

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung .....	1
2 Grundlagen .....	5
2.1 Stahlproduktion in Deutschland.....	5
2.2 Emissionsreduktion in der Stahlproduktion .....	7
2.3 Produkt- und anlagenspezifische Grundlagen .....	10
2.3.1 Prozessgase.....	10
2.3.2 Produkte .....	12
2.3.3 Anlagen .....	14
2.3.4 Power-to-X und Flexibilität in der chemischen Industrie.....	17
2.4 Szenarien und ihre Anwendung .....	18
2.5 Mathematische Optimierung.....	20
2.5.1 Allgemein .....	20
2.5.2 Mathematische Formulierung eines MILP.....	22
2.5.3 MILP zur Planung von Energie- und Produktionssystemen .....	24
3 Stand der Forschung .....	27
3.1 Bisherige Forschungsarbeiten .....	27
3.2 Forschungslücke und Forschungsfragen.....	32
4 Vorgehensweise.....	35
4.1 Produktvorauswahl .....	35
4.1.1 Generisches Vorgehen zur Produktvorauswahl .....	36
4.1.2 Bestimmung der Hauptkomponenten.....	37
4.1.3 Identifikation möglicher Produkte und Syntheserouten .....	38
4.1.4 K.O.-Kriterien und Vorreduktion .....	38
4.1.5 Definition und Gewichtung der Bewertungskriterien.....	39
4.1.6 Vorauswahl durch Nutzwertanalyse .....	40
4.2 Konzeptionierung und Parametrierung der Syntheserouten .....	41
4.2.1 Hierarchisches Vorgehen.....	41
4.2.2 Upstream-Synthese-Downstream-Ebene .....	42
4.2.3 Vorkonzeptionierung der Anlagenebene .....	43
4.2.4 Technische Parametrierung der Anlagen.....	44
4.2.5 Endkonzeptionierung der Syntheserouten .....	46

4.3 Konzeptionierung des superstrukturbasierten allgemeinen Anlagenverbundes .....	46
4.3.1 Generisches Vorgehen zur Konzeptionierung .....	47
4.3.2 Reduktion auf eine Syntheseroute je Produkt.....	48
4.3.3 Kombinieren der Syntheserouten zum AAV.....	49
4.4 Szenarienerstellung.....	50
4.4.1 Umfeldanalyse und Vorbereitung .....	50
4.4.2 Einflussanalyse und Schlüsselfaktoridentifikation .....	51
4.4.3 Erstellung des Trendszenarios .....	52
4.4.4 Zukünftige Entwicklungen der Schlüsselfaktoren .....	53
4.4.5 Erstellung alternativer Szenarien.....	53
4.4.6 Bewertung der Szenarien.....	55
4.5 Weitere Beschränkungen des Optimierungsproblems .....	55
4.5.1 Bestimmung der maximalen Kapazitäten .....	55
4.5.2 Vorgehen zur ökonomischen Bewertung .....	57
4.5.3 Bestimmung der Puffer- und Speichergrößen .....	61
4.5.4 Reduktion der Jahreszeitreihen.....	62
4.6 Mathematische Optimierung .....	62
4.6.1 Ausgangszustand des Modells .....	62
4.6.2 Verwendete MILP-Modellierungstechniken .....	64
4.7 Ergebnisanalyse .....	65
5 Konzeptionierter allgemeiner Anlagenverbund und entwickelte Szenarien .....	67
5.1 Vorausgewählte Produkte .....	67
5.1.1 Mögliche Produkte und Syntheserouten .....	67
5.1.2 Vorreduktion der Produkte .....	68
5.1.3 Maßzahlen der Bewertungskriterien .....	68
5.1.4 Nutzwerte der einzelnen Syntheserouten .....	69
5.1.5 Vorausgewählte Syntheserouten und Produkte.....	70
5.2 Konzeptionierte und parametrierte Syntheserouten.....	71
5.2.1 Upstream-Synthese-Downstream-Ebene .....	71
5.2.2 Vorkonzeptionierte Anlagenebene .....	73
5.2.3 Technische Parameter und parametrierte Anlagen .....	75
5.2.4 Vollständig konzeptionierte Syntheserouten .....	78
5.3 Superstrukturbasierter allgemeiner Anlagenverbund .....	80
5.3.1 Techno-ökologischer Vergleich der MeOH-Syntheserouten .....	80

5.3.2 Endkonzeptionierter allgemeiner Anlagenverbund .....	82
5.4 Entwickelte Szenarien .....	87
5.4.1 Grundannahmen im Anwendungsfall.....	87
5.4.2 Identifizierte Schlüsselfaktoren .....	88
5.4.3 Trendszenario Business as usual ( <i>BAU</i> ).....	90
5.4.4 Zukünftige Entwicklungen der Schlüsselfaktoren .....	92
5.4.5 Alternative Szenarien.....	93
5.4.6 Bewertung der fünf Szenarien .....	96
5.5 Beschränkungen des Optimierungsproblems im vorliegenden Anwendungsfall .....	98
5.5.1 Maximale Kapazitäten .....	98
5.5.2 Ökonomische Parametrierung .....	100
5.5.3 Festgelegte Puffer- und Speichergrößen .....	105
5.5.4 Reduzierte Zeitreihen.....	106
6 Superstrukturoptimierungsmodell .....	109
6.1 Superstrukturvariablen .....	109
6.2 Anlagenmodelle .....	110
6.2.1 Allgemeine Anlagenmodellgleichungen.....	110
6.2.2 Trennanlagen.....	111
6.2.3 Reaktoren .....	112
6.2.4 Kompressoren .....	115
6.2.5 Wasserstofferzeugung.....	115
6.2.6 Speicher.....	116
6.3 Netzwerke.....	117
6.3.1 Stromnetz .....	117
6.3.2 Wärmenetze .....	118
6.3.3 Emissionen.....	119
6.3.4 Überschüssiges Prozess- und Abgasnetz .....	120
6.4 Zielfunktion .....	121
6.4.1 Investitionskosten .....	122
6.4.2 Betriebserlöse.....	123
6.4.3 Betriebskosten.....	124
6.4.4 Restwerterlös .....	125
6.5 Plausibilisierung des Modells .....	125
7 Ergebnisse und Auswertung .....	127

7.1 Optimale Anlagenverbünde.....	127
7.1.1 <i>BAU-Szenario</i> .....	127
7.1.2 <i>EE-Max-Szenario</i> .....	134
7.1.3 <i>Markt-Szenario</i> .....	137
7.1.4 <i>Krise-Szenario</i> .....	140
7.1.5 <i>H2-Max-Szenario</i> .....	144
7.2 Vergleich von Struktur, Dimensionierung und Betrieb.....	147
7.2.1 Struktur .....	147
7.2.2 Dimensionierung .....	149
7.2.3 Betriebsweise .....	152
7.3 Gesamtsystemische Bewertung .....	155
7.3.1 Gesamtwirtschaftlichkeit.....	156
7.3.2 Einnahmequellen.....	157
7.3.3 Jährliche Strommengen .....	159
7.3.4 Jährliche Wärmemengen .....	160
7.3.5 Bewertung der Ökologie durch die jährliche CO <sub>2</sub> -Vermeidung .....	162
7.4 Fazit zur angewendeten Vorgehensweise und den Optimierungsergebnissen.....	163
8 Zusammenfassung und Ausblick .....	167
Literatur .....	171
A Inhaltlicher Anhang .....	I
B Lebenslauf .....	LXVII
C Wissenschaftliche Vita .....	LXIX