Anne Schatka

Strategische Netzwerkgestaltung in der Prozessindustrie

GABLER RESEARCH

Produktion und Logistik

Herausgegeben von
Professor Dr. Bernhard Fleischmann,
Universität Augsburg
Professor Dr. Martin Grunow,
Technische Universität München
Professor Dr. Hans-Otto Günther,
Technische Universität Berlin
Professor Dr. Stefan Helber,
Universität Hannover
Professor Dr. Karl Inderfurth,
Universität Magdeburg
Professor Dr. Herbert Kopfer,
Universität Bremen
Professor Dr. Herbert Meyr,
Technische Universität Darmstadt
Professor Dr. Thomas S. Spengler,
Technische Universität Braunschweig
Professor Dr. Hartmut Stadtler,
Universität Hamburg
Professor Dr. Horst Tempelmeier,
Universität Köln
Professor Dr. Gerhard Wäscher,
Universität Magdeburg

Kontakt: Professor Dr. Hans-Otto Günther, Technische Universität Berlin,
H 95, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

Anne Schatka

Strategische Netzwerkgestaltung in der Prozessindustrie

Eine Untersuchung am Beispiel
der Produktion von synthetischen
Biokraftstoffen

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Thomas S. Spengler

RESEARCH

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Dissertation Technische Universität Braunschweig, 2010

1. Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Stefanie Brich | Nicole Schweitzer

Gabler Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.gabler.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 978-3-8349-2935-8

Gelcitwort

Zur Sicherung einer langfristigen Energieversorgung sowie zur Senkung damit verbundener CO₂-Emissionen ist gemäß der Richtlinie 2009/28/EG der Europäischen Union bis zum Jahr 2020 eine Substitution von 10% fossiler Energieträger im Verkehrssektor zu gewährleisten. Während der derzeitige Einsatz von Biokraftstoffen der ersten Generation allerdings an technische und wirtschaftliche Grenzen stößt und auch unter dem Gesichtspunkt der Nahrungsmittelproduktion als bedenklich eingeschätzt wird, ruhen die Hoffnungen auf der zukünftigen Produktion von Biokraftstoffen der zweiten Generation. Zu diesem Zweck werden derzeit umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen unternommen, um geeignete Prozess- und Anlagenkonzepte zu identifizieren und großtechnisch umzusetzen. Der damit verbundene Aufbau umfangreicher Produktionskapazitäten erfordert hohe Investitionen und dies vor dem Hintergrund vielfältiger technischer, ökonomischer und rechtlicher Unsicherheiten. Eng verbunden mit den technischen Herausforderungen sind logistische Herausforderungen, die die Gestaltung eines zugehörigen Produktions- und Distributionsnetzwerkes betreffen. Die Gestaltung solcher Netzwerke erfordert ein integratives Planungsinstrument, in dem logistische, produktionswirtschaftliche und verfahrenstechnische Aspekte bei der Gestaltung gleichermaßen berücksichtigt werden.

Dieser Herausforderung stellt sich die von Frau Schatka vorgelegte Dissertation. Nach einer aussagekräftigen Einleitung werden die notwendigen Rahmenbedingungen der Gestaltung von Produktionsnetzwerken für synthetische Biokraftstoffe herausgearbeitet und Anforderungen an einen problemadäquaten Planungsansatz zur Netzwerkgestaltung formuliert. Daran anschließend werden im Rahmen von Literaturstudien die produktionswirtschaftliche und verfahrenstechnische Modellierung von Produktionsprozessen in der Prozessindustrie sowie Modellierungsansätze zur Standortplanung und Netzwerkgestaltung unter dem Aspekt der Unsicherheit untersucht. Darauf aufbauend erfolgt die Konzeption eines Planungsansatzes zur Netzwerkgestaltung für die Produktion von synthetischen Biokraftstoffen. Es folgt die Überführung des Konzeptes in ein konkretes quantitatives Planungsmodell. Aufbauend auf einem verfahrenstechnischen Flowsheeting-Modell und der anschließenden betriebswirtschaftlichen Modellierung erfolgt die Modularisierung ausgewählter komplexer Produktionsprozesse für synthetische Biokraftstoffe und deren Bewertung auf Basis detaillierter Investitions- und Kostenschätzungen. Die so gebildeten Produktionsmodule werden dann zur Formulierung eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodells zur integrierten Technologie-, Kapazitäts- und Standortplanung herangezogen. Frau Schatka gelingt es, ihren Planungsansatz in ein mehrperiodiges, n-stufiges, kapazitiertes Facility-Location-Modell umzusetzen, in dem die umfangreichen Stofftransformationen in den gebildeten Produktionsmodulen explizit berücksichtigt werden. Auch ist es ihr eindrucksvoll gelungen, sowohl bestehende Unsicherheiten als auch unterschiedliche Risikoeinstellungen potenzieller Investoren im Modell zu berücksichtigen, und zwar durch dessen Überführung in einen szenariobasierten Ansatz, der mehrere Ersatzzielfunktionen umfasst und diese mittels geeigneter Entscheidungskriterien miteinander

verknüpft. Zur Validierung des Planungsmodells wendet Frau Schatka ihr Planungsinstrument im Rahmen zweier umfangreicher Fallstudien zur regionalen und überregionalen Netzwerkgestaltung in Norddeutschland sowie in Westeuropa an. Aus den hier ermittelten Ergebnissen werden konkrete Handlungsempfehlungen an potenzielle Investoren sowie umweltpolitische Entscheidungsträger abgeleitet.

Frau Schatka deckt mit ihrer Dissertation eine sowohl unter theoretischen als auch praxisorientierten Gesichtspunkten äußerst anspruchsvolle Thematik ab und dies auf äußerst hohem Niveau. Die von ihr herangezogenen und eigenständig weiterentwickelten Methoden zur integrierten Technologie-, Kapazitäts- und Standortplanung von Produktionsnetzwerken in der Prozessindustrie sind wissenschaftlich fundiert und innovativ. Aufbau, Struktur und formale Gestaltung der Arbeit sind vorbildlich, das Literaturverzeichnis ist äußerst umfangreich und von der Auswahl und Qualität der herangezogenen Quellen her herausragend. Beeindruckend ist die gleichmäßig hohe Eindringtiefe, mit der Frau Schatka die interdisziplinäre Aufgabenstellung angeht und gekonnt anspruchsvolle Methoden der Verfahrenstechnik, der Produktionswirtschaft und Logistik sowie des Operations Research miteinander verknüpft und praxisorientiert umsetzt. Insgesamt hat Frau Schatka den Stand der Forschung zur Netzwerkgestaltung in der Prozessindustrie einen entscheidenden Schritt vorangebracht. Dem vorliegenden Buch sei daher eine weite Verbreitung in Wissenschaft und Praxis gewünscht.

Univ.-Prof. Dr. Thomas S. Spengler

Vorwort

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der strategischen Netzwerkgestaltung in der Prozessindustrie am Beispiel von Produktionsnetzwerken für synthetische Biokraftstoffe der zweiten Generation. Sie entstand in den Jahren 2006 bis 2010 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, Lehrstuhl für Produktion und Logistik der Technischen Universität Braunschweig. Dabei wurde ich von vielen Seiten unterstützt, wofür ich mich im Folgenden bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. pol. Thomas S. Spengler, Leiter des Instituts für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion, für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen sowie die fachlichen Anregungen, aber auch für die persönliche Unterstützung. Die von ihm am Institut geschaffene gute und offene Arbeitsatmosphäre sowie die Möglichkeit einer praxisnahen Forschung waren wesentlich für das Gelingen dieser Dissertation. Ebenso gebührt mein ganz herzlicher Dank Frau Prof. Dr. rer. pol. Grit Walther, Inhaberin des Lehrstuhls für Betriebswirtschaftslehre insb. Produktion und Logistik der Bergischen Universität Wuppertal. Die vielen fachlichen Hinweise und die Zusammenarbeit mit ihr sowie ihr persönlicher Rat bedeuten mir sehr viel und waren für das Gelingen dieser Dissertation essentiell. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. rer. pol. Dirk C. Mattfeld, Inhaber des Lehrstuhls für Decision Support, für die Übernahme des Korreferates und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. iur. habil. Prof. E. h. Edmund Brandt, Inhaber des Lehrstuhls Staats- und Verwaltungsrecht sowie Verwaltungswissenschaften, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission, die Schaffung einer guten Prüfungsatmosphäre sowie die wertvollen inhaltlichen Hinweise.

Ein ganz herzliches Dankeschön möchte ich meinen Kollegen aussprechen, die mich sowohl fachlich als auch persönlich in den letzten Jahren begleitet haben. Ganz besonders gebührt dies meinen ehemaligen Kollegen aus der Arbeitsgruppe Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke Jenny Steinborn, Kerstin Schmidt, Dr. Eberhard Schmid und Jörg Wansart. Durch die Zusammenarbeit mit ihnen habe ich nicht nur viel gelernt und wichtige Anregungen bekommen; sie sind mir auch gute Freunde geworden. Für die angenehme Zusammenarbeit möchte ich mich ebenfalls bei allen Kollegen aus den vergangenen fünf Jahren bedanken: Dr. Wiebke Junge, Dr. Stefan Rehkopf, Dr. Thomas Volling, Dr. Grischa Meyer, Dr. Niklas Labitzke, André Hintches, Britta Engel, Matthias Wichmann, Kai Witte, Karsten Kickhäfer, Martin Grunewald, Claas Hoyer, Andreas Matzke, Katharina Wachter, Philipp Zeise und Birgit Haupt. Auch die Zusammenarbeit mit unseren studentischen Mitarbeitern hat an vielen Stellen entlastet und Spaß gemacht. Stellvertretend möchte ich hier Tobias Vieker, Alexander Bruns und Christian Neldner danken.

Im Rahmen der von mir bearbeiteten Projekte wurden mir durch unsere Industriepartner viele interessante Einblicke in die Praxis ermöglicht. Hier waren insbesondere die Daten und Anregungen von Herrn Dr. Frank Seyfried, Leiter der Abteilung Brennstoffzelle und

Kraftstoffe der Volkswagen AG, und seinem Mitarbeiter Herrn Dr. Eckart Heinl wichtig, wofür ich mich bedanken möchte.

Meine Familie und meine Freunde haben durch ihre Unterstützung ebenfalls wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Meinen Freunden möchte ich für die leider wenigen aber schönen und abwechslungsreichen gemeinsamen Stunden danken, ganz besonders Michaela Otto. Meiner ganzen Familie danke ich für das umfangreiche Korrekturlesen. Meiner Schwester Imke und Clemens Gwinner möchte zudem ich für die schöne gemeinsame Zeit neben der Arbeit danken. Dies gilt auch für meinen Freund Leif Strauß, der viel Verständnis aufgebracht und mir stets den notwendigen persönlichen Rückhalt gegeben hat.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Bärbel und Ulrich. Sie haben mir bereits früh im Leben sehr viele Perspektiven aufgezeigt, tolle Erfahrungen ermöglicht und mich so stark geprägt. Sie waren immer für mich da. Ihnen widme ich dieses Buch.

Anne Schatka

Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht	IX
Inhaltsverzeichnis.....	XI
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis.....	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXV
Einheitenverzeichnis	XXVII
Symbolverzeichnis	XXIX
1 Einleitung	1
2 Rahmenbedingungen der Gestaltung von Produktionsnetzwerken für synthetische Biokraftstoffe	7
3 Methodische Ansätze zur Gestaltung von Produktionsnetzwerken in der Prozessindustrie	69
4 Ausgestaltung des Planungsansatzes zur Netzwerkgestaltung für die Produktion von synthetischen Biokraftstoffen.....	121
5 Fallstudien zur Gestaltung regionaler und überregionaler Produktionsnetzwerke für synthetischen Biodiesel.....	157
6 Würdigung und Ausblick.....	229
7 Zusammenfassung	237
Literaturverzeichnis.....	241
Rechtsverzeichnis.....	263
Anhang	265

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsübersicht	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXV
Einheitenverzeichnis	XXVII
Symbolverzeichnis	XXIX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Rahmenbedingungen der Gestaltung von Produktionsnetzwerken für synthetische Biokraftstoffe	7
2.1 Biogene und fossile flüssige Kraftstoffe	7
2.1.1 Synthetische Kraftstoffe auf fossiler Rohstoffbasis	9
2.1.2 Biokraftstoffe der ersten Generation	10
2.1.3 Biokraftstoffe der zweiten Generation	12
2.1.4 Weitere Biokraftstoffe	13
2.2 Rahmenbedingungen im Kontext der Nachhaltigkeit	14
2.2.1 Problembereiche fossile Energieträger und fossile Kraftstoffe	14
2.2.2 Potenziale und Risiken biogener Energieträger und biogener Kraftstoffe	18
2.2.3 Ökonomische Rahmenbedingungen von synthetischen Biokraftstoffen	21
2.2.3.1 Biomassepotenzial für synthetische Biokraftstoffe	21
2.2.3.2 Herstellkosten synthetischer Biokraftstoffe	25
2.2.4 Ökologische Rahmenbedingungen von synthetischen Biokraftstoffen	27
2.2.4.1 Zieldefinitionen bestehender Life Cycle Assessment Studien für Biokraftstoffe	29
2.2.4.2 Erstellung von Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen für Biokraftstoffe	30

2.2.4.3 Auswertung von Life Cycle Assessment Studien für Biokraftstoffe.....	33
2.2.5 Soziale Rahmenbedingungen	36
2.2.5.1 Soziale Wirkungen des Biomasseanbaus und der Biomassebereitstellung.....	36
2.2.5.2 Soziale Wirkungen der Produktion und Nutzung synthetischer Biokraftstoffe.....	39
2.2.6 Wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der nachhaltigen Produktion von synthetischen Biokraftstoffen	42
2.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen	44
2.3.1 EU-Verordnung (EG) No 443/2009	44
2.3.2 Biokraftstoffquotengesetz (BioKraftQuG)	45
2.3.3 Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung.....	47
2.3.4 Schlussfolgerungen aus den rechtlichen Rahmenbedingungen für die Netzwerkgestaltung	47
2.4 Verfahrenstechnische Rahmenbedingungen	49
2.4.1 Biomassevorbehandlung.....	50
2.4.2 Biomassevergasung	52
2.4.3 Gasreinigung und -konditionierung.....	54
2.4.4 Synthese.....	58
2.4.5 Raffination	61
2.4.6 Anlagenkonzepte	62
2.4.7 Wesentliche Erkenntnisse der verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen für die Netzwerkgestaltung.....	64
2.5 Anforderungen an einen Planungsansatz zur Netzwerkgestaltung für die Produktion synthetischer Biokraftstoffe	65
3 Methodische Ansätze zur Gestaltung von Produktionsnetzwerken in der Prozessindustrie	69
3.1 Modellierung der Produktionsprozesse.....	70
3.1.1 Verfahrenstechnische Modellierung der Produktionsprozesse.....	70
3.1.1.1 Modellierung auf Grundlage empirischer Daten.....	70
3.1.1.2 Flowsheeting Simulation.....	72
3.1.2 Betriebswirtschaftliche Modellierung verfahrenstechnischer Prozesse	74
3.1.2.1 Betriebswirtschaftliche Input-Output Modelle.....	75

3.1.2.2	Aktivitätsanalytische Stoffstrommodellierung.....	79
3.1.3	Verzahnung verfahrenstechnischer und betriebswirtschaftlicher Produktionsmodelle.....	81
3.1.4	Bewertung des Einsatzes von verfahrenstechnischen und betriebswirtschaftlichen Produktionsmodellen im Rahmen der Netzwerkgestaltung für synthetische Biokraftstoffe	82
3.2	Standortplanung	83
3.2.1	Standortplanungsmodelle	84
3.2.2	Standortvorauswahl	85
3.2.3	Planungsmodelle zur Netzwerkgestaltung für die Produktion synthetischer Biokraftstoffe.....	90
3.2.3.1	Beschreibung der Planungsmodelle zur Netzwerkgestaltung für die Produktion von (synthetischen) Biokraftstoffen	90
3.2.3.2	Zusammenfassende Bewertung der Planungsmodelle zur Netzwerkgestaltung für die Produktion von (synthetischen) Biokraftstoffen.....	93
3.2.3.3	Modellierungsoptionen zur Erreichung der beschriebenen Anforderungen.....	95
3.2.3.4	Lösungsverfahren	99
3.2.4	Wesentliche Erkenntnisse für die Technologie-, Kapazitäts- und Standortplanung im Rahmen der Netzwerkgestaltung für synthetische Biokraftstoffe.....	101
3.3	Netzwerkgestaltung unter Unsicherheit	102
3.3.1	Indirekte Berücksichtigung von Unsicherheiten	103
3.3.2	Direkte Berücksichtigung von Unsicherheiten.....	105
3.3.2.1	Risikoeinstellungen von Entscheidungsträgern im Rahmen der strategischen Planung.....	107
3.3.2.2	Berücksichtigung der Risikoeinstellungen von Entscheidungsträgern in Ersatzzielfunktionen	109
3.3.2.3	Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken in den Nebenbedingungen.....	112
3.3.3	Szenariotechnik	113
3.3.4	Rollierende Planung	114
3.3.5	Schlussfolgerungen für die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Netzwerkgestaltung für synthetische Biokraftstoffe	116

3.4 Konzeption des Planungsansatzes zur Netzwerkgestaltung für die Produktion von synthetischen Biokraftstoffen	117
4 Ausgestaltung des Planungsansatzes zur Netzwerkgestaltung für die Produktion von synthetischen Biokraftstoffen.....	121
4.1 Verfahrenstechnische Modellierung am Beispiel der Vergasung von Biomasse	121
4.1.1 Modellbeschreibung	121
4.1.2 Simulationsergebnisse	125
4.2 Betriebswirtschaftliche Modellierung und Bewertung der Produktionsprozesse für die Netzwerkgestaltung	128
4.2.1 Modularisierung der Produktionsprozesse	128
4.2.2 Investitionen der Produktionstechnologien	131
4.2.2.1 Schätzungen von Investitionen der Hauptkomponenten	133
4.2.2.2 Zuschlagsfaktoren zur Bestimmung der Gesamtinvestition.....	135
4.2.3 Modellierung der betriebsbedingten Zahlungen.....	137
4.2.3.1 Fixe betriebsbedingte Zahlungen	137
4.2.3.2 Kapazitätsauslastungsabhängige Zahlungen	138
4.3 Modell zur Technologie-, Kapazitäts- und Standortplanung	140
4.3.1 Nebenbedingungen	142
4.3.1.1 Kapazitätsrestriktionen	142
4.3.1.2 Massenbilanzen	143
4.3.1.3 Variablen Deklaration	144
4.3.2 Zielfunktion	145
4.4 Szenariobasierte Erweiterung des Planungsmodells	147
4.4.1 Nebenbedingungen der szenariobasierten Erweiterung	148
4.4.2 Zielfunktionen der szenariobasierten Erweiterung.....	150
4.5 Komplexität des Planungsansatzes.....	153
5 Fallstudien zur Gestaltung regionaler und überregionaler Produktionsnetzwerke für synthetischen Biodiesel.....	157
5.1 Fallstudiendesign.....	158
5.2 Entscheidungsrelevante Daten der Produktionsprozesse	159
5.2.1 Produktionsprozesse	159
5.2.2 Investitionen der Produktionstechnologien und fixe betriebsbedingte Zahlungen	161

5.2.3	Kapazitätsauslastungsabhängige Zahlungen der Produktionsprozesse	162
5.3	Regionale Fallstudie für Norddeutschland	163
5.3.1	Datenermittlung	164
5.3.1.1	Biomassebereitstellung	165
5.3.1.2	Transport	169
5.3.1.3	Nachfrage nach synthetischem Biodiesel	170
5.3.2	Szenarienerstellung	174
5.3.2.1	Ausprägungen der alternativen Deskriptoren	174
5.3.2.2	Szenarien	177
5.3.3	Modellanpassungen und Preprocessing	178
5.3.3.1	Anpassungen des Planungsmodells	178
5.3.3.2	Preprocessing	184
5.3.3.3	Implementierung und Lösung des Planungsansatzes	185
5.3.4	Ergebnisse	186
5.4	Überregionale Fallstudie für Westeuropa	192
5.4.1	Datenermittlung	196
5.4.1.1	Biomassebereitstellung	196
5.4.1.2	Investitionen der Produktionstechnologien an bestehenden Raffineriestandorten	204
5.4.1.3	Transport	205
5.4.1.4	Nachfrage nach synthetischem Biodiesel	206
5.4.2	Szenarienerstellung	206
5.4.2.1	Ausprägungen alternativer Deskriptoren	206
5.4.2.2	Szenarien	208
5.4.3	Anpassungen des Planungsmodells	208
5.4.4	Implementierung und Lösung des Planungsansatzes	213
5.4.5	Ergebnisse	213
5.5	Handlungsempfehlungen	221
5.5.1	Handlungsempfehlungen an potenzielle Investoren	222
5.5.2	Handlungsempfehlungen an umweltpolitische Entscheidungsträger	225
6	Würdigung und Ausblick	229
6.1	Würdigung des entwickelten Planungsansatzes	229

6.2 Würdigung der Erkenntnisse und weiterer Anwendungsmöglichkeiten für industrielle Entscheidungsträger	232
6.3 Würdigung der Erkenntnisse für politische Entscheidungsträger	233
6.4 Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf	234
7 Zusammenfassung	237
Literaturverzeichnis	241
Rechtsverzeichnis	263
Anhang	265

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Vorgehen und Zielsetzungen der Arbeit	5
Abbildung 2.1:	Klassifikationsschema für Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe (in Anlehnung an [DRÜKE 2008])	9
Abbildung 2.2:	Weltenergiebedarf unterschieden nach Primärenergieträgern (Daten: [IEA 2008a])	15
Abbildung 2.3:	Historische Daten zu CO ₂ -Konzentrationen in der Atmosphäre und CO ₂ -Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger [RYAN/ TURTON 2007], S.3.....	16
Abbildung 2.4:	Verschiedene Szenarien zur zukünftigen durchschnittlichen Temperamententwicklung bezogen auf das Jahr 1990 [RYAN/ TURTON 2007], S. 3, Datengrundlage: [HOUGHTON ET AL. 2001]	17
Abbildung 2.5:	Zusammensetzung des Kraftstoffabsatzes im Jahr 2003 [RYAN/ TURTON 2007], [IEA 2003a], [IEA 2003b]	18
Abbildung 2.6:	Prognose des Biomassepotenzials für das Jahr 2050 [IEA BIOENERGY 2009], [DORNBURG ET AL. 2008]	19
Abbildung 2.7:	Szenarien zum Biomasseaufkommen in Deutschland im Jahr 2020 (Datenquelle: [RENEW D 5.1.1 2004])	24
Abbildung 2.8:	Zusammensetzung der Herstellkosten von synthetischem Biodiesel nach [HAMELINCK ET AL. 2004]	26
Abbildung 2.9:	Schematische Darstellung des Lebenswegs von synthetischen Biokraftstoffen	27
Abbildung 2.10:	Treibhausgasemissionen verschiedener Kraftstoffe im Vergleich (Datenquelle: [CHERUBINI ET AL. 2009], S. 442)	34
Abbildung 2.11:	Veränderungen der Wirkungspotenziale bei Veränderungen des Rohstofftransportwegs (Datengrundlage: [BAITZ ET AL. 2004]).....	35
Abbildung 2.12:	Prognosen zum weltweiten technischen Biomassepotenzial im Jahr 2050 ([IEA BIOENERGY 2009], S. 19).....	37
Abbildung 2.13:	Beschäftigungswirkungen der Nutzung von synthetischen Biokraftstoffen in verschiedenen Branchen in Europa für das Jahr 2020 (Daten: [NEUWAHL ET AL. 2008])	41

Abbildung 2.14: Grundsätzlicher Ablauf von Verfahren zur Herstellung synthetischer Biokraftstoffe	50
Abbildung 2.15: Klassifizierung von Vergasungsverfahren nach [VOGEL ET AL. 2006]	53
Abbildung 2.16: Bildung von Kohlenwasserstoffketten an einer Katalysatoroberfläche	58
Abbildung 2.17: Anderson-Schulz-Flory-Verteilung [SCHLEEF 1999]	60
Abbildung 2.18: Methanol Raffination am Beispiel des MtSynfuel-Prozesses [HÖHLEIN ET AL. 2003]	62
Abbildung 2.19: Schematische Darstellung der Anforderungen an einen Planungsansatz zur Gestaltung von Produktionsnetzwerken für synthetische Biokraftstoffe	68
Abbildung 3.1: Grundsätzlicher Aufbau von sequentiell modularen Flowsheeting Programmen [LOHE/ FUTTERER 1995]	74
Abbildung 3.2: Darstellung eines vernetzten Produktionssystems am Beispiel eines zweistufigen Verfahrens zur Biomassevergasung und einer Gasaufbereitung (vereinfacht)	75
Abbildung 3.3: Überblick über wichtige Klassen von Transformationsfunktionen [SPENGLER 1994]	77
Abbildung 3.4: Aktivitäten des zweistufigen Verfahrens zur Biomassevergasung und der Gasaufbereitung (vereinfacht)	80
Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Modellierung der Produktionsprozesse im Rahmen einer Netzwerkgestaltung für synthetische Biokraftstoffe	83
Abbildung 3.6: Allgemeine betriebliche Standortfaktoren in Anlehnung an [JUNG 2006]	86
Abbildung 3.7: Revolvierende Planung zur Gestaltung von Produktionsnetzwerken für synthetische Biokraftstoffe (in Anlehnung an [SCHOLL ET AL. 2004])	115
Abbildung 3.8: Konzept zur Netzwerkgestaltung für die Produktion synthetischer Biokraftstoffe	119
Abbildung 4.1: Entwickeltes Aspen Plus Modell zur Biomassevergasung [SCHULZE 2008], S. 54	123
Abbildung 4.2: Stoffmengenanteile des Produktstroms in Abhängigkeit der Reaktortemperatur [SCHULZE 2008]	126

Abbildung 4.3:	Stoffmengenanteile von CO und H ₂ in Abhängigkeit der Inputmassenströme [SCHULZE 2008]	127
Abbildung 4.4:	Stoffmengenanteile von CO und H ₂ in Abhängigkeit des Wasserdampf- und Sauerstoff-Massenstroms (vgl. [SCHULZE 2008])	128
Abbildung 4.5:	Modularisierung der Produktionsprozesse.....	129
Abbildung 4.6:	Genauigkeit der Ergebnisse verschiedener Gruppen von Verfahren zur Investitionsschätzung (in Anlehnung an [PETERS/ TIMMERHAUS 1991], S. 161)	132
Abbildung 4.7:	Netzwerkmodellierung.....	142
Abbildung 5.1:	Produktionsprozesse nach Choren und nach dem Forschungszentrum Karlsruhe.....	160
Abbildung 5.2:	Regionales Netzwerk zur Herstellung von synthetischem Biodiesel.....	164
Abbildung 5.3:	Strohaufkommen im Jahr 2020 für unterschiedliche Szenarien (Datengrundlage: [RENEW D 5.1.3 2004])	169
Abbildung 5.4:	Prognose der Dieselnachfrage in Deutschland (Berechnungen auf Datengrundlage von [MWV 2009]).....	171
Abbildung 5.5:	Bevölkerungsentwicklung in Niedersachsen, Bremen und Hamburg (Daten: [Statistisches Bundesamt 2007]).....	171
Abbildung 5.6:	Jährliche Dieselnachfrage pro Einwohner in Deutschland (Berechnungen auf Datengrundlage von [STATISTISCHES BUNDESAMT 2006], [MINERALÖLWIRTSCHAFTVERBAND 2006])	172
Abbildung 5.7:	Nachfrage nach synthetischem Biodiesel für einen Anteil des synthetischen Biodiesels von 4,4 % am Gesamtdieselsabsatz im Jahr 2020.....	173
Abbildung 5.8:	Prognose der Dieselpreisentwicklung (Daten: [STATISTISCHES BUNDESAMT 2009a] sowie eigene lineare Fortschreibung)	173
Abbildung 5.9:	Als Deskriptoren berücksichtigte Anteile von synthetischem Biodiesel an der Gesamtdieselnachfrage	177
Abbildung 5.10:	Standortvorauswahl in der Region Niedersachsen	185
Abbildung 5.11:	Resultierende Netzwerkkonfigurationen der einzelnen Szenarien	187

Abbildung 5.12: Anteilige Zusammensetzung der diskontierten Auszahlungen und Investitionen für einen Planungszeitraum von 20 Jahren	188
Abbildung 5.13: Summe der diskontierten Zahlungen in den einzelnen Perioden für die verschiedenen Szenarien	189
Abbildung 5.14: Diskontierte Einzahlungen und diskontierte Strafzahlungen im Szenario „Basis“	189
Abbildung 5.15: Netzwerkkonfigurationen der szenarienübergreifenden Untersuchung.....	190
Abbildung 5.16: Schematische Darstellung des überregionalen Planungsproblems	194
Abbildung 5.17: Verteilung der Raffinerien und Raffineriekapazitäten in Westeuropa (Datenquellen: [A BARREL FUEL 2009], [MWV 2009], [CALTEX 2009]).....	195
Abbildung 5.18: Energiepflanzenpotenziale im Jahr 2020 für Deutschland und Frankreich (Daten: [RENEW D 5.1.7 2004]).....	197
Abbildung 5.19: Energiepflanzenpotenziale im Jahr 2020 für Belgien, Luxemburg und die Niederlande (Daten: [RENEW D 5.1.7 2004]).....	198
Abbildung 5.20: Strohpotenziale im Jahr 2020 für Deutschland und Frankreich.....	199
Abbildung 5.21: Strohpotenziale im Jahr 2020 für Belgien, Luxemburg und die Niederlande	200
Abbildung 5.22: Transportzahlungen für Biomassen in Abhängigkeit des regional verfügbaren Biomassepotenzials	201
Abbildung 5.23: Zahlungsfunktion für den Transport von flüssigen Kraftstoffen (Daten: [SUURS 2002])	206
Abbildung 5.24: Netzwerkkonfigurationen der einzelnen Szenarien in Westeuropa	215
Abbildung 5.25: Anteilige Zusammensetzung der Summe der diskontierten Zahlungen in den einzelnen Szenarien.....	218
Abbildung 5.26: Anteilige Zusammensetzung der Zahlungen für Biomasse in den einzelnen Szenarien	219
Abbildung 5.27: Netzwerkkonfigurationen der szenarienübergreifenden Untersuchungen für Westeuropa.....	220

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Ergebnisse verschiedener Studien zu den kurz- und langfristigen Herstellkosten von synthetischem Biodiesel	25
Tabelle 2.2:	Beschäftigungswirkungen der verstärkten Nutzung von Bioenergie in Deutschland (Daten: [MEYER ET AL. 2007])	42
Tabelle 2.3:	Entwicklung der Prozentsätze zur Bestimmung der durchschnittlichen spezifischen CO ₂ -Emissionen	44
Tabelle 2.4:	Änderungen der minimal geforderten Biokraftstoffquoten in Deutschland	46
Tabelle 2.5:	Orientierungswerte für die geforderte Synthesegasqualität (in Anlehnung an [LEIBLE ET AL. 2007], [KALTSCHMITT/ HARTMANN 2001])	54
Tabelle 2.6:	Abscheidungsverfahren von Verunreinigungen aus vergaster Biomasse nach [VOGEL ET AL. 2006]	56
Tabelle 2.7:	Ausgestaltungsformen verschiedener Prozesse zur Herstellung synthetischer Biokraftstoffe	64
Tabelle 3.1:	Standortfaktoren für Anlagenkonzepte zur Herstellung synthetischer Biokraftstoffe (in Anlehnung an [DRÜKE 2008])	89
Tabelle 3.2:	Eigenschaften von bestehenden Modellen zur Netzwerkgestaltung für (synthetische) Biokraftstoffe	95
Tabelle 4.1:	Chemische Komponenten des Modells	122
Tabelle 4.2:	Masseanteile der Biomasse (getrocknetes Ahornhackgut) nach [DOE 1998]	122
Tabelle 4.3:	Zusammensetzung des Produktgasstroms	124
Tabelle 4.4:	Bestandteile und Zusammensetzung des Chemical Engineering Plant Cost Index (vgl. [PETERS/ TIMMERHAUS 1991])	134
Tabelle 4.5:	Zuschlagsfaktoren zur Ermittlung der Investitionen der Produktionsmodule in [%] (in Anlehnung an [PETERS ET AL. 2002] sowie [BEIERMANN 2009])	136
Tabelle 4.6:	Schätzungen von Zahlungen für die Instandhaltung [PETERS ET AL. 2002], S. 268	138
Tabelle 4.7:	Schätzungen der betriebsbedingten fixen Zahlungen für Produktionsanlagen zur Herstellung synthetischer Biokraftstoffe	138

Tabelle 4.8:	Zielfunktionen	152
Tabelle 5.1:	Module der Produktionstechnologien.....	161
Tabelle 5.2:	Schätzung der Investitionen der Einzelaggregate (Berechnungen auf Datengrundlage von [BEIERMANN 2009])	161
Tabelle 5.3 :	Schätzung des Anlagekapitals, der Gesamtinvestition und der jährlichen fixen betriebsbedingten Zahlungen	162
Tabelle 5.4:	Kapazitätsauslastungsabhängige Zahlungen	162
Tabelle 5.5:	Transformationskoeffizienten in [Mg/Mg].....	163
Tabelle 5.6:	Flächennutzung in Niedersachsen, Bremen und Hamburg in [km ²] (Daten: [STATISTISCHES BUNDESAMT 2009b])	165
Tabelle 5.7:	Erträge bzw. Ertragsfaktoren für Biomassen (Berechnungen auf Datengrundlage von [RENEW D 5.1.7 2004], [RENEW D 5.1.3 2004])	168
Tabelle 5.8:	Zahlungen für die Bereitstellung von Biomassen an Sammelstellen in [€/Mg _{TM}] (Berechnungen auf Datengrundlage von [RENEW D 5.1.1 2004])	169
Tabelle 5.9:	Zahlungsfunktionen für den Transport von Stoffen in [€/Mg] (Berechnungen auf Datengrundlage von [SUURS 2002])	170
Tabelle 5.10:	Zuschlagsfaktoren zur Ermittlung der Gesamtinvestition der Produktionsmodule, die im Vergleich zu Tabelle 4.5 gesenkt werden, in [%]	176
Tabelle 5.11:	Parameterausprägungen in den untersuchten Szenarien.....	178
Tabelle 5.12:	Modulbezeichnung in der regionalen Fallstudie	179
Tabelle 5.13:	Zahlungen für die Bereitstellung unterschiedlicher Biomassearten im Jahr 2020 im Falle eines ökologischen Biomasseanbaus in [€/GJ] (Datengrundlage: [MÜLLER-LANGER ET AL. 2007])	203
Tabelle 5.14:	Zuschläge für Biomassezahlungen in Abhängigkeit des Anlagenkonzepts und der Anlagenkapazität für den Fall eines ökologischen Biomasseanbaus in [€/GJ]	204
Tabelle 5.15:	Zuschläge für Biomassezahlungen in Abhängigkeit des Anlagenkonzepts und der Anlagenkapazität für den Fall eines Biomasseanbaus, der auf hohe Flächenausbeuten abzielt, in [€/GJ].....	204

Tabelle 5.16: Zuschlagsfaktoren zur Ermittlung der Investition der Produktionsmodule bei Ansiedlung an einem bestehenden Produktionsstandort in [%]	205
Tabelle 5.17: Transportzahlungen für flüssigen Kraftstoff nach [SUURS 2002]	205
Tabelle 5.18: Energetische Mindestanteile von Biodiesel in Westeuropa für das Jahr 2010 (Daten: [UFOP 2009])	207
Tabelle 5.19: Szenarien	208
Tabelle 5.20: Standort- und Anlagenauswahl.....	216
Tabelle 5.21: Netzwerkkonfigurationen der szenarienübergreifenden Analyse in Westeuropa	221

Abkürzungsverzeichnis

Bä	Benzinäquivalent
BtL	Biomass-to-Liquid
CtL	Coal-to-Liquid
DME	Dimethylether
EPF	Engineering Production Function
FME	Tierfettmethylester
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GtL	Gas-to-Liquid
IEA	International Energy Agency
JME	Jatrophaölmethylester
LCA	Life Cycle Assessment
MTBE	tert-Butylmethylether
PME	Palmölmethylester
RME	Rapsölmethylester
SME	Sonnenblumenölmethylester
THG	Treibhausgas
TU	Technische Universität
UCG	Underground Coal Gasification
ΔH	Reaktionsenthalpie

Atome und Moleküle

C	Kohlenstoff
$C_{10}H_{20}$	Decen
C_2H_4	Ethen
$C_2H_4O_2$	Essigsäure
C_2H_6O	Ethanol
C_5H_{10}	Zyklopetan
C_6H_6	Benzen
CH_2	Kohlenwasserstoff
CH_4	Methan
C_nH_{2n}	Olefine
$C_nH_{2n+1}OH$	Alkohole
C_nH_{2n+2}	Paraffine

CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COS	Kohlenstoffsulfid
H	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HCl	Salzsäure
HCN	Cyanwasserstoff
N ₂	Stickstoff
N ₂ O	Stickstoffmonoxid
NH ₃	Ammoniak
O	Sauerstoff
S	Schwefel

Einheitenverzeichnis

\$	Dollar	Währungseinheit
°C	Grad Celsius	Temperatureinheit
€	Euro	Währungseinheit
a	Jahr	Zeiteinheit
b	Barrel	Volumeneinheit
bar	Bar	Druckeinheit
d	Tag	Zeiteinheit
g	Gramm	Masseneinheit
J	Joule	Energieeinheit
l	Liter	Volumeneinheit
m	Meter	Längeneinheit
m ³	Kubikmeter	Volumeneinheit
mol	Mol	Stoffmengeneinheit
N	Newton	Krafteinheit
oe	oil equivalent	Energieeinheit
ppm	Parts per million	Anteil
s	Sekunde	Zeiteinheit
t	Tonnen (entspricht Mg)	Masseneinheit
W	Watt	Leistungseinheit
W _{th}	Watt _{thermisch} (thermische Leistung)	Leistungseinheit

Größenordnungen

μ	Mikro	(10 ⁻⁶)
m	Milli	(10 ⁻³)
k	Kilo	(10 ³)
M	Mega	(10 ⁶)
G	Giga	(10 ⁹)
T	Tera	(10 ¹²)
P	Peta	(10 ¹⁵)
E	Exa	(10 ¹⁸)

Symbolverzeichnis

Indexmengen

A	Indexmenge der Szenarien; $a \in A$
B	Indexmenge der Biomassen; $b \in B$
F	Indexmenge der Anlagen; $f \in F$
J	Indexmenge aller Stoffe im Netzwerk; $b, j, c \in J, J = J^{material} \cup J^{fuel}$
J^{fuel}	Indexmenge der produzierten synthetischen Kraftstoffe; $c \in J^{fuel}, J^{fuel} \subseteq J$
$J^{material}$	Indexmenge aller (Input-)Stoffe, die weiterverarbeitet werden; $b, j \in J^{material}, J^{material} \subseteq J$
K	Indexmenge der Kapazitätsklassen; $k \in K$
M	Indexmenge der Module; in Kapitel vier: $m, g, h \in M$; in Kapitel fünf: $m, g \in M, M = M_{in}^{biomass} \cup M_{in}^{slurry}, M = M_{out}^{slurry} \cup M_{out}^{biodiesel}$
M_b	Indexmenge der Module, die Inputstoff b verarbeiten können; $m, h \in M, M_b \subseteq M$
$M_{in}^{biomass}$	Indexmenge der Module, die Biomasse verarbeiten; $m \in M_{in}^{biomass}$
M_{in}^{slurry}	Indexmenge der Module, die Slurry verarbeiten; $m \in M_{in}^{slurry}$
$M_{out}^{biodiesel}$	Indexmenge der Module, die synthetischen Biodiesel produzieren; $m \in M_{out}^{biodiesel}$
M_{out}^{slurry}	Pyrolysemodul, das Slurry produziert; $g \in M_{out}^{slurry}$
P	Indexmenge der potenziellen Produktionsstandorte; in Kapitel vier: $p, n, o \in P$ in Kapitel fünf: $p, n \in P$
Q	Indexmenge der Quellen; $q \in Q$
R	Indexmenge von Raffineriestandorten; $r, r^* \in R$
S	Indexmenge der Senken; $s \in S$
T	Indexmenge der Perioden; $t \in T$
U	Indexmenge der Regionen; $u \in U$

Variablen und Parameter

$Biom_{bqt}$	verfügbare Masse der Biomasse b an Quelle q in Periode t
$Biom_{but}$	in der Region u verfügbare Masse der Biomasse b in Periode t
$C_t^{material\ flow}$	Summe der Zahlungen für den Stofffluss in Periode t
$C_t^{process}$	Summe der prozessbedingten Zahlungen in Periode t

$c^{handl,biodiesel}$	fixe Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit von synthetischem Biodiesel
$c^{handl,slurry}$	fixe Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit Slurry
c^{handl}	fixe Zahlungen für den Bahntransport einer Masseneinheit von synthetischem Biodiesel
$c_b^{handl,biomass}$	fixe Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit der Biomasse b
c_b^{handl}	fixe Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit des Stoffs b
$c_b^{trans,biomass}$	distanzabhängige Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit der Biomasse b
c_b^{trans}	distanzabhängige Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit des Stoffs b
$c^{trans,slurry}$	distanzabhängige Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit Slurry
$c^{trans,biodiesel}$	distanzabhängige Zahlungen für den Transport einer Masseneinheit von synthetischem Biodiesel
c^{trans}	distanzabhängige Zahlungen für den Bahntransport einer Masseneinheit von synthetischem Biodiesel
$Demand_{cst}$	Nachfrage nach synthetischem Biokraftstoff c in Senke s in Periode t
$Demand_{csta}$	Nachfrage nach synthetischem Biokraftstoff c in Senke s in Periode t und im Szenario a
$Demand_{r^*,t}$	Nachfrage nach synthetischem Biodiesel in Raffineriestandort r^* in Periode t
$Demand_{st}$	Nachfrage nach synthetischem Biodiesel in den Senken s in Periode t
d_{no}	Distanz zwischen Produktionsstandort n und Produktionsstandort o
d_{np}	Distanz zwischen Produktionsstandort n und Produktionsstandort p
d_{ps}	Distanz zwischen Produktionsstandort p und Senke s
d_{qp}	Distanz zwischen Quelle q und Produktionsstandort p
d_{rr^*}	Distanz zwischen Raffineriestandort r und Raffineriestandort r^*
e_{ct}	Einzahlungen infolge des Verkaufs einer Masseneinheit des synthetischen Biokraftstoffs c in Periode t
e_{cta}	Einzahlungen infolge des Verkaufs einer Masseneinheit des synthetischen Biokraftstoffs c in Periode t und im Szenario a
e_t	Einzahlungen durch den Verkauf einer Masseneinheit von synthetischem Biodiesel in Periode t
Fix_f	betriebsbedingte fixe Zahlungen für Anlage f
Fix_m	fixe prozessbedingte Zahlungen für Modul m

Fix_{mk}	betriebsbedingte fixe Zahlungen für Modul m der Kapazitätsklasse k
Fix_{mka}	betriebsbedingte fixe Zahlungen für Modul m der Kapazitätsklasse k im Szenario a
$Index_{Aktuell}$	Preisindex für einen Apparat oder eine Maschine zu einem aktuellen Zeitpunkt
$Index_{Referenz}$	Preisindex für eine Referenzkomponente zu einem Referenzzeitpunkt
$Invest_{A/M}$	Investition für einen Apparat oder eine Maschine in [Geldeinheit]
$Invest_{Aktuell}$	Investition für einen Apparat oder eine Maschine zu einem aktuellen Zeitpunkt in [Geldeinheit]
$Invest_{Referenz}$	Investition für eine Referenzkomponente in [Geldeinheit]
$Invest_f$	Investition für Anlage f
$Invest_m$	Investitionen für Modul m
$Invest_{mk}$	Investition für Modul m der Kapazitätsklasse k
$Invest_{mka}$	Investition für Modul m der Kapazitätsklasse k im Szenario a
I_t	Summe der Investitionen in Periode t
i	Kalkulationszinsfuß
$Kap_{A/M}$	Kapazität eines Apparats oder einer Maschine in [Energie/Zeit] oder [Masse/Zeit]
$Kap_{Referenz}$	Kapazität des Referenzaggregats in [Energie/Zeit] oder [Masse/Zeit]
Mat_{bqt}	verfügbare Masse des Stoffs b in Quelle q und in Periode t
Mat_{bqta}	verfügbare Masse des Stoffs b in Quelle q in Periode t und im Szenario a
$maxcap_f$	maximale Aufnahmekapazität von Anlage f
$maxcap_m$	maximale Aufnahmekapazität von Modul m
$maxcap_{mk}$	maximale Aufnahmekapazität des Moduls m der Kapazitätsklasse k
NPV_a	Kapitalwert im Szenario a
NPV^{min}	Anspruchsniveau im Hinblick auf einen zu erzielenden Kapitalwert
$Proc_{bmk}$	Zahlungen für die Transformation einer Kapazitätseinheit von einem Inputstoff b in Modul m der Kapazitätsklasse k
$Proc_f$	betriebsbedingte Zahlungen für die Transformation einer Kapazitätseinheit Biomasse in Anlage f
$Proc_m$	Zahlungen für die Transformation einer Kapazitätseinheit von Inputstoff (Biomasse oder Slurry) in Modul m
p_a	Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenario a , die von Experten subjektiv festgelegt wird

p_{bqt}	Zahlungen für den Kauf einer Masseneinheit des Stoffs b an Quelle q in Periode t
p_{bqta}	Zahlungen für den Kauf einer Masseneinheit des Stoffs b an Quelle q in Periode t und im Szenario a
p_{bt}	Zahlungen für eine Masseneinheit der Biomasse b in Periode t
p_{ct}	Strafzahlungen für den Zukauf einer Masseneinheit des synthetischen Biokraftstoffs c in Periode t
p_{cta}	Strafzahlungen für den Zukauf einer Masseneinheit des Biokraftstoffs c in Periode t und im Szenario a
p_t	Strafzahlungen für den Zukauf einer Masseneinheit von synthetischem Biodiesel in Periode t
$\hat{p}_{bf}^{correct}$	Zahlungskorrektur für eine Energieeinheit der Biomasse b in Abhängigkeit der Anlagenkapazität der Anlage f
$\hat{p}_{bt}$	Zahlungen für eine Energieeinheit der Biomasse b in Periode t
$\hat{p}_t$	Zahlungen für den Kauf einer Energieeinheit Biomasse außerhalb des Netzwerks in Periode t
v_{cst}	Masse des extern bezogenen Biokraftstoffs c in Senke s in Periode t
v_{csta}	Masse des extern bezogenen synthetischen Biokraftstoffs c in der Senke s in Periode t und im Szenario a
v_{st}	Masse von extern bezogenem Biodiesel, die in Senke s in Periode t zugekauft wird
w_{mkpt}	Anzahl der Module m der Kapazitätsklasse k , die am Produktionsstandort p in Periode t betrieben werden
w_{mkpta}	Anzahl der Module m der Kapazitätsklasse k , die am Produktionsstandort p in Periode t und im Szenario a betrieben werden
x_{frt}	binäre Entscheidungsvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn Anlage f an Raffineriestandort r in Periode t angegliedert wird, sonst 0
x_{mkpt}	binäre Entscheidungsvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn Modul m der Kapazitätsklasse k am Produktionsstandort p in Periode t errichtet wird, sonst 0
x_{mpt}	Binäre Entscheidungsvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn Modul m am Produktionsstandort p in Periode t eröffnet wird, sonst 0
$y_{bmkpta}^{process}$	Masse des Stoffs b , die in Modul m der Kapazitätsklasse k am Produktionsstandort p in Periode t und im Szenario a verarbeitet wird
$y_{bmkpt}^{process}$	Masse des Stoffs b , die in Modul m der Kapazitätsklasse k am Produktionsstandort p in Periode t verarbeitet wird
y_{bqmpa}^{source}	Masse des Stoffs b , die von der Quelle q zu Modul m am Produktionsstandort p in Periode t und im Szenario a transportiert wird

$y_{bqmp}^{biomass}$	Biomasse b , die von Quelle q zu Modul m am Produktionsstandort p in Periode t transportiert wird
y_{bqmp}^{source}	Masse des Stoffs b , die von der Quelle q zu Modul m am Produktionsstandort p in Periode t transportiert wird
$y_{cmpsta}^{deliver}$	Masse des synthetischen Biokraftstoffs c , die von Modul m am Produktionsstandort p zu Senke s in Periode t und im Szenario a transportiert wird
$y_{cmpst}^{deliver}$	Masse des synthetischen Biokraftstoffs c , die von Modul m am Produktionsstandort p in Periode t zur Senke s transportiert wird
$y_{frr^*t}^{biodiesel}$	Masse des synthetischen Biodiesels, die von Anlage f von Raffinerie r zu Raffinerie r^* in Periode t transportiert wird
y_{gmpt}^{slurry}	Masse des Slurries, die von Modul g am Produktionsstandort n zu Modul m am Produktionsstandort p in Periode t transportiert wird
$y_{jgnhota}^{inter}$	Masse des Stoffs j , die in Modul g am Produktionsstandort n zum Modul h am Produktionsstandort o in Periode t und im Szenario a transportiert wird
y_{jgnhot}^{inter}	Masse des Stoffs j , die in Modul g am Produktionsstandort n zum Modul h am Produktionsstandort o in Periode t transportiert wird
$y_{mpst}^{biodiesel}$	Masse des synthetischen Biodiesels, die von Modul m am Produktionsstandort p zur Senke s in Periode t transportiert wird
$\hat{y}_{bfrt}^{biomass}$	Energie der in der Region beschafften Biomasse b , die in Anlage f am Raffineriestandort r in Periode t zu synthetischem Biodiesel verarbeitet wird
$\hat{y}_{frt}^{biomass}$	Energie der extern beschafften Biomasse, die in Anlage f am Raffineriestandort r und Periode t zu synthetischem Biodiesel umgewandelt wird
z_{frt}	Anzahl der Anlagen f , die an Raffinerie r bis einschließlich Periode t angegliedert wurden
z_{mkpt}	Anzahl der Module m der Kapazitätsklasse k , die bis einschließlich Periode t am Produktionsstandort p errichtet wurden
z_{mpt}	Anzahl der Module m , die am Produktionsstandort p bis einschließlich Periode t eröffnet wurden
$\gamma_{bm}^{biodiesel}$	Transformationskoeffizient des Moduls m , der die Transformation von Biomasse b in synthetischen Biodiesel beschreibt
γ_{bmkj}	Transformationskoeffizient des Moduls m der Kapazitätsklasse k , der die Transformation von Stoff b in den Stoff j beschreibt
γ_b^{slurry}	Transformationskoeffizient, der die Transformation von Biomasse b in Slurry beschreibt
$\gamma_m^{biodiesel}$	Transformationskoeffizient des Moduls m , der die Transformation von Slurry in synthetischen Biodiesel beschreibt
$\hat{\gamma}_{bf}^{biodiesel}$	Transformationskoeffizient der Anlage f , der die Transformation von einer

	Energieeinheit der Biomasse b in synthetischen Biodiesel beschreibt
$\gamma_f^{biodiesel}$	Transformationskoeffizient der Anlage f , der die Transformation von einer Energieeinheit der extern bezogenen Biomasse in synthetischen Biodiesel beschreibt
$\varepsilon_b^{biomass}$	Kapazitätseinheitenkoeffizient, der die Umwandlung einer Masseneinheit der Biomasse b in die Kapazitätseinheit der Module beschreibt
ε_{bm}	Kapazitätseinheitenkoeffizient, der die Umwandlung einer Masseneinheit des Stoffs b in die Kapazitätseinheit des Moduls m beschreibt
ε^{slurry}	Kapazitätseinheitenkoeffizient, der die Umwandlung einer Masseneinheit Slurry in die Kapazitätseinheit der Module beschreibt
$\xi_b^{biomass}$	Kapazitätseinheitenkoeffizient, der die Umwandlung einer Energieeinheit der Biomasse b in die Kapazitätseinheit der Anlagen beschreibt
$\xi^{biomass}$	Kapazitätseinheitenkoeffizient, der die Umwandlung einer Energieeinheit der extern bezogenen Biomasse in die Kapazitätseinheit der Anlagen beschreibt
η	Größendegressionsexponent
μ	Gewichtungsfaktor in einer Linearkombination, $0 \leq \mu \leq 1$
σ_{ru}	Faktor, der den Wert 1 annimmt, wenn Raffineriestandort r in der Region u liegt, sonst 0
ω	Faktor zur Gewichtung des Misserfolgs