1 Einleitung

Die derzeitige industrielle Produktion basiert weltweit zu großen Teilen auf der Nutzung fossiler Ressourcen, wie die folgenden Zahlen verdeutlichen:

- 85,9 % der weltweiten Primärenergiebereitstellung wird mit Kohle, Erdöl, Erdgas und Nuklearenergie gedeckt (Internationale Energieagentur 2016).
- 98 % des Mobilitätssektors in Deutschland wurde im Jahr 2013 mit Kraftstoffen versorgt (Rest: Strom), wovon fossile Kraftstoffe 94,6 % ausmachen (Umweltbundesamt 2015).
- Etwa 90 % der organischen Basischemikalien werden gegenwärtig aus fossilen Rohstoffen gewonnen (Maity 2015a).

Diese fossilen Ressourcen sind allerdings nur begrenzt verfügbar und setzen bei Verbrennung zudem große Mengen Treibhausgase frei, womit sie zum Klimawandel beitragen (Kircher 2012). Daher sollen zukünftig verstärkt nachwachsende Rohstoffe industriell genutzt werden. Die Substitution von fossilen durch erneuerbare Ressourcen wird allgemein als Transformation zu einer Bioökonomie bezeichnet und hat bereits Einzug in die wissenschaftliche, politische und industrielle Agenda gehalten (Golembiewski et al. 2015; Scarlat et al. 2015; Toppinen et al. 2017). Möglich wird eine solche Transformation nur durch eine Kombination von technischen, gesellschaftlichen, politischen und biologischen Veränderungen (Giurca und Späth 2017), für die unter anderem neuartige, innovative Technologien notwendig sind (Langeveld et al. 2010). Eine zentrale Rolle in einer zukünftigen Bioökonomie wird sogenannten Bioraffinerien zugeschrieben (Bundesregierung 2014; Schieb et al. 2015). Unter diesem Begriff werden verschiedene Konzepte zusammengefasst, die aus nachwachsenden Rohstoffen eine Palette an energetischen, stofflichen und pharmazeutischen Produkten herstellen können, die derzeit aus fossilen Ressourcen gewonnene Produkte direkt oder indirekt ersetzen (Liu et al. 2012).

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive ist es jedoch zunächst von grundlegender Bedeutung, dass eine Bioraffinerie wirtschaftlich profitabel betrieben werden kann. Bisher wurden Bioraffineriekonzepte in erster Linie im Labor- und Prototypenstatus getestet und nur selten im industriellen Maßstab umgesetzt (Sukumara et al. 2015; Bundesregierung 2014). Zur Vorbereitung einer Investitionsentscheidung dienen Machbarkeits-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

studien, um eine Vorauswahl zwischen alternativen technischen Ausführungen von innovativen Produktionssystemen im industriellen Maßstab zu treffen (Geldermann 2014).

Obwohl die Struktur und die Produktionsprozesse einer Bioraffinerie denen in einer fossilen Erdölraffinerie ähneln, gibt es bei der Planung von Bioraffinerien Fragestellungen, die sich deutlich von denen anderer Industrieanlagen unterscheiden (de Jong und Jungmeier 2015). Wichtig ist hier vor allem die (nachhaltige) Versorgung der Bioraffinerie mit Biomasseinputs (Parajuli et al. 2015), ohne dabei etwa die Produktion von Nahrungsmitteln zu beeinträchtigen (Mohr und Raman 2013). Daher sind vor allem Restbiomassen als Inputmaterial interessant, da diese nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen und zumeist auch keine umfassenden stofflichen Nutzungsoptionen bieten. Da Restbiomassen naturgemäß mit deutlich geringeren Flächenerträgen anfallen als eigens angebaute Biomassen (Kaltschmitt 2013), muss die räumliche Verfügbarkeit dieser Inputs beim Planungsprozess einer Bioraffinerie berücksichtigt werden. Dazu können Geoinformationssysteme (GIS) zur Verwendung von geografisch referenzierten Daten über den potentiellen Biomasseanfall genutzt werden.

Durch den Einsatz der geografisch verteilten Biomasse als Input für Bioraffinerien ergeben sich drei Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen. Erstens muss aufgrund der regional unterschiedlichen Biomasseverfügbarkeit der Standort geplant werden, da sich dieser direkt auf die Biomassebereitstellungskosten auswirkt. Zweitens muss die Kapazität der Bioraffinerie betrachtet werden, da diese ebenso von der regional unterschiedlichen Verfügbarkeit an Biomasse abhängt. Drittens wird die Konfiguration einer Bioraffinerie, und damit die Entscheidung darüber, welche Endprodukte in welchen Mengen produziert werden sollen, von der Gesamtkapazität beeinflusst. Da die verschiedenen Produktionseinheiten sehr unterschiedliche Investitionen erfordern, die Endprodukte Erlöse in unterschiedlicher Höhe erzielen und zudem Kuppelproduktion mehrerer Endprodukte vorliegt, kann für eine Bioraffinerie mit einer kleineren Gesamtkapazität eine andere Konfiguration der Produktionseinheiten vorteilhaft sein als für eine Bioraffinerie mit einer größeren Gesamtkapazität. Standort, Kapazität und Konfiguration einer Bioraffinerie stehen also in Wechselwirkung zueinander und müssen daher simultan geplant werden. Für alle drei Bestandteile der Bioraffinerieplanung wurden im Bereich des Operations Research (OR) Methoden entwickelt (Nickel et al. 2014). Durch die simultane Planung von Standort, Kapazität und Konfiguration unter Einbeziehung von Geodaten ergibt sich jedoch ein sogenanntes *schwieriges Problem* (Michalewicz und Fogel 2000), das nicht mit einfachen exakten OR-Methoden gelöst werden kann. Daher

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wird eine Kombination verschiedener heuristischer und exakter Ansätze in einem übergeordneten Entscheidungsmodell benötigt.

Somit ergeben sich folgende vier aufeinander aufbauende Forschungsfragen, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollen.

1. *Welche Besonderheiten bestehen bei der strategischen Planung von Bioraffinerien?*
2. *Können Geoinformationssysteme in ein Entscheidungsmodell zur strategischen Planung von Bioraffinerien integriert werden?*
3. *Wie muss ein Lösungsansatz ausgestaltet sein, um die Lösung des Entscheidungsmodells zur simultanen Planung von Standort, Kapazität und Konfiguration einer Bioraffinerie zu ermöglichen?*
4. *Ist das entwickelte Entscheidungsmodell auf verschiedene geografische Gebiete und Produktionsprozesse unterschiedlicher Bioraffinerietypen anwendbar?*

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird in dieser Arbeit folgender Lösungsweg verfolgt. Zunächst wird in Kapitel 2 das Konzept der Bioökonomie vorgestellt und in diesem Zusammenhang auf die Bedeutung von Bioraffinerien für eine zukünftige Bioökonomie eingegangen. Insgesamt werden fünf Bioraffineriekonzepte vorgestellt, von denen die Fischer-Tropsch- und die Lignocellulose-Bioraffinerie eingehender erläutert werden.

Mit dem grundlegenden Verständnis zu Aufbau und Konfiguration von Bioraffinerien werden in Kapitel 3 in einer Literaturanalyse die Anforderungen an die strategische Planung von Bioraffinerien herausgearbeitet. Daraus ergibt sich die Auswahl der geeigneten Methoden der exakten globalen Optimierung sowie der heuristischen Evolutionsstrategien. Durch die Zusammenführung dieser methodischen Bestandteile in einem übergeordneten Entscheidungsmodell wird ein Lösungsverfahren entwickelt, das die simultane Planung von Standort, Kapazität und Konfiguration einer Bioraffinerie unter Berücksichtigung des geografischen Anfalls der Biomasse im stetigen Lösungsraum ermöglicht.

Das entwickelte Entscheidungsmodell wird anschließend exemplarisch in zwei Fallstudien eingesetzt. In Kapitel 4 wird die strategische Planung von Standort, Kapazität und Konfiguration einer Fischer-Tropsch-Bioraffinerie in Deutschland durchgeführt. In Kapitel 5 wird eine Lignocellulose-Bioraffinerie im Cariboo District in British Columbia, Kanada, geplant. Damit wird das Entscheidungsmodell für zwei Technolo-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gien in unterschiedlichen Regionen angewendet, die sich in ihrem Rohstoffangebot deutlich unterscheiden.

Abschließend werden in Kapitel 6 die in dieser Arbeit aufgestellten Forschungsfragen beantwortet. Zudem werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf offene Fragen und mögliche sich künftig anschließende Forschungsfelder gegeben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Transformation des erdölbasierten Wirtschaftssystems zur Bioökonomie

Der Begriff „Bioökonomie“ wird in jüngerer Vergangenheit zunehmend verwendet, um die angestrebte Transformation zu einem Wirtschaftssystem zu beschreiben, das weitestgehend auf Grundlage erneuerbarer Ressourcen besteht (Staffas et al. 2013; Golembiewski et al. 2015). Staffas et al. (2013) unterscheiden Bioökonomie („Bioeconomy“, Fokus auf die Technologien) und biobasierte Ökonomie („Biobased Economy“, Fokus auf Biomasse als Rohstoffbasis). Hingegen definieren Langeveld und Sanders (2010) eine biobasierte Wirtschaft als „technological development that leads to a significant replacement of fossil fuels by biomass in the production of pharmaceuticals, chemicals, materials, transportation fuels, electricity and heat“. Sowohl die Europäische Kommission als auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie einige weitere internationale Institutionen sehen die Entwicklung der Bioökonomie als eine der zentralen Herausforderungen der Gegenwart und fördern Forschung in diesem Bereich in verschiedenen Programmen (Scarlat et al. 2015; BMBF 2011; Staffas et al. 2013; The White House 2012).

Angestrebt wird ein bioökonomisches Wirtschaftssystem, das neben Nahrungsmitteln auch Kraftstoffe, chemische Grundstoffe, Fasern für die Herstellung von Kleidung und Papier, Wärme und Strom auf Basis erneuerbarer Ressourcen bereitstellt (Langeveld und Sanders 2010; Johnson und Altman 2014). Angelis-Dimakis et al. (2011) geben einen Überblick über die verschiedenen erneuerbaren Ressourcen und deren Potentiale. Während sich Strom und Wärme gut aus Wind- und Sonnenkraft gewinnen lassen, stellt Biomasse für die Produktion von Basischemikalien und lagerfähigen Kraftstoffen mit hoher Energiedichte die einzige praktische Alternative zu fossilen Ressourcen dar (Zeng und Kaltschmitt 2015). Technisch können solche biogenen Substitute bereits hergestellt werden, vielfach können sie jedoch wirtschaftlich nicht mit fossil basierten Produkten konkurrieren (Brown und Brown 2014). Gegenwärtig werden daher weltweit noch etwa 80 % der Energie und 90 % der organischen Chemikalien auf Basis fossiler Rohstoffe bereitgestellt (Maity 2015a). Im Vergleich zum Jahr 2005 hat sich der Anteil der aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellten Chemikalien damit bereits erhöht. Damals wurden noch etwa 96 % der organischen Chemikalien auf Basis fossiler Eingangsstoffe produziert (Thoen und Busch 2010).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Insgesamt ergeben sich beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der Produktion einige neue Heraus- und Anforderungen, die beachtet werden müssen (Geldermann 2012). Neben dem technologischen Wandel sind für die Entwicklung hin zu einer Bioökonomie ebenso soziale, politische und biologische Veränderungen nötig (ten Pierick et al. 2010). Gesellschaftlich muss etwa die Akzeptanz von biobasierten Produkten steigen. Sisto et al. (2015) befragen entsprechend in einer Studie verschiedene Vertreter aus der Agroenergiebranche über Meilensteine, die auf dem Weg zu einer Bioökonomie erreicht werden müssen. An erster Stelle wird genannt, dass zunächst ein Markt für biobasierte Produkte geschaffen werden muss. Für die Schaffung eines Marktes wiederum spielt die Akzeptanz und Bekanntheit der Produkte eine wichtige Rolle (Geldermann et al. 2016a; Teuber et al. 2015; Osburg et al. 2016). Die größten Hindernisse werden in mangelnder bzw. unsicherer Unterstützung durch die Politik, sowohl auf lokaler als auch europäischer Ebene, gesehen. Als unproblematisch wird hingegen die Verfügbarkeit von Biomasse wahrgenommen (Sisto et al. 2015).

Im Folgenden wird auf verschiedene Restbiomassen und deren Verfügbarkeit eingegangen und das Konzept der Kaskadennutzung erläutert. Abschließend werden fünf Bioraffineriekonzepte vorgestellt, von denen zwei eingehender erläutert werden.

2.1 Biomasse und Restbiomasse

Für die industrielle Bereitstellung von biobasierten Produkten ist die ausreichende Verfügbarkeit von Biomasse erforderlich. Theoretisch ist diese gegeben: Field et al. (1998) quantifizieren den jährlich durch Photosynthese gebundenen – und damit zu Biomasse umgesetzten – Kohlenstoff auf 104,9 Milliarden Tonnen. Jeweils etwa 50 % davon werden in den Ozeanen und an Land gebunden. Abbildung 2-1 bildet die geografisch verteilte Kohlenstoffbindung in Biomasse ab. An Land verbleibt dieser Kohlenstoff dann im Schnitt 19 Jahre in der Biomasse, aus ozeanischer Biomasse wird er bereits nach zwei bis sechs Tagen wieder freigesetzt. Daher ergibt sich aus der vergleichbaren Kohlenstoffbindung an Land und im Wasser kein gleichverteilter Biomassebestand: etwa 99.8 % des Biomassebestandes befindet sich an Land (Field et al. 1998).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

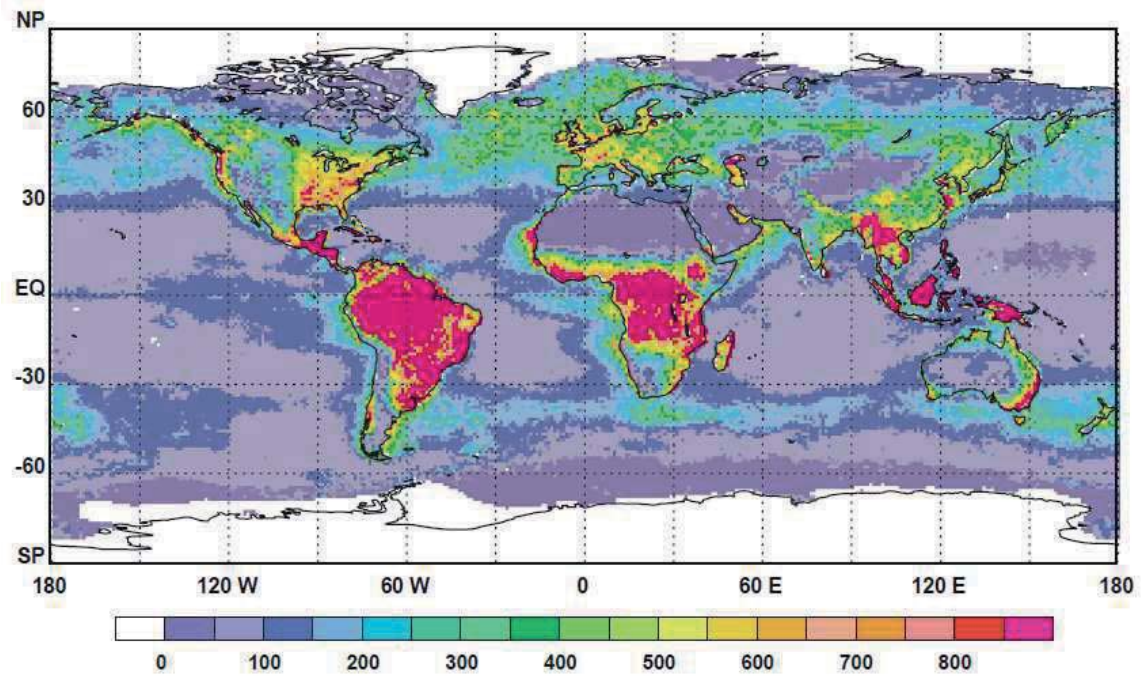

Abbildung 2-1: Geografische Verteilung des jährlich photosynthetisch gebundenen Kohlenstoffs in Gramm pro Quadratmeter [Field et al. 1998].

Nach ten Bos und van Dam (2013) ist das energetische Potential des jährlichen Zuwachses von Cellulose, einem wesentlichen Bestandteil von holzigen Biomassen an Land, zwanzigmal so groß wie der jährliche Verbrauch an Erdöl. Die tatsächliche energetische Nutzung von Bioenergie liegt deutlich darunter: Weltweit wurden im Jahr 2009 etwa 10 % (50 EJ) der insgesamt verbrauchten 500 EJ Primärenergie durch Biomasse bereitgestellt.[1] Ein Großteil dieser 50 EJ entfällt jedoch auf die traditionelle Energiebereitstellung im kleinen Maßstab in Entwicklungsländern, beispielsweise das Kochen über offenem Feuer. Die Bioenergienutzung im industriellen Maßstab in entwickelten Ländern spielt eine deutlich geringere Rolle (Eisentraut und Brown 2012). Auch die zukünftige Rolle der Bioenergie im globalen Energiemix ist unklar. Slade et al. (2011) analysieren eine Vielzahl von Studien, die sich mit der Prognose der energetischen Nutzung von Biomasse beschäftigen und finden eine große Bandbreite breit gefächerter Szenarien vor. In Szenarien mit einer niedrigen Bioenergienutzung bleibt deren Anteil am weltweiten Primärenergieverbrauch in etwa konstant. Durch eine Steigerung der insgesamt benötigten Energie erhöht sich die absolut durch Biomasse bereitgestellte Energie in diesen Prognosen bis 2050 auf etwa 100 EJ. Szenarien mit extrem hoher Bioenergienutzung gehen von über 600 EJ, im Extremfall bis zu 1600 EJ aus (Smeets et al. 2007). Der Großteil der Szenarien prognostiziert eine Nutzung im Bereich zwi-

[1] Ein Exajoule (EJ) entspricht 10^{18} Joule

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

schen 100 und 600 EJ, was einen vergleichsweise moderaten Anstieg der Quote der Bioenergie am weltweiten Primärenergieverbrauch bedeutet.

Der Zuwachs an Biomasse kann und sollte jedoch nicht vollständig energetisch genutzt werden. Zunächst steht die Versorgung der Weltbevölkerung mit Nahrungsmitteln im Vordergrund. Erst wenn dieses Bedürfnis befriedigt ist, kann die verbleibende Biomasse stofflich und energetisch verwendet werden. Arvizu et al. (2012) schätzen, dass im Jahr 2000 etwa 219 EJ Biomasse für Nahrung, Futter und Faserstoff geerntet wurden. Der Flächenbedarf für die Bereitstellung von Nahrungsmitteln wird in Zukunft vermutlich mindestens konstant bleiben, eher aber weiter steigen (Field et al. 2008; Qaim 2016). Hier sind die genauen Auswirkungen der gegenläufigen Trends von wachsender Weltbevölkerung und steigenden Flächenerträgen unklar (Godfray et al. 2010). Darüber hinaus hat die direkte stoffliche Nutzung, etwa von Holz in Möbeln, Priorität vor der chemischen Nutzung (Hesse 2015; Taskhiri et al. 2016). Es wird deutlich, dass bereits heutzutage Nutzungskonkurrenzen um vorhandene Biomassen bestehen, die sich in Zukunft noch weiter verschärfen dürften (Gerssen-Gondelach et al. 2014; Murphy et al. 2011). Hinzu kommt, dass Nachhaltigkeitsaspekte beim Biomasseanbau, etwa bezüglich des Nährstoffniveaus im Boden, beachtet werden müssen (Gabrielle et al. 2014; Schmehl et al. 2012).

Für die Produktion von Chemikalien aus Biomasse bieten sich daher Eingangsstoffe an, die nicht in direkter Nutzungskonkurrenz zu Nahrungsmitteln oder der direkten stofflichen Verwertung stehen. Die Umwidmung von Flächen für die Produktion von Biomasse für energetische Zwecke kann durch indirekte Landnutzungseffekte erhöhte Treibhausgasemissionen nach sich ziehen, wohingegen die Nutzung von Reststoffen bestehender Flächen die Emission von Treibhausgasen tendenziell verringert (Havlík et al. 2011). Als „Restbiomasse“ werden z. B. Schnittabfälle der Holzernte, Sägemehl aus der Sägeindustrie, Stroh aus dem Anbau von Lebensmitteln, Landschaftspflegematerial, biogene Abfälle oder zuvor anderweitig verwendete Biomasse bezeichnet (Iakovou et al. 2010; Ekman et al. 2013). Durch die Nutzung von Restbiomasse anstelle von angebauter Biomasse werden positive Effekte auf die weltweiten Treibhausgasemissionen angestrebt. Allerdings müssen Restbiomassen aufgrund einer geringeren spezifischen Verfügbarkeit tendenziell weiter transportiert werden (Jenkins 1997; Cameron et al. 2007). Sollen in erster Linie Restbiomassen als Eingangsstoff für eine industrielle Produktion verwendet werden, ist es daher wichtig zu betrachten, wo diese in welchen Mengen anfallen. Im Folgenden werden die wichtigsten Restbiomassen für den Einsatz in Bioraffinerien kurz vorgestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2.1.1 Restholz

Holz ist sowohl in Deutschland als auch weltweit eine der am intensivsten genutzten Biomassen. Auf dem Energiemarkt spielt Holz insbesondere im Wärmesektor eine wichtige Rolle. Hier werden knapp zwei Drittel der Wärme aus erneuerbaren Ressourcen aus Festbrennstoffen, im wesentlichen Holz, gewonnen. Bei der Stromproduktion beläuft sich der Anteil der Festbrennstoffe auf etwa 10 % (FNR 2015). Zudem wird Holz in einer Vielzahl von stofflichen Produkten verwendet, etwa im Bausektor oder bei der Herstellung von Möbeln.

Als Restholz werden verschiedene Teile und Sorten von Holz klassifiziert. Unter *Waldrestholz* werden allgemein die Teile des Baumes verstanden, die bei der Holzernte im Wald verbleiben. Dabei handelt es sich um das Reisholz aus der Baumkrone und teilweise nicht aufbereitetes Derbholz kleineren Durchmessers. Die Wurzeln und der Stubben verbleiben im Wald (Kaltschmitt et al. 2009). Das Derbholz macht dabei einen Anteil von etwa 56 % der Gesamtmasse eines Baumes aus (Kramer et al. 1988). *Industrierestholz* fällt nicht im Wald, sondern bei der industriellen Weiterverarbeitung von Stammholz an. Der Großteil dieser Restholzpotentiale steht allerdings nicht für potentielle anderweitige Nutzung zur Verfügung, da das meiste Industrieholz bereits entweder stofflich (beispielsweise durch Weiterverarbeitung zu Spanplatten) oder energetisch (beispielsweise als Holzpellets) genutzt wird (Kaltschmitt et al. 2009). Nach der stofflichen Nutzung fällt weiterhin *Altholz* an. Dieses ist oftmals mit Fremdstoffen belastet, was eine weitere Nutzung erschwert (Hesse 2015; Kaltschmitt et al. 2009). Der Fokus für die industrielle Nutzung von Restholz liegt daher auf Waldrestholz, das bisher weniger umfassend genutzt wird als Industrierestholz und Altholz und damit ungehobene Nutzungspotentiale aufweist (Mantau 2012). Die Nutzung von Waldrestholz wird dabei nicht nur in Deutschland untersucht, sondern ist weltweit Gegenstand von aktueller Forschung (Akhtari et al. 2014; Anttila et al. 2015; Paiano und Lagioia 2016; Peter und Niquidet 2016; Roberts et al. 2015). Die absolut gesehen größten Waldrestholzpotentiale ergeben sich in Flächenländern mit starker Holznutzung, vor allem den USA, Russland, China, Kanada, Indien und Brasilien (BMVBS 2010).

2.1.2 Landwirtschaftliche Reststoffe

Restbiomassen aus der Agrarwirtschaft wird ein großes Potential zur Nutzung zugeschrieben (Bentsen et al. 2014; Batidzirai et al. 2016; Lecksiwilai et al. 2016; Fischer et al. 2010; Scarlat et al. 2010). Bei landwirtschaftlichen Reststoffen handelt es sich in erster Linie um *Stroh*, das bei der Getreideproduktion als Nebenprodukt anfällt (Karimi Alavijeh und Yaghmaei 2016). Um dieses Stroh nachhaltig zu nutzen und den Nähr-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

stoffgehalt im Boden langfristig zu erhalten, kann nur ein Teil des gesamten anfallenden Strohs verwendet werden (Gabrielle et al. 2014). Je nach Region und Ergiebigkeit der Böden sollten 30 bis 60 % des Strohs auf dem Feld verbleiben, um für eine ausreichende Nährstoffversorgung des Bodens zu sorgen (Hakala et al. 2009). Ähnlich wie beim Holz ergeben sich auch für Stroh zudem Nutzungskonkurrenzen, etwa durch die Verwendung von Stroh als Einstreu in der Tierhaltung oder als Futterzusatz (Thrän und Kaltschmitt 2001). Weiterhin eignet sich insbesondere Getreidestroh zur weiteren Nutzung, da es einen niedrigen Wasseranteil von lediglich etwa 20 % aufweist und daher ohne vorherige Trocknung eingelagert werden kann (Rönsch et al. 2009).

Neben Stroh aus dem Anbau von Getreide kann auch *Heu aus Grünland* als Restbiomasse weiterverwertet werden, sofern die Weiden nicht für die Haltung und Ernährung von Vieh genutzt werden. Da der Bestand an Weidetieren seit den 1990er Jahren deutlich gesunken ist (Statistisches Bundesamt 2016a) und Grünflächen vielfach nicht zu Ackerland umgebrochen werden dürfen, können die frei gewordenen Flächen zur Produktion von Heu verwendet werden (Leible et al. 2005; Rösch et al. 2005). Dabei wird je nach Region von bis zu 20 % der gesamten Grundlandflächen ausgegangen, die dann zur Bereitstellung von Biomasse für die energetische Nutzung bereitstünden (Schlager 2017).

2.1.3 Siedlungsabfall

Den mit knapp 90 % wesentlichen Anteil von Siedlungsabfällen macht der *Hausmüll* aus (Schulze 2011). Hinzu kommen hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sowie Sperrmüll (Kranert und Cord-Landwehr 2010). Ein beträchtlicher Anteil der Siedlungsabfälle ist dabei organisch und kann somit als Restbiomasse klassifiziert werden. Teile der organischen Fraktion sind im normalen Restmüll enthalten und stehen damit nicht separat zur Verfügung. Stattdessen werden diese Restbiomassen zumeist als Teil des Restmülls in Müllverbrennungsanlagen zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt. Ein Teil der organischen Siedlungsabfälle wird jedoch getrennt gesammelt, etwa in *Biotonnen*. Im Jahr 2014 fielen gut 12 % des gesamten Siedlungsabfalls, vorwiegend Küchen- und Gartenabfälle, in Biotonnen an (Statistisches Bundesamt 2016b). Das Statistische Bundesamt (2016b) führt unter dem Oberbegriff „getrennt erfasste organische Abfälle“ neben den Abfällen aus der Biotonne auch biologisch abbaubare Abfälle aus der Park- und Friedhofspflege unter Siedlungsabfällen. In dieser Arbeit werden Abfälle aus der Park- und Friedhofspflege jedoch unter Landschaftspflegematerial (siehe nächster Abschnitt 2.1.4) gefasst.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Nutzung von (biogenen) Siedlungsabfällen für die Bereitstellung von Energie (z. B. Korai et al. 2016, Smith et al. 2015, Niziolek et al. 2014, Onel et al. 2014) und anderen Produkten (z. B. Chen et al. 2016, Sadhukhan et al. 2016, Rama Mohan 2016) wird in der aktuellen Forschung ebenso betrachtet, wie die Zusammensetzung vom Hausmüll selbst (Campuzano und González-Martínez 2016).

2.1.4 Landschaftspflegematerial

Unter Landschaftspflegematerial können verschiedene Arten von Biomasse verstanden werden. Kaltschmitt et al. (2009) unterteilen das Landschaftspflegematerial in drei Untergruppen: Straßenrandgrasschnitt, Grasschnitt aus Parks, Anlagen und Friedhöfen und Grasschnitt von Naturschutzflächen.

Straßenrandgrasschnitt wird in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet, da dieser auf sehr schmalen Bereichen entlang von Straßen anfällt (6 m Breite an Bundesstraßen) und nur sehr aufwendig zu bergen ist (Prochnow 1995). Zumeist wird diese Biomasse daher gemulcht und verbleibt direkt auf den Flächen am Straßenrand, wo sie verrottet (Kaltschmitt 2013).

Grasschnitt aus Parks, Anlagen und Friedhöfen spielt ebenfalls eine untergeordnete Rolle, da deren Fläche vergleichsweise gering ist. Jedoch ergeben sich hohe Flächenerträge, da Park- oder Sportflächen oft mehrmals im Jahr gemäht werden und etwa Friedhöfe zudem extern mit zusätzlicher Biomasse „versorgt“ werden (Kaltschmitt et al. 2009).

Der dritte Bereich, in dem *Landschaftspflegematerial* im eigentlichen Sinne anfällt, sind Naturschutzgebiete. Die Ziele der Unterschutzstellung (z. B. Biotoperhalt oder die Förderung bestimmter Pflanzenarten) lassen sich vielfach nur durch Beschnitt der Biomasse erreichen oder unterstützen. Die Biomassen aus den verschiedenen Naturschutzgebieten sind sehr inhomogen. Im Vergleich zu Flächen, die direkt auf die Biomasseerzeugung ausgelegt sind, ist der Flächenertrag nutzbarer Biomasse in Schutzgebieten naturgemäß vergleichsweise gering (Kaltschmitt et al. 2009). Dennoch lassen sich beachtenswerte Erträge erzielen. Die Bandbreite reicht dabei etwa von jährlich 1,9 t/ha Trockenmasse auf bewaldeten Wiesen (Melts et al. 2013) bis zu 23 t/ha Frischmasse auf feuchten Wiesen (Prochnow 1995). Dass die Nutzung dieser Biomassen relevant ist, zeigt sich auch in der aktuellen Forschung zur Verwendung von Biomassen aus Schutzflächen in Bioraffinerien (Mapemba et al. 2007; Xu et al. 2014; Lee et al. 2013).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2.2 Ressourceneffizienz und Kaskadennutzung

Ein Problem, das sich speziell in Europa ergibt, ist die dichte Besiedlung bei hoher Industrialisierung und ein damit einhergehender hoher Nahrungsmittel-, Material- und Energiebedarf auf vergleichsweise kleinem Raum. Die europäischen Staaten allein können es daher kaum leisten, neben Nahrungsmitteln und biobasierten stofflichen Produkten auch ihren Energiebedarf, bzw. die Energie-Fehlmengen an wind- und sonnenarmen Tagen, durch Bioenergie zu decken (Trainer 2013). Folglich ist ein weiterer Ansatzpunkt für die Etablierung von bioökonomischen Prinzipien unerlässlich: die Effizienzsteigerung der Nutzung von Biomasse. Insgesamt wird diese darüber definiert, wie viel nutzbares Produkt aus einer bestimmten Menge Biomasse gewonnen werden kann (Kolinski 2013). Dies kann zum einen durch effiziente Technologien erreicht werden, die sicherstellen, dass ein hoher Anteil der Biomasse in das finale Produkt eingeht. Zum anderen kann die Effizienz von Biomasse durch eine Kaskadennutzung verbessert werden (Geldermann et al. 2016a; Haberl und Geissler 2000). Das bedeutet, dass Ressourcen nicht nur einmal, sondern mehrmals stofflich und chemisch genutzt werden, bevor sie als letzte Nutzungskaskade energetisch verwertet werden. Durch die mehrfache Verwendung der gleichen Biomasse kann vermieden werden, dass für verschiedene hierarchisch angeordnete Nutzungsoptionen jeweils „frische“ Biomasse verwendet wird.

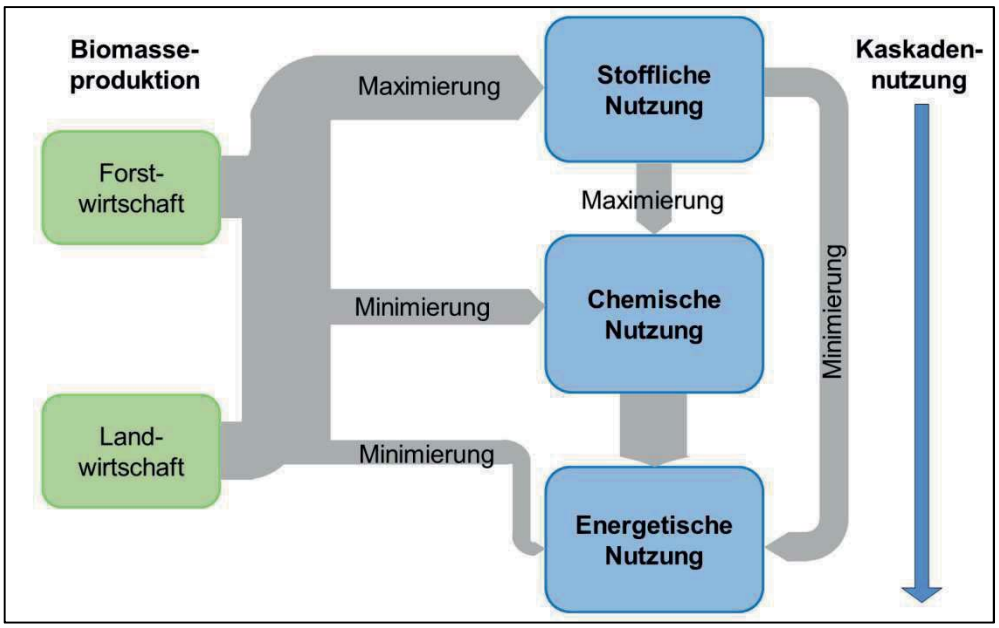

Abbildung 2-2: Optimierungsprinzipien der Kaskadennutzung in der Bioökonomie [Geldermann et al. 2016b]

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Grundsätzlich muss die Befriedigung der Nachfrage nach Nahrungsmitteln integriert mit stofflichen und energetischen Nutzungsoptionen betrachtet werden, dennoch genießt die Ernährungssicherheit stets Vorrang (Bundesministerium für Bildung und Forschung 2010). Die Optimierungsprinzipien der Biomassenutzung außerhalb der Nahrungsmittelversorgung sind in Abbildung 2-2 dargestellt. Diese Prinzipien implizieren, dass im Idealfall jeder energetischen Nutzung eine stoffliche Nutzung vorausgeht. Die direkte Nutzung von Biomasse als Energieträger sollte somit nur erfolgen, wenn die Nachfrage zur stofflichen Verwendung bereits gedeckt ist. Die stoffliche Nutzung kann dabei noch einmal in die stoffliche Nutzung im engeren Sinne sowie die chemische Nutzung unterteilt werden. Bei der stofflichen Nutzung geht die Biomasse, zumeist Holz, direkt in Produkte ein. Beispielsweise können Möbel oder andere Baustoffe, wie Spanplatten, hergestellt werden (Hesse 2015). Die chemische Nutzung bricht dagegen die Struktur der Biomasse auf Molekülebene auf und macht chemische Stoffe mit verschiedensten Eigenschaften nutzbar (Turley 2008; Wimmer und Johansson 2014). Diese Aufspaltung kann auch nach einer stofflichen Nutzung geschehen, wodurch sie hierarchisch unter der eigentlichen stofflichen Nutzung angesiedelt ist. Am Ende des Lebenszyklus der chemisch erzeugten Stoffe schließt sich die energetische Nutzung an. Eine Kaskadennutzung weist dabei nicht zwangsläufig diese drei Schritte auf, es ist ebenso möglich, dass auf einer der idealtypischen Stufen mehrere Nutzungskaskaden durchlaufen werden. Beispielsweise ist denkbar, dass ein Möbelstück zunächst zu einer Palette weiterverarbeitet wird, die dann wiederum am Ende ihrer Lebensdauer zerkleinert zur Spanplattenproduktion genutzt wird. Somit ergäben sich allein auf der Stufe der stofflichen Nutzung drei Nutzungskaskaden, bevor die ausgedienten Spanplatten in einer Bioraffinerie chemisch genutzt werden. In den vergangenen Jahren hat sich die Forschung verstärkt mit der Kaskadennutzung auseinandergesetzt. Viele Studien beschäftigen sich dabei mit der Quantifizierung von umweltrelevanten Aspekten der Kaskadennutzung (Gärtner et al. 2012; Hesse 2015; Höglmeier et al. 2015; Höglmeier et al. 2014; Sathre und Gustavsson 2006; Sikkema et al. 2013; Taskhiri et al. 2016; Werner et al. 2007; Yamashita et al. 2000).

Bioraffinerien ermöglichen dabei die chemische Nutzung von verschiedenen Biomassen. Da in Bioraffinerien die Biomasse mindestens auf Molekülebene heruntergebrochen wird, lassen sich verschiedene Biomassen einsetzen und daraus flexibel neue Produkte herstellen. Abfallstoffe können für die gleiche oder eine höhere Nutzungsstufe wieder aufbereitet werden und verbleiben so im Stoffkreislauf. Somit stellen Biomassen potentiell einen wichtigen Schritt in der Kaskadennutzung von Biomasse dar. Im folgenden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abschnitt werden daher fünf Bioraffinerie-Konzepte vorgestellt, wovon zwei eingehender beschrieben werden (Bundesregierung 2014).

2.3 Bioraffinerien

Bioraffinerien bieten die Möglichkeit, aus (Rest-)Biomassen ein Produktportfolio ähnlich dem klassischer fossiler Erdölraffinerien herzustellen. Auch die grundlegende Produktionsstruktur mit zwei Konversionsstufen, der Primär- und der Sekundärraffination, haben beide Raffineriearten gemeinsam (Behr et al. 2010). Daher sind auch die Planungsaufgaben für die Konfiguration ihrer Produktionsanlagen vergleichbar. Für beide Raffineriearten ist es von großer Bedeutung, welche Produkte in welchen Produktionseinheiten in welchen Mengen produziert werden sollen (Kiskini et al. 2015; Persson et al. 2004; Rosolio et al. 2008). Jedoch sind bei der Planung von Bioraffinerien zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen. Erdölraffinerien werden – zumindest in Deutschland – von einem einzelnen Punkt aus versorgt. Beispielsweise bezieht die Raffinerie Leuna ihren Erdöl-Input aus einer einzelnen Verbindung, der Druschba Pipeline, direkt aus Russland (Götz 2006). Ein anderes Beispiel ist die Rheinland Raffinerie, die größte Raffinerie Deutschlands, die ihr Erdöl ebenfalls aus einer Pipeline erhält, die direkt mit dem Hafen Rotterdam verbunden ist (Hensing et al. 1998). In beiden Fällen spielt jedoch der geografische Anfall des Rohstoffs Erdöl eine untergeordnete Rolle, da das flüssige Erdöl per Schiff (Siddiqui und Verma 2015) und Pipeline (Martínez-Palou et al. 2011) transportiert werden kann. Mit seiner hohen Energiedichte ist Rohöl zudem sehr transportwürdig, was die großen weltweit transportierten Mengen belegen (Wang und Lu 2015).

Anders ist dies bei Bioraffinerien, die aus der Fläche und nicht aus einem einzelnen Anschlusspunkt versorgt werden (Wright und Brown 2007). Sie sind abhängig von der Bereitstellung von Biomasse, die im großen Maßstab entsprechend große Flächen benötigt. Sollen ausschließlich Restbiomassen genutzt werden, verstärkt sich dieser Effekt aufgrund der geringeren Flächenproduktivität weiter (de Jong et al. 2010). Zudem ist die Produktion von Biomasse, beispielsweise aufgrund von Witterungseinflüssen, weit weniger genau planbar als die Gewinnung von Kohle und Erdöl.

Während das Konzept der umfassenden Nutzung von Biomassen in einem integrierten Mehrproduktsystem seinen Ursprung bereits im frühen 19. Jahrhundert hat, und somit vor der industriellen Nutzung von Kohle und Öl, wurde der Begriff Bioraffinerie in den 1990er Jahren etabliert (Kamm et al. 2010a). Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt der Forschung vor allem auf der Produktion von Kraftstoffen (Tsita und Pilavachi 2013), bei der wirtschaftlichen Produktion anderer Grundchemikalien besteht daher

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

noch Forschungsbedarf. Heute umfasst der Begriff Bioraffinerie eine Vielzahl von Konzepten, die jedoch allgemein in drei Unterkategorien eingeteilt werden: thermochemische, biochemische und physikalisch-chemische Konzepte (Maity 2015b).

Der „Arbeitskreis Roadmap Bioraffinerien“ erarbeitete im Auftrag der Bundesregierung (2014) fünf Bioraffineriekonzepte: Zucker- und Stärke-Bioraffinerien, Pflanzenöl- und Algenlipid-Bioraffinerien, Lignocellulose- und Grüne Bioraffinerien, Synthesegas-Bioraffinerien sowie Biogas-Bioraffinerien. Allen Bioraffinerien gemein ist ihre Unterteilung in primäre und sekundäre Raffinationsschritte. In der primären Raffination wird die eingehende Biomasse zu einer geringen Anzahl von Zwischenprodukten verarbeitet, darunter Kohlenwasserstoffe, Proteine, Synthesegas und einige weitere Stoffe. Diese Primärraffination bildet auch die Grundlage der Abgrenzung zwischen den fünf Raffineriekonzepten. In einem zweiten Schritt werden aus diesen Zwischenprodukten in der sekundären Raffination marktfähige Endprodukte hergestellt (Dale und Kim 2010). Dabei ergeben sich in einem Bioraffinerie-Produktionssystem typischerweise verschiedene Kuppelprodukte. Die ausschließliche Produktion eines Endprodukts ist zumeist nicht oder nur schwer möglich. Die Endprodukte von Bioraffinerien lassen sich wiederum in die beiden übergeordneten Kategorien energetisch und stofflich einteilen (Ghatak 2011). Langfristig ließen sich damit Produkte aus fossilen Raffinerien direkt oder nutzenäquivalent ersetzen (Clements und van Dyne 2010).

Bei der Anlagenplanung und der Vorbereitung einer Investitionsentscheidung sind die Kapazität und die Konfiguration der Bioraffinerieanlage ebenso zu planen wie der Standort. Anhand der Konfiguration ergibt sich das Produktspektrum. Im Folgenden werden die Synthesegas-Bioraffinerie (Abschnitt 2.3.1) und die Lignocellulose-Bioraffinerie (Abschnitt 2.3.2) näher beschrieben. Dadurch soll Verständnis für die später folgende Konfigurationsplanung der innovativen Bioraffineriekonzepte geschaffen werden. Abschnitt 2.3.3 gibt einen kurzen Überblick über die übrigen genannten Bioraffinerietypen sowie deren wichtigste Eigenschaften.

2.3.1 Synthesegasbasierte Bioraffinerien

In synthesegasbasierten Bioraffinerien wird aus Kohlenwasserstoffen Synthesegas gewonnen, das anschließend als Plattform für die Produktion marktfähiger Endprodukte dient. Unter Synthesegas wird dabei ein Gasgemisch verstanden, das im Wesentlichen aus Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2) besteht, wobei die genaue Zusammensetzung vom eingesetzten Brennstoff und der Vergasungstechnologie abhängt (Kaltschmitt et al. 2009; Brown 2010; Lv et al. 2007). Ein bekanntes Verfah-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.