

1 Einleitung

Eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts besteht vor dem Hintergrund des Umwelt- und Klimaschutzes sowie der Endlichkeit fossiler Energieträger in der nachhaltigen Erzeugung und dem sparsamen Einsatz von Energie. Die Nutzung erneuerbarer Energien kann hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Neben der Vermeidung klimaschädlicher Gase und der Substitution fossiler Energieträger tragen Energien aus solarer Strahlung, Wind, Wasserkraft, Erdwärme und Biomasse auch zu einer regionalen Wertschöpfung und stärkeren Unabhängigkeit von Importen bei. Im Jahr 2008 wurden bereits 7,1 % des Primärenergiebedarfs in Deutschland durch erneuerbare Energien gedeckt (BMU 2009a). Dabei kommt der Energieerzeugung aus Biomasse mit 5,3 % des Primärenergieverbrauches derzeit die größte Bedeutung zu. Nach der Richtlinie 2009/28/EG sollen bis 2020 20 % des Endenergieverbrauches der EU durch erneuerbare Energien gedeckt werden¹. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, den Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2020 auf 30 % und den Anteil an der Wärmebereitstellung auf 14 % zu steigern (BMU 2009b). Eine finanzielle Förderung der Erzeugung erneuerbarer Energien wird dabei durch das zuletzt im Jahr 2009 novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) geregelt.

Die Biogasproduktion nimmt unter den Verfahren zur nachhaltigen Energieerzeugung aus Biomasse eine zentrale Rolle ein. Als Folge der finanziellen Förderung der Stromerzeugung aus Biogas durch das EEG ist die Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland von 1050 im Jahr 2000 auf 4099 im Jahr 2008 gestiegen (FNR 2009a). Zusätzliche Boni werden nach dem EEG von 2009 u.a. für die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen und Gülle gezahlt. Damit werden auch der Einsatz von Energiepflanzen und die Etablierung „neuer“ Pflanzenarten, spezieller Sorten und angepasster Fruchtfolgen für die Biogasproduktion unterstützt. Für eine effektive Ausschöpfung des energetischen Potentials von Biogaspflanzen ist jedoch eine optimale Gestaltung der gesamten Bereitstellungskette des pflanzlichen Substrates nötig. Neben dem Anbau umfasst dies die Ernte, Konservierung und Lagerung des Pflanzenaufwuchses. Grundvoraussetzung für hohe Methanerträge ist die Beschickung der Biogasanlage mit qualitätsgerechten Substraten. Die vorliegende Arbeit soll zu einer besseren Kenntnis der Wirkung verschiedener Parameter bei der Ernte, Konservierung und Lagerung von Biogaspflanzen auf die Substratqualität und Methanbildung beitragen und damit Hinweise für eine effiziente Gestaltung der Bereitstellungskette geben.

¹ Vgl. Europäisches Parlament/ Europäischer Rat (2009) Art.3, Ziff. 1

2 Problemstellung

2.1 Stand des Wissens

2.1.1 Nutzung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung

2.1.1.1 Methanbildung aus pflanzlicher Biomasse

Die Biomethanisierung ist ein komplexer anaerober Prozess, bei dem ein mikrobieller Umbau von organischer Substanz zu Methan und Kohlendioxid stattfindet. Dieser Gärprozess lässt sich nach heutigem Kenntnisstand in vier Stufen unterteilen (WEILAND 2001). Dabei sind an den einzelnen Abbauphasen unterschiedliche Mikroorganismen beteiligt, die in enger Wechselbeziehung zueinander stehen. In der ersten Stufe, der Hydrolyse, werden durch die Wirkung von Exoenzymen hydrolytischer Bakterien polymere Verbindungen wie Fette, Proteine und Kohlenhydrate, gespalten. Die dabei gebildeten Monomere werden in der zweiten Stufe, der Acidogenese, durch acidogene Bakterien zu organischen Säuren, Alkoholen sowie Wasserstoff und Kohlendioxid umgebaut. In der sich anschließenden dritten Stufe, der Acetogenese, erfolgt die Umsetzung der organischen Säuren und Alkohole zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid durch acetogene Bakterien. Diese Produkte werden wiederum in einer vierten Stufe, der Methanogenese, durch methanogene Archaeen zur Bildung von Methan und Kohlendioxid genutzt. Eine detaillierte Beschreibung der Gärprozesse und beteiligten Mikroorganismen wird u.a. von SAHM (1981), WEILAND (2001), AHRING (2003) und MADIGAN & MARTINGO (2006) gegeben. Das entstehende Biogas setzt sich bei einem ungestörten Prozess aus 50 – 70 % Methan und 29 – 49 % Kohlendioxid zusammen. Weiterhin können Spuren von Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Stickstoff in dem Gasgemisch enthalten sein (WEILAND 2001).

Die gebildete Menge und Qualität des Biogases ist in erster Linie von dem Einsatzstoff abhängig. Für die Biogaserzeugung sind sowohl tierische als auch pflanzliche Roh- und Reststoffe geeignet. Die ursprüngliche landwirtschaftliche Biogasanlage war auf die Verwertung von Gülle und Flüssigmist ausgelegt (WEILAND 2005). Die Kofermentation von Energiepflanzen begann erst um 1999, wobei bereits im Jahr 2003 mehr als 50 % aller seither in Betrieb genommenen Biogasanlagen Energiepflanzen zur Kofermentation nutzten (WEILAND 2003). Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) schätzt, dass im Jahr 2008 in Deutschland Energiepflanzen auf etwa 500 000 ha für die Biogasnutzung angebaut wurden (FNR 2009b). Die meisten konventionell verwerteten landwirtschaftlichen Pflanzenarten sind für die Biomethanisierung geeignet, wenn sie geerntet werden, bevor eine starke Lignifizierung der Biomasse beginnt (WEILAND 2003). Energiepflanzen zeichnen sich im Vergleich zu Gülle durch hohe

Methanbildungspotenziale aus. Nach WEILAND (2003) liegen die Methanausbeuten von Energiepflanzen bei 250 bis 450 $\text{I}_\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$. LEHTOMÄKI (2006) ermittelte Methanbildungspotenziale von 10 verschiedenen Pflanzenarten zwischen 170 und 490 $\text{I} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$, wobei der Hauptanteil der Messungen Methanausbeuten zwischen 300 und 400 $\text{I} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ oTM}_{\text{zu}}$ ergab. **Abb. 1** zeigt beispielhaft Methanbildungspotenziale und Ligninanteile der Silagen verschiedener Pflanzenarten nach HERRMANN ET AL. (2009).

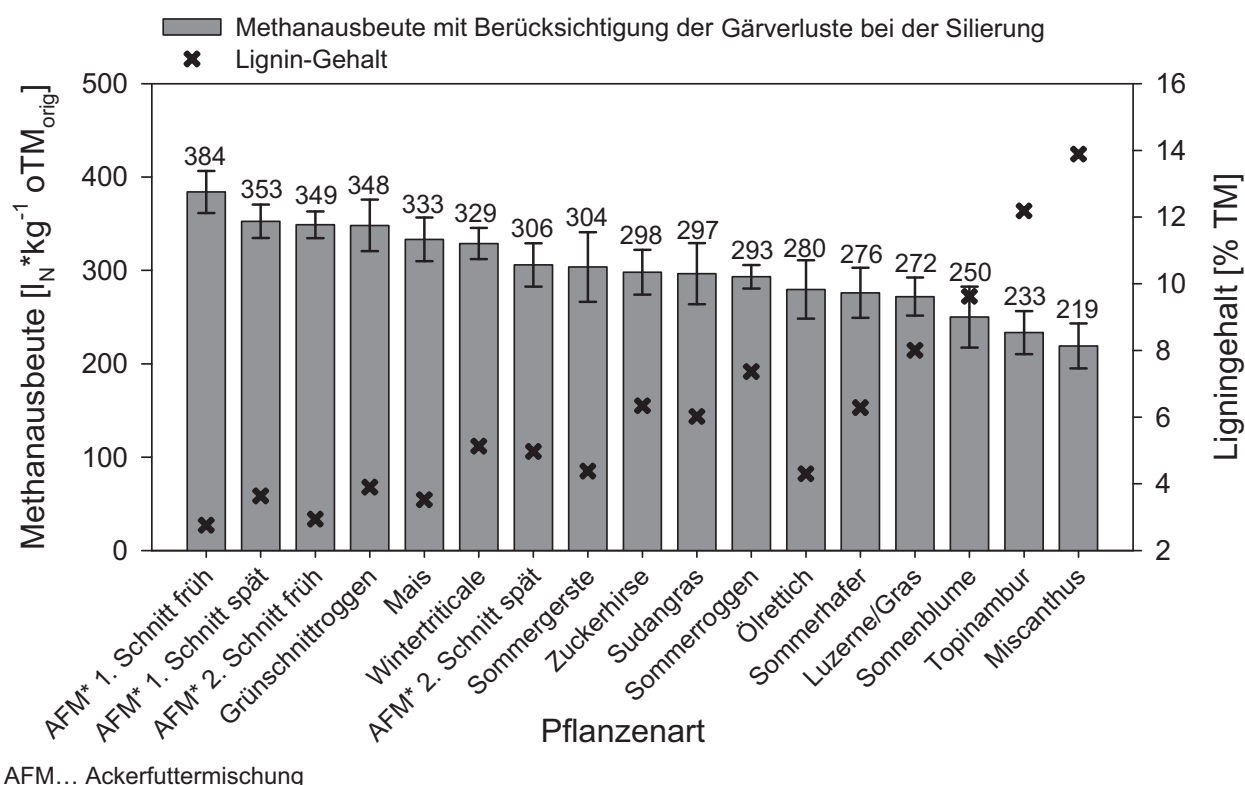


Abb. 1: Methanausbeuten ($\bar{x} \pm s$) und Ligningehalte von Ganzpflanzensilagen verschiedener Pflanzenarten

Neben der Methanausbeute ist für den Landwirt insbesondere der Methanhektarertrag einer Pflanzenart von Interesse. Dieser ist jedoch stark von den Standort- und Anbaubedingungen abhängig und unterliegt entsprechend innerhalb einer Pflanzenart großen Schwankungen. Die höchsten Methanhektarerträge können von Futterrüben und Silomais sowie von mehrschnittig genutzten Pflanzenarten wie Weidelgras, Sudangras und Luzerne gewonnen werden (WEILAND 2003). Von OECHSNER ET AL. (2003) werden maximale Methanhektarerträge für Mais von bis zu 9920 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ und von AMON ET AL. (2007A) von bis zu 9039 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ angegeben.

Aufgrund des hohen Methanhektarertrages sowie der sehr gut etablierten Anbau- und Erntetechnik und der guten Silierbarkeit nimmt Mais als Energiepflanze für die Biogasproduktion eine herausragende Rolle ein. Eine aktuelle Auswertung der Betriebsdaten von Biogasanlagen in einem Bundesmessprogramm sowie eine Vollerhebung aus

Bayern im Jahr 2007 bestätigen, dass Mais die am häufigsten verwendete Pflanzenart für die Methanproduktion ist (Abb. 2, RÖHLING & WILD 2008, GEMMEKE ET AL. 2009).

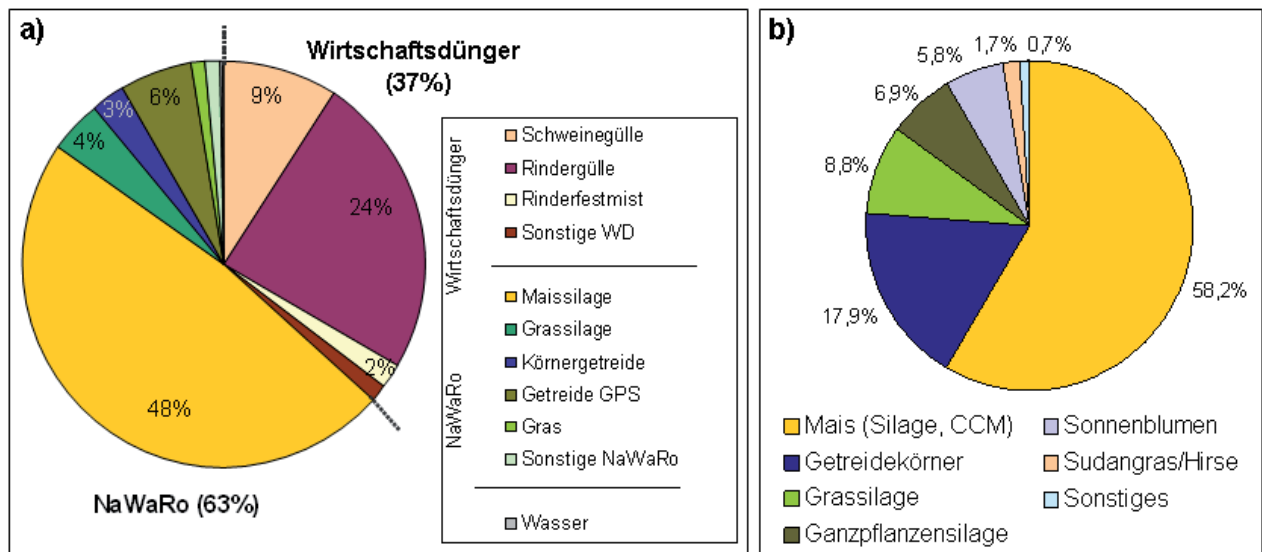


Abb. 2: Einsatzhäufigkeit von Energiepflanzen in Biogasanlagen nach a) GEMMEKE ET AL. (2009) und b) einer Vollerhebung in Bayern (RÖHLING & WILD 2008)

Für eine nachhaltige Nutzung der Anbaufläche ist jedoch bei der Produktion von Energiepflanzen nicht auf einzelne Pflanzenarten und Sorten, sondern auf standortangepasste Anbausysteme und Fruchtfolgen Wert zu legen. Ziel dabei ist es, eine hohe Produktivität und Ertragsstabilität zu erlangen sowie ökologische und ökonomische Risiken zu vermeiden oder zu mindern (KARPENSTEIN-MACHAN 2005). Verschiedene Nutzungskonzepte schließen den Anbau von mehrjährigen Fruchtarten, von Sommer- und Winterzwischenfrüchten sowie die Zweikulturnutzung ein und werden derzeit insbesondere für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion intensiv erprobt (AMON ET AL. 2007B, SCHUHMACHER 2008, STRAUSS & VETTER 2008).

2.1.1.2 Bedeutung der Substratzusammensetzung für die Biomethanisierung

Die chemische Zusammensetzung eines Pflanzenmaterials sowie die Abbaubarkeit der organischen Inhaltsstoffe sind Schlüsselfaktoren für die Methanausbeute aus Energiepflanzen (AMON ET AL. 2007a). Die organischen Bestandteile pflanzlicher Biomasse lassen sich in die drei Stoffklassen Kohlenhydrate, Fette und Proteine einteilen. Dabei wird von Kohlenhydraten allgemein die niedrigste und von Fetten die höchste Methanausbeute erzielt (CZEPUCK ET AL. 2006). Je nach zugrunde gelegter Summenformel für die einzelnen Stoffklassen sind in der Literatur voneinander abweichende Angaben bezüglich der Höhe dieser Methanausbeuten zu finden (Tab. 1).

Tab. 1: Biogasausbeute und Methangehalt einzelner Stoffklassen pflanzlicher Biomasse

	Kohlenhydrate	Fette	Proteine	Quelle
Biogasausbeute [l*kg ⁻¹ oTM]	886	1535	587	(BADGER ET AL. 1979)
	790	1250	700	(BASERGA 1998)
	700-800	1000-1250	600-700	(WEILAND 2001)
	746	1390	790	(LINKE ET AL. 2006)
Methangehalt [Vol-%]	50	70	84	(BADGER ET AL. 1979)
	50	68	71	(BASERGA 1998)
	50-55	68-73	70-75	(WEILAND 2001)
	50	72	60	(LINKE ET AL. 2006)

Für den Gärprozess spielt das C/N-Verhältnis im Substrat eine wichtige Rolle. Zum Einen ist ausreichend Stickstoff notwendig, um die Zellvermehrung zu ermöglichen, zum anderen ist jedoch ein Stickstoffüberschuss, der zur Bildung toxischer NH₃-Konzentrationen führen kann, zu vermeiden (WEILAND 2001). Als optimales C/N-Verhältnis wird eine Spanne von 20 bis 30 angegeben (WEILAND 2001). In Untersuchungen von OECHSNER ET AL. (2003) erfolgte die Umsetzung organischer Masse zu Biogas bei einem C/N-Verhältnis von 37 bis 45 stärker als bei einem C/N-Verhältnis von 15. Neben Kohlenstoff und Stickstoff sind auch Phosphor und Schwefel als Makronährstoffe sowie eine Reihe von Mikronährstoffen, wie Nickel, Kobalt, Molybdän, Eisen, Wolfram und Selen für den Ablauf der Umsetzungsvorgänge essenziell (WEILAND 2001, KARPENSTEIN-MACHAN 2005). Andere Verbindungen wie Schwefelwasserstoff, flüchtige Fettsäuren, Ammoniakstickstoff, die vorwiegend als Stoffwechselprodukte des anaeroben Abbaus entstehen, und Schwermetalle wirken hingegen abhängig von ihrer Konzentration hemmend oder toxisch auf die Biozönose (WEILAND 2001).

Der vollständigen Verwertung der Kohlenstoffquellen in pflanzlichen Substraten ist vorrangig durch den Gehalt an Lignin Grenzen gesetzt. Lignin gilt als im Biogasprozess nicht abbaubar und mindert damit die Methanausbeute (WEILAND 2001, LEHTOMÄKI 2006). Zusätzlich kann durch Komplexbildung mit Cellulose bzw. Hemicellulose und durch Inkrustierung der Abbau verwertbarer Komponenten herabgesetzt werden. Nur frei liegende Komponenten sind dem mikrobiellen Abbau zugänglich (WEILAND 2001). Nach VAN SOEST (1981) schützt Lignin etwa das 1,4fache des eigenen Gewichtes an Zellwand-Kohlenhydraten vor mikrobieller Zersetzung. GHOSH & HENRY (1985) fanden bei der Biomethanisierung von Wasserhyazinthe und Bermudagrass Abbaugrade für Lignin von 0 %, für Cellulose von 31 – 43 % und für Hemicellulose von 81 – 86 %. BANEMANN ET AL. (2008c) ermittelten Abbaugrade für Hemicellulosen von 65 % sowie den Abbau des ADF-Anteils um 51 % und des NDF-Anteils um 57 %. Hemicellulosen besitzen eine leichter aufbrechbare Struktur als Lignocellulosen, für den Celluloseabbau sind jedoch weniger verschiedene Enzyme und Energie nötig (GHOSH & HENRY 1985).

Verschiedene Autoren beschreiben die Korrelation einzelner Inhaltsstoffe pflanzlicher Substrate mit der erzielbaren Methanausbeute bzw. geben Möglichkeiten zur Berechnung des Methanbildungspotenzials aus der stofflichen Zusammensetzung an. Nach BUSWELL & MUELLER lässt sich auf Grundlage der Elementarzusammensetzung organischer Materialien die Methanbildung berechnen (BUSWELL & MUELLER 1952, LINKE ET AL. 2006). Dabei wird jedoch von einem bei pflanzlichem Material nicht erreichbaren vollständigen Abbau ausgegangen. Untersuchungen von CZEPUCK ET AL. (2006) zeigen, dass mit der Formel nach BUSWELL & MUELLER errechnete Methanausbeuten um bis zu 22 % höher liegen als bei Analyse im Batch-Gärtest. Unter der Annahme, dass zwischen Abbauvorgängen in der Biogasanlage und Verdauungsvorgängen bei Wiederkäuern Parallelen bestehen, wird die Schätzung der Methanausbeute bei Kenntnis der Anteile an Rohfett, Rohfaser, Rohprotein und NfE in der pflanzlichen Biomasse durch Kombination der theoretischen Methanausbeuten dieser Stoffklassen (**Tab. 1**) mit Verdauungsquotienten vorgeschlagen (SCHATTAUER & WEILAND 2006). Den Rohfaser- und NfE-Bestandteilen wird dabei die theoretische Methanausbeute der Kohlenhydrate zugeordnet. GRUBER ET AL. (2004) stellen bei auf diese Weise berechneten Methanausbeuten eine Differenz von $\pm 5\%$ zu realen Methanausbeuten aus der Praxis fest. Nach CZEPUCK ET AL. (2006) liegen die Abweichungen gegenüber Messungen im Labormaßstab bei +12 bis -23 %. Die Gleichsetzung der Abbauvorgänge im Pansen von Wiederkäuern und in einer Biogasanlage ist kritisch zu bewerten (CZEPUCK ET AL. 2006). WEIßBACH (2008b) schlägt aktuell die Berechnung des Biogasbildungspotenzials verschiedener Pflanzenarten auf Grundlage der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS), d.h., der bei der Biomethanisierung biologisch nutzbaren Substanz der Substrate vor. Die Schätzung der FoTS erfolgt auf Grundlage der Ausscheidungen bei Verdauungsversuchen mit Schafen, wobei die Ausscheidungen an Rohprotein und Rohfett je Art des pflanzlichen Substrates als konstant angesehen werden, während die Ausscheidungen an Kohlenhydraten über den Rohfasergehalt bzw. den Gehalt an enzymunlöslicher organischer Substanz (EulOS) berechnet werden (WEIßBACH 2008b).

Für einzelne, zum Teil umfangreiche Datensätze konnten über einfache bzw. multiple Regressionsmodelle Zusammenhänge mit Bestimmtheitsmaßen $R^2 > 0,9$ zwischen dem Methanbildungspotenzial und den Gehalten an löslichen Kohlenhydraten, Proteinen, Lignin, ADF bzw. den Rohnährstoffgehalten der einfachen oder erweiterten Weender-Analyse gefunden werden (HABIG 1985, AMON ET AL. 2003b, AMON ET AL. 2007b, GUNASEELAN 2007, KAISER 2007). Die ermittelten Regressionsgleichungen sind jedoch zumeist nur für einzelne Pflanzenarten gültig und nur schwer auf andere Datensätze übertragbar (WELLENBROCK ET AL. 2007).

2.1.1.3 Bereitstellung pflanzlicher Substrate für die Biomethanisierung

Die gesamte Prozesskette zur Produktion von Energiepflanzen für die Biomethanisierung umfasst Anbau, Ernte und Bergung, Transport und Konservierung. Die Grundlagen für den Anbau von Biogaspflanzen sind identisch mit denen für die Futter- und Nahrungsmittelproduktion, Abweichungen ergeben sich jedoch in den Anbausystemen und agrotechnischen Maßnahmen (STRAUSS ET AL. 2009). Entsprechend können sich z.B. Sortenwahl, Saatstärke, Düngung, Pflanzenschutz und Erntetermin je nach Nutzungsrichtung unterscheiden. Für die Biogasproduktion erfolgt üblicherweise die Ernte der Gesamtpflanze. Von AMON ET AL. (2007A) konnte am Beispiel von Mais gezeigt werden, dass bei Nutzung der Ganzpflanze deutlich höhere Methanhektarerträge erzielt werden verglichen mit CCM bzw. der ausschließlichen Nutzung des Korns. Der Betrieb einer Biogasanlage macht eine ganzjährige Beschickung mit dem pflanzlichen Substrat notwendig. Dabei sollte eine gleichbleibend hohe Qualität gewährleistet sein. Hohe Anteile an leicht abbaubaren Kohlenhydraten im saisonal anfallenden Erntegut können bei suboptimaler Lagerung leicht verloren gehen. Daher besteht die Forderung nach einer schonenden und verlustarmen Konservierung und Lagerung des Pflanzenbestandes über einen langen Zeitraum. Die übliche und geeignete Form der Konservierung bei Ernte der Ganzpflanze ist die Silierung (EGG ET AL. 1993).

Für die Nutzungsrichtung Biogasproduktion ist im Vergleich zur Futtermittelproduktion häufig eine größere Vielfalt an Erntegütern zu bewältigen. Weiterhin hat eine intensivere mechanische Aufbereitung an Bedeutung gewonnen. Steigende Erntemengen machen eine hohe Maschinenkapazität notwendig und stellen neue Herausforderungen an Management und Logistik der Verfahrensketten (CIELEJEWSKI 2007).

Für die Ernte und Bergung existiert eine Reihe von Verfahren, die sich nach SONNEN (2006) voneinander unterscheiden durch

- die Art des Erntegutes (Körnerfrüchte, Siliergüter, Hackfrüchte, Erzeugung von Stückgütern: Pressballen),
- die Art der Erntegutbe- und -entladung,
- der Puffermöglichkeit und Anbindung des Puffers an die Ernteeinheit (parallele, bedingt absätzig und absätzig Verfahren),
- den Zeitpunkt und Ort des Gutumschlages und
- den Ort der Lagerstätte.

Als Standardverfahren für die Ernte und Bergung von Siliergütern für die Biogaserzeugung gilt die Häckselkette. Wird zur Ernte der für einen guten Silierverlauf notwendige Mindest-TM-Gehalt nicht erreicht, kann dem Häckseln das Mähen, Anwelken und Schwaden des Bestandes zur Erhöhung der Trockenmasse vorangehen. Je nach Pflanzenart kann die Ernte auch über Ladewagen- oder Ballenketten erfolgen (**Abb. 3**).