an Außererststraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM<sub>10</sub>-Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen  
Düring, Bössinger, Lohmeyer € 17,00
- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen  
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckließ € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003  
Fitschen, Koßmann € 24,50
- V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation  
Boltze, Reusswig € 17,00
- V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst  
Badelt, Breitenstein € 13,50
- V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02  
Steven € 12,00
- V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken  
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50
- V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme  
Boltze, Breser € 15,50
- V 133: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen  
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00
- V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen  
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00
- V 137: PM<sub>x</sub>-Belastungen an BAB  
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO<sub>x</sub>)- und Ozon (O<sub>3</sub>)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004  
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50
- V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen  
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00
- V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen  
Fitschen, Koßmann € 15,50
- V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003  
Lensing € 15,00
- V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen  
Fischer, Brannolte € 17,50
- V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen  
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50
- V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis  
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50
- V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland  
Baier, Klemps, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: Prüfung von Sensoren für Glätteldealanlagen  
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50
- V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005  
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie –  
Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger € 16,50
- V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung  
Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig € 18,50
- V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst  
Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin € 18,00

## 2006

- V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge  
Hübelt, Schmid € 17,50
- V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen  
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Komplettverzeichnis erhältlich.