Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
Institut für Produktionswirtschaft und Logistik (H73400)

Diplomarbeit

zum Thema

Design und Optimierung eines Liefernetzwerks für biogene Sekundärrohstoffe

Verfasser:

Jakob Niederwieser, BSc

Studienrichtung *Stoffliche und Energetische Nutzung Nachwachsender Rohstoffe (NAWAROS)*

Betreuer:

Univ. Prof. Dr. Manfred Gronalt
Leiter Institut für Produktionswirtschaft und Logistik

Wien, Juli 2020

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Manfred Gronalt, der meine Diplomarbeit ermöglicht, betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen, die konstruktive Kritik bei der Erstellung und die finanzielle Unterstützung meiner Forschung möchte ich mich herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern des Instituts für Produktionswirtschaft und Logistik, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht hätte entstehen können. Mein Dank geht an Frau Dr. Maria Anna Huka und Herrn DI Matthias Kaltenbrunner für ihre Informations- und Hilfsbereitschaft und Antworten auf meine Fragen.

Bedanken möchte ich mich bei allen Projektmitarbeitern und Workshop Teilnehmern des *Austrian Bio Cycles* Projekts, durch deren Mitwirken und hervorragende Zusammenarbeit meine Forschung in dieser Form ermöglicht wurde.

Ebenfalls möchte ich mich bei der HAPA Creative GmbH bedanken, die mich mit dem Zugang zu IT Hardware und deren Büroräumlichkeiten unterstützt hat. Bedanken möchte ich mich bei meinen Freunden für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Diplomarbeit in dieser Form vorliegt.

Abschließend gebührt große Dankbarkeit meiner Familie und meinen Freunden. Insbesondere bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir mein Studium durch ihre großzügige Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Jakob Niederwieser

Wien, 14.07.2020

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Kurzfassung

Aufgrund der Flächenkonkurrenz beim Anbau von Futter- und Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen zur Bioenergieerzeugung stellen organische Reststoffe der Land- und Forstwirtschaft ein vielversprechendes Rohstoffpotenzial bei der Produktion von Chemikalien zur stofflichen und energetischen Nutzung dar. In dieser Arbeit wird das Potenzial dieser sogenannten Sekundärrohstoffe erhoben und eine darauf basierende Vorgehensweise beim Design von Produktionsnetzwerken anhand einer Fallstudie entwickelt. Das gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodell der vorliegenden Arbeit ermittelt anhand einer Standort- und Kapazitätsplanung die kostenminimale Struktur eines Biomass-to-liquid Produktionsnetzwerks in Österreich. Der betrachtete Sekundärrohstoff ist Stroh aus der Landwirtschaft. Die Prozessschritte umfassen die Pyrolyse des Rohstoffs zu Slurry und eine anschließende Synthese zu Biokraftstoffen. Beim Endprodukt in der Fallstudie handelt es sich um den dieselähnlichen Stoff Dimethylether (DME), obwohl daraus noch weitere Kraftstoffarten produziert werden können. Das Modell ist als zweistufiges Facility Location Problem (FLP) formuliert. Eine Besonderheit gegenüber bestehender Literatur ist die Berechnung des Rohstoffpotenzials auf Gemeindeebene, eine modellendogene Kostenschätzung in Abhängigkeit der gewählten Anlagenkapazität und der Vergleich zweier verschiedener Logistikansätze. Dabei wird ein dezentrales mit einem zentral an einem Standort organisiertem Verarbeitungskonzept verglichen. Die Auswirkungen des regional verteilten Rohstoffaufkommens auf die Standortwahl wird anhand einer Szenariorechnung überprüft. In beiden Konzepten entstehen Produktionskosten des Biokraftstoffs von rund 1€/l, wobei das zentrale Konzept aufgrund von Skaleneffekten Vorteile bei den Gesamtkosten aufweist. Bei einer dezentralen Pyrolyse des Rohstoffs können hingegen Einsparungen bei den Transportkosten realisiert werden. Der zentrale Synthesestandort in den optimierten Konzepten wird jeweils im Bezirk Krems gewählt. Die jährlichen Gesamtverarbeitungskosten liegen im dezentralen Konzept bei 271 Mio. € bzw. im zentralen Konzept bei 254 Mio. €, wobei eine Gesamtrohstoffmenge von 1,8Mt Stroh verarbeitet und rund 205kt Biokraftstoff produziert wird.

Abstract

Due to the competition for land for the cultivation of feed and food and renewable raw materials for bioenergy production, organic residues from agriculture and forestry represent a promising raw material potential in the production of chemicals for material and energy use. In this thesis, the potential of these so-called secondary raw materials is assessed and an approach to the design of production networks based on this potential is developed using a case study. The mixed-integer linear optimization model of this thesis determines the cost-minimum structure of a biomass-to-liquid production network in Austria on the basis of site and capacity planning. The considered secondary raw material is straw from agriculture. The process steps comprise the pyrolysis of the raw material to slurry and a subsequent synthesis to biofuels. The end product in the case study is the diesel-like substance dimethyl ether (DME), although other various types of fuel can be produced from it. The model is formulated as a two-stage Facility Location Problem (FLP). A special feature compared to existing literature is the calculation of the raw material potential at the community level, a model-based cost estimate depending on the selected plant capacity and the comparison of two different logistics approaches. A decentralized processing concept is compared with a centrally organized processing concept at one location. The effects of the regionally distributed raw material supply on the choice of location are checked by means of a scenario calculation. In both concepts, production costs of the biofuel are around 1€/l, whereby the central concept has advantages in terms of total costs due to economies of scale. In contrast, decentralized pyrolysis of the raw material can lead to savings in transport costs.The location of the synthesis plant site in both concepts is chosen in the district of Krems. The total annual processing costs are €271 million in the decentralized concept and €254 million in the centralized concept, whereby a total raw material quantity of 1.8Mt straw is processed, yielding around 205kt of biofuel.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung 10

1.1 Einleitung 10

1.2 Hintergrund 11
1.2.1 Grundlagen und Ziele des Supply Chain Designs 11

1.3 Supply Chain Design in der Biomasselogistik 12

1.4 Charakteristik biogener Sekundärrohstoffe 15
1.4.1 Sekundärrohstoff als Koppelprodukt 15
1.4.2 Räumliche und zeitliche Verfügbarkeit 16
1.4.3 Lagerung von Biomasse 18
1.4.4 Menge und Dichte 19
1.4.5 Transport 19

1.5 Supply Chain Design Biomass to Liquid -Netzwerk Stroh 20
1.5.1 Problembeschreibung 20
1.5.2 Logistikkonzept - Gestaltungsoptionen 22
1.5.3 Zielsetzung 24

2 Material und Methodik 25

2.1 Potenzialbegriffe 25

2.2 Datengrundlage 25
2.2.1 Anbauflächen in Österreich 26
2.2.2 Korn-Stroh-Verhältnis 28
2.2.3 Abschlagsfaktoren technisches Potenzial 29
2.2.4 Abschlagsfaktoren relevantes Potenzial 29
2.2.4.1 Stroh als Einstreu 29
2.2.4.2 Mehrbedarf für Bioflächen 29
2.2.4.3 Humusbildung 30
2.2.4.4 Sonstige Verwendung 30

2.3 Berechnungsmethode des relevanten Potenzials auf Gemeindeebene 31

2.4 Ergebnisse Strohpotenzial Österreich 32

2.5 Räumliche Verteilung relevantes Strohpotenzial 35

2.6 Modellstruktur zur Standortplanung 36

2.7 BtL Wertschöpfungsnetzwerk mit Sekundärrohstoff Stroh 37
2.7.1 Rohstoffmenge und Bereitstellungszustand 38
2.7.2 Standortdaten 38
2.7.2.1 Rohstoffstandorte 39
2.7.2.2 Pyrolyseanlagen 39
2.7.2.3 Zentrale Syntheseanlagen 39
2.7.3 Transportdistanzen 40
2.7.4 Transportkapazitäten 40
2.7.5 Konversionsfaktoren und Produktionskapazitäten 41

2.8 Kostenschätzung der BtL Prozesskette Stroh 43
2.8.1 Investitionsschätzung 44
2.8.2 Investitionsabhängige Fixkosten 45
2.8.3 Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten 46
2.8.3.1 Rohstoffkosten 46
2.8.3.2 Transportkosten 47
2.8.3.3 Variable Pyrolysekosten 48
2.8.3.4 Variable Synthesekosten 49
2.8.3.5 Erlöse Koppelprodukt Strom 50

2.9 Mathematisches Optimierungsmodell zum Supply Chain Design 52

3 Ergebnisse 58

3.1 Basisszenario 58
3.1.1 Standortlösung dezentrales Logistikkonzept 58
3.1.2 Standortlösung zentrales Logistikkonzept 60
3.1.3 Gesamtkosten BtL-Wertschöpfungsnetzwerk 61
3.1.4 Detailkosten BtL - Wertschöpfungsnetzwerk 64

3.2 Sensitivitätsanalyse dezentrales Logistikkonzept 69
3.2.1 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse 69

3.3 Verfügbarkeitsszenarien 72
3.3.1 Szenario Rohstoffangebot: 25% 72
3.3.2 Szenario Rohstoffangebot: 50% 74
3.3.3 Szenario Rohstoffangebot: 75% 75
3.3.4 Szenario: Verfügbarkeit Pyrolyseanlagen 76

4 Diskussion und Ausblick 78

4.1 Diskussion des Optimierungsmodells 78

4.2 Diskussion der Ergebnisse der Fallstudie Stroh 81

4.3 Ausblick und zukünftige Untersuchungen 83

5 Literaturverzeichnis 86

6 Anhang 88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unternehmensplanung Struktur und Aufgaben des Supply Chain Designs 12
Abbildung 2: Schritte in einer biomassebasierten Wertschöpfungskette 12
Abbildung 3: Struktur der Biomasselogistik am Beispiel Energieerzeugung 14
Abbildung 4: Planungsaufgaben im Supply Chain Design für Biomasse 15
Abbildung 5: Räumliche Verteilung ausgewählter Sekundärrohstoffe in Österreich auf Gemeindeebene 17
Abbildung 6: Zeitliche Verfügbarkeit Sekundärrohstoffe 18
Abbildung 7: Prozessschaubild Bioliq-Verfahren 22
Abbildung 8: integriertes/zentrales Logistikkonzept für Stroh 23
Abbildung 9: dezentrales Logistikkonzept für Stroh mit regionalen Pyrolyseanlagen 24
Abbildung 10: Prozentuale Verteilung der betrachteten Ackerfläche je Bundesland. 27
Abbildung 11: Visuelle Darstellung der Ackerfläche Österreich 28
Abbildung 12: Berechnetes Strohaufkommen und Nutzungsarten. 33
Abbildung 13: Aufteilung technisches Strohpotenzial 2018 auf Bundesländerebene 34
Abbildung 14: Anteil Stroharten am Gesamtaufkommen auf Bundesländerebene. 35
Abbildung 15: gemeindespezifische Verteilung relevantes Strohpotenzial 2018 36
Abbildung 16: Modellstruktur Logistiknetzwerk, 2-stufiges Warehouse Location Problem 37
Abbildung 17: Ballenpressungsarten für Halmgut 38
Abbildung 18: Produktpfade BtL Prozesse 42
Abbildung 19: Massenstromverhältnisse für Zwischen- und Endprodukte, Hilfsmittel und Reststoffe 49
Abbildung 20: Standortlösung Pyrolyse dezentrales Konzept, Basisszenario 59
Abbildung 21: Standortlösung Synthese dezentrales Konzept, Basisszenario 60
Abbildung 22: Standortlösung Pyrolyse-Syntheseanlage zentrales Konzept, Basisszenario 61
Abbildung 23: Gesamtkosten BtL Prozesskette Stroh; dezentral (links) und zentral (rechts) 62
Abbildung 24: Gesamtkosten in Prozent - dezentral (Summe 271 Mio. €) 63
Abbildung 25: Gesamtkosten in Prozent - zentral (Summe 254 Mio. €) 63
Abbildung 26: Verarbeitungskosten pro Tonne Stroh; Lösung dezentral (links) und zentral (rechts) 65
Abbildung 27: Verarbeitungskosten pro Tonne Stroh in Prozent - dezentral (Summe 159 €/t Stroh) 66
Abbildung 28: Verarbeitungskosten pro Tonne Stroh in Prozent - zentral (Summe 150 €/t Stroh) 66
Abbildung 29: Auswertung Sensitivitätsanalyse Gesamtkosten; dezentrales Logistikkonzept 70

Abbildung 30: Gesamtkostenvariation bei veränderten Pyrolysekosten (fix & variabel); dezentrales Konzept ... 71
Abbildung 31: Standortlösung dezentrales Konzept bei 25% Rohstoffverfügbarkeit ... 73
Abbildung 32: Standortlösung zentrales Konzept bei 25% Rohstoffverfügbarkeit. ... 73
Abbildung 33: Standortlösung dezentrales Konzept bei 50% Rohstoffverfügbarkeit ... 74
Abbildung 34: Standortlösung zentrales Konzept bei 50% Rohstoffverfügbarkeit ... 74
Abbildung 35: Standortlösung dezentrales Konzept bei 75% Rohstoffverfügbarkeit ... 75
Abbildung 36: Standortlösung zentrales Konzept bei 75% Rohstoffverfügbarkeit ... 76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betrachtete Feldfrüchte zur Erhebung des Strohpotenzials ... 26
Tabelle 2: Korn: Stroh Verhältnis ausgewählter Kulturpflanzen ... 28
Tabelle 3: Mengen in Tonnen FM pro Jahr & prozentuale Anteile der Nutzungsarten Stroh ... 33
Tabelle 4: Transportkapazitäten Strohballen und Slurry ... 41
Tabelle 5: Konversionsfaktoren Bioliq Verfahren, bezogen auf Trockensubstanz ... 41
Tabelle 6: Bestimmung Anlagenkapazität dezentrale Pyrolyseanlagen ... 43
Tabelle 7: investitionsabhängige Kosten in Prozent der Gesamtinvestition ... 46
Tabelle 8: Rohstoff- /Stroherfassungskosten ... 47
Tabelle 9: Fixe und variable Transportkosten Stroh und Slurry ... 47
Tabelle 10: Preise und Kosten von Hilfsmitteln und Reststoffen ... 50
Tabelle 11: Kostenstruktur zentrales/dezentrales Logistikkonzept für Sekundärrohstoff Stroh ... 51
Tabelle 12: Kostenstruktur zentrales/dezentrales Logistikkonzept für Sekundärrohstoff Stroh ... 52
Tabelle 13: Modellnotation ... 53
Tabelle 14: Detailergebnisse Verarbeitungskosten bis Pyrolyse pro Tonne Stroh; dezentrales und zentrales Konzept ... 67
Tabelle 15: Detailergebnisse Verarbeitungskosten pro t Stroh ab Slurrytransport; dezentrales und zentrales Konzept ... 67
Tabelle 16: Gesamtverarbeitungskosten BtL-Produktionsnetzwerk ... 68
Tabelle 17: Gesamtkostenvariation bei veränderten Pyrolysekosten (fix & variabel); dezentrales Konzept ... 71
Tabelle 18: Detailkosten; in Abhängigkeit von Pyrolyseanlagenzahl ... 76
Tabelle 19: Standortlösung Pyrolyseanlagen in Abhängigkeit von Pyrolyseanlagenzahl ... 77
Tabelle 20: Standortlösung der Syntheseanlage in Abhängigkeit von Pyrolyseanlagenzahl ... 78
Tabelle 21: Potenzielle Synthesestandorte ... 88
Tabelle 22: Ausgangsdaten Investitions- und Kostenschätzung ... 89
Tabelle 23: Kapitalwert und Annuitäten bei versch. Biokraftstoffpreisen (ohne Steuern); Zinssatz 3%; Beobachtungszeitraum 20 Perioden/Jahre ... 89

1 Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Aufgrund der stetig steigenden Energienachfrage, der Knappheit fossiler Ressourcen und jüngster Entwicklungen bezüglich Klimawandel steht die Gesellschaft sowohl vor ökologischen als auch ökonomischen Herausforderungen.

Das Konzept der biobasierten Industrie und Forschungsaktivitäten in diesem Fachgebiet zielen im Wesentlichen auf eine verstärkte und möglichst vollständige Nutzung von biogenen Rohstoffen ab. Dabei spielt die stoffliche Nutzung und somit die Herstellung von Basischemikalien aus biogenen Rohstoffen eine zentrale Rolle. Dadurch können je nach Ausgestaltung des technoökonomischen Systems Substitutionspotenziale gegenüber fossilbasierten Stoffen oder Produkten realisiert werden. Unter dem Aspekt der Flächenkonkurrenz bei der Produktion von Nahrungs- bzw. Futtermitteln und dem Anbau von Rohstoffen zur energetischen und stofflichen Nutzung, stellt die Nutzung von biogenen Sekundärrohstoffen eine Möglichkeit der nachhaltigen Rohstoffnutzung ohne zusätzlichen Flächenbedarf dar.

Die dezentrale Verteilung und die saisonale Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen spielt bei der Ausgestaltung von wirtschaftlichen Liefer- und Produktionsnetzwerken und somit bei deren Nutzbarmachung eine wesentliche Rolle. Um diese Rahmenbedingungen beim Design von Wertschöpfungsnetzwerken miteinzubeziehen, werden verstärkt Logistikkonzepte mit dezentralen Vorbehandlungstechnologien beforscht (Leible *et al.*, 2006, 2007; Kappler, 2008; Kerdoncuff, 2008; Schwaderer, 2012; Becker et al., 2019). Dabei sollen etwaige Vorteile einer dezentralen gegenüber einer zentralen Nutzung mit Großanlagen erarbeitet und beurteilt werden.

Basierend auf einem Sekundärrohstoffaufkommen soll eine Standort- und Kapazitätsplanung mittels gemischt-ganzzahliger linearer Optimierung Ergebnisse bezüglich der räumlichen Ausgestaltung, Lieferschemata, Anlagenkapazitäten und Gesamtkosten eines Biomass-to-liquid Wertschöpfungsnetzwerk zur Produktion von Biokraftstoffen liefern.

1.2 Hintergrund

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die Theorie der Unternehmensplanung und einen Überblick der planungsrelevanten Begrifflichkeiten innerhalb einer Supply Chain zur Nutzung von biogenen Rohstoffen.

1.2.1 Grundlagen und Ziele des Supply Chain Designs

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die grundlegende Methodik zur strategischen Planung von biomassebasierten Wertschöpfungsketten.
In der Unternehmensplanung werden grundsätzlich drei Planungsebenen unterschieden. Diese werden als strategische (langfristig), taktische (mittelfristig) und operationale (kurzfristig) Ebene bezeichnet. Die strategische Planung bildet die Grundlage für den gesamten Supply-Chain-Prozess. Entscheidungen auf der Strategieebene sind in der Regel der erste Schritt zur Entwicklung eines Wertschöpfungsprozesses. Die strategische Planung befasst sich mit Fragen wie der Wahl des Standorts und des Verwendungszwecks von Anlagen, der Schaffung eines Netzwerks von Lieferanten und Lagerhaltung, langfristigen Prozessverbesserungen und mögliche Innovationen. Darüber hinaus werden Entscheidungen betreffend Produktion, Logistik, Forschung und Entwicklung gefällt sowie Informationen zu Möglichkeiten der Finanzierung und des Absatzes von Gütern generiert. Ziel der strategischen Unternehmensplanung ist die langfristige Sicherung von Existenz und Erfolg der Unternehmung sowie die Schaffung und Realisierung von Erfolgspotenzialen bei sich verändernden Rahmenbedingungen (Kerdoncuff, 2008; Schwaderer, 2012). Diese erste, strategische Phase des Supply Chain Managements wird auch *Design*-Phase genannt. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau der Unternehmensplanung und die darin enthaltenen Aufgaben des Supply Chain Designs (Abbildung aus: SCM Plus Unternehmensberatung, 2020).

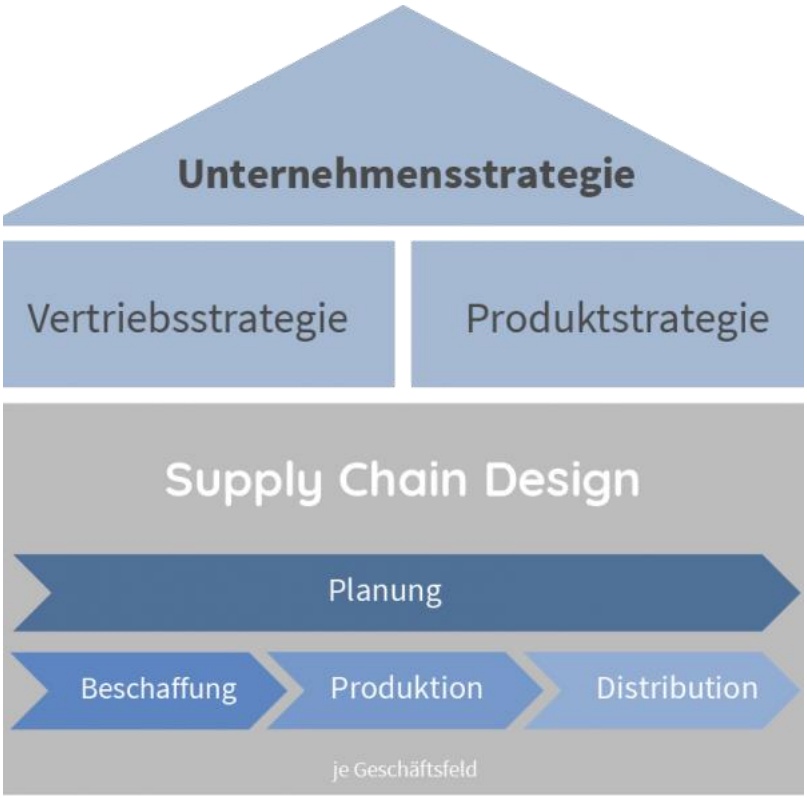

Abbildung 1: Unternehmensplanung Struktur und Aufgaben des Supply Chain Designs

1.3 Supply Chain Design in der Biomasselogistik

Grundsätzlich basiert die Planung einer Supply Chain zur stofflichen oder energetischen Nutzung biogener Rohstoffe auf der räumlichen Verteilung von Biomasse (Schwaderer, 2012). Dabei wird der Begriff einer sogenannten *Bereitstellungskette* als Synonym für eine Supply Chain verwendet. Entlang dieser Kette folgen aufeinander die Schritte Biomasseproduktion, Ernte bzw. Bereitstellung, Vorbehandlung und Versorgungssysteme, Konversion zu bestimmten Zwischen- oder Endprodukten und Absatz. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den schematischen Ablauf einer *Biomasse Supply Chain* (Abbildung aus: Kaltschmitt et al., 2016).

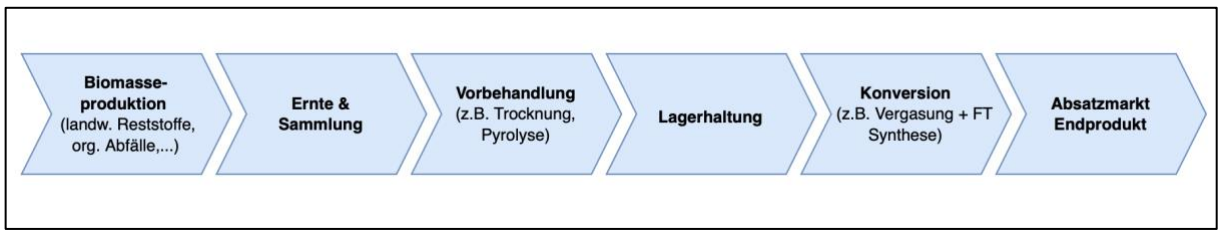

Abbildung 2: Schritte in einer biomassebasierten Wertschöpfungskette

Entlang der Supply Chain wird ausgehend von einer Rohstoffquelle die Biomasse geerntet und für den Transport in geeigneter Form bereitgestellt. Je nach Menge und Lagerfähigkeit der produzierten Biomasse kann eine Lagerhaltung benötigt werden. Diese kann entweder direkt am Anfallsort des Rohstoffs, in Sammelzentren oder auch am Ort der Konversion der Biomasse installiert werden. Die Vorbehandlung der Biomasse macht diese überhaupt erst lager- bzw. transportfähig und überführt diese in ein Zwischenprodukt für die spätere Weiterverarbeitung. Im Konversionsschritt werden aus dem Zwischenprodukt bzw. aus der Biomasse unter Anwendung bestimmter Technologien ein oder mehrere Produkte erzeugt, die im letzten Schritt in einem Absatzmarkt nachgefragt und über eine Distributionsebene verteilt werden.

Ergänzend zur obigen Erklärung beschreiben Kaltschmitt et al. (2016) den Begriff der *Bereitstellungskette* für Biomasse zur Produktion von Energieträgern. Dabei ist das Ziel einer solchen Bereitstellungskette eine bestimmte Nachfrage nach einem Produkt zu erfüllen, indem die dazu erforderlichen Konversionsanlagen mit der dafür erforderlichen Menge, Qualität und zum erforderlichen Zeitpunkt mit Biomasse versorgt werden. Diese Aufgaben werden auch zusammenfassend als *Biomasselogistik* bezeichnet. Eine Bereitstellungskette von Biomasse besteht nach dieser Definition aus den Schritten Biomasseproduktion bzw. -aufkommen, Bereitstellung, Nutzung/Konversion sowie Verwertung der anfallenden Koppelprodukte bzw. Reststoffe. Oft bestehen diese genannten Schritte wieder aus vielen Einzelprozessen und unterscheiden sich je nach verwendeter Biomasseart und eingesetzter Konversionstechnologie. Üblicherweise finden die genannten Schritte nicht alle am gleichen Ort statt, wodurch ein Transport von Biomasse und/oder Zwischenprodukten innerhalb dieser Bereitstellungskette notwendig ist. In Abbildung 3 ist die generelle Struktur der Biomasselogistik dargestellt. Diese unterteilt sich grob in die Ebenen *Aufkommen, Bereitstellung* und *Nutzung.*

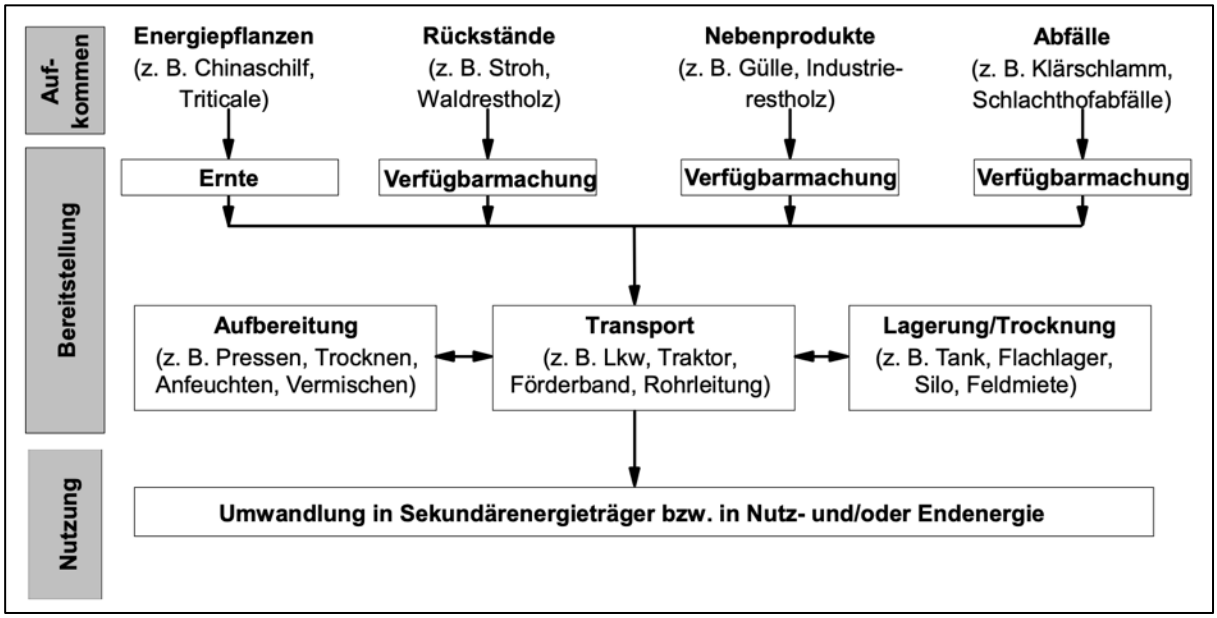

Abbildung 3: Struktur der Biomasselogistik am Beispiel Energieerzeugung

Je nach Bereitstellungskonzept und betrachteter Biomasse werden die einzelnen Teilschritte aus Abbildung 3 (Abbildung aus: Kaltschmitt et al., 2016) gewählt und in einem Logistikkonzept optimal miteinander kombiniert.

Schwaderer (2012) nennt in seiner Arbeit die aufeinander folgenden Schritte Biomasseernte bzw. -erfassung, Vorbehandlung (Zerkleinern, Trocknen, Mahlen) und thermochemische (z.B. Pyrolyse, Vergasung) oder biochemische (z.B. Fermentation, anaerobe Gärung) Stoffumwandlungsprozesse zur Verarbeitung der Biomasse in Zwischen- oder Endprodukte und definiert somit die Bereitstellungskette. Vorbehandlungsschritte bzw. Zwischenprodukte weisen oft eine höhere Kompaktheit oder sogar (Energie-)Dichte als die ursprüngliche Biomasse auf, wodurch Kosteneinsparungen im Transport erwartet werden. Beispiele hierfür sind etwa Konzentrate wie z.B. Zuckerdicksaft aus Rüben und Zuckerrohr oder Pyrolyseöle (Schwaderer, 2012; Kaltschmitt et al., 2016).

Eine Bereitstellungskette wird also im weitesten Sinne durch die Systemgrenzen „Biomasseangebot“ und „(End-)Produktnachfrage“ definiert und beschreibt Teilprozesse, die innerhalb dieser Systemgrenzen durchlaufen werden. Darüber hinaus haben ökologische, ökonomische, technische und soziale Faktoren Einfluss auf die Rahmenbedingung bzw. auf die praktische Umsetzbarkeit. Als Beispiele hierfür sind etwa Schwankungen von Biomasseangebot und -qualität, Rohstoffkonkurrenz, Wahl der Konversionstechnologie, rechtliche Bestimmungen und die Verwendung und Entsorgung von Koppelprodukten und

Reststoffen (z.B. Kreislaufwirtschaft) zu nennen. Zusätzlich muss die letztendlich gefundene Kombination dieser Faktoren ökonomisch tragfähig, rechtlich konform und sozial akzeptabel sein.

Abbildung 4 zeigt die strategischen Planungsaufgaben, die in einer biomassebasierten Wertschöpfungskette miteinander in Wechselwirkung stehen und unter Annahme einer Zielfunktion kombiniert und gelöst werden sollen (Abbildung aus: Schwaderer, 2012).

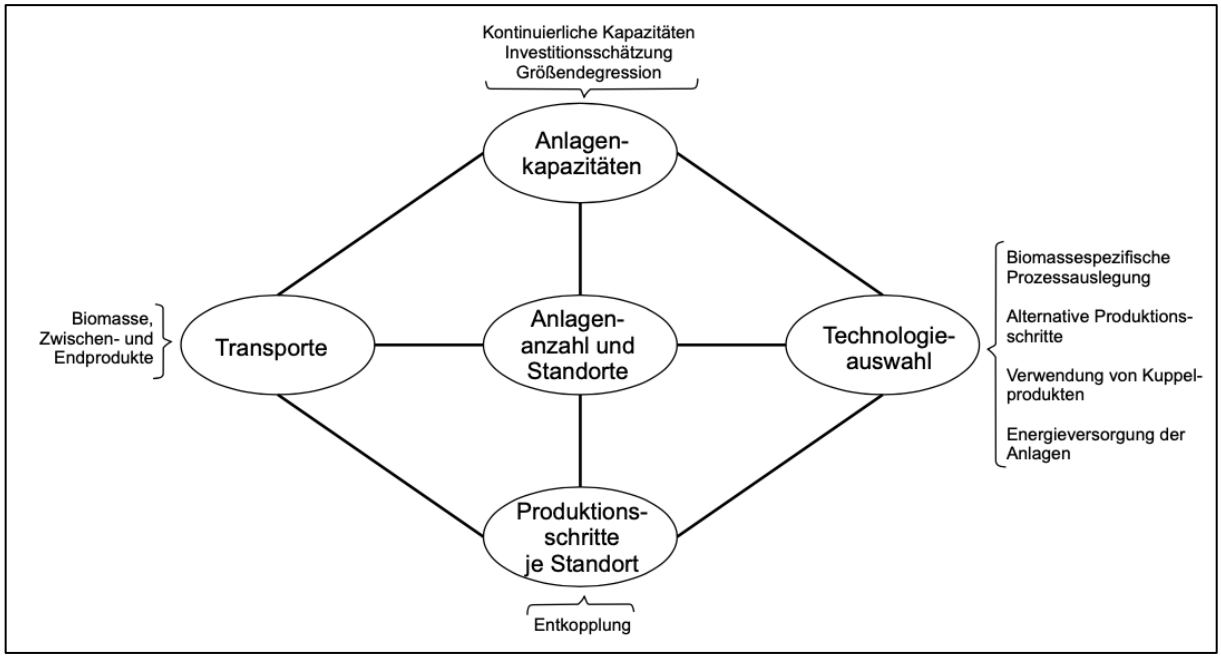

Abbildung 4: Planungsaufgaben im Supply Chain Design für Biomasse

1.4 Charakteristik biogener Sekundärrohstoffe

Biomasse weist als natürlicher, nachwachsender Rohstoff eindeutige Eigenschaften auf, die Einfluss auf die Planung von Bereitstellungsketten bzw. auf die Mobilisierung der Biomasse innerhalb eines Logistiknetzwerks haben. Diese zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen werden in diesem Kapitel erläutert. Eine Mengenanalyse zu Sekundärrohstoffen ist im Abschlussbericht des Projektes *Austrian Bio Cycles* (ABC) in Kapitel 2 zu finden (Reinberg *et al.*, 2020).

1.4.1 Sekundärrohstoff als Koppelprodukt

Als Koppelprodukt sind biogene Sekundärrohstoffe stark abhängig von der Produktion des eigentlichen Primärrohstoffs/-produkts. Vorgaben, die das Primärprodukt betreffen, wirken

sich auf das Koppelprodukt aus. Hier sind die anfallende Menge, Qualität, Bereitstellungsmöglichkeiten und zeitliche Verfügbarkeit zu erwähnen. Beispielsweise zählen Entwicklungen in der Erntetechnologie der Landwirtschaft zu diesen Faktoren, welche Auswirkungen auf die oben genannten Eigenschaften des Koppelprodukts haben können. Je nach Rohstoffart beeinflussen unterschiedliche Entwicklungen in der Technologie, aber auch in rechtlichen, sozialen oder ökonomischen Belangen dessen Eigenschaften und Nutzungsmöglichkeiten.

1.4.2 Räumliche und zeitliche Verfügbarkeit

Geografische Gegebenheiten, Besitzverhältnisse von landwirtschaftlichen Flächen, deren Verteilung über eine Region und wechselnde Bewirtschaftungsformen ergeben eine dynamische Situation bezüglich *wo* und *wann* welche Menge und Qualität einer bestimmten Biomasse – folglich auch des Sekundärrohstoffs- verfügbar ist. Abbildung 5 zeigt anhand von Punktverteilungen das Aufkommen vier ausgewählter Sekundärrohstoffe in Österreich. Eine detaillierte Mengenanalyse ist in Reinberg *et al.*, (2020) Kapitel 2 zu finden. In der Karte sind mögliche Standorte für Bioraffinerien und Standorte für potenzielle Endkunden eines Produkts eingezeichnet. Als Endkunden kommen unter anderem Unternehmen der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in Frage und wurden die Standorte anhand Internetrecherchen ausgewählt. In dieser Arbeit wird eine Distribution der erzeugten Produkte in den Absatzmarkt (Endkunden; Konsumenten) nicht betrachtet. Das heißt, das Logistiknetzwerk endet an der Syntheseanlage.
Die Informationen der Abbildung 5 stellen kein berechnetes Endergebnis dar, sondern dienen als visuelle Darstellung der Ausgangslage zum Supply Chain Design und zeigt die Komplexität bei der Planung eines Logistiknetzwerks von biogenen Sekundärrohstoffen. Das Vorgehen bzw. die Kriterien bei der Auswahl der potenziellen Standorte werden im Kapitel 2.8.1 behandelt.

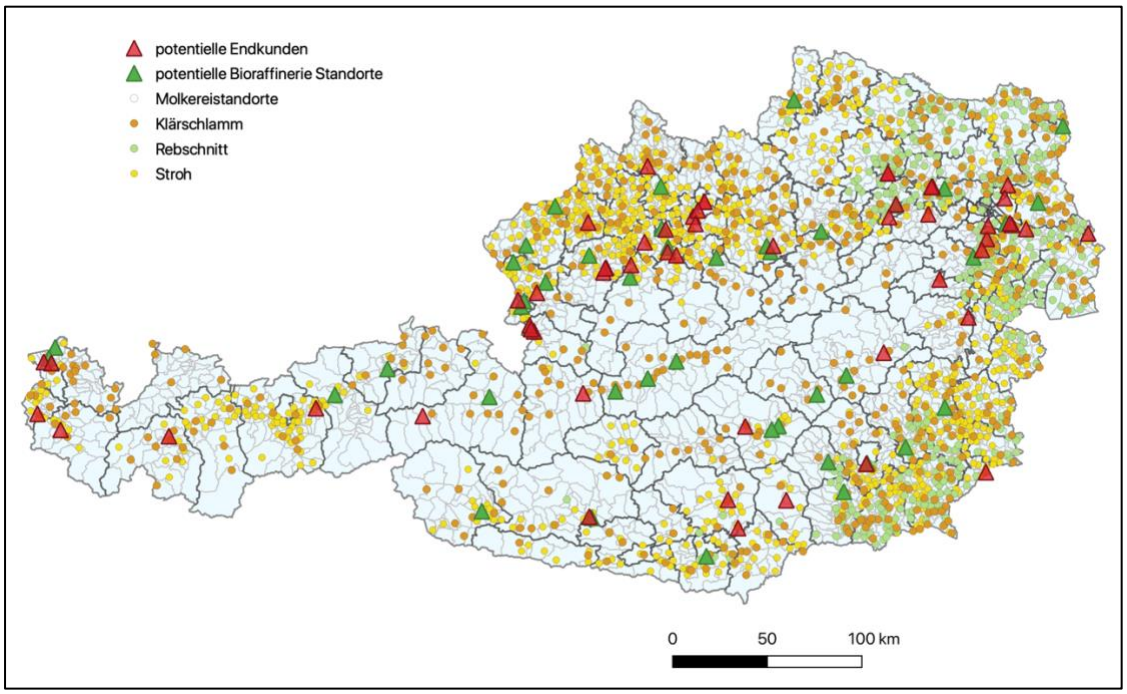

Abbildung 5: Räumliche Verteilung ausgewählter Sekundärrohstoffe in Österreich auf Gemeindeebene

Die obige Karte in Abbildung 5 zeigt die gemeindespezifisch verorteten Sekundärrohstoffe *Stroh, Rebschnitt, Klärschlamm* und *Molkereireststoffe.* Es zeigt sich eine deutlich je nach Rohstoff typische, räumliche Verteilung. Die zeitliche Verfügbarkeit der einzelnen Sekundärrohstoffe ist abhängig von der Produktion des Primärprodukts. Diese Primärprodukte sind in diesem Beispiel Milch- und Käseprodukte, Wein bzw. Trauben und Getreide. Klärschlamm steht dabei nicht direkt in Verbindung mit einem Primärprodukt, wird aber aufgrund seines hohen Energie- und Nährstoffgehalts und seiner Charakteristik als biogener Reststoff ebenfalls betrachtet. Man kann annehmen, dass Klärschlamm und Molkereireststoffe regelmäßig und ganzjährlich anfallen. Stroh und Rebschnitt hängen von Erntezeitpunkt des Getreides bzw. Zeitpunkt des Rebschnittes ab. Generell gilt bei biogenen Rohstoffen, dass deren zeitliche Verfügbarkeit saisonal schwankt oder sich zumindest auf wenige Wochen bis Monate beschränkt. In Abbildung 6 ist die zeitliche Verfügbarkeit dieser vier Sekundärrohstoffe im Jahresverlauf dargestellt (Reinberg *et al.*, 2020). Die Bedeutung der Rohstoffverfügbarkeit in der Biomasselogistik im nächsten Absatz näher erläutert.

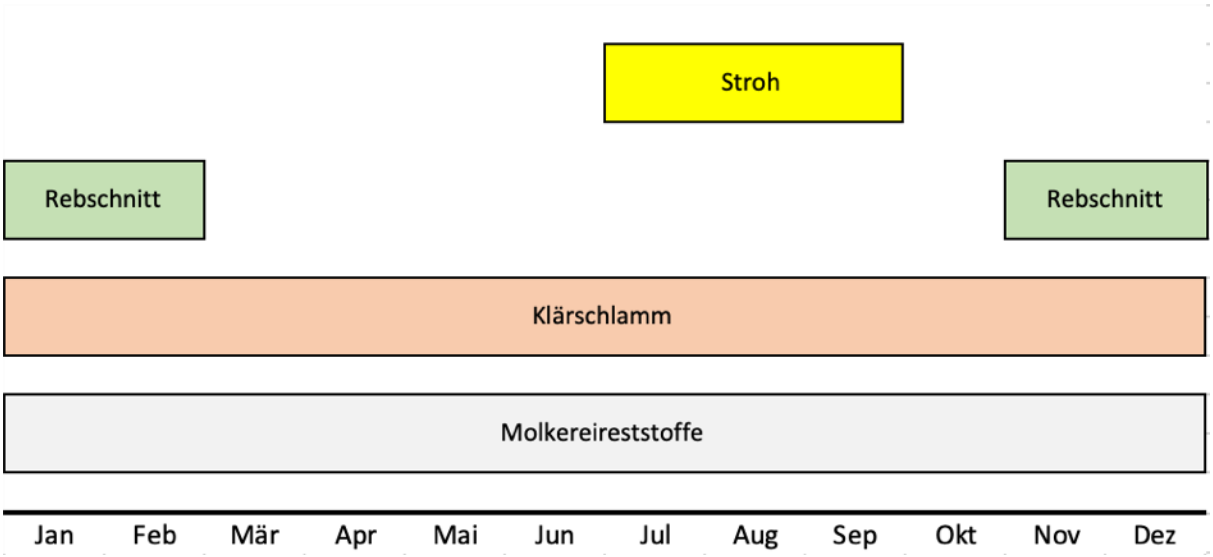

Abbildung 6: Zeitliche Verfügbarkeit Sekundärrohstoffe

1.4.3 Lagerung von Biomasse

Die Lagerung von Biomasse ist ein integraler Bestandteil der Biomasselogistik, welchem aus unterschiedlichen Gründen besondere Bedeutung zukommt. Bedingt durch den saisonalen Biomasseanfall, welcher oft nicht mit dem Zeitpunkt der Biomassenutzung übereinstimmt, dient die Lagerung der Überbrückung einer Zeitspanne. Ziel ist eine sichere Rohstoffversorgung von Zwischenhandel oder der Konversionsanlage selbst. Je nach zeitlichem Biomasseangebot und Biomassenachfrage ergeben sich Möglichkeiten der kurz-, mittel- oder langfristigen Lagerstrategie. Die Wahl der geeigneten Lagerstrategie ermöglicht es, saisonal anfallende Biomasse ganzjährlich für eine Lieferung bereitzustellen.

Während der Lagerung von biogenem Material finden immer natürliche, biologische Vorgänge statt. Diese können zum einen die Qualität negativ beeinflussen (z.B. biologische Abbauprozesse wichtiger Inhaltsstoffe, Schwund) oder zum anderen zu Sicherheitsproblemen führen (z.B. Selbstentzündung von Hackgut). Lagerverfahren und -techniken sind dementsprechend zu wählen, um eine Minimierung dieser unerwünschten Nebeneffekte zu erzielen (Kaltschmitt et al., 2016; Wimmer et al., 2011).

1.4.4 Menge und Dichte

In Abbildung 5 ist deutlich zu erkennen, wie sich das Angebot von Biomasse über ein großes Flächengebiet verteilt. Dabei spielt neben der dezentralen (regionalen) Verteilung von Biomasse auch die Größenordnung der anfallenden Mengen eine Rolle. Je feiner die betrachtete Planungsebene zur Analyse des Biomasseangebots gewählt wird (vgl. Bezirks- zu Gemeindeebene), desto geringere Mengen fallen pro betrachtetem Angebotspunkt im Netzwerk an. Die Komplexität der Planung von Bereitstellungsketten für Biomasse wird also um eine mengenmäßig unterschiedliche Verteilung ergänzt.

Ein weiterer Aspekt, der berücksichtigt werden muss, ist die Dichte der bereitgestellten Rohstoffe. Diese bestimmt die benötigten Lager- und Transportkapazitäten und beeinflusst somit das gesamte Bereitstellungskonzept (Kaltschmitt et al., 2016). Beispielsweise hat Slurry (=Pyrolyseöl) eine ca. 10 bis 15-mal höhere Dichte als Strohballen (~0,15 t/m3). Slurry lässt sich daher kompakter lagern und kostengünstiger bzw. über weitere Entfernungen transportieren als Stroh (Leible *et al.*, 2007). Bei der Planung einer optimierten Bereitstellungskette für Biomasse kann durch die Wahl einer geeigneten Aufbereitungsform unter Berücksichtigung standort- und biomassespezifischer Rahmenbedingungen die Dichte eines Rohstoffs erhöht werden, wodurch sich transportwürdigere Eigenschaften des Rohstoffs ergeben. Dabei muss jedoch der geringere Transportaufwand die Kosten einer teureren Vorbehandlung bzw. Verdichtung des Rohstoffs kompensieren, um eine optimale Logistik ermöglichen zu können.

1.4.5 Transport

Das Systemelement *Transport* dient der physischen Verknüpfung einzelner Prozessschritte innerhalb der Bereitstellungskette. Die Transportart ist abhängig von physikalischen und chemischen Eigenschaften der zu transportierenden Biomasse. Darüber hinaus beeinflussen die Eigenschaften der Biomasse die Auslastung und somit die Effizienz der Transportmittel. Zum Beispiel ist beim Transport von Strohrundballen auf Anhängern weder eine Volumen- noch Massenvollauslastung gegeben. „In diesem Kontext ist es die Aufgabe der Logistik, einerseits das am besten geeignete […] Transportmittel und andererseits die optimal an die […] Brennstoffeigenschaften angepasste Konfiguration der jeweiligen Transportmittel zu identifizieren und dadurch die Kosten innerhalb des Gesamtbereitstellungskonzeptes zu minimieren.“ (vgl. Kaltschmitt et al., 2016: 177). Die Transportmittel inklusive Kapazität,

welche im Modell dieser Arbeit eingesetzt werden, sind in Kapitel 2.8 erläutert. Die Mengenanalyse aus Reinberg *et al.*, 2020 empfiehlt aufgrund von Mengenaufkommen, Nutzbarkeit und vorhandener Forschungsliteratur hinsichtlich des Sekundärrohstoffs die Untersuchung von *Stroh* als Rohstoff zur Nutzung und Verwertung in einem Liefernetzwerk.

1.5 Supply Chain Design Biomass to Liquid -Netzwerk *Stroh*

Folgendes Kapitel definiert die Rahmenbedingungen beim Design eines Logistiknetzwerks für den Anwendungsfall *Reststroh.* Es werden die Ausgangslage, eingesetzte Verfahren und angewandte Logistikkonzepte für diese Problemstellung erläutert. Diese Fallstudie wird anschließend in Kapitel 2.10 in ein Logistikmodell implementiert und gelöst.

1.5.1 Problembeschreibung

Neben der Verbrennung von Stroh zur Energiegewinnung kommt der Produktion von synthetischen Biotreibstoffen und anderen biobasierten Chemikalien zur stofflichen Nutzung sowohl in der Literatur als auch in der Praxis der letzten Jahre besondere Bedeutung zu. Die dafür verwendeten Verfahren zählen zur *Biomass to Liquid (BtL)* Technologie. Dabei wird über thermochemische Umwandlungsprozesse lignozellulosische Biomasse in Synthesegas überführt. Dieses Gas dient im weiteren Schritt der Herstellung synthetischer Kraftstoffe oder anderen Chemikalien. Die Verwendung von biogenen Sekundärrohstoffen stellt dabei eine Möglichkeit der Nutzung von Biomasse dar, welche nicht in Konkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion steht und somit eine nachhaltige Möglichkeit zur Substitution von fossilbasierten Produkten darstellen kann (Kappler, 2008).
Die Prozesse zur Herstellung von Syntheseprodukten aus biogenen Rohstoffen sind im Vergleich zu den „klassischen“ Nutzungskonzepten (z.B. Verbrennung) mit einem höheren verfahrenstechnischen Aufwand verbunden, welcher im kostenintensiven Prozessschritt der Gasaufbereitung und -reinigung sowie der Synthese und Produktaufbereitung liegt. Ökonomische und die Verfahrenseffizienz betreffende Vorteile ergeben sich, wenn dieser Schritt im Rahmen einer Großanlage mit dementsprechend höherer Kapazität realisiert wird. Hier sind Größendegressions- und Skaleneffekte auf der ökonomischen und Prozesseffizienz auf der technischen Seite vorteilhaft. Dieser Prozessschritt kann auch in bestehende technische Infrastruktur der Chemie- oder Ölindustrie aber auch in biotechnologische oder natürliche Ressourcen verarbeitende Industrie (z.B. Papier- Zellstoffindustrie, Holzindustrie) integriert

bzw. mit diesen kombiniert werden (Kappler, 2008). Um die eben genannten Vorteile einer Großanlage der Vergasung und Synthese realisieren zu können, bedarf es einer Rohstofflogistik, welche hinreichend große Mengen an kostengünstigem Rohstoff bereitstellen kann. Die dezentral bzw. regional in geringen Mengen anfallende Biomasse muss für die Weiterverarbeitung gebündelt und somit über weite Strecken transportiert werden. Der Transport über große Distanzen von biogenen Rohstoffen zur energetischen Nutzung wird kritisch diskutiert. Der Grund liegt bei der im Vergleich zu fossilen Brennstoffen niedrigen Energiedichte von biogenen Brennstoffen. Für die stoffliche Nutzung von biogenen Rohstoffen gilt dieselbe Annahme, wenn man die im Gegensatz zu fossilbasierten Rohstoffen geringeren Produktausbeuten ausgehend vom eingesetzten Rohstoff betrachtet. Eine Erhöhung der Energie- bzw. Transportdichte des betrachteten Rohstoffs kann diesem Nachteil entgegenwirken. Eine höhere Transportdichte kann durch den Einsatz unterschiedlicher Vorbehandlungstechnologien erreicht werden. Beispiele hierfür sind die Trocknung auf einen geringeren Wassergehalt, eine kompaktere Pressung von Strohballen oder eine Konversion zu Pyrolyseöl. Laut einer Schätzung nach Leible *et al.*, 2007 macht die Bereitstellung von Biomasse 50% - 60% der Produktionskosten synthetischer Biokraftstoffe aus. Eine wirtschaftliche Mobilisierung des Biomassepotenzials und das Design einer effizienten Sammel- und Transportlogistik spielt somit eine entscheidende Rolle bei der Herstellung synthetischer Biokraftstoffe. Die Forschung untersucht unter diesen Gegebenheiten verstärkt den Ansatz von dezentralen Verarbeitungskonzepten von Biomasse (Leible *et al.*, 2006, 2007; Kappler, 2008; Kerdoncuff, 2008; Lange, 2008; Dahmen *et al.*, 2012a; Schwaderer, 2012).

Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Logistik- und Produktionskonzept wird die Verarbeitung von Stroh im Zuge der Bioliq Technologie des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) untersucht. Dieses Verfahren kann grundlegend in zwei Prozessschritte eingeteilt werden. Der erste Verarbeitungsschritt ist die Pyrolyse. Bei dieser wird die Biomasse in das Zwischenprodukt Pyrolyseöl überführt, welches mit Teilen aus dem Prozess stammendem Koks zu einer Suspension vermischt und als *Slurry* bezeichnet wird. Dieser Slurry ist lager- und pumpfähig, besitzt eine ca. 10-mal höhere Energiedichte als Stroh und weißt somit Vorteile für einen wirtschaftlicheren Transport auf. Im zweiten Verfahrensschritt wird dieser Slurry in einer Syntheseanlage zu BtL-Kraftstoffen weiterverarbeitet. Eine detaillierte Prozessbeschreibung des Bioliq - Prozesses findet sich in den Arbeiten von Leible *et al.*, 2007; Kappler and Leible, 2011; Dahmen *et al.*, 2012, Schwaderer, 2012 und Trippe, 2013.

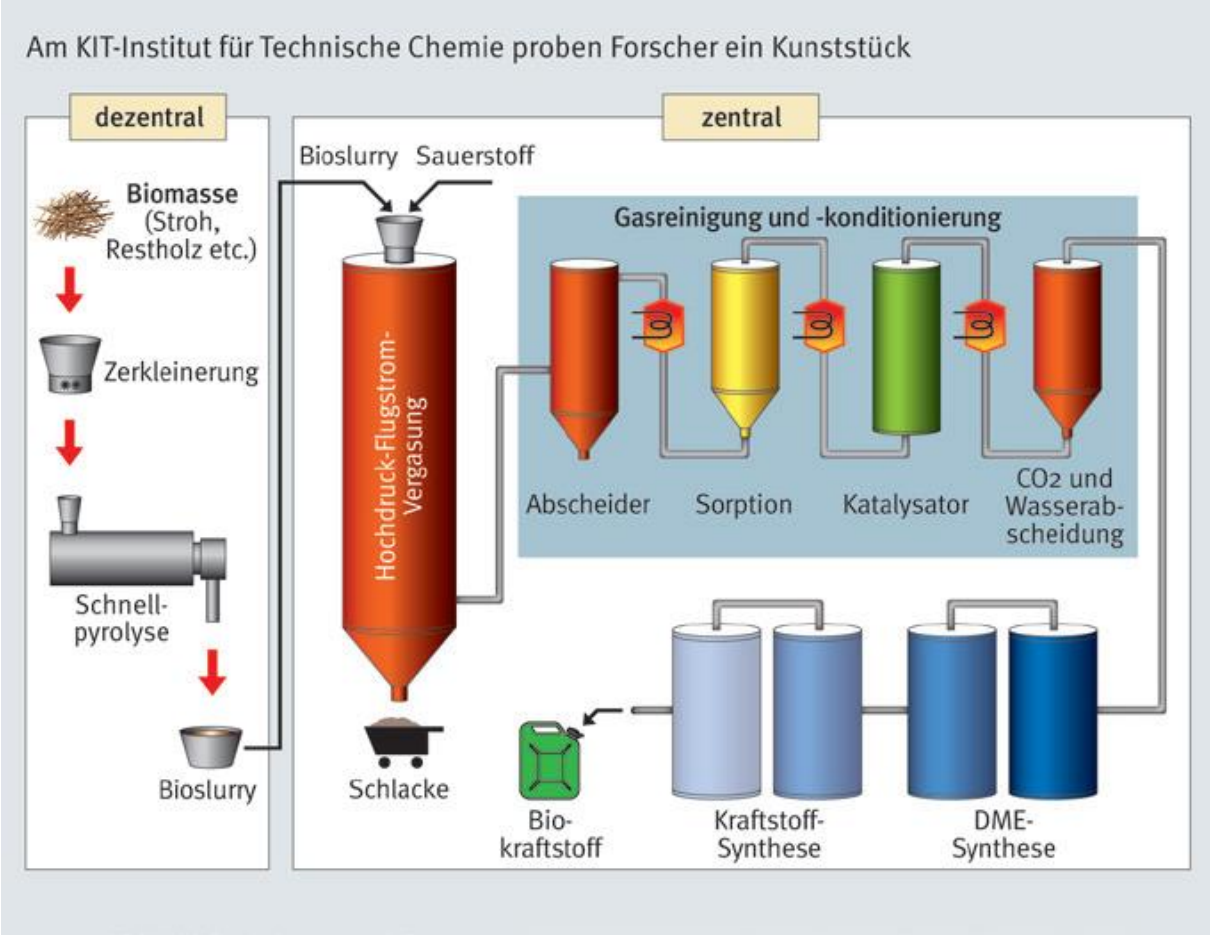

Abbildung 7: Prozessschaubild Bioliq-Verfahren

In Abbildung 7 ist das Bioliq Verfahren dargestellt (Abbildung aus: KIT, 2018). Hierbei folgt auf eine dezentrale Pyrolyse die zentrale Synthese. In diesem zentralen Verfahrensschritt wird mittels Hochdruck-Flugstrom-Vergasung das erzeugte Synthesegas gereinigt und für den (die) anschließende(n) Syntheseschritt(e) vorbereitet. Anschließend folgt ein bzw. folgen mehrere Syntheseschritte, welche das gewonnene Synthesegas zum Endprodukt umwandeln. Dabei kann je nach Anforderungen an das Endprodukt aus unterschiedlichen Produktrouten gewählt werden. Eine detaillierte, verfahrenstechnische Beschreibung ist der Arbeit von Dahmen et al. (2012) und Trippe (2013) zu entnehmen. Die für das Supply Chain Design relevanten Konversionsfaktoren von Input- zu Output-Mengen der jeweiligen Prozessschritte sind in Kapitel 2.8.5 angeführt.

1.5.2 Logistikkonzept - Gestaltungsoptionen

Die räumliche Gestaltung dieser Prozessschritte betreffend wird zunächst ein *dezentrales* und ein *zentrales* Logistikkonzept betrachtet. In späterer Folge kann mit Hilfe eines

Optimierungsmodells das kostenminimale Design unter Annahme von definierten Systemgrenzen ermittelt werden. Bei der *zentralen* Version des Logistikkonzepts erfolgt der Biomassetransport direkt an eine zentrale Pyrolyse- und Syntheseanlage, welche sich an einem Standort befinden. In Abbildung 8 ist das zentrale Logistikkonzept basierend auf dem regionalen Strohaufkommen dargestellt (Steffl, 2019, eigene Darstellung; QGIS). Dabei werden die gemeindespezifischen Mengen an relevantem Strohpotenzial direkt einer zentralen Pyrolyse- und Syntheseanlage zugeteilt. In diesem Szenario ist zu erwarten, dass ein Biomassetransport über weite Strecken durchzuführen ist und somit höhere Kosten durch den Transport entstehen können. Die Biomassebereitstellungskette ist technologieunabhängig und kann auf andere Biomassearten oder Konversionstechnologien angewandt werden.

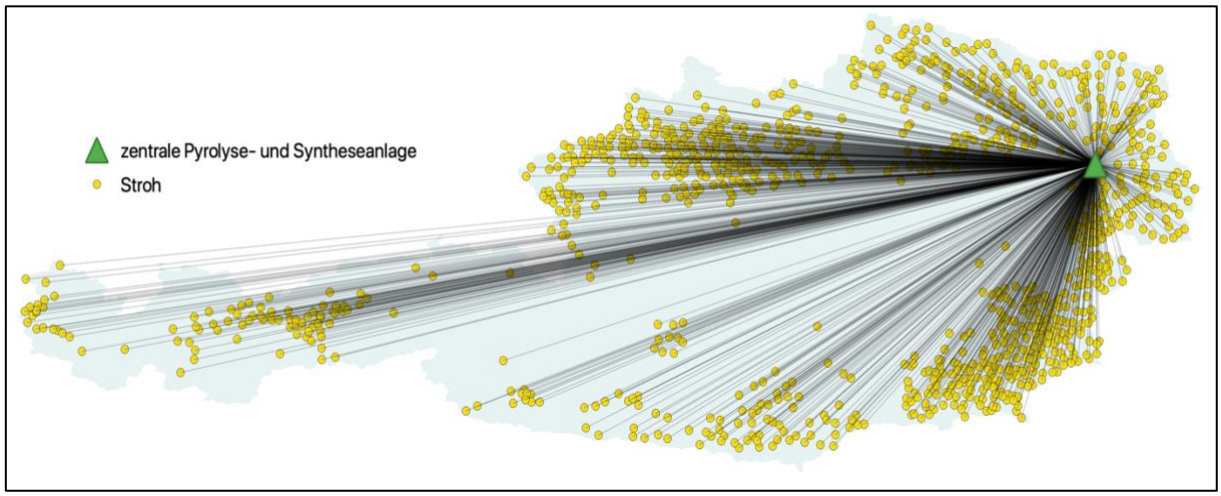

Abbildung 8: integriertes/zentrales Logistikkonzept für Stroh

Abbildung 9 zeigt schematisch das Konzept eines dezentralen Logistiknetzwerks, ebenfalls basierend auf dem relevanten Strohpotenzial auf Gemeindeebene (Steffl, 2019, eigene Darstellung; QGIS). Der produzierte Slurry wird in einer zweiten Distributionsstufe zu einer zentralen Syntheseanlage für die Weiterverarbeitung transportiert. Über eine solche Vorbehandlung der Biomasse mittels Pyrolyse soll ein kompakterer bzw. dichterer und in Folge transportwürdigerer Zwischenstoff zu einer Kostenreduktion im Transportnetzwerk führen (vgl. Leible *et al.*, 2006; Kappler, 2008; Kerdoncuff, 2008; Lange, 2008; Dahmen *et al.*, 2012a; Schwaderer, 2012).

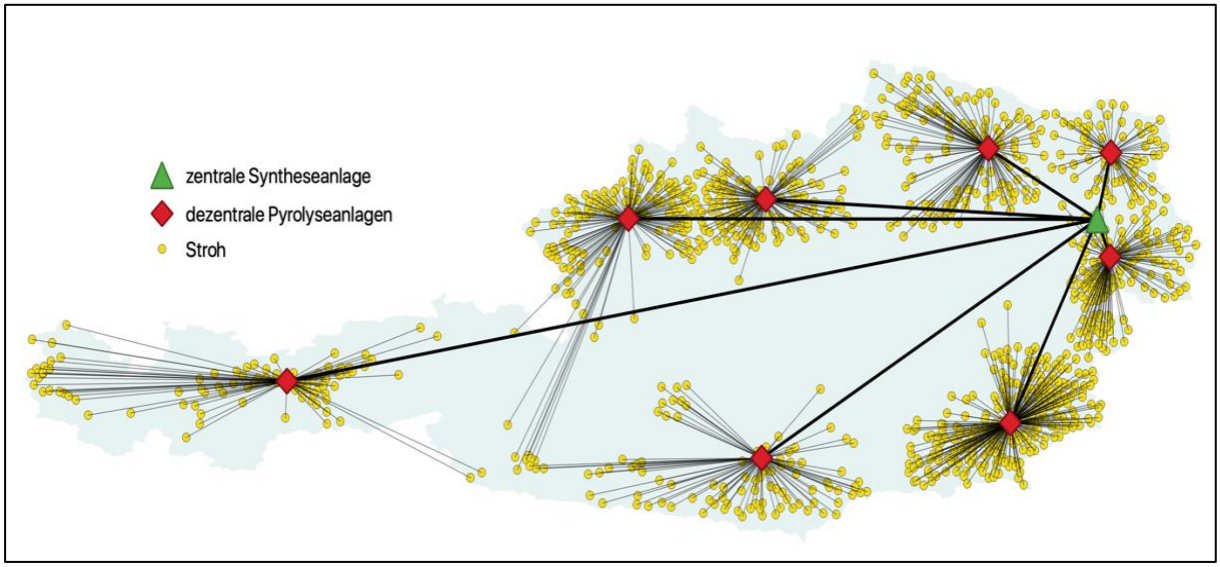

Abbildung 9: dezentrales Logistikkonzept für Stroh mit regionalen Pyrolyseanlagen

In dieser Arbeit wird Reststroh der österreichischen Landwirtschaft als eingesetzter Rohstoff untersucht. Stroh ist nicht nur für das betrachtete Verfahren besonders geeignet, sondern stellt auch mengenmäßig und als leicht zugängliche Ressource eine interessant Ausgangssituation bei der Untersuchung von Logistiknetzwerken zur Verarbeitung von biogenen Sekundärrohstoffen dar. Bereitstellungsform (z.B. Ballen, loses Stroh) und die Eigenschaften des Rohstoffs *Stroh* sind in Kapitel 2.8 erläutert.

1.5.3 Zielsetzung

In dieser Arbeit wird mittels eines logistischen Planungsmodells eine kostenminimale Wertschöpfungskette bzw. ein Logistik- und Produktionsnetzwerk mittels optimierter Kapazitäts- und Standortplanung von Pyrolyseanlagen und einer zentralen Syntheseanlage zur Produktion von Biokraftstoffen aus Stroh ermittelt. Dies soll unter Berücksichtigung der diskutierten Aspekte und anhand der Datengrundlage aus Kapitel 2 durchgeführt werden und mit den Ergebnissen eines zentralen Logistikkonzepts (Pyrolyse & Synthese an einem Standort) verglichen werden.

2 Material und Methodik

Im folgenden Kapitel wird auf die verwendeten Daten und deren Berechnung und auf Methoden und Modelle der strategischen Kapazitäts- und Standortplanung eingegangen und die Systemgrenzen für die Modellplanung gezogen. Darüber hinaus werden die für die Modellberechnung benötigten Ausgangsdaten und Parameter erklärt und dargestellt.

2.1 Potenzialbegriffe

Bevor eine strategische Planung zur stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse durchgeführt werden kann, müssen die Potenziale zu verfügbaren Mengen an Rohstoff erhoben werden. In der Literatur werden folgende Potenzialbegriffe unterschieden.
Das *theoretische* Potenzial beschreibt jene Menge an Biomasse, welche insgesamt physisch in einem bestimmten Zeitraum in einer Region produziert wird. Diese Menge ist die Obergrenze der nutzbaren Menge an Biomasse. Aufgrund von technischen, administrativen oder ökologischen Gründen kann nur auf einen bestimmten Teil des theoretischen Potenzials zugegriffen werden. Dieser zugängliche Teil wird folglich als *technisches* Potenzial bezeichnet. Das ist jener Teil, welcher unter technischen Gegebenheiten eingebracht werden kann. Von diesem *technischen* Potenzial werden noch jene Mengen abgezogen, welche einer direkten Nutzung zugeordnet werden (z.B. Einstreu, Futter, etc.) (Moser, 2012; Schwaderer, 2012; Kaltschmitt et al., 2016). Die somit berechnete Menge an Restbiomasse wird in dieser Arbeit als *relevantes* Potenzial bezeichnet. Detaillierte Berechnungswege sind dem Kapitel 2.3 zu entnehmen.

2.2 Datengrundlage

Als Datengrundlage zur Erhebung der Ackerfläche dient die Agrarstrukturerhebung inklusive Bodennutzungsdaten der Statistik Austria aus dem Jahr 2010 (Statistik Austria, 2010). Dies sind die aktuellsten Daten, welche offiziell auf Gemeindeebene vorliegen. Neben den Daten zur Anbaufläche unterschiedlicher Kulturpflanzen werden Daten der Fruchterntestatistik aus dem Jahr 2018 herangezogen (Statistik Austria, 2018). Durch Kombination dieser beiden Datenbanken und unter Anwendung Feldfrucht-spezifischer Korn/Stroh-Ertragsfaktoren aus der Literatur wird ein Strohertrag in Tonnen pro Jahr der jeweiligen Feldfrucht geschätzt.

Für die Berechnung des Strohpotenzials werden folgende Feldfruchtarten aus der Datenbank der Statistik Austria berücksichtigt und sind in Tabelle 1 zusammengefasst:

Tabelle 1: Betrachtete Feldfrüchte zur Erhebung des Strohpotenzials

Brot- und Futtergetreide (ohne Mais):	**Ölfrüchte:**
Winterweichweizen	Sojabohne
Sommerweichweizen	Raps
Winterhartweizen	Sonnenblume
Sommerhartweizen	Ölkürbis
Dinkel	Mohn
Roggen	**Eiweißpflanzen:**
Wintermenggetreide	Ackerbohne
Wintergerste	Körnererbsen
Sommergerste	Weitere Hülsenfrüchte
Triticale	**Hanf & Hopfen:**
Hafer	Hanf
Rispenhirse	Hopfen
Sommermenggetreide	
Mais:	
Körnermais	

In der Fruchterntestatistik (Statistik Austria, 2018) wird Brot- und Futtergetreide zusammen betrachtet, Mais hingegen aufgrund der großen Menge separat ausgewiesen. In der Flächenstatistik (Statistik Austria, 2010) wird jedoch zwischen Anbauflächen für Brotgetreide und Anbauflächen für Futtergetreide inklusive Mais unterschieden. Für die Berechnung und Verteilung der Strohmengen auf die Gemeinden werden somit die Flächendaten von Brot- und Futtergetreide aus der Datenbank entnommen und um jene Strohertragsdaten von Mais ergänzt (Steffl, 2019).

2.2.1 Anbauflächen in Österreich

Die Anbaufläche auf Gemeindeebene stammt aus der Agrarstrukturerhebung 2010. Dabei werden die Flächendaten von Brot- und Futtergetreide berücksichtigt. Die in dieser Arbeit

berücksichtigte Gesamtfläche beläuft sich auf 814.859 Hektar. Die Anbaufläche pro Gemeinde wird darüber hinaus als Prozentanteil der Gesamtertragsfläche angegeben und dient als „Verteilungsschlüssel“ für das technische Potenzial auf die jeweilige Gemeindeanbaufläche. Abbildung 10 zeigt die prozentuale Verteilung der betrachteten Ackerfläche auf Bundeslandebene.

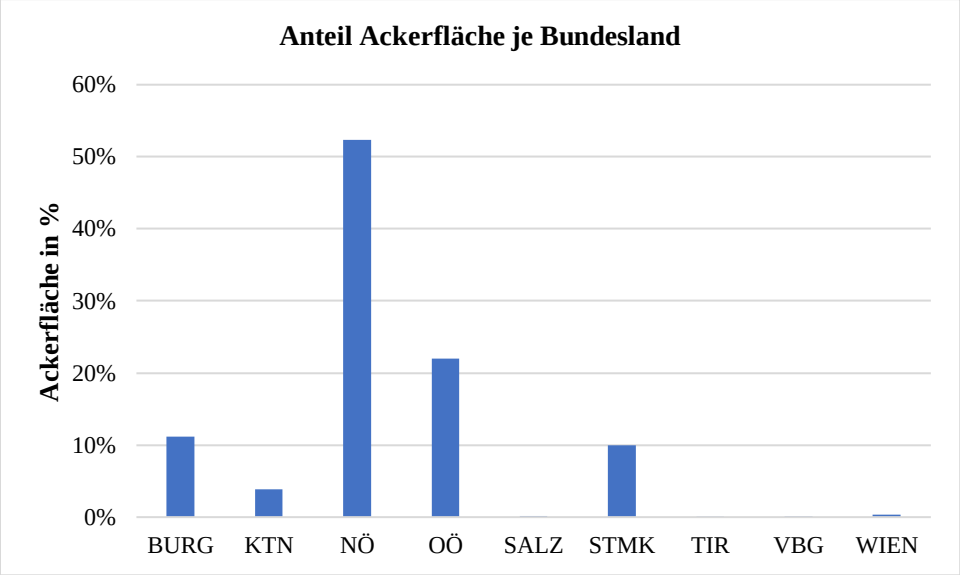

Abbildung 10: Prozentuale Verteilung der betrachteten Ackerfläche je Bundesland.

In Abbildung 11 ist die Verteilung der Ackerfläche in Österreich dargestellt. Basierend auf dem Corine Landcover Datensatz 2018 (Umweltbundesamt et al., 2018) wurde mit dem Nutzungscode „211 Ackerland (unbewässert)“ die Ackerfläche in einem GIS Programm visualisiert. Dabei handelt es sich jedoch nicht nur um die Getreideanbauflächen, sondern um die gesamte Ackerfläche und soll der Nachvollziehbarkeit der räumlichen Verteilung der Anbaugebiete dienen.

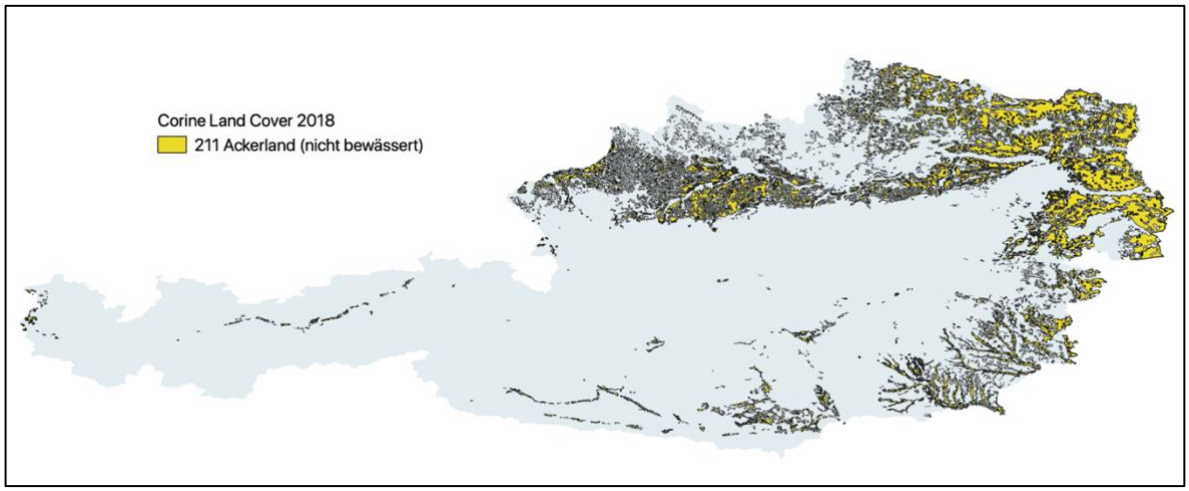

Abbildung 11: Visuelle Darstellung der Ackerfläche Österreich

2.2.2 Korn-Stroh-Verhältnis

Um den Strohertrag abschätzen zu können, werden je nach Kulturart spezifische Faktoren eingesetzt. Dieses Korn/Stroh Verhältnis wird mit der geernteten Menge der Feldfrucht multipliziert und ergibt somit die Strohmenge. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die verwendeten Korn/Stroh Verhältnisse.

Tabelle 2: Korn: Stroh Verhältnis ausgewählter Kulturpflanzen

Getreideart	**Korn:Stroh Verhältnis***	**Quellenangabe**
Brot- und Futtergetreide	1:0,76	(Kaltschmitt, Hartmann and Hofbauer, 2016), (Steffl, 2019)
Körnermais	1:0,95	(Fleschhut and Ostertag, 2017), (Steffl, 2019), (Neugschwandtner, Buerstmayr and Kaul, 2019)
Ölfrüchte	1:2,07	(Steffl, 2019)
Eiweißpflanzen	1:1	(Steffl, 2019)
Hopfen & Hanf	1:6,96	(Steffl, 2019)

*gemittelte Werte aus versch. Quellen

2.2.3 Abschlagsfaktoren technisches Potenzial

In dieser Arbeit wird das technische Potenzial bestimmt, indem das berechnete theoretische Potenzial mit der tatsächlich geernteten Strohmenge verglichen wird. Dabei ergibt sich eine um 21,2% vom theoretischen Potenzial reduzierte Menge. Diese Berechnung beruht auf Daten aus der Getreidestrohernte (Steffl, 2019). Ein Abschlagsfaktor von diesen 21,2% wird auf alle Kulturpflanzen zur Berechnung des technischen Potenzials angewandt. Bei der Erntestatistik für Getreidestroh ist der Ernterücklass auf dem Feld bereits berücksichtigt. Somit setzen sich die 21,2% aus Ernterücklass am Feld und möglichen Schwund der Erntetechnologie zusammen (Moser, 2012; Steffl, 2019).

2.2.4 Abschlagsfaktoren relevantes Potenzial

Um direkte Nutzungsarten von Stroh zu berücksichtigen, wird das technische Potenzial erneut um eine bestimmte Menge reduziert. Die so berechnete Menge gibt die für eine in dieser Arbeit zur Verfügung stehende *relevante* Menge wieder. Dabei werden direkte Nutzungen von Stroh als Einstreu und ein erhöhter Bedarf als Ernterücklass am Feld berücksichtigt.

2.2.4.1 Stroh als Einstreu

Der direkten Nutzung von Stroh als Stalleinstreu kommt eine große Bedeutung zu. In der Literatur kommen verschiedene Berechnungsmethoden zum Einsatz, welche unterschiedliche Werte für die als Einstreu verwendete Menge liefern. Grundlage dabei ist der je nach Viehhaltung unterschiedliche Bedarf an Stroh pro Groß-Vieh-Einheit (GVE). Eine genaue Berechnung der benötigten Einstreumengen basierend auf GVE finden sich in den Arbeiten von Kappler (2008), Kerdoncuff (2008), Schwaderer (2012) und Moser (2012). Zur Vereinfachung der Berechnung in dieser Arbeit wird eine benötigte Einstreu von 40% angenommen.

2.2.4.2 Mehrbedarf für Bioflächen

Da die biologische Landwirtschaft besonderen Regeln und Richtlinien zur Bodendüngung unterliegt, wird angenommen, dass der Einsatz von mineralischem Dünger auf diesen Flächen nicht möglich ist. Dadurch ergibt sich eine Menge an Stroh, welche nicht vom Feld dieser biologischen Anbauflächen abgeführt werden kann, da es für die Bodendüngung bzw.

Humusbildung benötigt wird. Moser (2012) schätzt in seiner Berechnung des freien Strohpotenzials den Anteil an biologischen Flächen auf knapp 12%. Dieser Anteil wird im Zuge der Verortung auf Gemeindeebene vom dort technisch verfügbaren Potenzial abgezogen. Eine genau Zuordnung der Bioflächen auf die Gemeinden wurde hierbei nicht durchgeführt, lediglich wurde über alle Gemeinden eine um 12% geringere Strohmenge angenommen (Steffl, 2019).

2.2.4.3 Humusbildung

Unter der Annahme, dass Stroh, welches als Einstreu verwendet wird, auch wieder über Mistausfuhr auf das Feld ausgetragen und somit in den Boden als Nährstofflieferant zurückgeführt wird, ist in dieser Arbeit keine separate Verwendung von Stroh als Humusbildner bzw. Dünger berücksichtigt. Jedoch gibt es eine Reduktion des theoretischen Potenzials aus rein erntetechnischen Gründen. Diese Menge wird am Feld gelassen und dient der Nährstoff- und Kohlenstoffrückführung im Boden. Der Anteil, der durch Ernterücklass am Feld belassen wird, wurde durch Vergleich der theoretischen Strohmenge und tatsächlich geernteter Strohmenge berechnet und beläuft sich nach Steffl (2019) auf rund 21 Prozent.

2.2.4.4 Sonstige Verwendung

Weitere das Strohpotenzial mindernde Faktoren sind etwa die direkte Verbrennung in Fernwärmeheizkraftwerken und Schwankungen der Erträge wie Ernteausfälle, Dürre, Brände oder Auswinterungen. Moser (2012) bezifferte die für die Verbrennung benötigte Strohmenge im mit knapp 15.000 Tonnen, was bei einem berechneten theoretischen Potenzial von 2,43 Mt Erntemasse (15% H_2O) lediglich 0,6% ergibt. Durch den im Vergleich zu anderen biogenen Brennstoffen hohen Asche-, Stickstoff- und Chlorgehalt ist die herkömmliche Verbrennung von Stroh als Energieträger aus prozesstechnischer Sicht weniger geeignet. Deshalb wird auch der Anteil der Verbrennung von Stroh in dieser Arbeit nicht berücksichtig und kann aufgrund des geringen Anteils an der Gesamtmenge vernachlässigt werden (Kappler, 2008). Ein Strohhandel bzw. Mengenflüsse zwischen den Gemeinden wird ebenso vernachlässigt, da es sich um eine Gesamtbetrachtung des Strohpotenzials handelt und der Rohstoffursprungsort für die Logistik ausschlaggebend ist. Ein internationaler Rohstoffhandel über die Grenzen Österreichs und damit verbundene Mengenänderungen werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Wimmer, Hohensinner and Eikemeier, (2011) geben einen Überblick über die Nutzung von

Stroh als Dämmstoff in Österreich. Die Autoren diskutieren verfügbare Strohmengen, Anforderungen an Zertifizierungssystem und Logistikkonzepte zur Nutzung von Stroh als Dämmstoff. Aufgrund des relativ hohen Bedarfs an Dämmstoffen wird die Nutzung von Stroh als Dämmstoff nicht vom relevanten Potenzial abgezogen, sondern stellt ein alternatives Nutzungskonzept für den Rohstoff *Stroh* dar. Logistikkonzepte zur Nutzung von Stroh als Dämmstoff sind (Wimmer et al., 2011) zu entnehmen.
Um saisonal schwankende Mengen und etwaige Verluste verschiedener Verfahrensschritte (z.B. Ernte, Transport, Verladen, Zerkleinern, Vorbehandlung, etc.) zu berücksichtigen, wird ein Abschlagsfaktor von 4% verwendet.

2.3 Berechnungsmethode des relevanten Potenzials auf Gemeindeebene

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie das im Modell verwendete Mengenpotenzial an verfügbarem Rohstoff *Stroh* erhoben wird. Das Ergebnis ist eine Liste österreichischer Gemeinden mit den jeweiligen Werten zu Getreideanbauflächen in Hektar und den zugeordneten Mengen an Stroh sowohl in Frischmasse (FM; 14w% Wasser) und in Trockenmasse in Tonnen pro Jahr. Die Daten liegen aggregiert auch auf Bezirks- bzw. Bundeslandebene vor, kommen aber in dieser Form bei der Modellierung nicht zum Einsatz. Im Zuge eines von der Forschungsförderungsgesellschaft Österreich (FFG) unterstützten Projektes zur Untersuchung von Nutzungspotenzialen von biogenen Sekundärrohstoffen in Österreich wurden von Projektpartnern extern der Universität für Bodenkultur Wien die relevanten Daten erhoben und eine Berechnung von Mengenpotenzialen durchgeführt, welche in diesem Kapitel beschrieben wird. Neben Begriffsdefinitionen der unterschiedlichen Mengenpotenziale wird auf deren genaue Berechnungsmethodik eingegangen. Dafür werden Abschlagsfaktoren für bereits nachweislich existierende Nutzungen definiert, welche schrittweise auf die Mengenpotenziale angewandt werden, um schlussendlich die frei verfügbare Strohmenge angeben zu können. Abschließend werden die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt, auf Gemeindeebene verortet und die räumliche Verteilung der Mengen visualisiert.
Der nächste Abschnitt beschreibt die Berechnungsmethode des relevanten Strohpotenzials auf Gemeindeebene. Im Vergleich zu Berechnungsschemata aus der Literatur (Leible *et al.*, 2007; Kerdoncuff, 2008; Moser, 2012; Schwaderer, 2012; Kaltschmitt et al., 2016) wurde in dieser Arbeit versucht, eine vereinfachte Berechnungsmethode zu entwickeln. Zu Beginn werden die Daten aus der Fruchterntestatistik betrachtet. Basierend darauf ergibt sich durch Multiplikation

mit dem Korn/Stroh – Verhältnis (Kapitel 2.3.2) ein Strohertrag pro Erntemenge der jeweiligen Feldfruchtart. Diese Menge wird über die Bundesländer aufsummiert und mit dem Abschlagsfaktor des technischen Potenzials multipliziert. Es ergibt sich eine Schätzung des technischen Potenzials je Feldfrucht pro Jahr. Durch Summenbildung der Strohmengen je Feldfrucht und Einteilung in Nutzpflanzengruppen ergibt sich das geschätzte technische Potenzial. Die Formeln (2.1), (2.2) und (2.3) beschreiben die schrittweise Berechnung des *theoretischen*, *technischen* und *relevanten* Strohpotenzials unter Anwendung der in Kapitel 2.3.4 definierten Abschlagsfaktoren.

Berechnungsmethode relevantes Strohpotenzial:

$\sum$ (Erntemenge je Feldfrucht auf Bundesländerebene)
x feldfruchtabhängiges Korn/Stroh Verhältnis
= theoretisches Potenzial je Feldfrucht [t/a] (2.1)

$\sum \sum$ (Theoretisches Potenzial je Feldfrucht
x (1 - Abschlagsfaktor technisches Potenzial))
x gemeindespezifischer Flächenverteilungsschlüssel
= *gemeindespezifisches technisches Potenzial* (2.2)

x (1 – Abschlagsfaktor Einstreu)
x (1 – Abschlagsfaktor Bioflächen)
x (1 – Abschlagsfaktor sonst. Verluste)
= gemeindespezifisches relevantes Potenzial [t/a] (2.3)

2.4 Ergebnisse Strohpotenzial Österreich

Nach der Berechnungsmethodik aus dem vorigen Kapitel ergibt sich ein österreichweites theoretisches Strohpotenzial von rund 4,9Mt FM. Das entspricht rund 4,3Mt Trockenmasse (TM) bei einem Wassergehalt der Frischmasse von 14 Prozent. Das technische Potenzial beläuft sich auf rund 3,9Mt FM bzw. 3,35Mt TM. Das schlussendlich relevante Strohpotenzial ergibt österreichweit rund 1,8Mt FM bzw. 1,5Mt TM. Abbildung 12 zeigt das Gesamtstrohaufkommen und die Aufteilung nach berücksichtigten Nutzungsarten. Bezogen auf das theoretische Strohpotenzial (Gesamtaufkommen) ergeben sich für das relevante Strohpotenzial rund 38%. Gemessen am Gesamtaufkommen ergeben sich für Mehrbedarf in

Bioflächen rund 9%, für den Einstreubedarf 32% und für den Feldrücklasse bei der Ernte rund 21%.

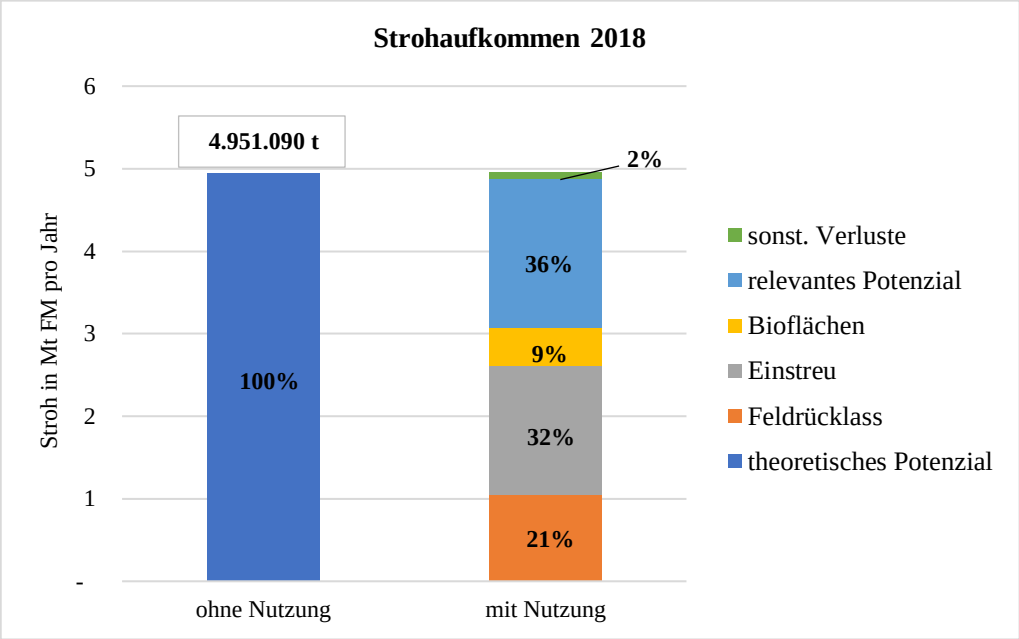

Abbildung 12: Berechnetes Strohaufkommen und Nutzungsarten.

Tabelle 3 zeigt die detaillierten Zahlenwerte des Strohaufkommens nach der oben dargestellten Berechnungsmethode.

Tabelle 3: Mengen in Tonnen FM pro Jahr & prozentuale Anteile der Nutzungsarten Stroh

	theoretisches Potenzial	Feldrücklass	Einstreu	Bioflächen	Sonst. Verluste	relevantes Potenzial
ohne Nutzung	**4.951.090**	-	-	-	-	-
mit Nutzung	-	1.049.631	1.560.584	468.175	71.616	1.800.000
Prozentanteil	**100%**	21,2%	31,5%	9,5%	1,4%	36,4%

Abbildung 13 zeigt die prozentuale Verteilung des technischen Potenzials auf Bundesländerebene. Rund 70% des Gesamtstrohaufkommens stammt aus Nieder- und Oberösterreich. Die Steiermark, Kärnten und das Burgenland sind zusammen für rund 28% des Strohaufkommens verantwortlich. Der Rest teilt sich zu geringen Anteilen auf Tirol, Salzburg, Vorarlberg und Wien auf.

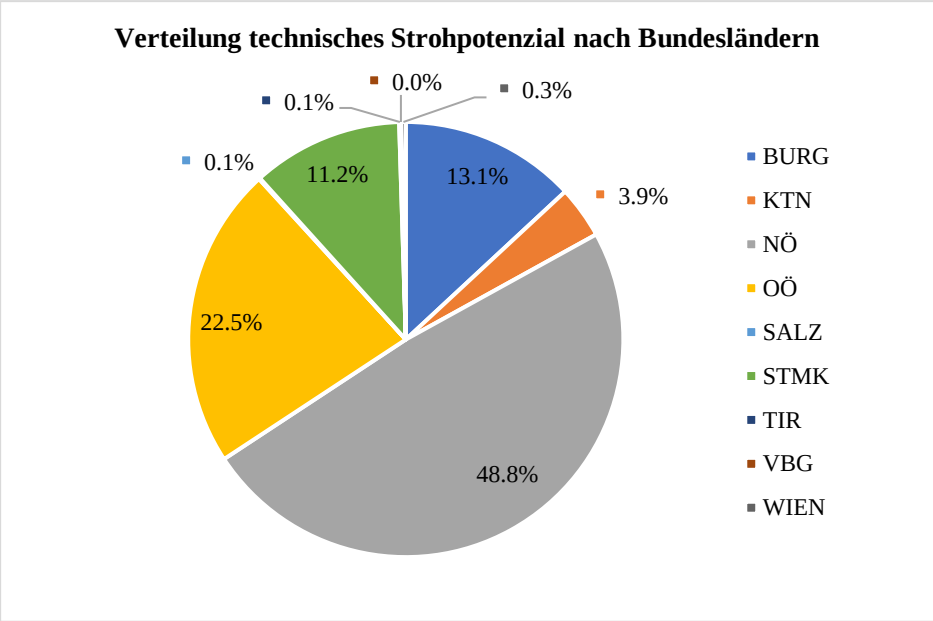

Abbildung 13: Aufteilung technisches Strohpotenzial 2018 auf Bundesländerebene

Knapp 80% des Strohs aus Eiweißpflanzen stammen aus Niederösterreich (~60%) und Oberösterreich (~18%). Ebenso teilen sich wiederum Niederösterreich mit knapp 60% und Oberösterreich mit rund 20% den Großteil des Aufkommens aus Getreidestroh. Eine ähnliche Verteilung liegt bei Hanf- und Hopfenstroh vor. Den Maisstrohanteil teilen sich hingegen die Steiermark und Oberösterreich jeweils mit rund 25% und erfassen in Kombination mit Niederösterreich rund 80% des Maisstrohs. Die Mengenanteile von Stroh in Tirol, Vorarlberg und Wien sind aufgrund des geringen Anteils in Abbildung 14 kaum darstellbar. Weitere Verteilungen der Stroharten auf Bundesländerebene sind Abbildung 14 zu entnehmen.

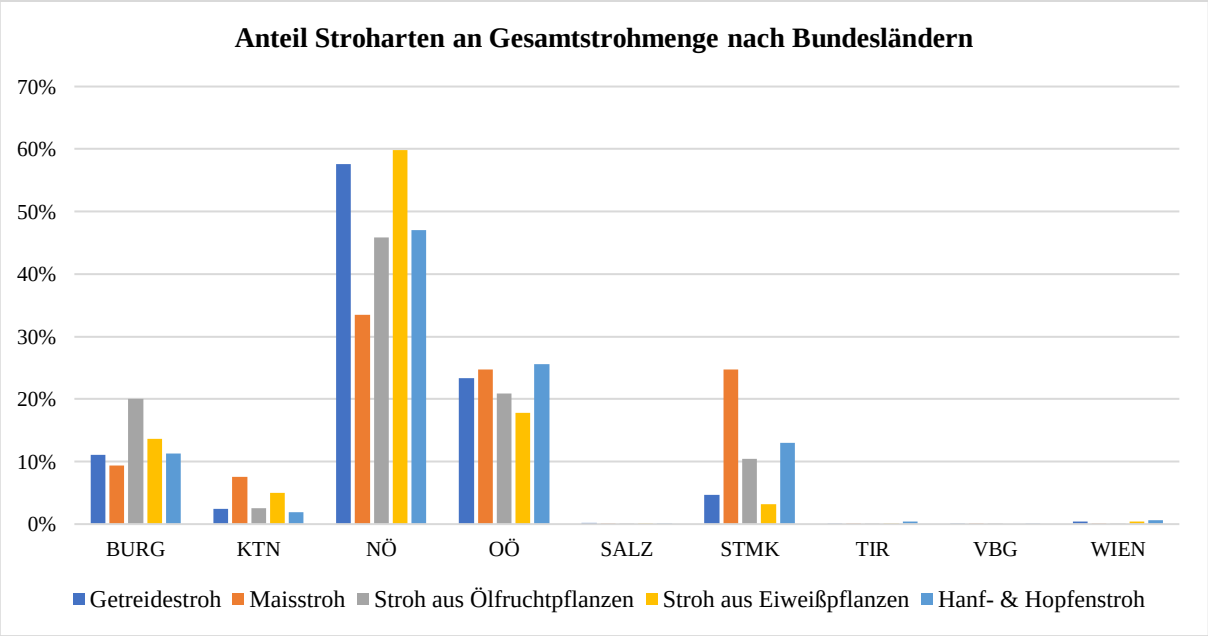

Abbildung 14: Anteil Stroharten am Gesamtaufkommen auf Bundesländerebene.

Moser (2012) gibt im Vergleich zu den oben genannten Mengen ein Strohpotenzial von 1,74Mt FM pro Jahr ohne Konkurrenz bzw. knapp 1Mt FM pro Jahr in einem Rohstoff-Konkurrenz-Szenario an. Schwaderer (2012) berechnet aufgrund unterschiedlicher Annahmen zu verfügbaren Reststrohmengen ein Mindestpotenzial von 444 Mt FM bzw. ein Maximalpotenzial von 1,32Mt FM pro Jahr. Diese Werte beruhen auf der Annahme der Ackerfläche von 834.500 ha und ergibt eine durchschnittliche Menge von 0,5 bis 1,57 Tonnen nutzbares Strohpotenzial pro Hektar. Wenn man das relevante Strohpotenzial von 1,8 Mt FM und eine Ackerfläche von 814.859 ha dieser Arbeit heranzieht, ergibt sich eine Durchschnittsstrohmenge von rund 2,2 Tonnen pro Hektar. Zum Vergleich gibt Dissemond und Zaussinger, (1995) ein frei verfügbares Strohpotenzial zur energetischen Nutzung in Österreich im Jahr 1995 von 350.000 Tonnen an.

2.5 Räumliche Verteilung relevantes Strohpotenzial

Die gemeindespezifische Verteilung des relevanten Strohpotenzials ist in Abbildung 15 dargestellt. Vergleicht man diese Mengenverteilung mit der Abbildung 11, ist eine deutliche Konzentration des Strohaufkommens in der nördlichen, östlichen und südöstlichen Anbauregion zu erkennen.

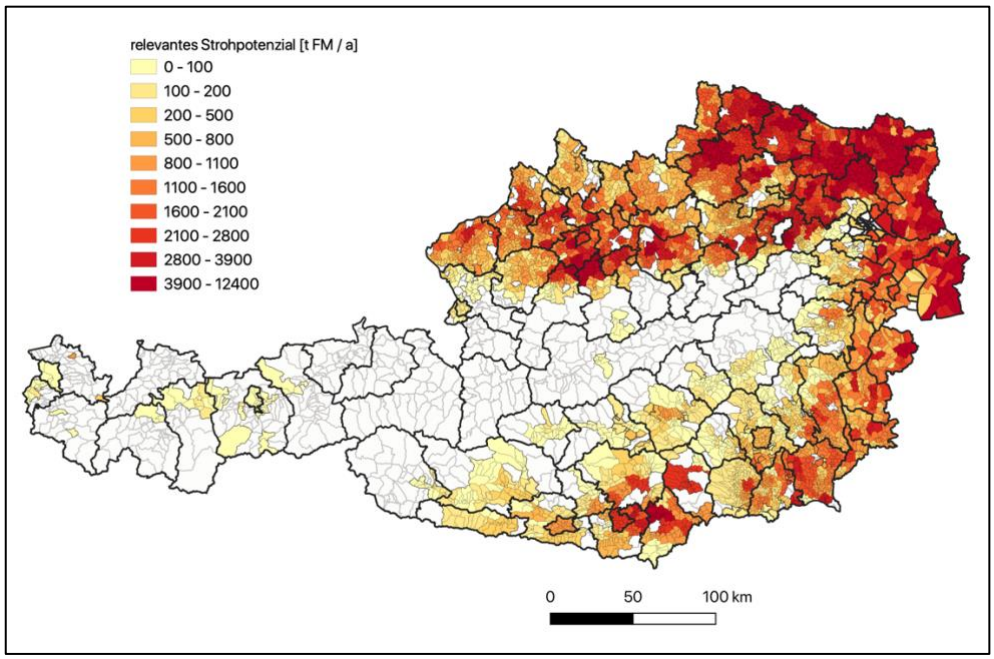

Abbildung 15: gemeindespezifische Verteilung relevantes Strohpotenzial 2018

2.6 Modellstruktur zur Standortplanung

In diesem Abschnitt wird die grundlegende Modellstruktur zur Lösung eines Kapazitäts- und Standortproblems beschrieben. Die dem Logistikmodell zugrunde liegende Struktur orientiert sich am Aufbau eines *Facility-Location-Problems (FLP).* In dieser Modellformulierung werden nicht nur variable Transportkosten betrachtet, sondern es fließen auch Fixkosten mit ein, die bei Errichtung eines Produktionsstandorts anfallen. Diese Standortfixkosten sind in dieser Arbeit die Kosten der Errichtung von Konversionsanlagen. Bei diesem Modellansatz wird also die Summe von fixen und variablen Kosten bei der Versorgung von bestimmten Absatzgebieten betrachtet. Als Basis dient eine Zielfunktion zur Minimierung des Gesamtkosten (Mattfeld and Vahrenkamp, 2014). Diese ergeben sich aus der Summe von *variablen* und *fixen* Kosten. Je nach Prozesskette, die im Logistikmodell formuliert wird, setzen sich dabei die fixen und variablen Kosten wieder aus verschiedenen Teilkostenbeträgen zusammen. Die Kostendefinitionen sind im Kapitel 2.9 angeführt.

Abbildung 16 zeigt die modelltypische Struktur eines 2-stufigen FLP. Diese Struktur bildet in diesem Fall nur das *dezentrale* Logistikkonzept ab, da eine dezentrale Vorbehandlung der Pyrolyse und ein anschließender Slurry-Transport zur Syntheseanlage stattfindet. Ausgehend vom Strohangebot wird der Rohstoff zum jeweilig optimalen Pyrolysestandort transportiert. Danach wird der Slurry zur Syntheseanlage weitertransportiert. Das Modell soll aus einer Menge an möglichen Standorten und einem Set an verfügbaren Kapazitätsklassen die optimalen Standorte bzw. Kapazitäten der Pyrolyseanlage(n) auswählen und der Standort der *zentralen*

Syntheseanlage soll ebenfalls aus einer Menge an möglichen Standorten gewählt werden, sodass sich ein kostenminimales Logistiknetzwerk ergibt.

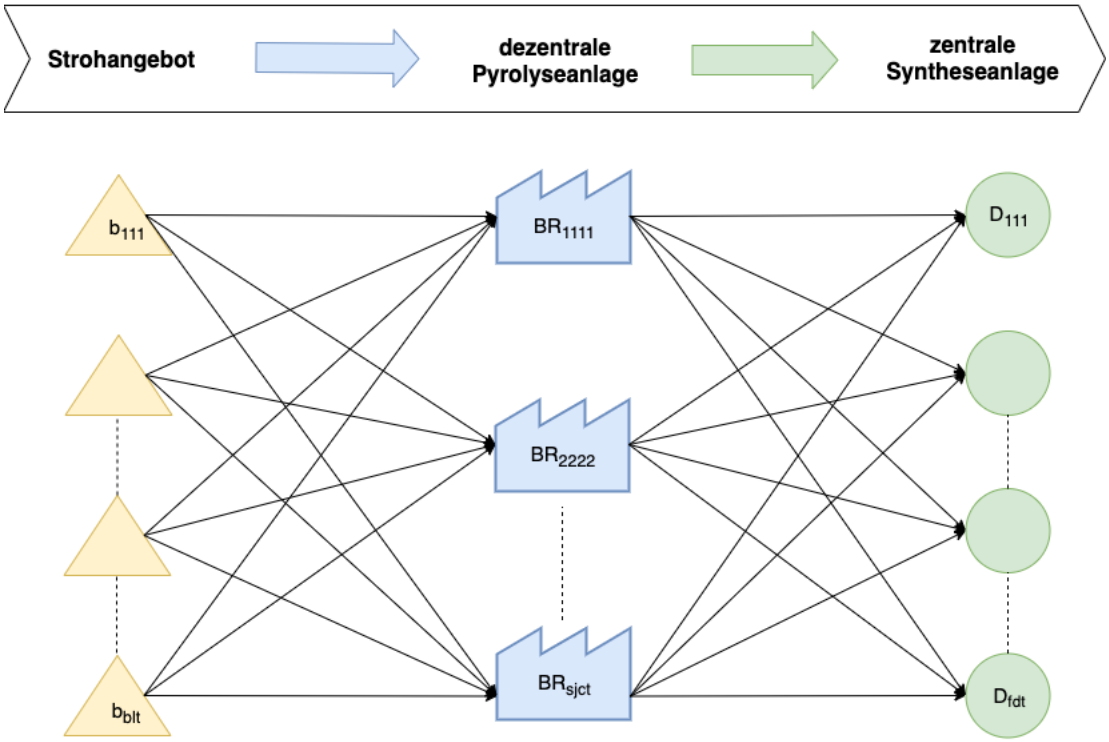

Abbildung 16: Modellstruktur Logistiknetzwerk, 2-stufiges Warehouse Location Problem

Im *zentralen* oder *integrierten* Logistikkonzept entsteht durch die direkte Zuordnung der Biomassequelle zu einer zentralen Verarbeitungsanlage nur eine Distributionsebene. Diese umfasst den Strohtransport vom Anfallsort zur zentralen Pyrolyse- und Syntheseanlage.
Eine genaue Auflistung der im Modell dieser Arbeit verwendeten Parameter und Variablen wird im Kapitel 2.10 angeführt.

2.7 BtL Wertschöpfungsnetzwerk mit Sekundärrohstoff *Stroh*

Dieses Kapitel behandelt den Aufbau und Ursprung der Daten, die im Modell zum Design eines Logistiknetzwerks für den Anwendungsfall *Stroh* verwendet werden. Anhand der Beschreibung der Datenstruktur wird versucht, die Systemgrenzen für diesen Anwendungsfall zu definieren. Darüber hinaus liefert dieser Abschnitt nähere Informationen zu technischen Parametern betreffend Rohstoff, Standorte, Distanzen, Kapazitäten und Konversionsfaktoren.

2.7.1 Rohstoffmenge und Bereitstellungszustand

Der Rohstoff Stroh kann in unterschiedlichen Zuständen bereitgestellt werden. Die Zustände oder Arten der Bereitstellung unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich Form, Gewicht, Dichte und Feuchtigkeit. Für diese Arbeit wird angenommen, dass das Stroh als Frischmasse mit 14% Restfeuchte in Form von Quaderballen für den Transport bereitgestellt wird. Abbildung 17 gibt einen Überblick über die praxistauglichen Ballenpressarten inklusive mögliche Abmessungen und Dichten (Abbildung aus: Kaltschmitt et al., 2016).

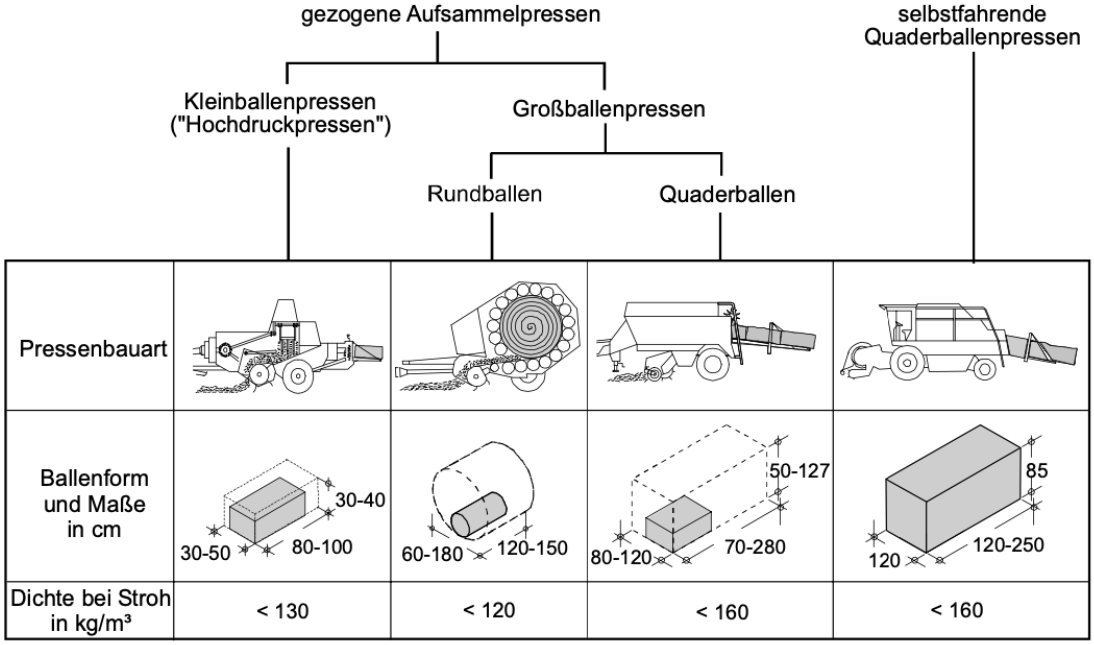

Abbildung 17: Ballenpressungsarten für Halmgut

Die Dichte eines solchen Strohballens wird mit 0,15 t/m3 angenommen. Für den Transport relevante Parameter sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

2.7.2 Standortdaten

Dieses Kapitel erklärt die Methodik, mithilfe welcher die Daten zu Rohstoffmengen verortet werden bzw. anhand welcher Kriterien Systemknoten (Standorte) ausgewählt und definiert werden.

2.7.2.1 Rohstoffstandorte

Die berechneten Reststrohmengen werden mittels eines Geo-Informations-Systems (GIS) verortet. Dafür wurden Daten der Gemeindegrenzen Österreichs eingelesen und die Geokoordinaten (Längen- und Breitengrad) der Gemeindemittelpunkte (*Zentroiden)* berechnet (Open Government Data, 2020a). Diese Mittelpunkte dienen als fiktiver Zuordnungspunkt der Rohstoffmengen. Diese Standortdaten wurden mit den Daten der gemeindespezifischen Mengen verknüpft. Somit liegen die Rohstoffmengen auf Gemeindeebene punktgenau im jeweiligen Zentrum des Gemeindegebiets vor. In Schwaderer (2012) werden die Mengen nicht anhand dieser Methode verortet, jedoch wird die Methodik der Zuordnung zu Zentroiden der Gemeindepolygone als valide Verortungsmöglichkeit erwähnt.
Um einen Vollauslastungstransport zu ermöglichen und die Notwendigkeit einer zusätzlichen Tourenplanung zu vermeiden, werden nur jene Standorte betrachtet, welche mindestens eine Strohmenge von 14 Tonnen FM aufweisen. Dies beruht auf der Annahme, dass die Transportkapazität des eingesetzten Transportmittels *LKW-Gliederzug* mit 14 Tonnen Stroh FM (14% H_2O) angenommen wird (Schwaderer, 2012). Dadurch reduziert sich die Gesamtmenge an relevantem Strohpotenzial lediglich um 0,06% oder 1138 t Stroh FM. In Summe kommen für das Logistikmodell *1695* Knoten auf Gemeindeebene zum Einsatz.

2.7.2.2 Pyrolyseanlagen

Als Standorte für dezentrale Pyrolyseanlagen werden die Zentroide (Mittelpunkte) der politischen Bezirksgrenzen betrachtet (Open Government Data, 2020b). Diese werden mittels GIS Software erstellt und ebenfalls um das Attribut von Längen- und Breitengrad ergänzt. Es stehen im dezentralen Modell somit 117 mögliche Standorte zur Errichtung von Pyrolyseanlagen zu Verfügung. Die Anzahl der schlussendlich berechneten Pyrolyseanlagen hängt von deren Kapazität ab.

2.7.2.3 Zentrale Syntheseanlagen

Aufgrund der hohen Anzahl an möglichen Pyrolyseanlagen (Gemeinde- oder Bezirksebene) wird versucht bei der Auswahl von geeigneten Standorten für eine zentrale Syntheseanlage auf schon bestehende bzw. branchen- oder verfahrensähnliche Infrastruktur in Österreich zurückzugreifen. Die Integration von Anlagen in bestehende Infrastruktur hat aber nicht nur

Vorteile in der Modellplanung bezüglich Lösungsraumreduktion. Diese sogenannten *brownfield* (bebautes Land) Produktionssysteme bieten im Gegensatz zur Installation von Anlagen im *greenfield* (unbebautes Land) schon bestehende Infrastruktur (z.B. Lagertanks, Pump- und Fördersysteme, Sicherheitseinrichtungen, etc.), was eine etwaige Realisierung der Prozessintegration vereinfacht (Becker, Lier and Werners, 2019). Ein wesentlicher Faktor zur Standortauswahl für potentielle Syntheseanlagen ist also die Möglichkeit der Prozessintegration bzw. schon bestehende Infrastruktur. Eine Auflistung der potenziellen Synthesestandorte ist im Anhang in Tabelle 21 zu finden.

2.7.3 Transportdistanzen

Die für ein Liefernetzwerk erforderlichen Distanzdaten zwischen den Knoten im Netzwerk werden mittels der GIS Software (*QGIS 3.8*) bestimmt. Für die Berechnung der Distanzmatrix für das zentrale Logistikkonzept werden die Distanzen zwischen den Gemeindemittelpunkten und den potenziellen Synthesestandorten ermittelt. Für das dezentrale Logistikkonzept werden die Distanzen zuerst von den Gemeindemittelpunkten (Rohstoffursprung) zu den Bezirksmittelpunkten (potenzielle Pyrolysestandorte) berechnet. Im weiteren Schritt werden die Distanzen zwischen den Bezirksmittelpunkten und den potenziellen Synthesestandorten bestimmt. Dadurch reduziert sich der Lösungsraum der potenziell in Frage kommenden Pyrolysestandorte von 1695 auf 117.
Bei den betrachteten Distanzen handelt es sich um Luftlinienabstände zwischen den Knotenpunkten, wodurch jedoch regional-geografische Gegebenheiten nicht berücksichtigt werden (Schwaderer, 2012).

2.7.4 Transportkapazitäten

Das Transportmittel, welches in beiden Distributionsstufen des dezentralen Logistikkonzepts zum Einsatz kommt, weist unterschiedliche Kapazitäten auf. Diese werden aus Schwaderer (2012) und Kerdoncuff (2008) entnommen. In beiden Fällen wird ein *LKW-Lastzug* mit einer Kapazität für Strohballen und ein *Tankauflieger* mit einer Kapazität für flüssigen Slurry angenommen. Die Werte dafür sind in Tabelle 4 dargestellt (Schwaderer, 2012):

Tabelle 4: Transportkapazitäten Strohballen und Slurry

Kapazitäten	**Strohballen**	**Slurry**
Dichte [t/m3]	0,15	1,25
Massenzuladung [t]	14	26
Volumszuladung [m3]	96	21

2.7.5 Konversionsfaktoren und Produktionskapazitäten

Das angewandte Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen (o.a. andere Chemikalien) aus Lignocellulose ist das Bioliq Verfahren des Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dieses Verfahren besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten. Zuerst wird die Lignocellulose mittels Schnellpyrolyse zu einem Pyrolyseöl verarbeitet. Diesem werden Koksrückstände zu einem bestimmten Anteil beigemengt und man erhält zähflüssigen Slurry. Dieser Slurry wird im zweiten Schritt mittels Vergasung und anschließendem Syntheseverfahren zu bestimmten Chemikalien synthetisiert. In Tabelle 5 sind die für die Modellplanung relevanten Konversionsfaktoren der einzelnen Prozessschritte angeführt. Diese werden Kerdoncuff (2008), Dahmen et al., 2012a und Trippe (2013) entnommen.

Tabelle 5: Konversionsfaktoren Bioliq Verfahren, bezogen auf Trockensubstanz

Stoffkategorie	**Menge**	**Einheit**	**Konversionsfaktor**	**Prozess**
Stroh	1.800.000	t/a		
⇓			*0,6708*	Schnellpyrolyse
Bioslurry	1.207.440	t/a		
⇓			*0,17*	Kraftstoff-Synthese
Biokraftstoff	205.265	t/a		
⇓			1.360	Umrechnung l/kg
Biokraftstoff	279.160.000	l/a		

In Tabelle 5 sind drei Konversionsfaktoren angeführt. Die Einheit beschreibt den mengenmäßigen Output pro Input und ist eine absolute Zahl [kg/kg; t/t] und die Umrechnung von Kilogramm auf Liter des Biokraftstoffs. Der erste Faktor beschreibt den Output der Pyrolyse von Stroh zu Slurry, auch Bio Syncrude genannt und beträgt rund 0,67 (Dahmen *et*

al., 2012a). Das heißt aus einer Tonne Stroh FM (14w% Feuchtigkeit) erhält man über das Bioliq Verfahren 670,8 Kilogramm Slurry. Aus diesem Slurry wird mit einem Faktor von rund 0,17 die Ausbeute an Biokraftstoff nach der Vergasung, Reinigung und Synthese beschrieben. Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass es sich bei dem Endprodukt um einen Biokraftstoff mit einem Brennwert von rund 12kWh/kg handelt. Zur Umrechnung der Menge an Endprodukt von Kilogramm auf Liter wird ein Faktor von 1,361 [l/kg] für das Endprodukt *Dimethylether* (DME) angenommen (Linde Gas AG, 2008). Es kann jedoch eine breite Palette an Chemikalien oder anderen Kraftstoffen aus dem Synthesegas bzw. aus DME weitere Produkte hergestellt werden (Dahmen *et al.*, 2012b; Schwaderer, 2012; Trippe, 2013; Kaltschmitt et al.,2016). Über den Gesamtprozess des Bioliq Verfahrens ergibt sich ein Endprodukt-Konversionsfaktor von rund 0,115 bezogen auf die Frischmasse an Stroh. Abbildung 18 beinhaltet Informationen zu weiteren Produktpfaden, welche über das Bioliq-Verfahren angewandt werden können (eigene Darstellung nach: KIT, 2019).

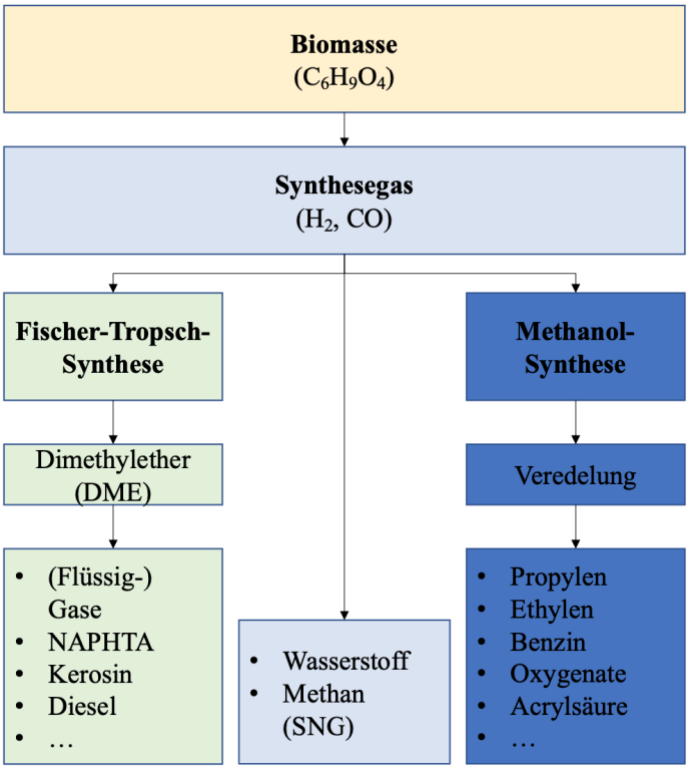

Abbildung 18: Produktpfade BtL Prozesse

Für die Planung der Kapazitäten von dezentralen Pyrolyseanlagen werden vorab Größenklassen erstellt. In diesem Modell wird angenommen, dass die jeweils optimale Anlagengröße und -anzahl entsprechend der Rohstoffallokation unter Einhaltung von Nebenbedingungen und Zielfunktion gewählt wird. Auch eine Kombination unterschiedlicher Kapazitäten ist möglich.

Tabelle 6 zeigt die Berechnungsmethode und Werte der Anlagenkapazitäten der dezentralen Pyrolyseanlagen. Das Biomasseangebot (AN_{BM}) entspricht dem relevanten Strohpotenzial und beläuft sich auf 1,8Mt FM.

Tabelle 6: Bestimmung Anlagenkapazität dezentrale Pyrolyseanlagen

Anzahl PY Anlagen	**Kapazität pro Pyrolyseanlage** [t FM/a]
N_{PY}	AN_{BM} / N_{PY}
1	1.800.000
2	900.000
4	450.000
9	200.000
18	100.000
36	50.000
72	25.000
180	10.000
360	5.000

Der Betrieb der Anlagen wird nur unter Vollauslastung bei 8.000 Betriebsstunden jährlich angenommen. Beim zentralen Logistikkonzept (Pyrolyse und Synthese an einem Standort) wird die Kapazität der Pyrolyseanlage dem Rohstoffangebot gleichgesetzt. In diesem Fall beträgt diese 1.800.000t FM Stroh.

In beiden Logistikkonzepten kommt nur eine einzige, zentrale *Syntheseanlage* zum Einsatz. Die Kapazität dieser Syntheseanlage wird durch die produzierte Menge an Slurry bestimmt. Der Gesamtoutput der Pyrolyse beträgt nach Tabelle 5 rund 1,21 Mio. Tonnen und stellt somit die Kapazität der Syntheseanlage dar.

Die Kapazitäten der Prozesskette sind nicht nur für die Bestimmung der Anzahl von Anlagen relevant, sondern beeinflussen darüber hinaus auch die Kosten der Anlagen. Die Herleitung der Kosten der BtL Prozesskette wird im nächsten Abschnitt behandelt.

2.8 Kostenschätzung der BtL Prozesskette *Stroh*

In diesem Kapitel wird die Kostenstruktur der Biomass-to-Liquid Prozesskette für Stroh beschrieben. Es wird zum besseren Verständnis zwischen Errichtungskosten bzw. Investitionen und Betriebskosten unterschieden. Neben notwendigen Investitionen für die reine Errichtung einer technischen Anlage (Pyrolyse oder Synthese) fallen noch fixe und variable Kosten an.

Dabei werden investitionsabhängige (fixe) und betriebsmittelverbrauchsabhängige (variable) Kosten unterschieden.

2.8.1 Investitionsschätzung

Ein grundlegendes Element in der Planung von strategischen Liefernetzwerken stellt die Schätzung der Investitionshöhe der benötigten Anlagenkomponenten dar. Da sich viele Prozessschritte zur stofflichen Umwandlung von nachwachsenden Rohstoffen jedoch erst im Labor- oder Pilotmaßstab befinden, ist eine exakte Erfassung der Kosten erschwert und nur unter hohem zeitlichen und finanziellen Aufwand möglich und erfordert darüber hinaus eine detaillierte Dimensionierung aller Apparate der gesamten technischen Anlage. Da die Kapazität jedoch Einfluss auf die Höhe der Investition hat, wird in dieser Arbeit mittels Größendegressionsrechnung auf diesen Zusammenhang eingegangen. Unter Betrachtung einer bekannten Ausgangsinvestition I_0, einer Ausgangskapazität C_0 und eines Größendegressionsfaktors r kann mittels folgender Formel eine Investition I_1 für die Kapazität C_1 geschätzt werden (Kerdoncuff, 2008; Schwaderer, 2012):

$$I_1 = I_0 * \left(\frac{C_1}{C_0}\right)^r \tag{2.4}$$

Mit der Formel 2.4 kann eine neue Investition I_1 geschätzt werden, welche um den Faktor r unterproportional zur Kapazitätsänderung zunimmt. Größendegressionsfaktoren für thermochemische Umwandlungsprozesse nehmen je nach Komponente/Apparat unterschiedliche Werte an. Für diese Arbeit wurde zur Vereinfachung ein Größendegressionswert von 0,7 für die gesamte Anlage angenommen (Kappler, 2008; Kerdoncuff, 2008; Schwaderer, 2012). Aus Gründen der Vereinfachung und aufgrund der unter Unsicherheit angenommenen Werte in der Literatur ist die Investitionssumme inklusive der direkten und indirekten Nebenpositionen zu verstehen. Eine Auflistung möglicher direkter und indirekter Nebenpositionen einer Anlageninvestition sind in Trippe *et al.*, (2013), Schwaderer, (2012) und Kerdoncuff, (2008) zu finden. Daher wird der über Formel (2.4) geschätzte Wert als Gesamtinvestition der Anlagen verstanden.

Mit oben beschriebener Methode der Größendegression lässt sich die Investition für das zentrale Logistikkonzept abbilden. Ausgehend von einer Kapazität und Investition der Referenzanlage (vgl. Anhang Tabelle 22; Kerdoncuff, 2008; Moser, 2012) von ca. 1 Mt Stroh FM wird über Formel (2.4) die Investition der Pyrolyse- und Syntheseanlage mit einer Kapazität zur Verarbeitung des relevanten Strohpotenzials von 1,8 Mio. Tonnen Stroh FM geschätzt.

Für das dezentrale Logistikkonzept werden Kapazitätsklassen der Pyrolyseanlagen entsprechend den Werten aus Tabelle 6 vorgegeben. Zur Bestimmung der Investitionshöhen werden aus Kerdoncuff (2008) und Moser (2012) Werte für Investitionen von Pyrolyseanlagen entnommen. Dabei werden die Investitionen analog für 1, 2, 10 und 20 Anlagen bei einer Gesamtverarbeitungsmenge von 1,8Mt Stroh mittels Formel (2.4) geschätzt und eine Regressionsgleichung erstellt. Mittels Anzahl der Anlagen als unabhängige Variable (x) und der Investitionshöhe als abhängige Variable (y) ergibt sich folgende Formel (2.5):

$$y = 0{,}093x^2 + 4{,}7485x + 140{,}11 \qquad (R_2 = 0{,}9997) \qquad (2.5)$$

Für die x-Werte wird die Anzahl der Pyrolyseanlagen aus Tabelle 5 eingesetzt und die Investitionen der Kapazitätsklassen berechnet. Da es sich um eine Investitionsschätzung für abnehmende Kapazitäten handelt, wird die Berechnung über die Regressionsgleichung gegenüber der Größendegression (Formel 2.4) bevorzugt.

2.8.2 Investitionsabhängige Fixkosten

Wie im vorigen Kapitel erwähnt, können bestimmte Kosten in Abhängigkeit der Investitionssumme geschätzt werden. Dazu zählen nach Schwaderer (2012) *Abschreibungen, Zinsen, Wartung und Instandhaltung, Steuern und Versicherung* sowie *Löhne.* Die Lohnkosten können aufgrund des geringen prozentualen Anteils an der Gesamtinvestition in linearem Zusammenhang mit der Investitionssumme hinreichend geschätzt werden. In Tabelle 7 sind die einzelnen Kostenpositionen und deren Höhe als Prozentsatz an der Investition angegeben.

Tabelle 7: investitionsabhängige Kosten in Prozent der Gesamtinvestition

Kostenart	**% der Gesamtinvestition**
Abschreibungen	5%
Zinsen	1%*
Wartung & Instandhaltung	4%
Steuern & Versicherung	2%
Löhne	0,5%
Sonstige**	3%
Gesamt	**15,5%**

* Abgeändert von 4% auf 1%.

** Ergänzung, um auf 15,5% aus Schwaderer (2012) zu kommen. Vgl. Kerdoncuff (2008) anteilige investitionsabh. Kosten ~16,5%.

Um die fixen Kosten einer Anlage zu berechnen, wird der Prozentsatz aus Tabelle 6 mit dem Wert der Gesamtinvestition multipliziert. Dabei kann zwischen Fixkosten für die Synthese- und Pyrolyseanlagen unterschieden werden. Um die jährlichen Abschreibungen der Anlage zu berechnen, wird ein Abschreibungszeitraum von 20 Jahren angenommen. Dadurch ergibt sich ein Wert der Abschreibungen von 5% jährlich. Die in Tabelle 7 angeführten „sonstigen" Kosten werden gewählt, um einen mit der Literatur vergleichbaren Wert zu erhalten (Schwaderer, 2012).

2.8.3 Betriebsmittelverbrauchsabhängige Kosten

Zu den betriebsmittelverbrauchsabhängigen (variablen) Kosten zählen die Bereitstellungskosten bzw. Rohstoffkosten, die Transportkosten für den Rohstoff und Zwischenprodukte sowie variable Betriebskosten der Pyrolyse- und Syntheseanlagen.

2.8.3.1 Rohstoffkosten

Für die Rohstoffkosten von Stroh wird von den Kosten ausgegangen, die durch die transportierbare Form der Bereitstellung von Stroh anfallen. Tabelle 8 zeigt wie Schwaderer (2012) die Kosten für die Bereitstellung von Stroh als Quaderballen angenommen hat.

Tabelle 8: Rohstoff- /Stroherfassungskosten

Kostenart	**Kosten [€ / t TM]**
Abschreibungen & Zinsen	14,3 – 20,9
Personalkosten	4,5 – 9,6
Kraftstoffkosten	2,2 – 5,5
Sonstige Kosten	11,2 - 19,6
Anteilige Düngekosten	11,0
Kosten für Abdeckung	2,0
Rohstoffkosten	**47,4 – 67,4**

Für das Optimierungsmodell werden Rohstofferfassungskosten in Höhe von 62 € pro Tonne TM frei Gemeindemittelpunkt angenommen.

2.8.3.2 Transportkosten

Die Transportkosten setzen sich aus zwei Komponenten zusammen. Diese gliedern sich in einen fixen und einen variablen Teilkostenbetrag. Beide Beträge sind jedoch von der zu transportierenden Menge abhängig. Die Fixkosten decken die Kosten für die Rohstoffmanipulation (Rüsten, Beladen, Entladen sowie Wartezeiten). Der variable (entfernungsabhängige) Kostenanteil beinhaltet die Kosten für Fahrtzeiten und Personal- bzw. Maschinenstundensätze. Der Rohstoff- bzw. Slurrytransport wird im betrachteten Modell ausschließlich per LKW durchgeführt. In Tabelle 9 sind die angenommenen Werte für den Stroh- und Slurrytransport dargestellt. Darüber hinaus sind weitere transportrelevante Parameter wie Dichte des Transportguts und Zuladung in Kubikmeter und Tonnage angegeben.

Tabelle 9: Fixe und variable Transportkosten Stroh und Slurry

	Reststroh (FM)	**Slurry**
LKW	Lastzug	Tankauflieger
Dichte [t_{FM} / m^3]	0,15	1,25
Zuladung [t_{FM}]	14,4	26
Zuladung [m^3]	96	21
Fix [€ / t_{FM}]	13,62	2,64
Variabel [€ / t_{FM} * km]	0,16	0,09

Um die Transportgesamtkosten zu erhalten, werden die Werte der fixen und variablen Teilkostenbeträge mit der jeweiligen Transportmenge und der jeweiligen Transportdistanz multipliziert. Die Werte aus Tabelle 9 werden aus Schwaderer (2012) übernommen.

2.8.3.3 Variable Pyrolysekosten

Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit Ergebnissen aus der Literatur (Kerdoncuff, 2008; Moser, 2012; Schwaderer, 2012) werden Kosten für elektrische Energie als variable Kosten der Pyrolyseanlagen berücksichtigt. Dafür wird ein linearer Zusammenhang der Stromkosten mit der Kapazität der Pyrolyseanlagen angenommen. Kerdoncuff (2008) geht von Kosten für elektrische Energie bei der Pyrolyse von 8,13 Mio. € aus. Dabei wird ein Strompreis von 7,6 ct/kWh und eine Verarbeitungskapazität von insgesamt 1 Mio. Tonnen Frischmasse bei 8000 Betriebsstunden pro Jahr angegeben. Mittels linearer Regression ergeben sich für das relevante Strohpotenzial von 1,8Mt FM Stromkosten in Höhe von rund 14,6 M€.
Darüber hinaus werden aus Kerdoncuff (2008) und Moser (2012) variable Prozesskosten der Pyrolyse übernommen und über die Anzahl von 2, 10 und 20 Anlagen mit der Gesamtverarbeitungsmenge von 1,8Mt Stroh linear approximiert. Über die Regressionsgleichung (2.6) werden die variablen Pyrolysekosten (ohne Stromkosten) berechnet:

$$y = 0{,}2158x + 15{,}703 \qquad R^2 = 0{,}9635 \qquad (2.6)$$

Durch Einsetzen der Anlagenanzahl der verschiedenen Kapazitätsklassen aus Tabelle 5 ergeben sich mit Formel (3.4) die variablen Pyrolysekosten der jeweiligen Kapazitätsklasse. Durch Division durch die Anzahl an Anlagen der jeweiligen Kapazitätsklasse erhält man variable Kosten pro Anlage. Um die Stromkosten der Anlage einer Kapazitätsklasse miteinzubeziehen, wird der Wert von 14,6 M€ durch die Anzahl der Anlagen der Kapazitätsklasse dividiert und zu den variablen Kosten pro Anlage addiert. Durch Division durch die Rohstoffmenge der jeweiligen Kapazitätsklasse in Mt, ergeben sich schlussendlich variable Kosten in € pro Tonne Stroh. Formel (2.7) fasst die Berechnung der variablen Pyrolysekosten zusammen:

$$y = \left[(14{,}6 \,/\, x) + \left((0{,}2158x + 15{,}703)/x\right)\right] * \frac{CAP_{Py,i}}{1.000.000} \quad (2.7)$$

Beispielsweise ergeben sich bei Kapazitätsklasse 9 (x = 9; 200kt /a) variable Kosten von 17,9 €/t. Im Vergleich gibt Kerdoncuff (2008) variable Pyrolysekosten von 9,31 €/t Stroh bei einer Anlagenkapazität von 100kt pro Jahr an, was annähernd der Hälfte der Kosten bei ebenfalls halber Kapazität entspricht.

Beim zentralen Logistikkonzept ergeben sich durch lineare Regression und einer Gesamtverarbeitungsmenge von 1,8Mt Stroh variable Pyrolysekosten von 0,86 € pro Tonne Stroh FM. Dies entspricht ebenfalls im Vergleich mit 0,45 € pro Tonne aus Kerdoncuff (2008) rund dem Zweifachen der Kosten bei doppelter Verarbeitungskapazität und ist somit eine repräsentative Annahme.

2.8.3.4 Variable Synthesekosten

Zu den variablen Synthesekosten zählen die Kosten für Hilfsmittel und der Reststoffentsorgung. Zur Berechnung der Mengen an Hilfs- und Reststoffen werden die Massenstromverhältnisse aus Schwaderer entnommen und in Abbildung 19 dargestellt (Abbildung aus: Schwaderer, 2012). In dieser Arbeit werden Frisch- und Abwasserkosten, Kosten und Erlöse durch elektrische Energie und Kosten der Schlackeentsorgung miteinbezogen.

	WRHd	RSd	Slurry	ND-Dampf	Kraftstoff	H_2O	Abwasser	Schlacke
$[t_{in}/t_{out}]$	$\beta^{VS}_{BTL,b,z}$		$\beta^{US}_{BTL,z',z}$			$\delta_{BTL,z',o}$		
WRH	0,59							
RS		1,0						
WRHd			0,72					0,003
RSd			0,68					0,007
Slurry				18,75	0,17	1,37	1,37	

Abbildung 19: Massenstromverhältnisse für Zwischen- und Endprodukte, Hilfsmittel und Reststoffe

Die Preise bzw. Kosten für Hilfsmittel und Reststoffe wurden ebenfalls aus Schwaderer (2012) übernommen und sind in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10: Preise und Kosten von Hilfsmitteln und Reststoffen

Elektrische Energie	
Zukauf [€/kWh]	0,076
Verkauf [€/kWh]	0,05
Frischwasser [€/m3]	1,55
Abwasser [€/m3]	1,38
Schlacke [€/t]	20,0

Zur Berechnung der Kosten werden die Faktoren aus Abbildung 20 mit den Preisen/Kosten aus Tabelle 10 multipliziert. Als Inputgröße wird das relevante Strohpotenzial bzw. die daraus produzierte Menge an Slurry verwendet.

2.8.3.5 Erlöse Koppelprodukt Strom

Bei der Herstellung von BtL-Kraftstoffen entsteht ein Stromüberschuss in der Syntheseanlage. Dieser Überschuss wird beim zentralen Logistikkonzept zum Betrieb der Pyrolyseanlage verwendet, wodurch geringere Erlöse durch den Stromverkauf resultieren. Beim dezentralen Konzept sind die Erlöse größer, jedoch muss Strom für die Pyrolyse zugekauft werden. Ausgehend von den Angaben aus Kerdoncuff (2008) wird ein linearer Zusammenhang des Erlöses aus dem Stromverkauf mit der Kapazität der Syntheseanlage angenommen und mittels linearer Regression berechnet. Es ergeben sich variable Synthesekosten (Erlöse) von -9,85 € pro Tonne Slurry im zentralen bzw. -17,72 € pro Tonne Slurry im dezentralen Logistikkonzept. In Tabelle 11 und 12 sind die Kosten für die Bereitstellung des Rohstoffs und die Logistik/den Transport noch nicht enthalten. Diese werden als Teil des Modellergebnisses gesondert behandelt und im Kapitel 3 dargestellt.

Tabelle 11: Kostenstruktur zentrales/dezentrales Logistikkonzept für Sekundärrohstoff Stroh

		Logistikkonzept				
Größendegressionsfaktor	0,7	Zentrale Pyrolyse (1)	Dezentrale Pyrolyse (1)	Dezentrale Pyrolyse (2)	Dezentrale Pyrolyse (4)	Dezentrale Pyrolyse (9)
Investition						
Kapazität Pyrolyseanlage	[t FM / a]	1.800.000	1.800.000	900.000	450.000	200.000
Kapazität Syntheseanlage	[t SL / a]	1.207.440	1.207.440	1.207.440	1.207.440	1.207.440
Kapazität Pyrolyseanlage	MWth	990	990	495	248	110
Kapazität Syntheseanlage	MWth	888	888	888	888	888
Investition Synthese	[M€]	**600,10**	**600,10**	**600,10**	**600,10**	**600,10**
Investition Pyrolyse	[M€]	**144,95**	**144,95**	**149,98**	**160,59**	**190,38**
pro PY Anlage	[M€]	**144,95**	**144,95**	**74,99**	**40,15**	**21,15**
Fixkosten						
Investitionsabh. Kosten	[M€ / a]	**115,48**	**115,48**	**116,26**	**117,91**	**122,52**
davon Synthese	[M€ / a]	93,02	93,02	93,02	93,02	93,02
davon Pyrolyse (gesamt)	[M€ / a]	22,47	22,47	23,25	24,89	29,51
davon Pyrolyse (je Anlage)	[M€ / a]	22,47	22,47	11,62	6,22	3,28
Betriebsverbr.abh. Kosten						
Frisch- Abwasserkosten	[M€ / a]	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
Stromkosten Pyrolyse	[M€ / a]	0,00	14,63	14,63	14,63	14,63
je Anlage	[M€ / a]	0,00	14,63	7,32	3,66	1,63
Schlackeentsorgung	[M€ / a]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Erlöse Elektrizität Synthese	[M€ / a]	-16,99	-26,50	-26,50	-26,50	-26,50
variable Kosten Synthese	[€/t SL]	-9,85	-17,72	-17,72	-17,72	-17,72
variable Kosten Pyrolyse	[€/t Stroh]	0,86	16,97	17,09	17,33	17,93

Tabelle 12: Kostenstruktur zentrales/dezentrales Logistikkonzept für Sekundärrohstoff Stroh

		Logistikkonzept				
Größendegressionsfaktor	0,7	Dezentrale Pyrolyse (18)	Dezentrale Pyrolyse (36)	Dezentrale Pyrolyse (72)	Dezentrale Pyrolyse (180)	Dezentrale Pyrolyse (360)
Investition						
Kapazität Pyrolyseanlage	[t FM / a]	100.000	50.000	25.000	10.000	5.000
Kapazität Syntheseanlage	[t SL / a]	1.207.440	1.207.440	1.207.440	1.207.440	1.207.440
Kapazität Pyrolyseanlage	MWth	55	28	14	6	3
Kapazität Syntheseanlage	MWth	888	888	888	888	888
Investition Synthese	[M€]	**600,1**	**600,1**	**600,1**	**600,1**	**600,1**
Investition Pyrolyse	[M€]	**255,7**	**431,6**	**964,1**	**4008,0**	**13902,4**
pro PY Anlage	[M€]	**14,2**	**12,0**	**13,4**	**22,3**	**38,6**
Fixkosten						
Investitionsabh. Kosten	[M€ / a]	**132,65**	**159,91**	**242,45**	**714,26**	**2247,88**
davon Synthese	[M€ / a]	93,02	93,02	93,02	93,02	93,02
davon Pyrolyse (gesamt)	[M€ / a]	39,64	66,90	149,44	621,25	2154,87
davon Pyrolyse (je Anlage)	[M€ / a]	2,20	1,86	2,08	3,45	5,99
Betriebsverbr.abh. Kosten						
Frisch- Abwasserkosten	[M€ / a]	4,85	4,85	4,85	4,85	4,85
Stromkosten Pyrolyse	[M€ / a]	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63
je Anlage	[M€ / a]	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
Schlackeentsorgung	[M€ / a]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Erlöse Elektrizität Synthese	[M€ / a]	-26,50	-26,50	-26,50	-26,50	-26,50
variable Kosten Synthese	[€/t SL]	-17,72	-17,72	-17,72	-17,72	-17,72
variable Kosten Pyrolyse	[€/t Stroh]	19,01	21,17	25,49	38,43	60,01

2.9 Mathematisches Optimierungsmodell zum Supply Chain Design

Basierend auf der Modellstruktur und der darin auftretenden Stoffströme wird in diesem Kapitel ein 2-stufiges Facility Location Problem zur Kapazitäts- und Standortplanung für das dezentrale BtL-Netzwerk formuliert. Die verwendeten Indizes, Parameter und Variablen sind in Tabelle 13 angeführt.

Tabelle 13: Modellnotation

Symbol	Beschreibung	Einheit
Indizes		
$h \in H$	Lieferant / Gemeinde	-
$i \in I$	Pyrolysestandorte (= Gemeindestandorte)	-
$j \in J$	Synthesestandorte	-
$k \in K$	Kapazitätsklasse	-
Py	Pyrolyse	-
Sy	Synthese	-
b	Biomasse / Stroh	-
s	Slurry	-
p	Produkt / Kraftstoff (fuel)	-
Parameter		
p_b	Preis für t Biomasse (Stroh)	€ / t TM
$c^{b,LKW}$	Transportkosten Biomasse (Stroh) von Gemeinde h zu Pyrolysestandort i	€ / t FM
$c^{s,LKW}$	Transportkosten Slurry von Pyrolysestandort i zu Syntheseanlage j	€ / t Slurry
$c^{b,fix}$	Transportfixkosten pro t FM Stroh	€ / t FM
$c^{s,fix}$	Transportfixkosten pro t Slurry	€ / t Slurry
d_{hi}	Transportdistanz von Gemeinde h nach Gemeinde/Pyrolysestandort i	m
d_{ij}	Transportdistanz Pyrolysestandort i zu Synthesestandort j	m
$cap_{hi}^{b,LKW}$	Transportkapazität Biomasse	t FM
$cap_{ij}^{s,LKW}$	Transportkapazität Slurry	t Slurry
f_k^{Py}	Jährliche Fixkosten bei Errichtung einer Pyrolyseanlage der Kapazität k	€ / a
f_j^{Sy}	Jährliche Fixkosten bei Errichtung einer Syntheseanlage am Standort j	€ / a
$c_k^{var,Py}$	Jährliche variable Kosten einer Pyrolyseanlage der Kapazität k	€ / t FM * a
$c_j^{var,Sy}$	Jährliche variable Kosten für Synthese einer Tonne Slurry am Standort j	€ / t Slurry * a
$a_h^{b,max}$	Jährliches relevantes Potenzial an Biomasse/Stroh am Standort h	t Stroh / a
cap_k^{Py}	Verarbeitungsmenge der Pyrolyseanlage der Kapazität k	t Stroh FM / a
cap_j^{Sy}	Kapazität der Syntheseanlage an Standort j	T Slurry / a

η^{Py}	Konversionsfaktor Pyrolyse; Slurryoutput pro Tonne Strohinput FM	{0..1}; [t/t]; [kg/kg]
η^{Sy}	Konversionsfaktor Synthese; Produktoutput pro Tonne Slurryinput	{0..1}; [t/t]; [kg/kg]
Variablen		
x_{hi}^{b}	Jährliche Transportmenge Stroh von Gemeinde h zur Pyrolyseanlage am Standort i	t Stroh FM / a
w_{ik}^{b}	Hilfsvariable; Rohstoffmenge an Standort i mit Pyrolyseanlage der Kapazität k (=Summe transportierte Rohstoffmenge an Standort i)	t Stroh FM / a
x_{ij}^{s}	Jährliche Transportmenge Slurry von Pyrolyseanlage am Standort i zu Syntheseanlage am Standort j	t Slurry / a
y_{i}^{Py}	Jährliche Menge des aus Stroh produziertem Slurry der Pyrolyseanlage an Standort i	t produziertes Slurry / a
y_{j}^{Sy}	Synthesemenge (zu verarbeitende Slurrymenge) am Synthesestandort j	t verarbeitetes Slurry / a
y_{j}^{p}	Produzierte Menge Endprodukt an Synthesestandort j	t / a
$z_{i,k}^{Py}$	Binäre Entscheidungsvariable für Pyrolyseanlage mit Kapazität k an Standort i	{0,1} mit:1=ja
z_{j}^{Sy}	Binäre Entscheidungsvariable für Syntheseanlage an Standort j	{0,1} mit:1=ja

Die Zielfunktion zur Lösung des Standortproblems wird wie folgt formuliert:

ZF → Min [

$$\sum_{h\in H}\sum_{i\in I} p^b * x_{hi}^b \quad \textbf{(2.8)}$$

$$+\sum_{h\in H}\sum_{i\in I} c^{b,LKW} * d_{hi} * x_{hi}^b \quad \textbf{(2.9)}$$

$$+\sum_{h\in H}\sum_{i\in I} c^{b,fix} * x_{hi}^b \quad \textbf{(2.10)}$$

$$+\sum_{i\in I}\sum_{k\in K} f_k^{Py} * z_{i,k}^{Py} \quad \textbf{(2.11)}$$

$$+\sum_{i\in I}\sum_{k\in K} c_k^{var,Py} * cap_k^{Py} * z_{i,k}^{Py} \quad \textbf{(2.12)}$$

$$+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c^{s,LKW} * d_{ij} * x_{ij}^s \quad \textbf{(2.13)}$$

$$+\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} c^{s,fix} * x_{ij}^s \quad \textbf{(2.14)}$$

$$+\sum_{j} f_j^{Sy} * z_j^{Sy} \quad \textbf{(2.15)}$$

$$+\sum_{i}\sum_{j} c_j^{var,Sy} * x_{ij}^s \quad \textbf{(2.16)}$$

]

Die obige Formel beschreibt die Zielfunktion zur Minimierung der Gesamtkosten bei einer vorgegebenen Menge an zu produzierendem Endprodukt. Die Gesamtkosten setzen sich nach obiger Formel schrittweise aus den folgenden Teilkostenbeträgen zusammen:

- Rohstoffkosten Stroh (2.8)
- Variable Rohstofftransportkosten (2.9)
- Fixe Rohstofftransportkosten (2.10)
- Fixkosten je errichteter Pyrolyseanlage der Kapazität k ($wenn$: $z_{ik}^{Py} = 1$) (2.11)
- Variable Kosten je Pyrolyseanlage der Kapazität k (2.12)
- Variable Transportkosten Slurry (2.13)
- Fixe Transportkosten Slurry (2.14)

- Fixkosten Syntheseanlage ($wenn$: $z_j^{Sy} = 1$) (2.15)
- Variable Synthesekosten (2.16)

Die Rohstoffkosten für Stroh (2.8) entstehen durch Ankauf der Biomasse. Danach folgen die distanzabhängigen Transportkosten für Stroh von Lieferant *h* an Standort *i* (2.9) und die Transportfixkosten (2.10). Die Errichtung einer Pyrolyseanlage der Kapazität ist mit fixen Errichtungskosten (2.11) und mengenabhängigen variablen Kosten (2.12) verbunden. Dann folgen die distanzabhängigen Transportkosten für Slurry von Standort *i* an Standort *j* (2.13) und Transportfixkosten für Slurry (2.14). Aus der Gesamtmenge an zur Verfügung stehenden Biomasse und produzierter Slurrymenge ergibt sich die Kapazität der Syntheseanlage, welche die Errichtungskosten einer Syntheseanlage bestimmt (2.15). Formel (2.16) ergibt die variablen Kosten bei der Synthese.

Folgende Nebenbedingungen werden im Modell berücksichtigt:

$$\sum_{i \in I} x_{hi}^{b} \leq a_h^{b,max} \qquad \forall \boldsymbol{h} \qquad \textbf{(2.17)}$$

$$\sum_{h \in H} x_{hi}^{b} = w_{ik}^{b} \qquad \forall \boldsymbol{i} \qquad \textbf{(2.18)}$$

$$\sum_{k \in K} cap_k^{Py} * z_{i,k}^{Py} = w_{ik}^{b} \qquad \forall \boldsymbol{i}, \mathbf{k} \qquad \textbf{(2.19)}$$

$$\sum_{h \in H} \eta^{Py} * x_{hi}^{b} = y_i^{Py} \qquad \forall \boldsymbol{i} \qquad \textbf{(2.20)}$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in I} x_{hi}^{b} = \sum_{h \in H} a_h^{b,max} \qquad \textbf{(2.21)}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} cap_k^{Py} * z_{i,k}^{Py} = \sum_{h \in H} a_h^{b,max} \qquad \textbf{(2.22)}$$

$$\sum_{k \in K} z_{i,k}^{Py} \leq 1 \qquad \forall \boldsymbol{i} \qquad \textbf{(2.23)}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} z_{i,k}^{Py} \geq 1 \qquad \textbf{(2.24)}$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij}^{s} = y_{i}^{Py} \qquad \forall i \qquad \textbf{(2.25)}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij}^{s} = cap_{j}^{Sy} * z_{j}^{Sy} \qquad \forall j \qquad \textbf{(2.26)}$$

$$\sum_{i \in I} \eta^{Sy} * x_{ij}^{s} = y_{j}^{p} \qquad \forall j \qquad \textbf{(2.27)}$$

$$x_{hi}^{b}, w_{ik}^{b}, x_{ij}^{s}, y_{i}^{Py}, y_{j}^{Sy}, y_{j}^{f} \geq 0 \qquad \forall h, i, j, k \qquad \textbf{(2.28)}$$

$$z_{i,k}^{Py}, z_{j}^{Sy} \in \{0,1\} \qquad \forall i, j, \mathbf{k} \qquad \textbf{(2.29)}$$

Nebenbedingung (2.17) stellt sicher, dass nicht mehr Rohstoff vom Ursprungsort abtransportiert wird, als dort zur Verfügung steht. (2.18) setzt die Summe an Rohstoff am Standort *i* gleich der Hilfsvariable. (2.19) stellt die Kapazitätsbeschränkung dar, indem die gelieferte Rohstoffmenge an Standort *i* jeweils der errichteten Kapazität an Standort *i* entspricht. Durch Einhaltung dieser Nebenbedingung wird eine Anlagenauslastung von 100% gewährleistet. (2.20) definiert die Menge an produziertem Slurry an Standort *i*. Über (2.21) und (2.22) wird gewährleistet, dass das gesamte verfügbare Rohstoffpotenzial genutzt wird. (2.23) erlaubt nur jeweils eine Kapazitätsklasse pro Pyrolysestandort *i* und nach (2.24) muss mindestens eine Pyrolyseanlage errichtet werden. Mit (2.25) wird sichergestellt, dass die gesamte Slurrymenge an Standort *i* abtransportiert wird. (2.26) berechnet die Endproduktmenge am errichteten Standort *j*. Nach (2.27) soll die Kapazität der errichteten Syntheseanlage größer gleich der summierten Slurrytransportmenge entsprechen. (2.28) beschreibt die Nicht-Negativitätsbedingung, (2.29) definiert die angegebenen Entscheidungsvariablen als binär.

Für das zentrale Logistikkonzept sind lediglich die Transportkosten des Rohstoffs Stroh entscheidungsrelevant, da in diesem Konzept lediglich eine Kapazitätsklasse verwendet und eine dementsprechende Kostenstruktur (s. Tabelle 10) betrachtet wird. Somit werden für alle zentralen Pyrolyse- und Synthesestandorte die Transportkosten berechnet. Das Ergebnis des

zentralen Pyrolyse- und Synthesestandorts ist somit jener, welcher die geringsten Transportkosten bei einer Rohstoffmenge von 1,8Mt Stroh aufweist.

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des mathematischen Modells basierend auf den Annahmen zu verfügbaren Rohstoffmengen und der techno-ökonomischen Rahmenbedingungen aus Kapitel 2 angeführt. Zu Beginn werden verschiedene Kostenarten des zentralen und dezentralen Logistikkonzepts dargestellt und verglichen. In einer anschließenden Sensitivitätsanalyse im Kapitel 3.2 werden ausgewählte Parameter in deren Höhe variiert und die Lösungen hinsichtlich derer des Basisszenarios verglichen. Zuletzt werden im Kapitel 3.3 Szenarien berechnet, wodurch die Abhängigkeit der Standort- und Kapazitätsplanung von der Rohstoffverfügbarkeit dargestellt werden soll.

3.1 Basisszenario

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Modellrechnungen im Basisszenario dargestellt.
Die Ergebnisse umfassen die Gesamtkosten bzw. Verarbeitungskosten und eine grafische Darstellung der Detailergebnisse für ein BtL-Logistiknetzwerk.
Zur Lösung des Optimierungsmodells wird der kommerzielle Solver *Xpress* des Softwareunternehmens FICO und ein Rechner mit einem Intel Core i7-7700 HQ Prozessor mit 2.8 GHz und einem 32GB Arbeitsspeicher verwendet. Das Modell ist über eine FICO Python Programmierschnittstelle (API) implementiert und enthält 200.691 Variablen und 13 Nebenbedingungen. Die Berechnung der Lösung mit einer Abweichung von 0,99% vom optimalen Zielfunktionswert wurde nach rund 1,5 Stunden beendet.

3.1.1 Standortlösung dezentrales Logistikkonzept

Die Lösung des Optimierungsmodells aus Kapitel 2 ergibt die in Tabelle 14 angeführten Standorte zur dezentralen Vorbehandlung des Rohstoffs. In Abbildung 20 sind die realisierten Standorte kartografisch dargestellt. Die Linien stellen die Rohstofflieferanten auf

Gemeindeebene dar. Die Verteilung der dezentralen Pyrolyseanlagen lässt erkennen, dass sich die Wahl der Standorte stark an den Anbaugebieten bzw. am Rohstoffaufkommen orientiert.

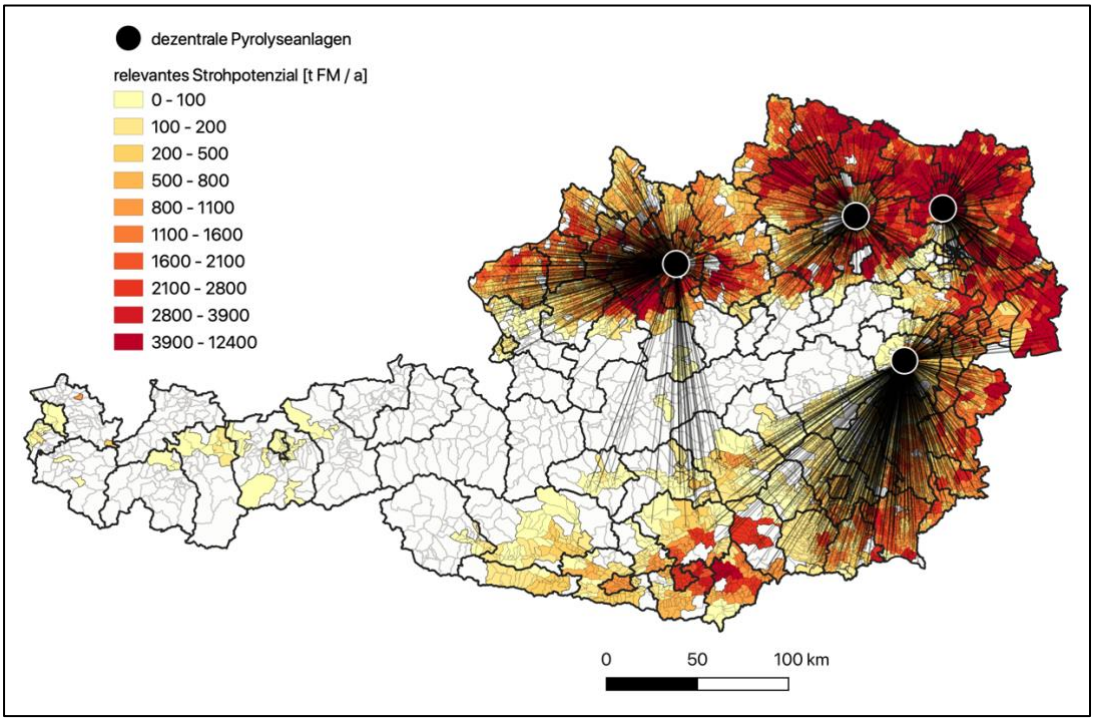

Abbildung 20: Standortlösung Pyrolyse dezentrales Konzept, Basisszenario

Im dezentralen Logistikkonzept werden die dezentralen Pyrolyseanlagen an den Standorten/ in den Bezirken *Linz-Land, Neunkirchen, Krems an der Donau* und *Korneuburg* errichtet. Die Verarbeitungskapazität für die vier Standorte liegt bei jeweils 450kt pro Jahr.
In Abbildung 21 sind die Standorte der dezentralen Pyrolyse- und der zentralen Syntheseanlage eingezeichnet. Der Synthesestandort wird am Standort *Metadynea* in Niederösterreich (Bezirk Krems) errichtet.

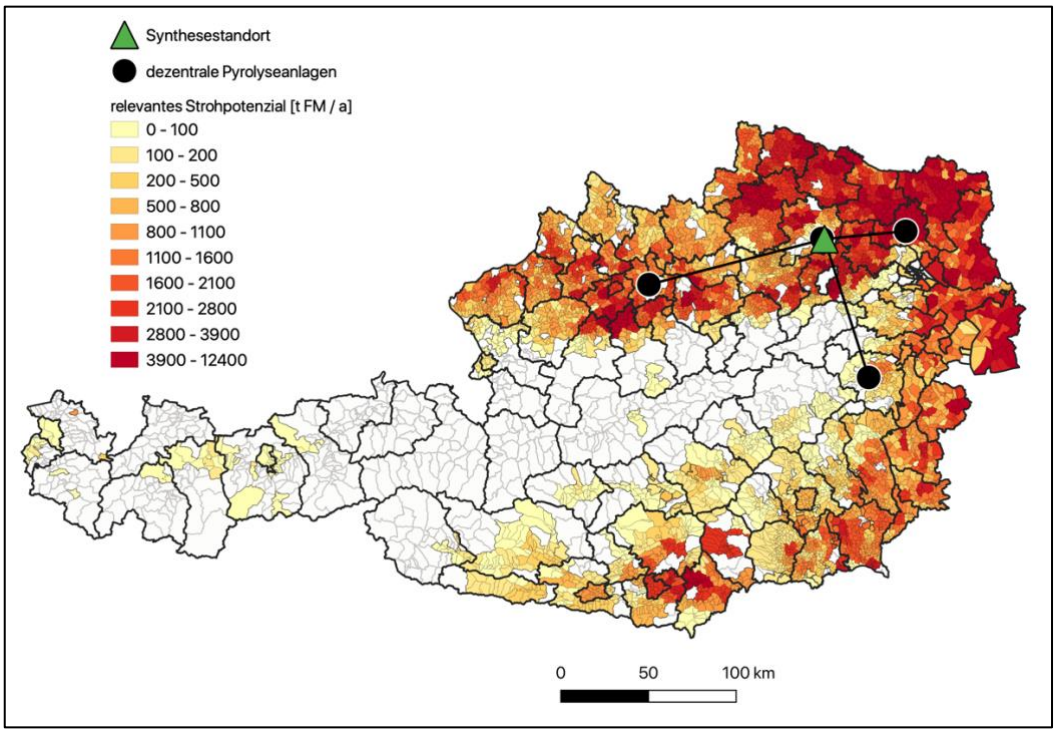

Abbildung 21: Standortlösung Synthese dezentrales Konzept, Basisszenario

3.1.2 Standortlösung zentrales Logistikkonzept

Anhand der Ergebnisse des zentralen Konzepts ist zu erkennen, dass sich die Standortwahl am Rohstoffaufkommen bzw. an deren räumliche Verteilung im nordöstlichen Gebiet orientiert. Im zentralen Konzept wird die kombinierte Pyrolyse- und Syntheseanlage ebenfalls am Standort *Metadynea* im Bezirk Krems errichtet.

In Abbildung 22 ist die Standortlösung und das Lieferschema des zentralen Konzepts dargestellt.

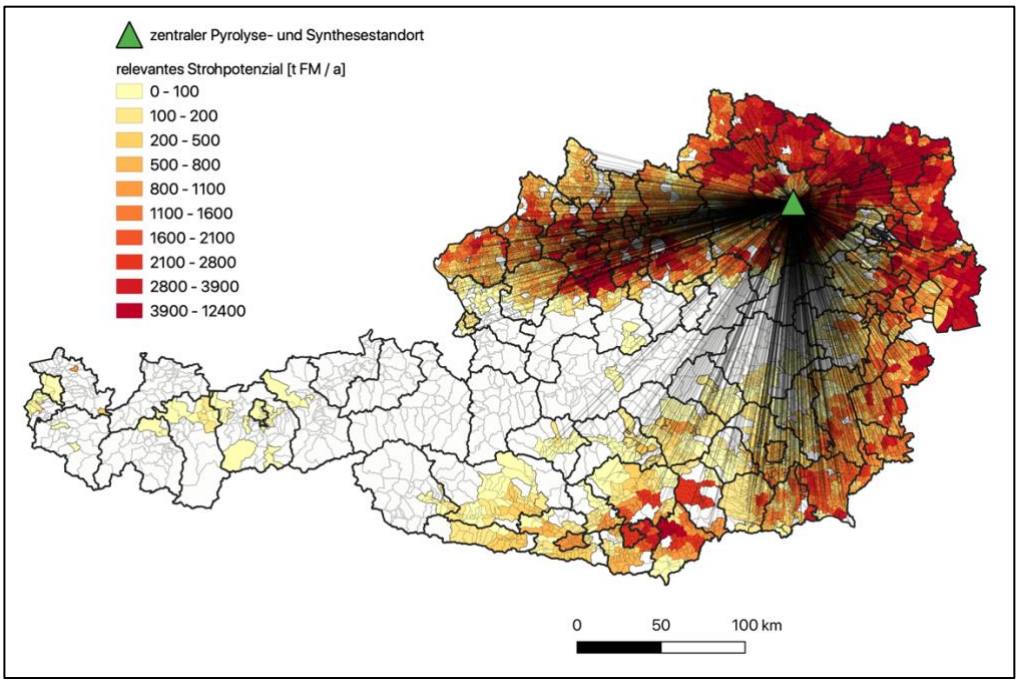

Abbildung 22: Standortlösung Pyrolyse-Syntheseanlage zentrales Konzept, Basisszenario

3.1.3 Gesamtkosten BtL-Wertschöpfungsnetzwerk

Die Modellrechnung des Basisszenarios ergibt jährliche Gesamtkosten von 271 Mio. € für das dezentrale bzw. 254 Mio. € für das zentrale Logistikkonzept. Bei diesen Ergebnissen sind die Erlöse durch den Verkauf überschüssiger elektrischer Energie aus der Syntheseanlage bereits miteingerechnet. Diese betragen beim dezentralen Konzept rund 26 Mio. € und beim zentralen Konzept rund 17 Mio. €. Diese Erlöse reduzieren sich um die betriebsmittelverbrauchsabhängigen Kosten der Synthese und sind in den variablen Synthesekosten der beiden untersuchten Konzepte miteingerechnet. Bei einer verarbeiteten Slurrymenge von 1.207.440 t und variablen Synthesekosten von -17,71 €/t Slurry ergeben sich in Summe -21,4 Mio. € beim dezentralen bzw. -11,9 Mio. € beim zentralen Konzept. Die einmaligen Gesamtinvestitionen zur Errichtung der technischen Infrastruktur (Pyrolyse- und Syntheseanlagen) betragen bei einem Abschreibungszeitraum von 20 Jahren rund 755 Mio. € im dezentralen bzw. 744 Mio. € im zentralen Logistikkonzept. Dies entspricht einer Differenz von rund 11 Mio. € bzw. rund 1,5%.

Abbildung 23 stellt die Gesamtkosten der berechneten Logistiknetzwerke gegenüber. Beide Konzepte weisen die gleichen Rohstoff-, Syntheseerrichtungs- und Synthesefixkosten auf. Im dezentralen Konzept fallen in der zweiten Distributionsstufe Kosten für den Slurrytransport in Höhe von 9,6 Mio. € an. Im dezentralen Netzwerk fallen Pyrolysefixkosten von rund 25 Mio. € an. Im zentralen Konzept betragen die Pyrolysefixkosten hingegen rund 22 Mio. €. Dieser

Kostenunterschied ist auf Skaleneffekte bzw. Größendegression der Kosten bei Anlagen mit höherer Kapazität zurückzuführen. Der größte Kostenunterschied ist bei den variablen Pyrolysekosten zu erkennen. Im dezentralen Konzept betragen diese rund 31 Mio. €. Dies entspricht rund dem 20-fachen der Kosten der zentralen Lösung bei 1,6 Mio. € (+1938%).

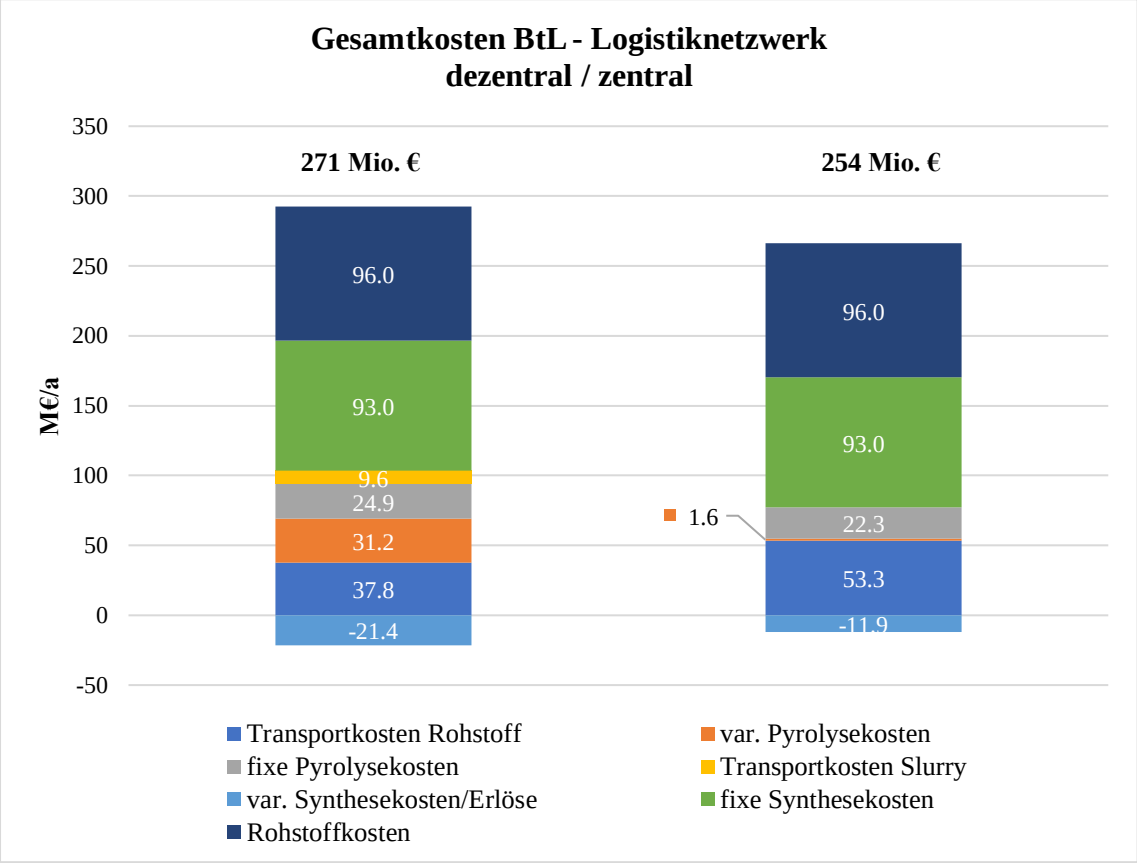

Abbildung 23: Gesamtkosten BtL Prozesskette Stroh; dezentral (links) und zentral (rechts)

Die dezentrale Lösung weist einen Kostenvorteil beim Rohstofftransport auf. Diese liegen beim dezentralen Konzept bei 37,8 Mio. € und sind somit um knapp ein Drittel günstiger (15,5 Mio. €; ~29%) als beim direkten Transport des Rohstoffs zu einer zentralen Pyrolyse-Syntheseanlage. Jedoch ergeben sich beim dezentralen Konzept in der zweiten Distributionsstufe Kosten für den Slurrytransport von den Pyrolyseanlagen zur zentralen Syntheseanlage, welche rund 10 Mio. € betragen. Somit ergeben sich in Summe Transportgesamtkosten von knapp 48 Mio. € beim dezentralen Konzept, welche verglichen zu den Transportgesamtkosten des zentralen Konzepts von 53,3 Mio. € immer noch um rund 10% geringer ausfallen. Die Abbildung 24 und 25 zeigen die prozentuale Aufteilung der Gesamtkosten der beiden Logistikkonzepte.

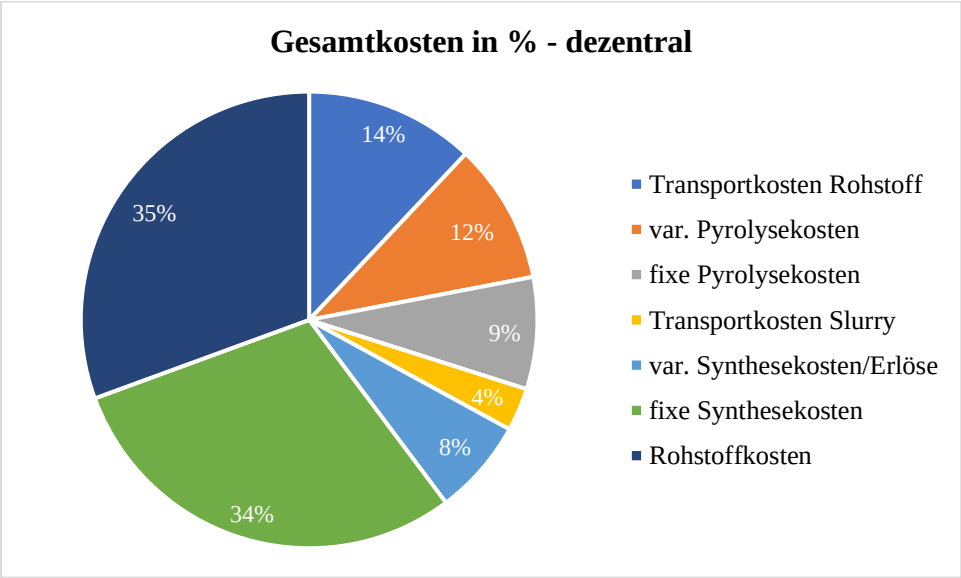

Abbildung 24: Gesamtkosten in Prozent - dezentral (Summe 271 Mio. €)

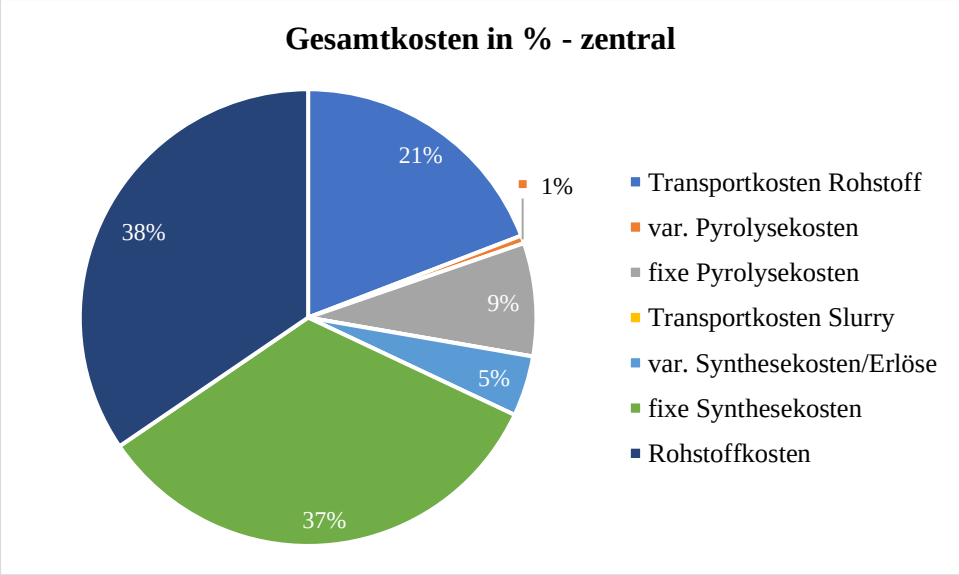

Abbildung 25: Gesamtkosten in Prozent - zentral (Summe 254 Mio. €)

Im dezentralen bzw. im zentralen Konzept machen die Rohstoffkosten und die Kosten für dessen Transport in Summe einen relativen Anteil von 49% bzw. 59% der jährlichen Gesamtkosten aus. Die Kosten für die Pyrolyse (variable + fixe Kosten) fallen im dezentralen Konzept relativ um etwa 10% höher aus als beim zentralen Konzept. Die Kosten für die Synthese tragen in beiden Konzepten betragsmäßig den gleichen Anteil zu den Gesamtkosten bei (42%). Die variablen Synthesekosten bzw. die Erlöse durch den Verkauf von elektrischer Energie reduzieren im zentralen Konzept die Gesamtkosten um rund 5%, im dezentralen

Konzept um rund 8%. Dabei ist zu beachten, dass durch die dezentrale Pyrolyse jedoch höhere Stromkosten anfallen. Vergleicht man jedoch die Zahlen aus Abbildung 23, ist zu erkennen, dass die vergleichsweise höheren Erlöse im dezentralen Konzept die höheren variablen Pyrolysekosten nicht übertreffen, die Gesamtkosten jedoch stärker beeinflussen, als im zentralen Konzept.

3.1.4 Detailkosten BtL - Wertschöpfungsnetzwerk

Als erweiterte Darstellungsweise der Kosten und zur verbesserten Vergleichbarkeit der verschiedenen Supply Chain Konzepte, wird ein Produktionspreis pro Tonne Rohstoff und in Folge eine Berechnung und Darstellung der Kosten in Euro pro Kilogramm bzw. Euro pro Liter Biokraftstoff durchgeführt.
Bezieht man alle Teilkostenbeträge der Gesamtkosten auf die verarbeitete Menge von 1,8 Mio. Tonnen Stroh, erhält man Verarbeitungskosten von rund 159 €/t im dezentralen bzw. rund 150 €/t Stroh FM im zentralen Logistikkonzept. In Abbildung 26 sind die Verarbeitungskosten pro Tonne Stroh und deren Zusammensetzung dargestellt. Die Rohstoff- und fixen Synthesekosten nehmen in Summe in beiden Logistikkonzepten den gleichen Anteil an den Gesamtkosten an. Die Kostenunterschiede der beiden Konzepte werden - wie in den vorigen Vergleichen dargestellt - durch die Transportkosten, Pyrolysekosten und die variablen Synthesekosten verursacht.

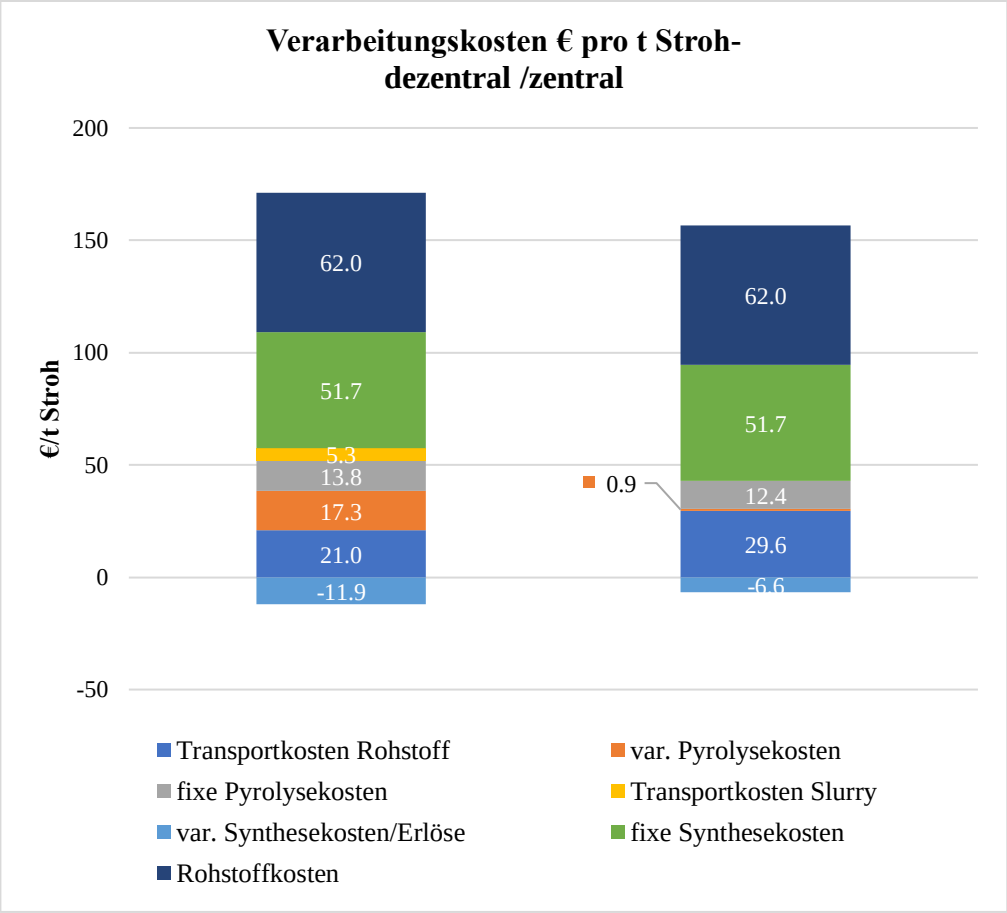

Abbildung 26: Verarbeitungskosten pro Tonne Stroh; Lösung dezentral (links) und zentral (rechts)

Im dezentralen Konzept (Abb. 26 links) ergeben sich Gesamttransportkosten von knapp 27 €/t Stroh. Die Pyrolysekosten (variabel + fixe Kosten) ergeben in Summe knapp 31€/t Stroh. Im zentralen Konzept fallen die Pyrolysekosten mit rund 13 €/t vergleichsweise niedriger aus. Die Kosten für den Rohstofftransport sind im zentralen Konzept um knapp 8 €/t höher als im dezentralen Konzept. Durch die geringeren Transportdistanzen im dezentralen Konzept werden die Rohstofftransportkosten also um rund 38% pro Tonne reduziert.

In Abbildung 27 und 28 werden die relativen Anteile der Teilkostenbeträge an den Gesamtkosten der zwei Logistikkonzepte dargestellt.

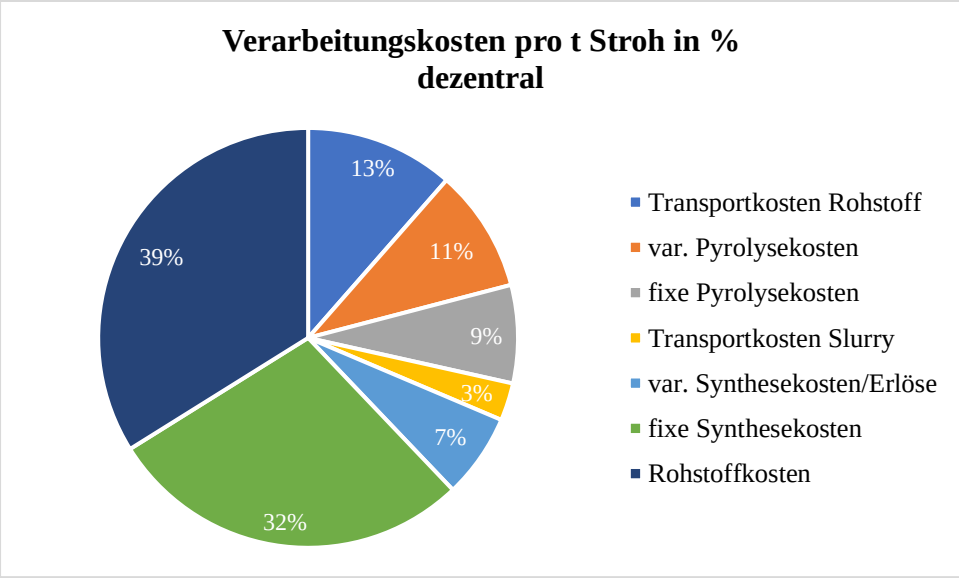

Abbildung 27: Verarbeitungskosten pro Tonne Stroh in Prozent - dezentral (Summe 159 €/t Stroh)

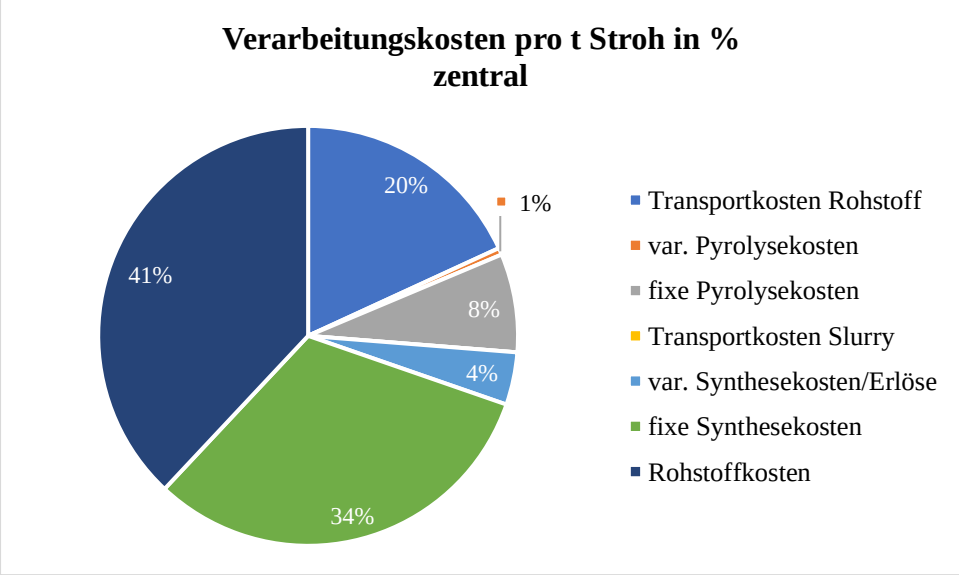

Abbildung 28: Verarbeitungskosten pro Tonne Stroh in Prozent - zentral (Summe 150 €/t Stroh)

In beiden Logistikkonzepten ergeben die mengenbezogenen Rohstoffkosten und die Synthesefixkosten den Großteil der Verarbeitungskosten. Diese machen in Kombination im dezentralen Konzept 71% bzw. 75% beim zentralen Konzept aus. Die Transportkosten für den Rohstoff und Slurry ergeben im dezentralen Konzept in Summe 16%, beim zentralen Konzept fallen 20% der mengenbezogenen Verarbeitungskosten durch den Rohstofftransport an. Im zentralen Konzept ergeben die Rohstoffkosten und Kosten für dessen Transport (=Bereitstellungskosten) 61%. Im dezentralen Konzept machen die Biomassebereitstellungskosten 52% der Gesamtverarbeitungskosten aus. Änderungen der

Rohstoffpreise bzw. der Transportkosten können somit unter den gegebenen Annahmen einen starken Einfluss auf die Verarbeitungskosten von Stroh zu Biokraftstoffen haben. Die Detailergebnisse des dezentralen und zentralen Logistikkonzepts sind in Tabelle 14 und 15 dargestellt. Je nach Transportdistanz und gelieferten Rohstoffmengen ergeben sich unterschiedliche Kosten pro Pyrolysestandort. Um einen Kostenvergleich der Standorte zu erhalten, sind die Verarbeitungskosten ab Pyrolyse (Tab. 14) bzw. ab Synthese (Tab. 15) ebenfalls angegeben.

Tabelle 14: Detailergebnisse Verarbeitungskosten bis Pyrolyse pro Tonne Stroh; dezentrales und zentrales Konzept

Kosten dezentrales Logistikkonzept							
Pyrolysestandorte	**Anlagen-kapazität** [t Stroh FM]	**Rohstoff-kosten** [€]	**Transport-kosten Rohstoff** [€]	**var. Pyrolyse-kosten** [€]	**fixe Pyrolyse-kosten** [€]	**Verarbeitungs-kosten Pyrolyse** [€]	**Verarbeitungs-kosten ab Pyrolyse** [€/t Stroh]
Krems (Stadt)	450.000	23.994.000	8.747.250	7.800.050	6.222.940	46.764.240	104
Korneuburg	450.000	23.994.000	8.978.900	7.800.050	6.222.940	46.995.890	104
Neunkirchen	450.000	23.994.000	11.005.900	7.800.050	6.222.940	49.022.890	109
Linz-Land	450.000	23.994.000	9.026.120	7.800.050	6.222.940	47.043.110	105
Summe	1.800.000	95.976.000	37.758.170	31.200.200	24.891.760	189.826.130	-
Kosten zentrales Logistikkonzept							
zentraler Pyrolyse- & Synthesestandort	**Kapazität Pyrolyse** [t Stroh FM]	**Rohstoff-kosten** [€]	**Transport-kosten Rohstoff** [€]	**var. Pyrolyse-kosten** [€]	**fixe Pyrolyse-kosten** [€]	**Verarbeitungs-kosten ab Pyrolyse** [€]	**Verarbeitungs-kosten ab Pyrolyse** [€/t Stroh]
Metadynea (Krems)	1.800.000	95.976.000	53.261.077	1.548.000	22.280.915	173.065.992	105

Tabelle 15: Detailergebnisse Verarbeitungskosten pro t Stroh ab Slurrytransport; dezentrales und zentrales Konzept

Kosten dezentrales Logistikkonzept						
Pyrolysestandorte	**Anlagen-kapazität** [t Stroh FM]	**Transport-kosten Slurry** [€]	**var. Synthese-kosten** [€]	**fixe Synthese-kosten** [€]	**Verarbeitungs-kosten Synthese** [€]	**Verarbeitungs-kosten ab Synthese** [€/t Stroh]
Krems (Stadt)	450.000	839.002	-5.348.959	23.253.875	18.743.918	146
Korneuburg	450.000	2.062.440	-5.348.959	23.253.875	19.967.356	149
Neunkirchen	450.000	3.050.540	-5.348.959	23.253.875	20.955.456	156
Linz-Land	450.000	3.608.780	-5.348.959	23.253.875	21.513.696	152
Summe	1.800.000	9.560.762	-21.395.837	93.015.500	81.180.425	-
Kosten zentrales Logistikkonzept						
zentraler Pyrolyse- & Synthesestandort	**Kapazität Pyrolyse** [t Stroh FM]	**Transport-kosten Slurry** [€]	**var. Synthese-kosten** [€]	**fixe Synthese-kosten** [€]	**Verarbeitungs-kosten Synthese** [€]	**Verarbeitungs-kosten ab Synthese** [€/t Stroh]
Metadynea (Krems)	1.800.000	-	- 11.893.284	93.015.662	81.122.378	150

Die Verarbeitungskosten der Pyrolyse ergeben sich aus der Summe der Kosten bis zu diesem Schritt. In diesem Fall sind das die Rohstoffkosten und Kosten für dessen Transport und die variablen und fixen Pyrolysekosten, welche in Summe die *Verarbeitungskosten Pyrolyse* bilden. Bezogen auf die jeweilige Rohstoffkapazität der verschiedenen Pyrolysestandorte ergeben sich Pyrolysekosten pro Tonne Rohstoff. Diese liegen beim dezentralen Konzept durchschnittlich bei 105 € pro t Stroh. Beim zentralen Konzept ergeben sich Pyrolysekosten von rund 96 € pro t Stroh.

Die Verarbeitungskosten der Synthese ergeben sich analog zur Berechnung der Pyrolysekosten. Die Verarbeitungskosten ab Synthese erhält man, indem man die Kosten für den Slurrytransport, die variablen und fixen Synthesekosten aufsummiert. Die Verarbeitungskosten ab Synthese in Tabelle 15 stellen die Gesamtverarbeitungskosten des Liefernetzwerks dar. Das heißt, die Kosten aus der vorangehenden Pyrolyse sind miteinbezogen. Somit belaufen sich die Gesamtkosten des dezentralen Konzepts im Schnitt auf 159 € pro t Stroh bzw. auf 150 € pro t Stroh bei zentral-kombinierter Pyrolyse und Synthese.

Unter Anwendung des Faktors (1,360 l/kg; Siedepunkt T_s = -24,8°C) zur Umrechnung des Endprodukts *Dimethylether* von Tonnen auf Liter erhält man eine Menge von rund 279 Mio. Liter (Linde Gas AG, 2008). Somit lässt sich ein Produktionspreis in Euro pro Liter darstellen, indem man die jährlichen Gesamtkosten durch die Produktionsmenge an Endprodukt in Liter dividiert. Es ergibt sich ein Literpreis von 0,97 € im dezentralen und 0,91 € im zentralen Logistiknetzwerk. In Tabelle 16 sind die bei dieser Berechnung berücksichtigten Werte der Kosten und Mengen angeführt.

Tabelle 16: Gesamtverarbeitungskosten BtL-Produktionsnetzwerk

Verarbeitungskosten [€/a]	
dezentral	*zentral*
271.006.555	254.190.208
Menge Biokraftstoff	
t/a	l/a
205.265	279.365.393
Herstellkosten [€/l]	
0,97	0,91
Herstellkosten [€/kg]	
1,32	1,24

3.2 Sensitivitätsanalyse dezentrales Logistikkonzept

Die Ergebnisse aus dem vorigen Kapitel basieren auf Werten und Annahmen, welche mit Unsicherheiten behaftet sind. Gründe für Unsicherheiten sind z.B. Schwankungen in Rohstoffpreisen, Personalkosten und Kapitalkosten bzw. weitere sich ändernde Rahmenbedingungen innerhalb des betrachteten Systems. Darüber hinaus sind Schätzungen und Angaben zu ökonomischen und technischen Parametern der verfahrenstechnischen Anlagen meist nur im Labor oder Pilotmaßstab zugänglich. Die Sensitivitätsanalyse soll darstellen, in welchem Maß diese Unsicherheiten verschiedene Ergebnisse beeinflussen. Dafür werden einzelne Parameter innerhalb eines Schwankungsbereichs variiert und das Ergebnis einer Zielgröße auf dessen Veränderung untersucht. Dafür werden ausgewählte Parameter einzeln und schrittweise um ± 25% ausgehend vom Basiswert variiert, während andere Eingangsparameter konstant bleiben. Die Auswahl dieser Parameter basiert auf den Ergebnissen aus dem Kapitel 3.1. Es werden jene Parameter gewählt, welche den größten relativen Anteil an den Gesamtkosten der BtL-Prozesskette tragen. Folgende Parameter werden folglich in der Analyse variiert:

- Rohstoffkosten
- Rohstofftransportkosten (fix & variabel)
- Synthesefixkosten

Bei der in der Sensitivitätsanalyse beobachteten Zielgröße handelt es sich um die jährlichen Gesamtkosten der dezentralen BtL-Prozesskette.

3.2.1 Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse in Abbildung 29 zeigt die Abhängigkeit der jährlichen Gesamtkosten des dezentralen Logistikkonzepts von den ausgewählten Eingangsparametern.

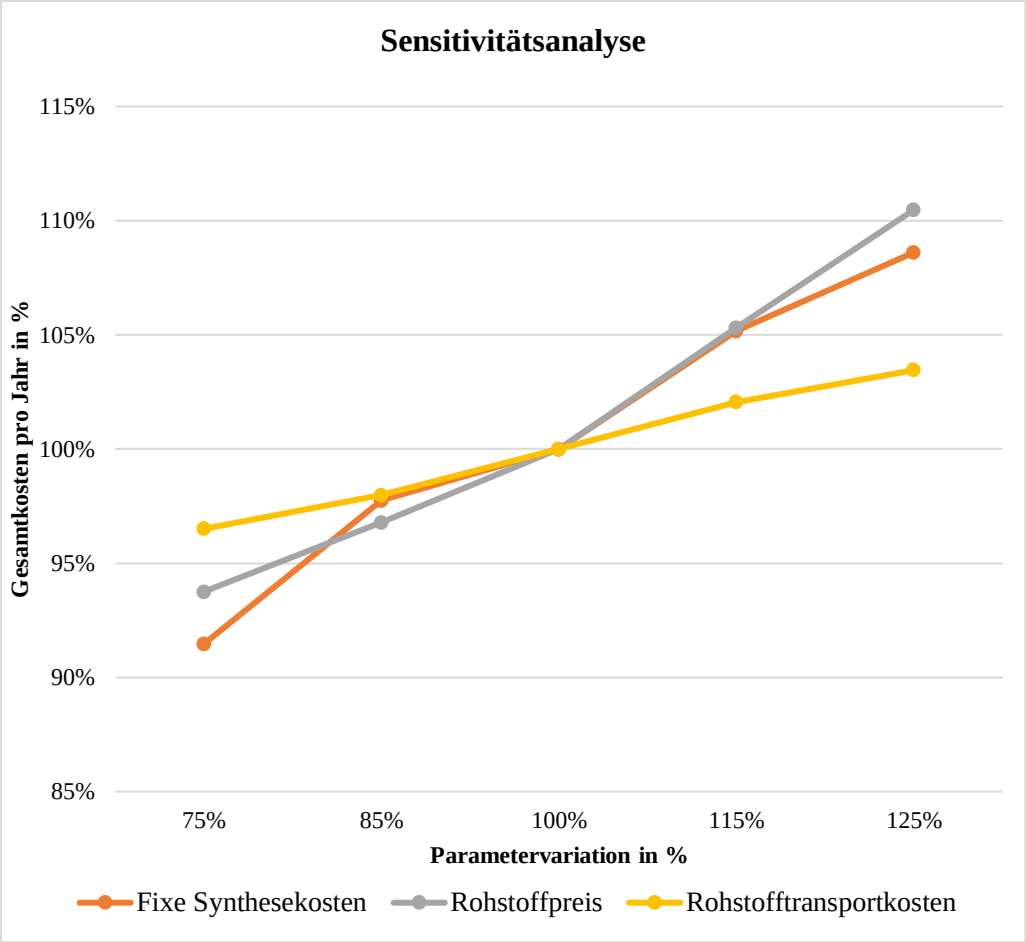

Abbildung 29: Auswertung Sensitivitätsanalyse Gesamtkosten; dezentrales Logistikkonzept

Eine Minderung der Synthesefixkosten um 25% bedeutet eine Reduktion der jährlichen Gesamtkosten von rund 9%. Weiterhin ist aus der Sensitivitätsanalyse die Bedeutung des Rohstoffpreises zu erkennen. Steigt der Preis für Reststroh etwa um 25%, ist mit einer Steigerung der Gesamtkosten von rund 11% zu rechnen. Einen weniger starken Effekt auf die Gesamtkosten haben die Rohstofftransportkosten. Eine Veränderung dieses Parameters um jeweils ± 25% verursacht eine Veränderung der Gesamtkosten um jeweils ± 3%. Die Biomassebereitstellungskosten setzen sich aus den Rohstoffkosten und den Rohstofftransportkosten zusammen. Veränderungen dieser kombinierten Parameter resultieren folglich in einer stärkeren Schwankung der Gesamtkosten der BtL-Prozesskette.

Das dezentrale Konzept unterscheidet sich hinsichtlich dessen Kostenstruktur vom zentralen Konzept. Um eine Abschätzung treffen zu können, welche Kosten des dezentralen Konzepts sich um wie viel reduzieren müssten, um mit dem zentralen Konzept konkurrieren zu können, wird im folgenden Abschnitt behandelt. Es werden jene „unabhängigen“ Teilkostenbeträge des dezentralen Logistikkonzepts identifiziert, in deren Höhe variiert und die Auswirkungen auf

die jährlichen Gesamtkosten dargestellt. Abbildung 30 stellt die Abhängigkeit der Gesamtkosten des dezentralen Konzepts von den Pyrolysekosten dar.

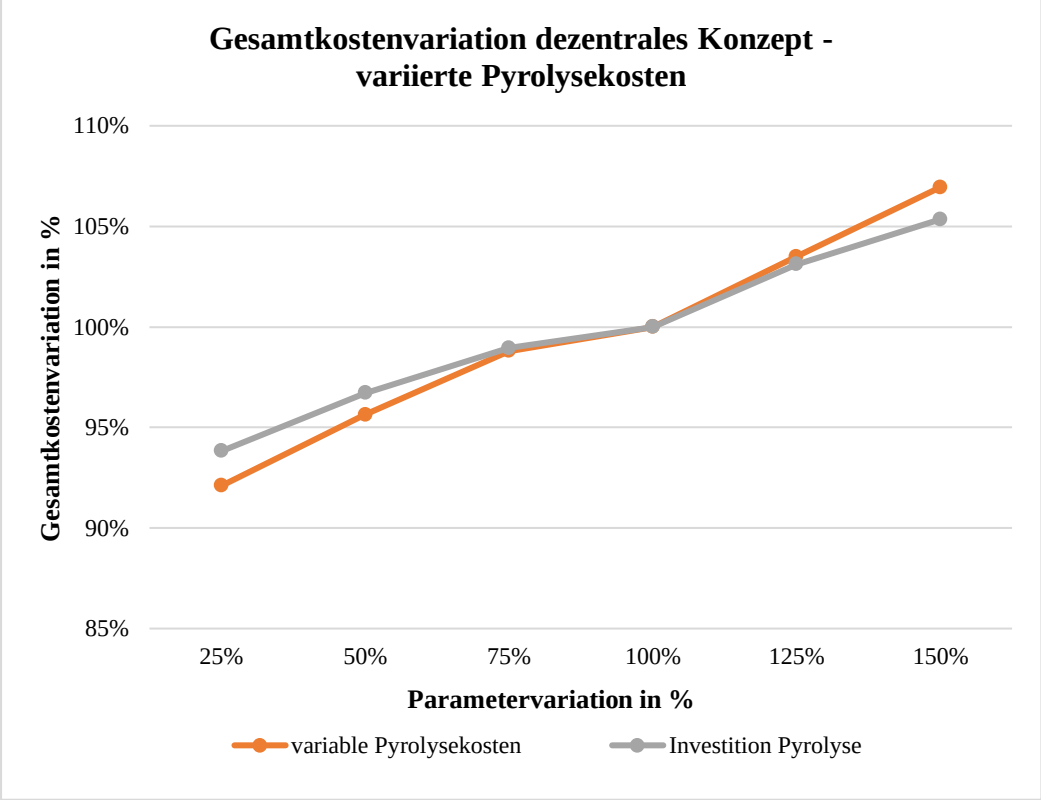

Abbildung 30: Gesamtkostenvariation bei veränderten Pyrolysekosten (fix & variabel); dezentrales Konzept

Tabelle 17 sind die absoluten Werte der jährlichen Gesamtkosten des dezentralen Konzepts bei veränderten Pyrolysekosten zu entnehmen.

Tabelle 17: Gesamtkostenvariation bei veränderten Pyrolysekosten (fix & variabel); dezentrales Konzept

	Gesamtkosten	
% Variation	*variable Pyrolysekosten*	*Investition Pyrolyse*
25%	249.586.204 €	254.256.127 €
50%	259.183.308 €	262.099.614 €
75%	267.753.464 €	268.164.281 €
100%	271.006.555 €	271.006.555 €
125%	280.452.629 €	279.432.054 €
150%	289.815.392 €	285.489.911 €

Bei den variablen und fixen Pyrolysekosten des dezentralen Konzepts handelt es sich um jene Kosten, die unabhängig bzw. ohne Auswirkungen auf die Gesamtkosten des zentralen Konzepts variiert werden können. Die jährlichen Gesamtkosten des zentralen Konzepts betragen 254,2 Mio. €, jene des dezentralen Konzepts betragen 271 Mio. €. Das bedeutet, dass die Gesamtkosten des dezentralen Konzepts um rund 6% (bzw. auf 93,8% = 1-0,062) reduziert werden müssten, um mit dem zentralen Konzept konkurrieren zu können. Aus Abbildung 30 ist zu entnehmen, dass bei einer Reduktion der variablen Pyrolysekosten um 75% vom Basiswert (100%) die Gesamtkosten um rund 8% geringer ausfallen (249,6 Mio. €, vgl. Tab. 17). Die Reduktion der Investition der Pyrolyseanlagen um 75% ergeben eine Gesamtkostenreduktion von 6%. Bei einer Halbierung der variablen Pyrolysekosten verringern sich die Gesamtkosten um rund 4%, wobei sich die gleiche Änderung der Investitionshöhe mit 3% geringeren Gesamtkosten weniger stark auswirkt.

3.3 Verfügbarkeitsszenarien

Im vorigen Kapitel werden Unsicherheiten bzw. die Veränderung von techno-ökonomischen Parametern und deren Einfluss auf die Gesamtkosten untersucht. Analog zur Vorgehensweise im vorigen Kapitel soll dieser Abschnitt die Abhängigkeit der Standort- und Kapazitätsplanung von der verfügbaren Rohstoffmenge *Stroh* analysiert werden. Über Szenarien mit einer Gesamtverarbeitungsmenge von 25%, 50% und 75% des gesamt über Österreich verteilten *relevanten* Strohpotenzials werden jeweils eine Standort- und Kapazitätsplanung durchgeführt und die Standortergebnisse dargestellt. Über diese Methode soll die Situation einer Nutzungskonkurrenz des Rohstoffs *Reststroh* simuliert und der Einfluss auf die Standort- und Kapazitätswahl dargestellt werden.

3.3.1 Szenario Rohstoffangebot: 25%

In diesem Szenario wird die Verarbeitungsmenge auf 25% des ursprünglichen Angebots von 1,8 Mio. t Stroh reduziert. Es ergibt sich somit ein Verarbeitungsmenge von 450kt. Abbildung 31 und 32 zeigen die Standortlösung des dezentralen und zentralen Konzepts.
Im dezentralen Konzept wird in diesem Szenario eine Pyrolyseanlage am Standort *Krems* mit einer Kapazität von 450kt Stroh errichtet. Die Syntheseanlage befindet sich ebenfalls im Bezirk Krems am Standort *Metadynea.*

Bei einer zentralen Organisation wird der Standort der kombinierten Pyrolyse- und Syntheseanlagen im Bezirk Krems am Standort *Metadynea* errichtet.

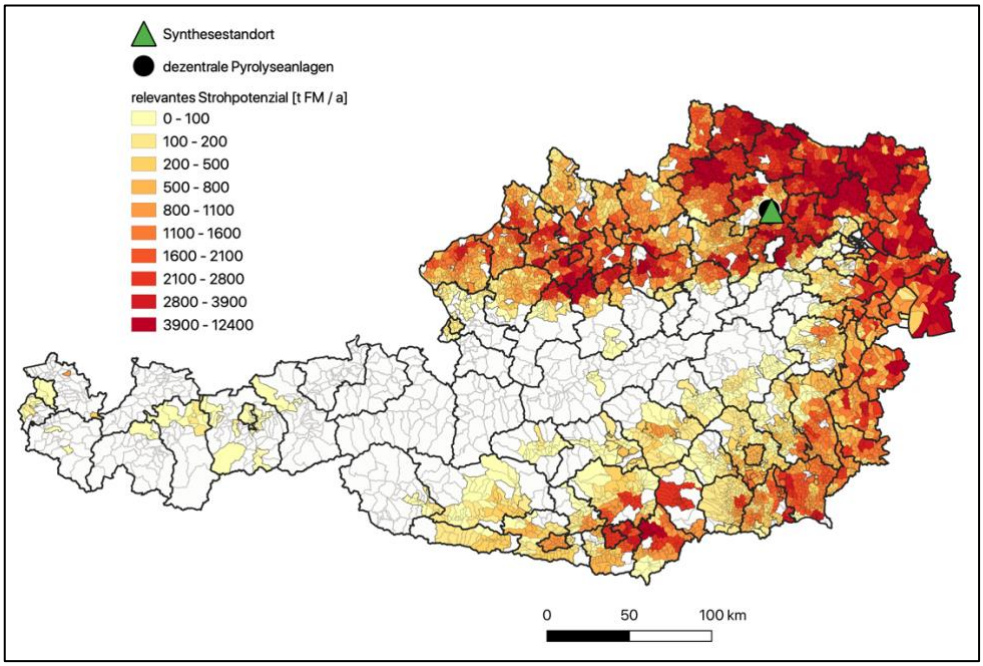

Abbildung 31: Standortlösung dezentrales Konzept bei 25% Rohstoffverfügbarkeit

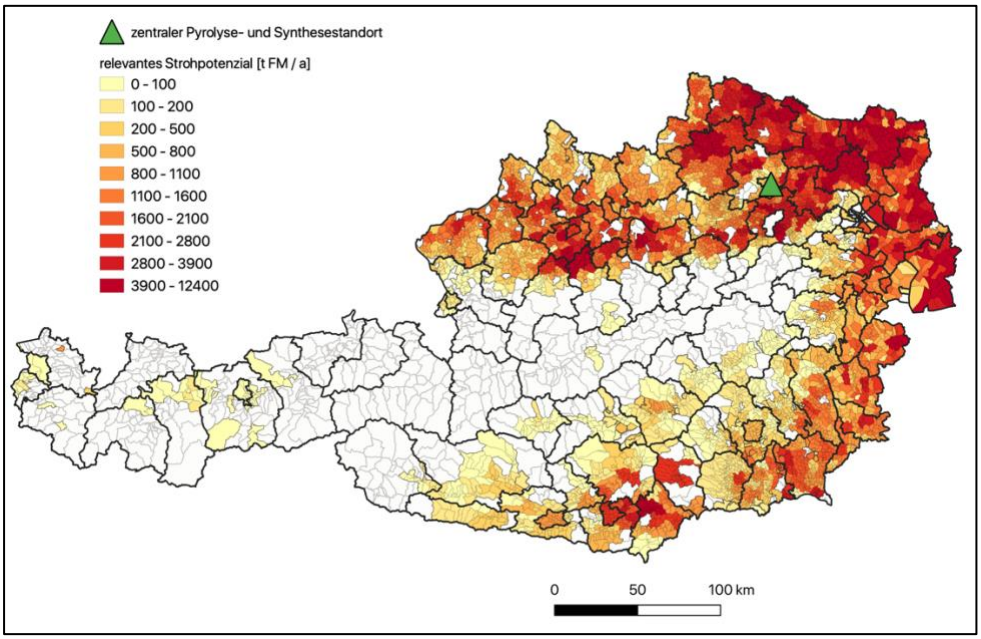

Abbildung 32: Standortlösung zentrales Konzept bei 25% Rohstoffverfügbarkeit.

3.3.2 Szenario Rohstoffangebot: 50%

Analog zur Vorgehensweise im vorigen Kapitel wird die Gesamtverarbeitungsmenge auf 50% bzw. 900kt Stroh reduziert und eine Standort- und Kapazitätsplanung durchgeführt. Die Ergebnisse des dezentralen Konzepts sind in Abbildung 33 dargestellt.

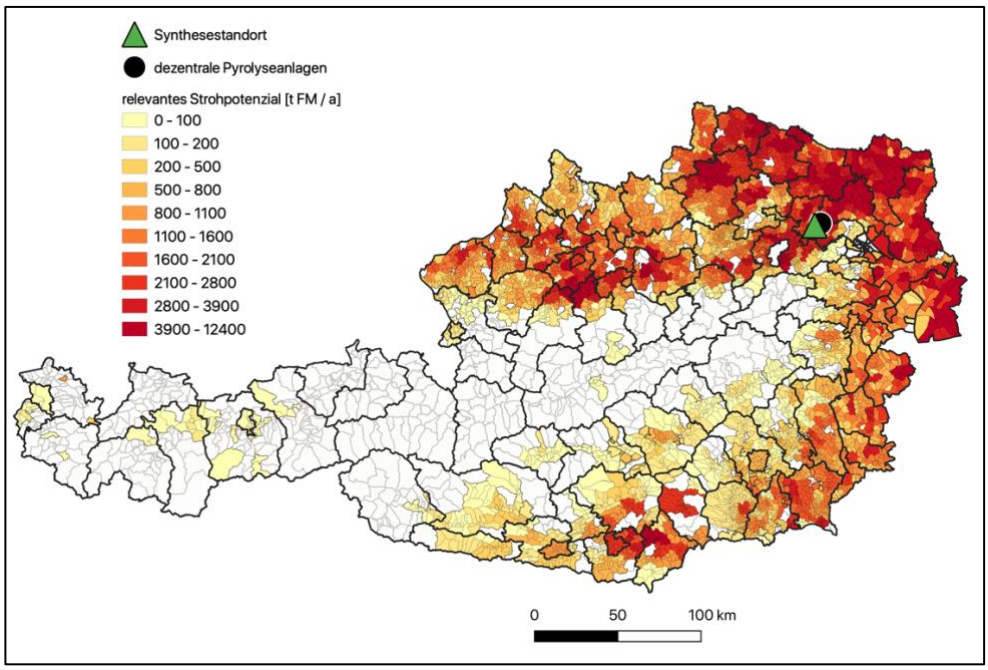

Abbildung 33: Standortlösung dezentrales Konzept bei 50% Rohstoffverfügbarkeit

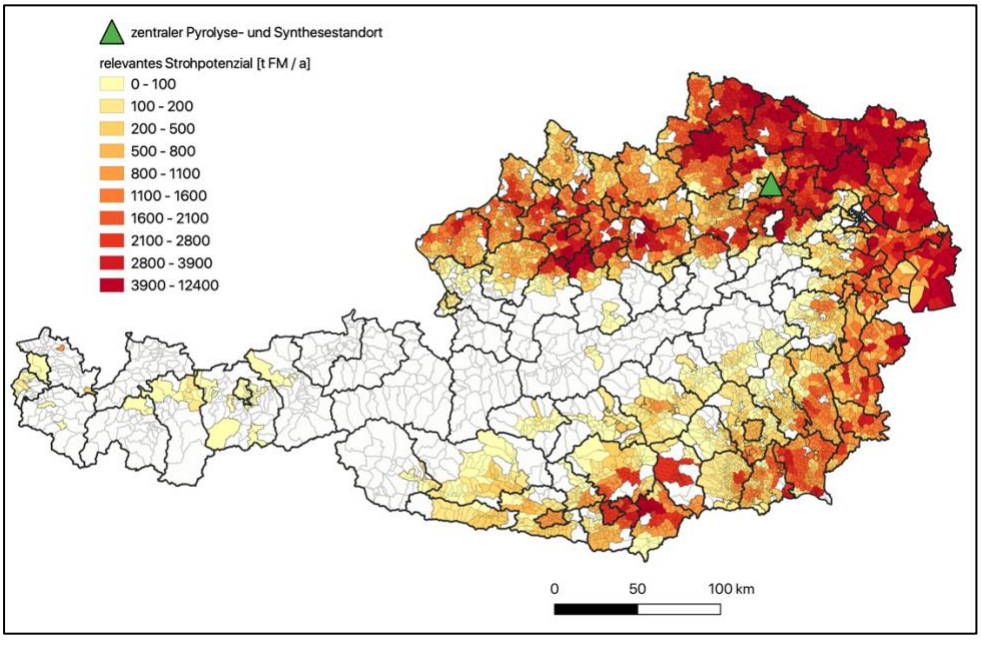

Abbildung 34: Standortlösung zentrales Konzept bei 50% Rohstoffverfügbarkeit

Beim dezentralen Konzept befindet sich die Pyrolyseanlage im Bezirk *Tulln* und wird mit einer Kapazität von 900kt installiert, was der gesamten, verfügbaren Rohstoffmenge in diesem Szenario entspricht. Die Syntheseanlage im dezentralen Konzept wird am Standort *Donau Chemie Pischelsdorf* errichtet. Im zentralen Logistikkonzept (Abbildung 34) wird die Syntheseanlage im Bezirk *Krems* am Standort *Metadynea* errichtet.

3.3.3 Szenario Rohstoffangebot: 75%

Bei einer Reduktion des Rohstoffangebots um ein Viertel werden zwei Standorte für die dezentrale Pyrolyse gewählt. Die Kapazität am Standort *Tulln* wird mit 900kt und am Standort *Perg* mit 450kt gewählt. Die zugehörige Syntheseanlage wird am Standort *Donau Chemie Pischelsdorf* errichtet. Die Abbildungen 35 und 36 zeigen die grafische Darstellung der Standortplanung des dezentralen und des zentralen Logistikkonzepts.

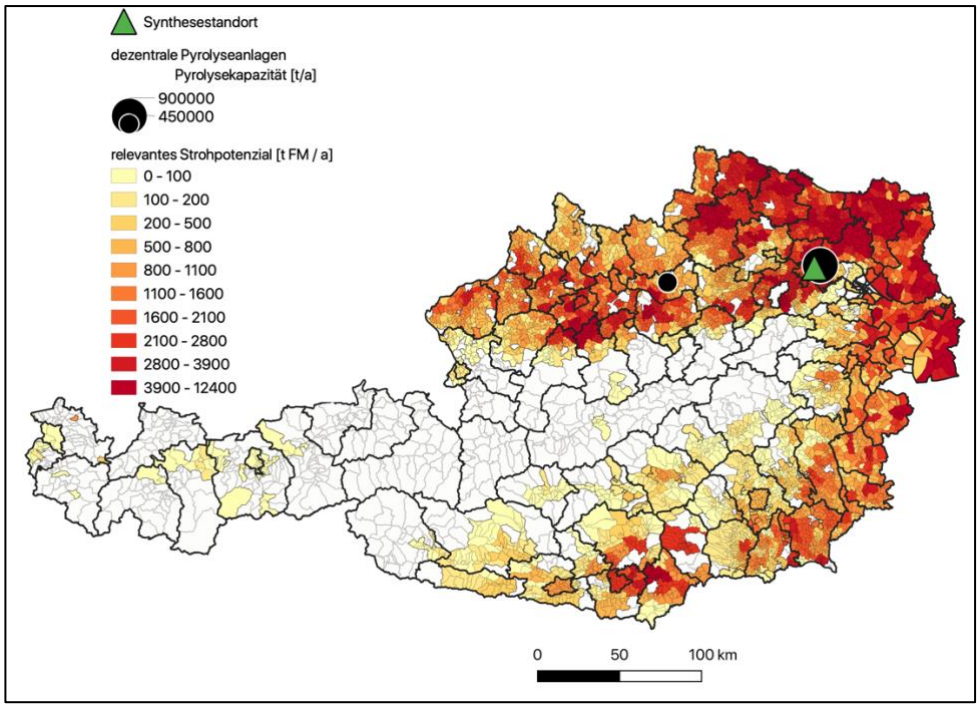

Abbildung 35: Standortlösung dezentrales Konzept bei 75% Rohstoffverfügbarkeit

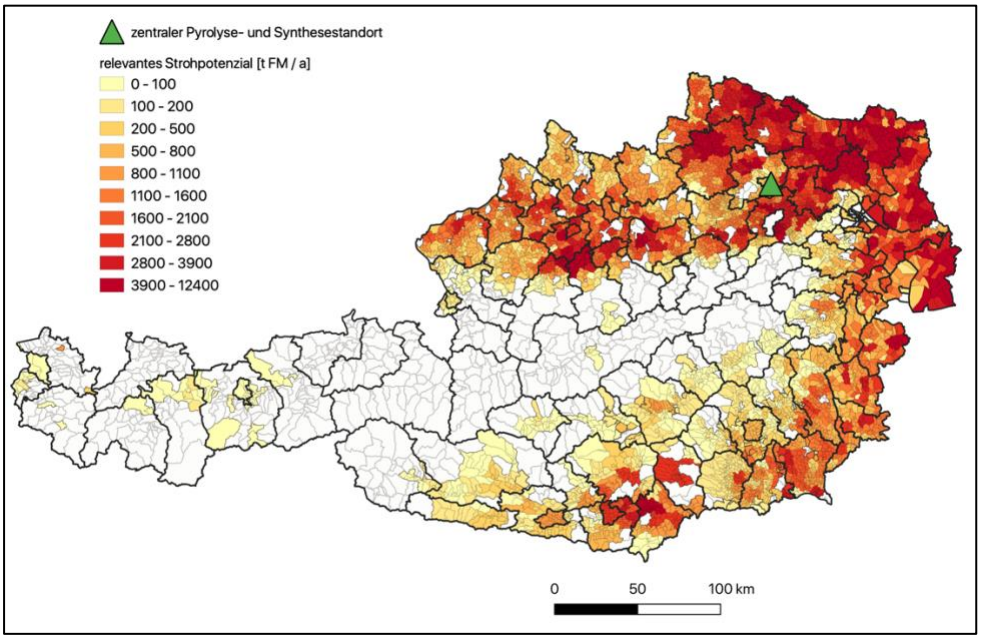

Abbildung 36: Standortlösung zentrales Konzept bei 75% Rohstoffverfügbarkeit

Für das zentrale Konzept ergibt sich die gleiche Standortlösung (Bezirk Krems/*Metadynea*) wie in den vorigen Verfügbarkeitsszenarien am Standort *Metadynea* im Bezirk Krems.

3.3.4 Szenario: Verfügbarkeit Pyrolyseanlagen

Die Auswirkungen der Anzahl dezentraler Pyrolyseanlagen auf die Gesamtkosten soll in diesem Kapitel untersucht werden. Dabei wird die Anzahl der zu errichtenden Anlagen auf 1 bis 9 mit jeweils gleicher Kapazität fixiert. Es soll das gesamte relevante Strohpotenzial von 1,8Mt Stroh verarbeitet werden. Tabelle 18 fasst die Ergebnisse der Szenarienrechnung zusammen:

Tabelle 18: Detailkosten; in Abhängigkeit von Pyrolyseanlagenzahl

			Transportkosten		Variable Kosten		Fixkosten		Gesamtkosten
Anzahl PY Anlagen	**Kapazität je Anlage [t/a]**	**Rohstoff-kosten [M€/a]**	**Biomasse [M€/a]**	**Slurry [M€/a]**	**Pyrolyse [M€/a]**	**Synthese [M€/a]**	**Pyrolyse [M€/a]**	**Synthese [M€/a]**	**[M€/a]**
1	1.800.000	95,98	51,89	3,36	30,55	- 21,40	22,47	93,02	276,11
2	900.000	95,98	43,81	11,83	30,77	- 21,40	23,25	93,02	277,50
3	600.000	95,98	39,84	12,36	30,98	- 21,40	24,05	93,02	275,08
4	**450.000**	**95,98**	**37,76**	**9,56**	**31,20**	**- 21,40**	**24,89**	**93,02**	**271,01**
5	360.000	95,98	37,67	11,22	31,42	- 21,40	25,76	93,02	273,91
6	300.000	95,98	37,23	12,02	31,63	- 21,40	26,65	93,02	275,38
7	257.143	95,98	36,65	11,43	31,85	- 21,40	27,58	93,02	275,35
8	225.000	95,98	33,71	13,16	32,06	- 21,40	28,53	93,02	275,31
9	200.000	95,98	33,25	12,73	32,28	- 21,40	30,33	93,02	276,44

Die Lösung mit vier dezentralen Pyrolyseanlagen mit jeweils 450kt Verarbeitungskapazität stellt die optimale Lösung des Basisszenarios dar. Es ist kein eindeutiger Trend bzw. Abhängigkeit der Gesamtkosten von der Anlagenanzahl zu erkennen. Dennoch hat die Anzahl der zu errichtenden Anlagen einen Einfluss auf einige Teilkostenbeträge. Eine Erhöhung der Anlagenanzahl resultiert in geringeren Transportkosten der Biomasse, bewirkt jedoch auch steigenden Slurrytransportkosten. Das Szenario „4“ weist jedoch die geringsten Slurrytransportkosten auf. Die Pyrolysekosten (fix & variabel) steigen ebenfalls mit zunehmender Anlagenanzahl an.

In Tabelle 19 sind die Ergebnisse der Standortplanung der Szenarien 1 bis 9 dargestellt. Dabei ist der Name des Szenarios als die Anzahl der zu errichtenden Pyrolyseanlagen zu verstehen. Neben den tatsächlich gewählten Standorten der Szenarien ist die Häufigkeit des jeweiligen Standorts abgebildet. Es sind bevorzugte Standorte von dezentralen Pyrolyseanlagen zu erkennen, welche in mehreren Szenarien Bestandteil der Lösung sind.

Tabelle 19: Standortlösung Pyrolyseanlagen in Abhängigkeit von Pyrolyseanlagenzahl

Pyrolysestandort	**Szenario**									**Häufigkeit**
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Hartberg-Fürstenfeld			x	x	x	x	x	x		6
Bruck an der Leitha					x	x	x	x	x	5
Linz (Stadt)		x	x			x	x		x	5
Wels-Land				x	x	x	x		x	5
Krems Stadt)	x			x	x	x				4
Korneuburg						x		x	x	3
Tulln			x		x		x			3
Krems (Land)							x	x		2
Wien 22., Donaustadt				x			x			2
Graz-Umgebung								x		1
Graz (Stadt)									x	1
Grieskirchen								x		1
Hollabrunn									x	1
Melk									x	1
Sankt Pölten (Stadt)								x		1
Steyr (Stadt)								x		1
Wien 11., Simmering		x								1
Wiener Neustadt (Land)									x	1
Zwettl									x	1

Analog zur Standortplanung der dezentralen Pyrolyseanlagen sind in Tabelle 20 die Ergebnisse der gewählten Synthesestandorte je Szenario dargestellt.

Tabelle 20: Standortlösung der Syntheseanlage in Abhängigkeit von Pyrolyseanlagenzahl

Synthesestandort	**Szenario**									**Häufigkeit**
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Metadynea	x		x		x	x				4
Borealis Linz		x							x	2
BASF Performance Products				x				x		2
Donau Chemie Pischelsdorf							x			1
Mondi Frantschach										0
OMV Raffinerie										0
Donau Chemie Großendorf										0
Lenzing Plastics										0
Austrocell Hallein										0
Zellstoff Pöls AG										0
Donau Chemie Landeck										0
Münzer Bioindustrie										0

Wie in Tabelle 20 zu erkennen ist, wird der Standort *Metadynea* im Bezirk Krems für die zentrale Syntheseanlagen in 4 von 9 Szenarien bevorzugt.

4 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel wird das entwickelte Modell aus Kapitel 2.10 und die Ergebnisse der Fallstudie aus Kapitel 3 diskutiert. Abschließend wird die Bedeutung dieser vorliegenden Arbeit für zukünftige Forschungsmöglichkeiten aufgezeigt.

4.1 Diskussion des Optimierungsmodells

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Modell umfasst eine Optimierung von Produktionskapazitäten und -Standorten zur Etablierung eines Wertschöpfungsnetzwerk zur Nutzung von Sekundärrohstoffen in Österreich. Unter Berücksichtigung der Zielfunktion von minimalen Gesamtkosten und den festgelegten Rahmenbedingungen wird das Modell der *strategischen* Unternehmensplanung zugeordnet. Als Basis des Planungsmodells dient ein Sekundärrohstoffangebot, welches auf Gemeindeebene vorliegt. Eine derart detaillierte

Kapazitäts- und Standortplanung auf dieser gemeindespezifischen Planungsebene ist in der Literatur bislang kaum berücksichtigt (vgl. Dissemond and Zaussinger, 1995; Moser, 2012). Beim Modell handelt es sich um ein zweistufiges *Capacitated Facility Location Problem.*

Durch die Anwendung des Modells auf das Fallbeispiel *Stroh* wird dessen Lösbarkeit und Optimierungsqualität aufgezeigt. Das Design des Wertschöpfungsnetzwerks ist an das Bioliq-Verfahren des Karlsruher Instituts für Technologie angelehnt. Dieses umfasst mehrere Produktionsschritte, welche an verschiedenen Standorten durchgeführt werden. Beginnend mit dem Rohstofftransport wird dieser in Pyrolyseanlagen mittels Schnellpyrolyse zu Slurry verarbeitet. Anschließend wird der Slurry an eine zentrale Syntheseanlage geliefert und über Vergasung, Reinigung und Synthese zu Biokraftstoffen endverarbeitet. Die Wahl der Standorte und Kapazitäten der installierten Anlagen im Liefernetzwerk werden von den Eigenschaften nachwachsender Rohstoffe -insbesondere durch deren räumliche und mengenmäßige Verfügbarkeit- beeinflusst. Das mathematische Modell ist als gemischt-ganzzahliges lineares Modell formuliert. Anhand des Modells wird Planung eines BtL-Wertschöpfungsnetzwerk zur Produktion von biomassebasierten Kraftstoffen oder anderen chemischen Produkten mit minimalen Gesamtkosten ermöglicht. Die Gesamtkosten werden als jährliche Herstellkosten, bestehend aus Rohstoffkosten, Rohstofftransportkosten, variablen und fixen Pyrolysekosten, Slurrytransportkosten, fixen Synthesekosten sowie Erlösen durch den Verkauf von elektrischer Energie dargestellt.

Die Berechnung des Rohstoffpotenzials an Reststroh wird anhand Daten zu Ackerflächen, Feldfruchterträgen und pflanzentypischen Strohertragsfaktoren durchgeführt. Von der Schätzung des Gesamtpotenzials werden durch Abschlagsfaktoren ökologische und erntetechnische Verluste berücksichtigt. Eine detaillierte Erfassung der Nutzungspfade von Stroh wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Unter der Annahme von Verfügbarkeitsszenarien wird jedoch eine Konkurrenzsituation um den Rohstoff *Stroh* simuliert. Die Ergebnisse dieser Simulation zeigen die Auswirkungen auf das Design des BtL-Wertschöpfungsnetzwerks.

Die berechneten Rohstoffpotenziale werden anhand eines Geographischen Informationssystems (GIS) dargestellt. Dazu werden Gemeindegrenzen mittels Shapefile-Dateien eingelesen, mit den gemeindespezifischen Rohstoffmengen verknüpft und über eine abgestufte Farbskala visualisiert. Als Rohstoffquellen werden die jeweiligen Schwerpunkte (Zentroide) der Polygone verwendet. Insgesamt werden 1695 Knoten als Rohstofflieferanten berücksichtigt. Als Standorte der potenziellen Pyrolyseanlagen dienen die Zentroide der politischen Bezirksgrenzen Österreichs. In Summe kommen 117 Standorte für die Errichtung

von Pyrolyseanlagen in Frage. Bestehende Infrastruktur bzw. Standorte branchenähnlicher Betriebe dienen als potenzielle Standorte für die zentrale Syntheseanlage. Eine Einschränkung des Modells entsteht durch die Berechnung der Distanzen in Form von Luftlinienabständen, wodurch regionale Gegebenheiten im betrachteten Gebiet weniger stark berücksichtigt werden. Da es sich jedoch um ein Modell der strategischen Planungsebene handelt, sind mögliche Ungenauigkeiten der Transportdistanzen vertretbar.

Die Rohstoffkosten umfassen alle Schritte von der Getreideernte bis zur Bereitstellung der transportfähigen Form des Rohstoffs und werden einheitlich über das gesamte Erntegebiet angenommen. Die Schätzung der Investition für verfahrenstechnische Anlagen dient als Ausgangspunkt für die Berechnung von Abschreibungen, Zinsen, Reparaturen und Instandhaltung sowie Personalkosten. Dabei werden Werte aus der Literatur mittels Größendegression auf die Gesamtverarbeitungskapazität in Höhe des vorhandenen Rohstoffs skaliert. Auf eine detaillierte Berechnung der Kosten basierend auf Massen- und Energiebilanzen wird in der vorliegenden Arbeit aus Gründen der Vereinfachung verzichtet. Das vorliegende Modell im Fallbeispiel Stroh wählt hinsichtlich minimalen Gesamtkosten und basierend auf dem regional verteilten Rohstoffaufkommen die optimalen Standorte und Kapazitäten der Pyrolyseanlagen und den Standort der Syntheseanlage. Wird eine Pyrolyseanlage mit bestimmter Kapazität errichtet, gewährleistet das Modell einen Betrieb unter Vollauslastung von 100 Prozent, d.h. die gelieferte Rohstoffmenge entspricht der gewählten Kapazität am jeweiligen Standort.

Im Modell werden Erlöse aus dem Verkauf von überschüssiger Elektrizität berücksichtigt. Analog zu anderen Prozessen oder Produktpfaden kann eine Rückführung oder ein Verkauf von anfallenden Koppelprodukten berücksichtigt werden, sofern Daten dafür vorhanden sind. Eine Anwendung des Modells auf weitere Rohstoffgruppen oder Prozesse ist ohne gravierende Veränderungen der Modellstruktur möglich. Das entwickelte Modell dient somit der umfassenden strategischen Planung von dezentralen Wertschöpfungsnetzwerken zur stofflichen oder energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Die Besonderheit des Modells liegt in der gemeindespezifischen Planungsebene des Rohstoffaufkommens am Fallbeispiel *Stroh,* der modellendogenen Schätzung der Investitionen und Verarbeitungskosten und der optimalen Wahl von Standorten und der Anlagengrößen in Abhängigkeit von vorgegebenen Kapazitätsklassen.

4.2 Diskussion der Ergebnisse der Fallstudie *Stroh*

Dieses Kapitel umfasst die kritische Diskussion der Ergebnisse der Fallstudie *Stroh* zur Planung eines BtL-Wertschöpfungsnetzwerks. Es werden die beiden untersuchten Logistikkonzepte einer dezentralen Vorbehandlung des Rohstoffs und einer zentral kombinierten Pyrolyse und Synthese verglichen und auf deren Auswirkungen auf die Gesamtkosten aufgezeigt.

Im Basisszenario werden im dezentralen Konzept vier Standorte zur Vorbehandlung des Rohstoffs gewählt. Die zentrale Syntheseanlage befindet sich jedoch am gleichen Standort, wie im zentralen Konzept (Bezirk Krems, Standort *Metadynea*). Die vier dezentralen Pyrolyseanlagen weisen die gleiche Kapazität von 450kt FM pro Jahr auf, wodurch eine Gesamtmenge von 1,8Mt Stroh verarbeitet werden kann. Anhand der Ergebnisse der Standortplanung ist zu erkennen, dass sich die Wahl der Anlagenstandorte stark am regional verteilten Rohstoffaufkommen orientiert.

Die jährlichen Gesamtkosten liegen im dezentralen Konzept bei rund 271 Mio. € und im zentralen Konzept bei rund 254 Mio. €. Bezogen auf eine produzierte Biokraftstoffmenge von rund 279 Mio. Liter pro Jahr, werden im dezentralen Wertschöpfungsnetzwerk Verarbeitungskosten von 0,97 €/l erzielt. Demgegenüber weist das zentrale Konzept jährliche Verarbeitungskosten von 0,91 €/l auf. Werden die Erlöse aus dem Verkauf von überschüssiger Elektrizität nicht berücksichtigt, ergeben sich Kosten von 1,05 €/l im dezentralen bzw. 0,95 €/l im zentralen Konzept. Bei diesen Werten handelt es sich um Kosten vor Steuern und Gewinnzuschlägen. Es erweist sich unter den gegebenen Rahmenbedingungen der vorliegenden Arbeit eine zentral kombinierte Verarbeitung von Stroh zu Biokraftstoffen als die günstigere Planungsalternative. Im dezentralen Konzept können Einsparungen im Rohstofftransport erzielt werden, jedoch ergeben sich durch kleinere Kapazitäten und fehlenden Größendegressionseffekten der Pyrolyseanlagen höhere Pyrolysekosten. Die Kapazität beeinflusst die Investition und somit die Kosten der Anlagen. Aufgrund der Schätzungsmethode der Kosten ergibt sich ein bestimmter Kostenverlauf in Abhängigkeit von der Anlagenkapazität. Bei den Pyrolyseanlagen ergibt sich eine optimale Untergrenze der Pyrolysekapazität. Diese liegt bei 45.000 t FM pro Jahr. Werden Kapazitäten unterhalb dieser Grenze gewählt, steigen die Kosten pro Anlage dieser Kapazitätsklasse wieder an und sind unter Betrachtung einer Kostenminimierung nicht zielführend.

Die Kostenreduktion durch einen geringeren Rohstofftransport im dezentralen Konzept können unter den gewählten Umständen die höheren Pyrolysekosten nicht kompensieren, womit die höheren Kosten im dezentralen Wertschöpfungsnetzwerk erklärt werden können. Betrachtet man die Rohstofflogistik der dezentralen Pyrolysestandorte im Detail, ergibt sich ein

durchschnittlicher Biomasseeinzugsradius von 121km. Vergleiche mit Ergebnissen aus der Literatur sind aufgrund fehlender Forschungsarbeiten im untersuchten Gebiet (Österreich; Gemeindeebene) nicht möglich. Berücksichtigt man die Transportkapazitäten von 14,4 t FM pro LKW ergibt sich im dezentralen Konzept eine Transportleistung des Rohstoffs von insgesamt 15.382.721 km. Außerdem ergibt sich in der zweiten Distributionsstufe durch den Slurrytransport eine Transportleistung von 7.682.643 km bei einer Transportkapazität von 26 Tonnen pro Lieferung. Im zentralen Konzept wird der Rohstoff über eine Gesamtdistanz von knapp 12.478.254 km transportiert. Dies ist vor allem unter Betrachtung von CO2-Emissionen beim Transport und Motivation der THG Minderung erwähnenswert.

Sinnvolle Ansätze zur Kostenreduktion des dezentralen Konzepts bilden die fixen und variablen Pyrolysekosten. Bei einer Reduktion der variablen Kosten auf ein Viertel des Ursprungswertes ergeben sich geringere Gesamtkosten als im zentralen Konzept. Bei einer Halbierung der variablen Kosten der dezentralen Pyrolyseanlagen erhält man annähernd die gleichen Gesamtkosten im dezentralen wie im zentralen Konzept. Eine Prozessoptimierung bzw. Kostenreduktion durch Prozessintegration in bestehende Infrastruktur wäre eine Möglichkeit, die variablen Pyrolysekosten zu senken und somit die dezentrale Verarbeitung in Kombination mit geringeren Transportkosten zu einer wirtschaftlichen Verarbeitungsweise des Sekundärrohstoffs Stroh zu etablieren.

Um die Sinnhaftigkeit der Investition eines auf dem Sekundärrohstoff *Stroh* basierenden BtL Wertschöpfungsnetzwerks zu beurteilen, wird eine dynamische Investitionsrechnung mittels Annuitätenmethode durchgeführt. Dabei wird zuerst der Kapitalwert der Investition bestimmt und anschließend mit dem Kapitalwiedergewinnungsfaktor multipliziert. Durch Abzinsung der Zahlungsüberschüsse pro Periode mit einem bestimmten Zinssatz fließt der abgezinste Wert von zukünftigen Einnahmen/Ausgaben in die Bewertung der Investition mit ein. Zur Einschätzung der Einnahmen durch den Verkauf des Biokraftstoffs wird zuerst ein Preis von 1,0 €/l angenommen (Dieselpreis pro Liter, Stand: 11.05.2020; Statista, 2020). Als Investitionssumme werden die einmaligen Ausgaben für die Anlageninfrastruktur (Pyrolyse und Synthese) verwendet. Diese liegen beim dezentralen Konzept bei 760,7 Mio. € bzw. 745 Mio. € im zentralen Konzept. Bei einem Zinssatz von 3% und einem Beobachtungszeitraum von 20 Jahren ergibt sich im dezentralen Konzept eine negative Annuität von -304 Mio.€ bzw. -286 Mio.€. im zentralen Konzept. Die Investition in ein BtL-Wertschöpfungsnetzwerk ist bei einem marktüblichen Kraftstoffpreis von 1 €/l (Statista, 2020) - d.h. bei einer Marge von 3ct pro Liter und Produktionskosten von 0,97 €/l- somit nicht konkurrenzfähig. Eine Analyse ergibt eine Mindestmarge von 1,16 €/l Biokraftstoff, damit die Annuität im dezentralen Konzept einen

positiven Wert annimmt. Durch eine erneute Bewertung der Investition des dezentralen Konzepts stellt sich heraus, dass bei einem Preis von 2,13 €/l (Produktionskosten: 0,97 €/l und 1,16 €/l Marge; ohne Steuer) eine jährliche Annuität von 0,01 Mio. € erwirtschaftet werden kann. Im zentralen Konzept beläuft sich die berechnete Annuität unter den genannten Annahmen auf 17,3 Mio. €.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen auf, dass durch eine Reduktion der fixen Synthesekosten die Gesamtkosten maßgeblich reduziert werden können. Die Schätzungen der Anlageninvestitionen basieren auf Annahmen aus der Literatur. Diese Annahmen beziehen sich auf die Neuerrichtung der gesamten Anlageninfrastruktur. Die Integration der Prozessschritte des BtL-Wertschöpfungsnetzwerks in bestehende Anlageninfrastruktur stellt einen Ansatz zur Reduktion der Gesamtkosten dar, sofern die Prozessanpassungen finanziell vorteilig, technische möglich und in vergleichbaren Größenmaßstäben machbar sind. Die vorab definierten Standorte für die Syntheseanlage stellen als branchen-prozessähnliche Infrastruktur potentielle Schlüsselstellen für zukünftige Entwicklungen eines BtL-Wertschöpfungsnetzwerks in Österreich dar.

Betrachtet man die Menge an produziertem Biokraftstoff mit einem Energiegehalt von 12 kWh/kg (vgl. Dahmen *et al.*, (2012b)) und einen Endenergieverbrauch im Verkehrssektor von 401 PJ (vgl. BMNT (2019)), ergibt sich ein Substitutionspotenzial der Biokraftstoffmenge von rund 2,2%. Zieht man die Verbrauchsmenge an fossil produziertem Diesel in Österreich aus dem Jahr 2019 heran (~6,3Mt, BMNT, (2019a)), ergibt sich ein mengenbezogenes Substitutionspotenzial von rund 3,3%. Voraussetzungen für diese Annahme sind ein zur Verfügung stehendes Rohstoffpotenzial von 1,8Mt Stroh, korrekte Daten zu verfahrenstechnischen Konversionsfaktoren der installierten Anlagenkapazitäten und ein Energiegehalt von 12 kWh pro kg Endprodukt.

4.3 Ausblick und zukünftige Untersuchungen

Das entwickelte Modell ist auf andere Regionen, Prozesse und Produktpfade sowie Planungszeiträume anwendbar, sofern die Datenlage dafür vorhanden ist. Somit kann ein ähnliches Wertschöpfungsnetzwerk für andere Sekundärrohstoffgruppen geplant und hinsichtlich der räumlichen und ökonomischen Ausgestaltung analysiert werden. In Hinblick auf zukünftige Produktionsformen wie Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie stellen die Ergebnisse und Diskussion dieser Arbeit Anknüpfungsmöglichkeiten für weitere Untersuchungen dar.

Untersuchungen hinsichtlich detaillierter Massen-, Energie und Stoffströme von Prozessen im Wertschöpfungsnetzwerk würden sich positiv auf die Genauigkeit der erzielbaren Ergebnisse auswirken. Darüber hinaus kann das Modell um alternative Prozesse oder Rohstoffgruppen erweitert werden, wodurch eine integrierte Technologieplanung ermöglicht werden kann. Neben dem in der vorliegenden Arbeit betrachtetem Endprodukt *Biokraftstoff* kann die Produktion eines breiten Spektrums an Chemikalien zur stofflichen und/oder energetischen Nutzung untersucht und geplant werden. Weitere Forschungsaktivitäten können in Teilbereiche der Verfahrenstechnik zur Generierung von rohstoffspezifischen Konversionsfaktoren gehen. Dabei spielen die Wechselwirkung bzw. die Abhängigkeit der Prozesseffizienz von der Kapazität eine entscheidende Rolle. Ein interessanter Ansatz könnte dabei -im Gegenteil zu dieser Arbeit- eine *top-down* Betrachtung von besonders gefragten Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen sein.

Weitere Aspekte der zukünftigen Forschung können die Untersuchung von alternativen Transportmitteln für Rohstoff und Zwischenprodukte (Stichwort: *mobile biorefinery)*, Möglichkeiten der Anlagenkostenreduktion, Erhebungen der Rohstoffverfügbarkeit und Preisgestaltung von Endprodukten betreffen. Ein weiterer Anknüpfungspunkt wäre eine Machbarkeitsstudie zur Prozessintegration in die bestehende Anlageninfrastruktur der Chemieindustrie bzw. die Erhebung von realisierbaren Kapazitäten der integrierten Prozesse in die bestehende Anlageninfrastruktur in Österreich und Europa. Zur Abschätzung der ökologischen Auswirkungen können *Life Cycle (Impact) Assessments* basierend auf den Systemgrenzen und Ergebnissen dieser Arbeit durchgeführt werden.

Da das Modell anhand einer Fallstudie etabliert wurde, wäre eine zukünftige Forschung zur Erstellung eines einfach zu bedienenden Eingabe-Interfaces mit entsprechender Optimierungssoftware in Form des diskutierten Modells ein weiterer Schritt zur Untersuchung und Planung von Wertschöpfungsnetzwerken von nachwachsenden (Sekundär)Rohstoffen.

5 Literaturverzeichnis

- Becker, T., Lier, S. and Werners, B. (2019) 'Value of Modular Production Concepts in Future Chemical Industry Production Networks', *European Journal of Operational Research*, 276. doi: 10.1016/j.ejor.2019.01.066.
- BMNT (2019a) *Biokraftstoffe im Verkehrssektor*. Wien.
- BMNT (2019b) *Energie in Österreich: Zahlen, Daten, Fakten*. Wien.
- Dahmen, N. *et al.* (2012a) 'The bioliq® bioslurry gasification process for the production of biosynfuels, organic chemicals, and energy', *Energy, Sustainability and Society*, 2(1), p. 3. doi: 10.1186/2192-0567-2-3.
- Dahmen, N. *et al.* (2012b) 'The bioliq ® bioslurry gasification process for the production of biosynfuels , organic chemicals , and energy', pp. 1–44.
- Dissemond, H. and Zaussinger, A. (1995) *Stroh- ein nachwachsender Rohstoff für die energetische Nutzung*. Wien.
- Fleschhut, M. and Ostertag, J. (2017) 'Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Verwertung von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion (N / 14 / 07) Projektbericht'.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. and Hofbauer, H. (2016) *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg. Available at: https://ubdata.univie.ac.at/AC13075425.
- Kappler, G. and Leible, L. (2011) *The bioliq® concept - from biomass to fuel. Das bioliq ®-Konzept - von der Biomasse zum Kraftstoff*.
- Kappler, G. O. (2008) *Systemanalytische Untersuchung zum Aufkommen und zur Bereitstellung von energetisch nutzbarem Reststroh und Waldrestholz in Baden-Württemberg. Eine auf das Karlsruher Bioliq-Konzept ausgerichtete Standortanalyse*.
- Kerdoncuff, P. (2008) *Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation*. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe. doi: 10.5445/KSP/1000009317.
- KIT (2018) *Datenblatt Bioliq® 2018, Pressemitteilung/Download*. Available at: https://www.bioliq.de/downloads/Datenblatt_Bioliq_deutsch_2018_p.pdf (Accessed: 27 January 2020).
- KIT (2019) *Bioliq Enproduktpfade*.
- Lange, S. (2008) 'Systemanalytische Untersuchung zur Schnellpyrolyse als Prozessschritt bei der Produktion von Synthesekraftstoffen aus Stroh und

Waldrestholz'. doi: 10.5445/KSP/1000008977.

- Leible, L. *et al.* (2006) 'Kraftstoffproduktion aus Stroh und Waldrestholz - dezentral oder zentral?'
- Leible, L. *et al.* (2007) 'Kraftstoff, Strom und Wärme aus Stroh und Waldrestholz - eine systemanalytische Untersuchung', *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis*, 16(3), pp. 94–97. Available at: http://www.itas.fzk.de/tatup/073/leua07a.pdf.
- Linde Gas AG (2008) *Produktblatt - Dimethylether 3.0*.
- Mattfeld, D. C. and Vahrenkamp, R. (2014) *Logistiknetzwerke - Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*. 2nd edn. Springer Gabler Verlag. doi: 10.1007/978-3-8349-6912-5.
- Moser, T. (2012) 'Masterarbeit Standort- und Kapazitätsplanung von BtL- Anlagen in Österreich , mittels gemischt- ganzzahliger Optimierung'.
- Neugschwandtner, R., Buerstmayr, H. and Kaul, H.-P. (2019) 'Ackerbauliche Ernterückstände als Ressource für Bioraffinerien – Potentiale und Einschränkungen'.
- Open Government Data (2020a) *Gemeindegrenzen Österreich 2020*.
- Open Government Data (2020b) *Politische Bezirksgrenzen Österreich*.
- Reinberg, V. *et al.* (2020) *Austrian BioCycles – Biobasierte Industrie als Bestandteil der Kreislaufwirtschaft*. Wien.
- Schwaderer, F. (2012) *Integrierte Standort-, Kapazitäts- und Technologieplanung von Wertschöpfungsnetzwerken zur stofflichen und energetischen Biomassenutzung*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. doi: 10.5445/KSP/1000030109.
- SCM Plus Unternehmensberatung (2020) *SCM Plus*. Available at: https://www.scm-plus.at/supply-chain-management/beratung-supply-chain-design/.
- Statista (2020) *Dieseplreis pro Liter Österreich 2020*. Available at: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/796450/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-einen-liter-diesel-in-oesterreich/ (Accessed: 17 May 2020).
- Statistik Austria (2010) *Agrarstrukturerhebung 2010, Agrarstrukturerhebung - Bodennutzung*.
- Statistik Austria (2018) *Feldfruchtproduktion 2018, Feldfruchtproduktion*.
- Steffl, T. (scenario editor) (2019) *Austrian Biocycles - eigene Berechnung Mengengerüst Strohaufkommen basierend auf Feldfruchterträgen und Korn : Stroh Verhältnissen*. Wien.
- Trippe, F. *et al.* (2013) 'Comprehensive techno-economic assessment of dimethyl ether (DME) synthesis and Fischer–Tropsch synthesis as alternative process steps within

biomass-to-liquid production', *Fuel Processing Technology*. doi: 10.1016/j.fuproc.2012.09.029.

- Trippe, F. (2013) *Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. doi: 10.5445/KSP/1000034963.
- Umweltbundesamt, Copernicus Land Monitoring Service and European Environment Agency (2018) *CORINE-Landbedeckung 2018, Erhebungszeitraum 212-2018, Nomenklatur: Level 3 (28/41 Klassen in Österreich), 25 ha kleinste berücksichtigte Flächeneinheit (MMU), Lambert-Projektion, Format: ESRI Shape File, Maßstab: 1:100.000, credits: Umweltbundesamt & EEA*. Available at: https://docs.umweltbundesamt.at/s/beBw8fmwyCMA2ga.
- Wimmer, R., Hohensinner, H. and Eikemeier, S. (2011) *Stroh-Cert: Zertifizierung, Logistik und Qualitäts- management für den Strohballenbau*. Wien.

6 Anhang

Tabelle 21: Potenzielle Synthesestandorte

Unternehmen	**Bundesland**	**Ort**	**Branche**
Mondi Frantschach	KTN	St. Gertraud	Papier/Kartonage
Donau Chemie Pischelsdorf	NÖ	Pischelsdorf	Chemikalien, Anorganik
Metadynea GmbH	NÖ	Krems	Holzwerkstoffe, Harze, Feinchemie
OMV Raffinerie	NÖ	Schwechat	Kraft- & Treibstoffe, Chemikalien
Borealis Linz	OÖ	Linz	Kunststofferzeugung
Donau Chemie Großendorf	OÖ	Großendorf	Düngemittel, Kosmetik, Medizin
Lenzing AG	OÖ	Lenzing	Zellstoff, Fasern, Chemikalien
Austrocell Hallein GmbH	SBG	Hallein	Zellstoff, Bioenergie, Bioethanol
BASF Performance Products AG	STK	Krieglach	Chemikalien, Anorganik
Zellstoff Pöls AG	STK	Pöls	Zellstoff, Chemie
Donau Chemie Landeck	TI	Landeck	Kalziumkarbid
Münzer Bioindustrie	W	Wien/Lobau	Biotechnologie

Tabelle 22: Ausgangsdaten Investitions- und Kostenschätzung

		Szenarien			
		Zentrale Pyrolyse (1)	Dezentrale Pyrolyse (2)	Dezentrale Pyrolyse (10)	Dezentrale Pyrolyse (20)
Größendegressionsfaktor	0,7				
Fixkosten					
Kapazität Pyrolyseanlage	[t FM / a]	1.000.000	500.000	100.000	50.000
Kapazität Syntheseanlage	[t Slurry / a]	680.000	680.000	680.000	680.000
Kapazität Pyrolyseanlage	MWth	550	275	55	27,5
Kapazität Syntheseanlage	MWth	500	500	500	500
Gesamtkosten Synthese	[M€ / a]	401,49	401,49	401,49	401,49
Gesamtkosten Pyrolyse	[M€ / a]	95,26	100,33	130,29	180,48
Investitionsabh. Kosten	[M€ / a]	81,97	82,8	87,85	96,03
Synthese	[M€ / a]	66,25	66,25	66,25	66,25
Pyrolyse (gesamt)	[M€ / a]	15,72	16,55	21,6	29,78
Pyrolyse (je Anlage)	[M€ / a]	15,72	8,28	2,16	1,49

Tabelle 23: Kapitalwert und Annuitäten bei versch. Biokraftstoffpreisen (ohne Steuern); Zinssatz 3%; Beobachtungszeitraum 20 Perioden/Jahre

Marge (Preis) Biokraftstoff: 1,16 (2,13) €/l			**Marge (Preis) Biokraftstoff: 0,03 (1,0) €/l**		
Periode t	dezentral	zentral	Periode t	dezentral	zentral
0	-760,69 €	-745,00 €	0	- 760,69 €	- 745,00 €
1	51,57 €	67,90 €	1	- 255,00 €	- 238,67 €
2	50,07 €	65,92 €	2	- 247,57 €	- 231,72 €
3	48,61 €	64,00 €	3	- 240,36 €	- 224,97 €
4	47,19 €	62,14 €	4	- 233,36 €	- 218,42 €
5	45,82 €	60,33 €	5	- 226,56 €	- 212,06 €
6	44,48 €	58,57 €	6	- 219,96 €	- 205,88 €
7	43,19 €	56,86 €	7	- 213,56 €	- 199,88 €
8	41,93 €	55,21 €	8	- 207,34 €	- 194,06 €
9	40,71 €	53,60 €	9	- 201,30 €	- 188,41 €
10	39,52 €	52,04 €	10	- 195,43 €	- 182,92 €
11	38,37 €	50,52 €	11	- 189,74 €	- 177,59 €
12	37,26 €	49,05 €	12	- 184,22 €	- 172,42 €
13	36,17 €	47,62 €	13	- 178,85 €	- 167,40 €
14	35,12 €	46,23 €	14	- 173,64 €	- 162,52 €
15	34,09 €	44,89 €	15	- 168,58 €	- 157,79 €
16	33,10 €	43,58 €	16	- 163,67 €	- 153,19 €
17	32,14 €	42,31 €	17	- 158,91 €	- 148,73 €
18	31,20 €	41,08 €	18	- 154,28 €	- 144,40 €
19	30,29 €	39,88 €	19	- 149,78 €	- 140,19 €
Kapitalwert	0,15 €	256,72 €	Kapitalwert	-4.522,81 €	-4.266,24 €
Annuität	0,01 €	17,26 €	Annuität	- 304,00 €	- 286,76 €