



# 1 Einleitung

Die zunehmende Verknappung der weltweiten Ressourcen stellt ein immer größer werdendes globales Problem dar. Eine nachhaltige und wirtschaftliche Nutzung der Ressourcen wird daher immer wichtiger.

Ein Aspekt, der in diesem Kontext an Bedeutung gewinnt, ist die Kaskadennutzung. Diese beschreibt die Mehrfachnutzung eines Rohstoffes mit dem Ziel der nachhaltigen Nutzung und eines ressourceneffizienten Rohstoffeinsatzes. Nach einer teils mehrfachen materiellen Nutzung schließt sich hierbei oft eine energetische Nutzung des Rohstoffs an. Holz kann beispielsweise zuerst zu einem Möbelstück verarbeitet werden, bevor es danach mehrfach zur Papierproduktion benutzt wird und anschließend zu energetischen Zwecken verbrannt wird. Oftmals fehlt es allerdings noch an Methoden, um die Auswirkungen der Kaskadennutzung zu quantifizieren. In dieser Dissertation werden drei eigenständige Paper vorgestellt, die sich mit der Entscheidungsunterstützung in unterschiedlichen wirtschaftlichen Bereichen beschäftigen. Zwei Paper berücksichtigen dabei die Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen.

Das Paper 1 beschäftigt sich mit der Kaskadennutzung in logistischen Netzwerken von Holzflüssen. Es wird der Frage nachgegangen, welche finanziellen und ökologischen Folgen die Kaskadennutzung von Holz für das logistische Netzwerk hat. Dazu wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell erstellt, das die logistischen Gesamtkosten des Netzwerks minimiert. Für die gefundene Lösung werden dann die entstehenden Treibhausgasemissionen berechnet. Diese Methode dient der Quantifizierung dieser Kosten und Emissionen und dient somit auch der Entscheidungsunterstützung bei der Implementierung einer Kaskadennutzung. Die entwickelte Methode wird schließlich auf eine Fallstudie aus Niedersachsen angewendet. Ausgangslage des Papers 2 ist die Untersuchung der Auswirkungen der Wirtschaftsdüngertransporte aus viehreichen Regionen in vieharme Regionen, um die hohen Nährstoffüberschüsse der viehreichen Regionen auszugleichen. Um die Transportwürdigkeit des Wirtschaftsdüngers zu erhöhen, bietet sich eine Kaskadennutzung des Wirtschaftsdüngers in einer Biogasanlage in der vieharmen Region an. Das Paper untersucht, welche finanziellen Auswirkungen der Wirtschaftsdüngertransport für Biogasanlagenbetreiber hat und welche ökologischen Auswirkungen sich ergeben. Dazu wird eine Methode entwickelt, um ausgewählte Auswirkungen zu berechnen und somit Biogasanlagenbetreibern eine Entscheidungshilfe zu geben. Zur



Veranschaulichung wird die Methode auf eine Fallstudie aus Niedersachsen angewendet.

Im Paper 3 werden unsichere Minimax-Probleme untersucht. Minimax-Probleme sind kombinatorische Optimierungsprobleme, bei denen die maximal auftretenden Kosten minimiert werden sollen. Wenn die Parameter des Problems nicht genau bekannt sind, handelt es sich um ein unsicheres Problem. In diesem Fall gibt es eine Menge an verschiedenen Szenarien, die eintreten können. Während es in der robusten Optimierung verschiedene Konzepte gibt, die für das unsichere Problem optimale Lösungen mit einer gewissen Eigenschaft (beispielsweise die beste Lösung im worst case) suchen, untersucht dieses Paper mathematisch, welche strukturellen Eigenschaften das unsichere Minimax-Problem besitzt.



## 2 Zusammenfassung der Paper

Im Folgenden werden die drei Paper, die in der Einleitung schon kurz vorgestellt wurden, ausführlicher behandelt. Im Abschnitt 2.1. wird das Paper 1 mit dem Titel „Sustainable logistics network for wood flow considering cascade utilisation“ vorgestellt. Die Zusammenarbeit bestand bei diesem Paper mit Mohammad Sadegh Taskhiri sowie Jutta Geldermann im Rahmen des Graduiertenkolleg 1703 „Ressourceneffizienz in Unternehmensnetzwerken“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Das vollständige Paper ist im Anhang A angefügt.

Das Paper 2 mit dem Titel „Analysis of selected economic and environmental impacts of long distance manure transports to biogas plants“ wird im Abschnitt 2.2. thematisiert. Dieses Paper, welches im Anhang B angehängt ist, ist im Zusammenarbeit mit Jutta Geldermann entstanden. Das Paper beruht auf den Ergebnissen des Projekts „Nachhaltige Biomassenutzung in Biogasanlagen auf der Grundlage der Wirtschaftsdüngerpotenziale in Niedersachsen (Bauernhof Niedersachsen)“. Das Projekt wurde im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung von Forschern der Georg-August-Universität Göttingen und der Universität Osnabrück durchgeführt. In diesem interdisziplinären Projekt waren Forscher aus den Bereichen Wirtschaftswissenschaften, Geographie und Agrarwissenschaften beteiligt.

Im darauffolgenden Abschnitt 2.3. wird letztendlich das Paper 3 mit dem Titel „Deeper Insights into uncertain minimax Problems“ dargestellt, welches im Anhang C hinterlegt ist.

Die folgenden Abschnitte sind jeweils so aufgebaut, dass zuerst die nötigen Grundlagen vermittelt werden und die zugrundeliegende Problematik erläutert wird. Darauf aufbauend werden die behandelte Forschungsfrage und das Ziel des Papers beschrieben. Im Anschluss folgt die Zusammenfassung des Papers.



## 2.1 Paper 1: Nachhaltige Logistiknetzwerke für Holzflüsse unter Berücksichtigung der Kaskadennutzung

Taskhiri, Mohammad Sadegh; Garbs, Matthias; Geldermann, Jutta (2016): Sustainable logistics network for wood flow considering cascade utilisation. In: *Journal of Cleaner Production* 110, S. 25-39

Die Forstwirtschaft ist in vielen Ländern ein wichtiger Industriezweig. Im Jahr 2016 arbeiteten in Deutschland im Holzsektor und in der Papierindustrie knapp 500.000 Menschen und der generierte Umsatz betrug fast 100 Milliarden Euro (BMEL 2017a). Jährlich werden in Deutschland gut 50 Millionen m<sup>3</sup> Holz eingeschlagen (BMEL 2017b), die nicht nur im Holzproduktsektor und der Papierindustrie, sondern auch im Chemiesektor und im Energiesektor verwendet werden. Neben geerntetem Holz gewinnen Nebenprodukte wie Sägespäne, Altholz und Altpapier als Rohmaterial an Bedeutung. Die Nutzung von Nebenprodukten und vor allem die Kaskadennutzung des Holzes wird als eine Möglichkeit angesehen, den wachsenden Bedarf an Holz zu decken. So kann beispielsweise das Altholz eines aussortierten Möbelstücks zur Papierherstellung wiederverwertet werden, bevor es schließlich zu energetischen Zwecken verbrannt wird. Neben ökologischen Vorteilen kann die Kaskadennutzung als wertschöpfende Methode auch finanzielle Vorteile bieten. Zur Kaskadennutzung im Holzsektor gibt es bereits viele Untersuchungen, wie beispielsweise von Dornburg und Faaij (2005), Fraanje (1997), Geldermann (2012), Rivela et al. (2006) und Sathre und Gustavsson (2006).

Während die Materialeigenschaften der Kaskadennutzung eines Holzproduktes umfangreich untersucht wurden, sind die Auswirkungen der Kaskadennutzung in logistischen Netzwerken von Holzflüssen noch weitgehend unerforscht. Durch die Kaskadennutzung können weitere logistische Prozesse notwendig werden, und deren finanzielle und ökologische Effekte müssen bei der Bewertung der Kaskadennutzung mitberücksichtigt werden. Allerdings fehlt es an Methoden zur quantitativen Bewertung der ökologischen und finanziellen Effekte der Kaskadennutzung in logistischen Netzwerken von Holzflüssen. In diesem Paper wird eine quantitative Methode entwickelt, die für logistische Netzwerke von Holzflüssen mit Kaskadennutzung die Gesamtkosten minimiert und anschließend die dadurch entstehenden Treibhausgasemissionen berechnet. Ziel ist es, für Entscheidungsträger eine geeignete



Methode zur Quantifizierung der Gesamtkosten und der Treibhausgasemissionen bereitzustellen.

Das Paper beginnt mit einer Literaturanalyse zu Anwendungen von Methoden des Operations Research auf logistische Netzwerke von Holzflüssen. Die betrachtete Literatur wird dabei klassifiziert hinsichtlich der Nutzung des Holzes (materiell, chemisch, energetisch), des betrachteten logistischen Prozesses und der verwendeten Methode.

Im nächsten Abschnitt des Papers wird kurz auf den Produktionsprozess von Spanplatten, mitteldichten Holzfaserverplatten und Grobspanplatten eingegangen, bevor das zu betrachtende logistische Netzwerk von Holzflüssen beschrieben wird. Als Rohstoffquellen des Netzwerks werden Wälder, Sägewerke und Sammelzentren für Altholz und Altpapier betrachtet, wobei Sägewerke auch Holz aus Wäldern beziehen. Die betrachteten Rohstoffe sind verschiedene Arten an Frischholz aus Wäldern, verschiedene Arten von Holznebenprodukten aus Sägewerken und Altpapier und Altholz unterschiedlicher Qualität aus Sammelstellen. Abnehmer sind weiterverarbeitende Unternehmen wie Holzprodukthersteller, Papierproduzenten und Holzpelletshersteller.

Im nächsten Schritt wird das mathematische Modell eingeführt, welches die Holzflüsse zwischen den Holzquellen und -senken hinsichtlich minimaler Gesamtkosten optimiert. Als Kosten betrachtet das Modell dabei Transportkosten, Zerspanungskosten, Lagerkosten (die insbesondere Kosten der Trocknung enthalten) und Erntekosten. Das Modell berücksichtigt die verschiedenen Bedarfe der herzustellenden Produkte, sowie unterschiedliche Transportarten. Das Modell ist ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm, das auf einem Transportproblem basiert.

Im Rahmen einer Fallstudie wird im nächsten Abschnitt des Papers ein logistisches Netzwerk von Holzflüssen in Niedersachsen betrachtet. Nachdem das logistische Netzwerk und die benötigten Daten im Detail erörtert wurden, werden die mathematischen Gleichungen zu den Rohstoffbedarfen der Abnehmer spezifiziert. Als herzustellende Produkte werden in der Fallstudie mitteldichte Holzfaserverplatten, Grobspanplatten, Spanplatten, Papier und Holzpellets mit ihren Anfallmengen in Niedersachsen betrachtet. Zudem werden die Gleichungen zur Wahl des Transportmittels konkretisiert. Im Folgenden werden die drei Szenarien besprochen, die im Rahmen der Fallstudie untersucht werden. In Szenario 1 wird das logistische Netzwerk ohne Kaskadennutzung betrachtet. Das bedeutet, dass die Sammelstellen nicht im Netzwerk berücksichtigt werden. Die Szenarien 2 und 3 berücksichtigen die



Kaskadennutzung, wobei in Szenario 2 davon ausgegangen wird, dass nur 1 % an Altholz in der Produktion von mitteldichten Holzfaserverplatten und Grobspanplatten verwendet werden dürfen, während es 10 % im Szenario 3 sind. Für diese drei Szenarien werden dann mit Hilfe des Modells die Holzflüsse bestimmt, deren logistische Gesamtkosten minimal sind. Im Anschluss werden die Emissionen hinsichtlich des Treibhauseffekts bestimmt.

Im Folgenden analysiert das Paper die Ergebnisse der Fallstudie ausführlich. Anhand der Fallstudie zeigt sich, dass die entwickelte Methode geeignet ist, um in den Szenarien die Gesamtkosten und die Treibhausgasemissionen gegenüberzustellen und die Szenarien untereinander zu vergleichen. Des Weiteren wird eine Methode zur Abschätzung von Emissionsänderungen bei Wechsel der Rohstoffquelle vorgestellt. Wenn die Art der Rohstoffquelle gleich ist (Wald, Sägewerk oder Sammelstelle) und sich nur der Ort ändert, so entspricht die Emissionsänderung dem Produkt der Tonnenkilometerdifferenz und der Emissionen pro Tonnenkilometer. Damit lässt sich bei Standortwechseln schnell eine obere Grenze für die Gesamtemissionen berechnen.

Das Paper schließt mit einer Zusammenfassung und Besprechung möglicher Modelerweiterungen und offener Forschungsfragen.

Im nächsten Abschnitt wird das Paper 2 vorgestellt, welches ebenfalls die Auswirkungen der Kaskadennutzung eines erneuerbaren Rohstoffs untersucht, wobei es sich bei dem Rohstoff um Wirtschaftsdünger handelt. Auch dort stehen die zusätzlichen Transportaufwendungen durch die Kaskadennutzung im Vordergrund, wenngleich nur die Auswirkungen eines einzelnen Transports untersucht werden. Während im Paper 1 der hauptsächliche Beitrag zur Dissertation in der Entwicklung des mathematischen Modells zur Quantifizierung der finanziellen Auswirkungen besteht, besteht der Beitrag im Paper 2 in der Entwicklung eines Modells, welches neben den finanziellen Auswirkungen auch die ökologischen Auswirkungen quantifizieren kann.



## 2.2 Paper 2: Analyse ausgesuchter ökonomischer und ökologischer Auswirkungen von Wirtschaftsdüngerferntransporten zu Biogasanlagen

Garbs, Matthias; Geldermann, Jutta (2018): Analysis of selected economic and environmental impacts of long distance manure transports to biogas plants. In: *Biomass and Bioenergy* 109, S. 71–84.

Traditionell wird Gülle aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung als Wirtschaftsdünger auf Ackerflächen ausgebracht. In sehr viehdichten Regionen kann es dabei durch die hohe Konzentration der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung zu erheblichen Nährstoffüberschüssen kommen, die sich negativ auf die Umwelt auswirken können. So kann etwa eine hohe Ausbringung von Stickstoff zu einer Nitratbelastung von Gewässern führen. Dies hat eine Eutrophierung der Gewässer zur Folge und belastet das Grundwasser (Dalgaard et al. 2001; Umweltbundesamt 2015b). In Deutschland ist die hohe Nitratbelastung des oberflächennahen Grundwassers hauptsächlich auf die Landwirtschaft zurückzuführen (Bundesministerium für Umwelt und Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2012). Die Ausbringung von Stickstoff auf Ackerflächen führt weiterhin zu hohen Ammoniak- und Lachgasemissionen, die sich als Treibhausgase negativ auf den Klimawandel auswirken (Dalgaard et al. 2001; Umweltbundesamt 2015a). Insbesondere Lachgas ist klimaschädlich, da es einen 265 mal höheren Treibhausgaseffekt besitzt als Kohlenstoffdioxid (Stocker et al. 2013). Des Weiteren gefährdet die Ausbringung hoher Stickstoffmengen die Biodiversität durch die Eutrophierung des Bodens (Bobbink und Hettelingh 2011). Gemäß Billen et al. (2011) und Holland et al. (2013) sind die negativen Auswirkungen der Stickstoffausbringung mittlerweile so stark ausgeprägt, dass die dadurch entstehenden Kosten die Erträge aus der Stickstoffnutzung übersteigen.

Neben dem Stickstoff ist auch die Ausbringung von hohen Mengen an Phosphor bedenklich, der zur Eutrophierung von Gewässern beiträgt (Dalgaard et al. 2001; Correl 1998).

Aufgrund der ökologischen Nachteile der Ausbringung von großen Mengen an Nährstoffen, kann in viehrefreichen Regionen nicht der gesamte anfallende Wirtschaftsdünger ausgebracht werden. Im Gegensatz dazu herrscht in vieharmen Regionen oft ein Nährstoffmangel, sodass Mineraldünger eingesetzt wird. Diese Situation ist zum Beispiel in Niedersachsen gegeben, wo es große, regionale Unterschiede bei der



Tierhaltung gibt. Während es insbesondere in der Veredlungsregion im Westen Niedersachsens (Region Weser-Ems) große Tierbestände gibt, so wird im Südosten Niedersachsens hauptsächlich Ackerbau betrieben. Dies resultiert in einem Wirtschaftsdüngerüberschuss und somit einem Nährstoffüberschuss in der Veredlungsregion und einem Nährstoffmangel in der Ackerbauregion. Eine mögliche Lösung des Problems des Wirtschaftsdüngerüberschusses ist die Verbringung des überschüssigen Wirtschaftsdüngers in vieharme Regionen, was zum Teil auch schon von Unternehmen durchgeführt wird (Klohn und Windhorst 2001). Um die Transportwürdigkeit des Wirtschaftsdüngers zu erhöhen, bietet sich eine Kaskadennutzung des Wirtschaftsdüngers in einer Biogasanlage an. Der Wirtschaftsdünger kann also erst energetisch genutzt werden und anschließend als Gärrest auf Ackerflächen ausgebracht werden.

Offen bleibt allerdings die Frage, welche ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der einzelne Wirtschaftsdüngertransport verursacht. Es sollte untersucht werden, ob die Emissionseinsparungen durch beispielsweise Mineraldünger substitution die zusätzlichen Emissionen durch den Transport übersteigen. Ebenso sollte quantifiziert werden, ob die Kosten des Transports durch die möglichen Kosteneinsparungen, zum Beispiel durch die Einsparung von Energiepflanzen, gedeckt werden können. Da sich der Biogasanlagenbetreiber nur dann für den Transport des Wirtschaftsdüngers entscheidet, wenn sich ökologische oder ökonomische Vorteile aus dem Transport ergeben, ist deren Analyse und Quantifizierung wichtig für dessen Entscheidungsfindung.

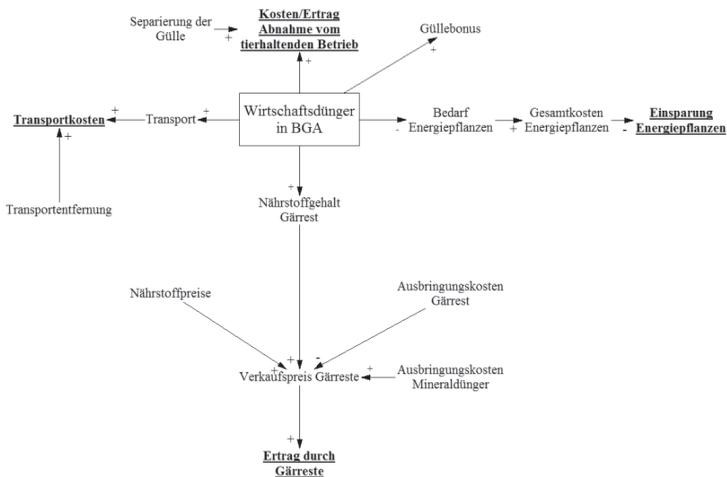
Ziel des Papers ist es, ein Modell aufzustellen, das es dem Biogasanlagenbetreiber ermöglicht, ausgewählte finanzielle und ökologische Folgen des Wirtschaftsdüngertransports zu berechnen. Dies dient der Entscheidungsunterstützung des Biogasanlagenbetreibers, der in Erwägung zieht, Wirtschaftsdünger aus entfernteren Regionen zu beziehen. Zudem wurde das Modell, das online unter <https://www.3-n.info/wissen-und-service/infomaterialien/biogas.html> zur Verfügung gestellt wird, bereits im Rahmen des Projekts „Bauernhof Niedersachsen“ benutzt, um die Potenziale der Emissionseinsparungen in Niedersachsen abzuschätzen.

Im Paper wird jeweils ein Modell zur Berechnung sowohl ausgewählter finanzieller als auch ökologischer Auswirkungen für den Biogasanlagenbetreiber entwickelt. Die grundlegende Idee des Modells ist in einem ersten Schritt zu untersuchen, welche Aspekte (Substitution von Energiepflanzen, Transport, etc.) sich durch den Einsatz



des Wirtschaftsdüngers ändern. In einem zweiten Schritt werden diese finanziellen bzw. ökologischen Änderungen mathematisch formuliert und anschließend aufsummiert. Damit berechnet das Modell einen Differenzbetrag, der den zusätzlichen oder verringerten Einnahmen bzw. Emissionen entspricht. Diese Vorgehensweise hat unter anderem den Vorteil, dass keine Ökobilanz zur Berechnung der Emissionsdifferenzen erforderlich ist. Dennoch können errechnete Emissionsdifferenzen mit Ergebnissen vorhandener Ökobilanzen zusammengeführt werden. So werden in der Fallstudie des Papers die Ökobilanzergebnisse aus Schmehl et al. (2012) genutzt.

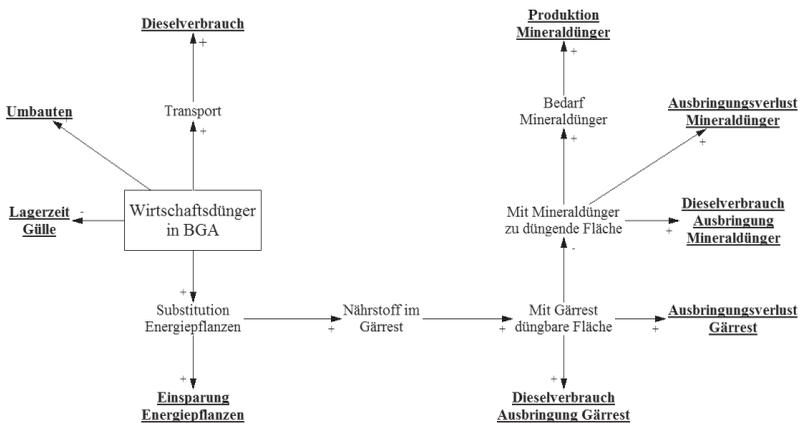
Das Modell des Papers beruht auf den folgenden getroffenen Grundannahmen. So wird angenommen, dass der Wirtschaftsdünger in dem Maße Energiepflanzen substituiert, sodass die Biogasproduktion der Biogasanlage gleichbleibt. Des Weiteren wird angenommen, dass der eingesetzte Wirtschaftsdünger anderenfalls in viehdichten Regionen ohne zusätzliche Düngewirkung ausgebracht werden würde. Außerdem beziehen sich die Berechnungen jeweils auf eine Tonne Wirtschaftsdünger.



**Abbildung 1:** Finanzielle Auswirkungen bei der Verwendung von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen. Die Pfeile zeigen die Kausalzusammenhänge zwischen den Parametern auf. Die Notation hierzu wurde aus System Dynamics übernommen. Die Plus- und Minuszeichen zeigen an, ob der Kausalzusammenhang positiv oder negativ ist. Wenn ein Kausalzusammenhang positiv ist, bewirkt eine Zunahme oder Abnahme einer Variablen eine Zunahme oder Abnahme der anderen Variablen. Wenn es negativ ist, ist es umgekehrt.



Anhand der Abbildung 1 wird im Paper schematisch gezeigt, welche Auswirkungen die Kaskadennutzung von Wirtschaftsdünger in einer Biogasanlage hat und welche direkten finanziellen Auswirkungen sich daraus ergeben. Die vier entscheidenden Aspekte sind hierbei Transportkosten, Einsparungen an Energiepflanzen, Gewinne aus Gärresten und der Bezug des Wirtschaftsdüngers. Im Folgenden erläutert das Paper die finanziellen Auswirkungen und deren mathematische Berechnungsweise. So entstehen durch den Transport des Wirtschaftsdüngers Transportkosten mit einem variablen und einem fixen Kostenanteil. Durch die Einsparung an Energiepflanzen ergibt sich eine Kostenersparnis, die sich aus dem Preis der Energiepflanzen und der substituierten Menge an Energiepflanzen ergibt. Bei den Gärresten gibt es eine Wertsteigerung, da sich der Nährstoffgehalt erhöht. Diese Wertsteigerung wird aus der Einsparung an Mineraldünger abzüglich der erhöhten Ausbringungskosten errechnet. Für den Bezug des Wirtschaftsdüngers entstehen dem Biogasanlagenbetreiber je nach Art des Wirtschaftsdüngers zusätzliche Kosten oder Einnahmen. Aufsummiert errechnen sich daraus die gesamten finanziellen Auswirkungen einer eingesetzten Tonne Wirtschaftsdüngers. Ergeben sich zusätzliche Einnahmen, so ist der Einsatz von Wirtschaftsdünger aus finanzieller Hinsicht für den Biogasanlagenbetreiber vorteilhaft.



**Abbildung 2:** Ausgewählte ökologische Faktoren beim Einsatz von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen. Die Pfeile zeigen die Ursache und die Wirkzusammenhänge zwischen den Parametern. Die Plus- und Minuszeichen zeigen an, ob der Kausalzusammenhang positiv oder negativ ist.