

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 parametrisierte Syntheserouten.....	71
5.2.1	Upstream-Synthese-Downstream-Ebene.....	71
5.2.2	Vorkonzeptionierte Anlagenebene	73
5.2.3	Technische Parameter und parametrisierte 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 (BAU)	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 BAU-Szenario	127
7.1.2 EE-Max-Szenario	134
7.1.3 Markt-Szenario.....	137
7.1.4 Krise-Szenario	140
7.1.5 H2-Max-Szenario.....	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 ₂ -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