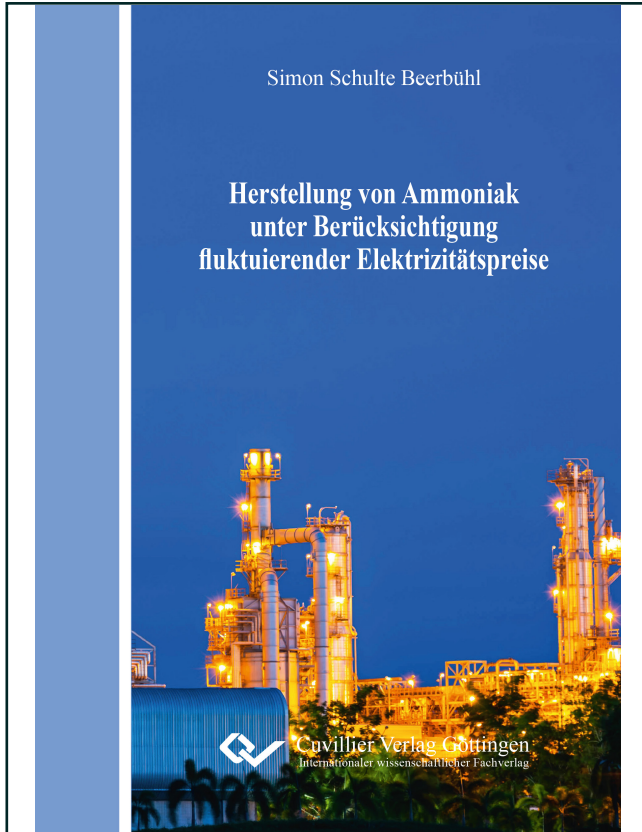




Simon Schulte Beerbühl (Autor)  
**Herstellung von Ammoniak unter Berücksichtigung  
fluktuierender Elektrizitätspreise**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6865>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Einleitung und Problemstellung</b>	<b>1</b>
1.1. Ausgangslage und Problemstellung . . . . .	1
1.2. Zielsetzung und Lösungsweg . . . . .	2
<b>2. Umfeldanalyse und Ableitung der Prozesskonzepte</b>	<b>7</b>
2.1. Entwicklungen am Elektrizitätsmarkt . . . . .	7
2.2. Entwicklungen im Bereich der Wasserstoffwirtschaft . . . . .	12
2.3. Stand der Wissenschaft und Technik zur Herstellung von NH <sub>3</sub> aus regenerativen Quellen . . . . .	15
2.3.1. Konzepte zum flexiblen Betrieb von Elektrolyseuren . . . . .	16
2.3.2. Konzepte zum flexiblen Betrieb von NH <sub>3</sub> -Anlagen . . . . .	17
2.4. Anforderungsanalyse und Ableitung der zu entwickelnden Prozesskonzepte . . . . .	18
2.4.1. Anforderungen an H <sub>2</sub> -basierte Konzepte von Seiten des Elektrizitätsmarktes . . . . .	19
2.4.2. Anforderungen möglicher Abnehmer von Ammoniak aus Kleinanlagen . . . . .	21
2.5. Ableitung der Prozesskonzepte zur Herstellung von NH <sub>3</sub> unter Berücksichtigung fluktuierender Elektrizitätspreise . . . . .	22
<b>3. Entwicklung einer Methodik zur Modellierung und Bewertung der Prozesskonzepte zur Herstellung von Ammoniak aus Elektrizität</b>	<b>27</b>
3.1. Phasen des Planungsprozesses für stoffumwandelnde Verfahren . . . . .	28
3.2. Methoden zur Modellierung verfahrenstechnischer Prozesse . . . . .	29
3.3. Definition der verwendeten prozesstechnischen Zielgrößen . . . . .	31
3.4. Grundstruktur der Optimierungsaufgabe . . . . .	33
3.5. Methoden zur Ermittlung der Anlageninvestition . . . . .	35
3.6. Methoden zur Einsatzplanung in der Energiewirtschaft . . . . .	38
3.7. Erweiterung des Modells um die Kapazitätsplanung . . . . .	42
3.8. Zusammenfassung der entwickelten Vorgehensweise . . . . .	42



<b>4. Konzept der elektrolysebasierten Herstellung von Ammoniak</b>	<b>45</b>
4.1. Wasserelektrolyse . . . . .	45
4.1.1. Technologien der Wasserelektrolyse . . . . .	46
4.1.2. Thermodynamische Grundlagen . . . . .	48
4.1.3. Wesentliche Quellen von Energieverlusten . . . . .	50
4.1.4. Prozessintegration . . . . .	53
4.1.5. Nebenprodukt Sauerstoff . . . . .	55
4.2. Wasserstoff-Pufferspeicher . . . . .	55
4.3. NH <sub>3</sub> -Synthese . . . . .	57
4.3.1. Thermodynamische und kinetische Grundlagen der Ammoniaksynthese . . . . .	57
4.3.2. Stand der Technik im Ammoniakanlagenbau . . . . .	62
4.4. Erstellung und Modellierung des elektrolysebasierten Anlagenkonzeptes . . . . .	75
4.4.1. Modellierung der Stickstoff-Bereitstellung . . . . .	77
4.4.2. Zusammenführung und Verdichtung des Synthesegases sowie Eingliederung des H <sub>2</sub> -Pufferspeichers . . . . .	78
4.4.3. NH <sub>3</sub> -Kondensation und Abscheidung . . . . .	79
4.4.4. NH <sub>3</sub> -Konverter . . . . .	80
4.4.5. Wärmemanagement und Wärmeübertrager . . . . .	86
4.4.6. Inerte und <i>Purge Gas</i> -Management . . . . .	91
4.5. Konzipierung und Implementierung des Betriebs bei Teillast . . . . .	93
4.5.1. Regelstrategien für Teillast und ihre Auswirkungen auf den Konverter . . . . .	94
4.5.2. Simulation der Teillast in AspenPlus® . . . . .	97
4.6. Betriebskosten auf Basis der Massen- und Energiebilanzen . . . . .	99
<b>5. Hybridkonzept zur Herstellung von Ammoniak aus Erdgas und Elektrizität</b>	<b>105</b>
5.1. Thermodynamische und kinetische Grundlagen . . . . .	106
5.1.1. Dampfreformierung . . . . .	107
5.1.2. Wasser-Gas-Shift Reaktion (CO-Konversion) . . . . .	110
5.2. Stand der Technik der erdgasbasierten Wasserstofferzeugung . . . . .	112
5.2.1. Rohstoffvorbehandlung . . . . .	113
5.2.2. Synthesegaserzeugung . . . . .	114
5.2.3. CO-Konversion . . . . .	119
5.2.4. Wärmemanagement . . . . .	121
5.2.5. Gasaufbereitung . . . . .	123
5.3. Erstellung und Modellierung des hybriden Anlagenkonzeptes . . . . .	125
5.3.1. Eduktaufwärmung und Rohstoffvorbehandlung . . . . .	127
5.3.2. Synthesegaserzeugung . . . . .	128
5.3.3. CO-Konversion . . . . .	133



5.3.4.	Gasaufbereitung . . . . .	136
5.3.5.	<i>Purge-</i> und Restgasmanagement . . . . .	137
5.3.6.	Wärmemanagement . . . . .	138
5.4.	Konzipierung und Implementierung des Betriebs bei Teillast . . . . .	144
5.5.	Sauerstoffmanagement . . . . .	146
5.6.	Betriebskosten auf Basis der Massen- und Energiebilanzen . . . . .	148
5.7.	Auswirkungen der Erzeugungspfade aufeinander . . . . .	151
5.8.	Vergleich zwischen Hybridkonzept und elektrolysebasiertem Verfahren . . . . .	153
<b>6.</b>	<b>Wirtschaftliche Bewertung der Verfahren</b>	<b>157</b>
6.1.	Ermittlung der Anlageninvestition . . . . .	157
6.1.1.	Vorgehen . . . . .	157
6.1.2.	Resultate der Investitionsschätzung . . . . .	160
6.2.	Entwicklung des Optimierungsmodells für das elektrolysebasierte Verfahren . . . . .	164
6.2.1.	Aufbau des Modells . . . . .	164
6.2.2.	Einbindung der Wasserelektrolyse . . . . .	166
6.2.3.	Einbindung des Pufferspeichers . . . . .	167
6.2.4.	Einbindung der NH <sub>3</sub> -Synthese . . . . .	168
6.3.	Heuristische Herangehensweise zur Reduktion der Modellkomplexität . . . . .	169
6.3.1.	Herleitung der verwendeten Heuristik . . . . .	169
6.3.2.	Aufbau und Ablauf der verwendeten Heuristik . . . . .	171
6.4.	Anpassung des Optimierungsmodells zur Abbildung des Hybridkonzepts . . . . .	173
6.5.	Anwendung der Optimierungsmodelle zur Kapazitäts- und Einsatzplanung . . . . .	177
6.5.1.	Parameter . . . . .	177
6.5.2.	Charakteristik des nichtlinearen Lösungsansatzes und der Heuristik . . . . .	179
6.5.3.	Ergebnisse für das elektrolysebasierte Konzept . . . . .	183
6.5.4.	Ergebnisse für das Hybridkonzept . . . . .	190
6.6.	Zusammenfassung des Kapitels . . . . .	199
<b>7.</b>	<b>Vergleich mit alternativen Anwendungen (<i>Power-to-Gas</i>)</b>	<b>201</b>
7.1.	Wasserstoff-Einspeisung in das Erdgasnetz . . . . .	202
7.1.1.	Prozessschnittstelle Erdgasnetz . . . . .	202
7.1.2.	Konzeptaufbau, -modellierung und -bewertung . . . . .	204
7.1.3.	Prozessflexibilität . . . . .	205
7.1.4.	Aufbau des Modells zur gekoppelten Kapazitäts- und Einsatzplanung . . . . .	205



---

7.1.5.	Anwendung des Modells zur gekoppelten Kapazitäts- und Einsatzplanung . . . . .	206
7.2.	Konzept der elektrolysebasierten Methanisierung . . . . .	209
7.2.1.	Prozessschnittstelle Erdgasnetz . . . . .	210
7.2.2.	CO <sub>2</sub> -Quelle . . . . .	210
7.2.3.	Thermodynamische und kinetische Grundlagen . . . . .	211
7.2.4.	Stand der Technik . . . . .	212
7.2.5.	Konzeptaufbau und -modellierung . . . . .	213
7.2.6.	Wärmemanagement . . . . .	214
7.2.7.	Betriebskosten auf Basis der Massen- und Energiebilanzen	216
7.2.8.	Einfluss des CO <sub>2</sub> -Preises auf den Grenzpreis . . . . .	218
7.2.9.	Aufbau des Modells zur gekoppelten Kapazitäts- und Einsatzplanung . . . . .	218
7.2.10.	Anwendung des Modells zur gekoppelten Kapazitäts- und Einsatzplanung . . . . .	219
7.3.	<i>Power-to-Gas</i> -Konzepte im Vergleich zur elektrolysebasierten Herstellung von NH <sub>3</sub> . . . . .	221
7.3.1.	Edukt- und Produktpreise . . . . .	222
7.3.2.	Reaktionseffizienz . . . . .	223
7.3.3.	Dampfexport als alternative Variante der Wärmenutzung	225
7.3.4.	Einfluss der unterschiedlichen spezifischen Investitionen je Arbeitsvolumen des Puffers . . . . .	226
7.3.5.	Vergleich der Ergebnisse der Kapazitäts- und Einsatzplanungen . . . . .	227
<b>8.</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerungen</b>	<b>231</b>
8.1.	Diskussion des methodischen Ansatzes . . . . .	231
8.2.	Diskussion der Designanforderungen . . . . .	234
8.3.	Diskussion der Modellergebnisse . . . . .	235
8.3.1.	Ergebnisse des elektrolysebasierten Verfahrens . . . . .	236
8.3.2.	Ergebnisse des Hybridkonzepts . . . . .	237
8.3.3.	Einordnung der Ergebnisse der gekoppelten Kapazitäts- und Einsatzplanung . . . . .	239
8.4.	Erweiterungsmöglichkeiten der Prozesse und Methoden . . . . .	242
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>245</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>249</b>



<b>Anhang</b>	<b>262</b>
<b>A. Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten</b>	<b>263</b>
<b>B. Kennzahlverlauf im Wärmeübertrager bei Teillast</b>	<b>267</b>
<b>C. Beispielhafte softwaregestützte Auslegung von Apparaten</b>	<b>271</b>
<b>D. Charakteristik der verwendeten Elektrizitätspreise 2007-2012 (EEX <i>day ahead</i>-Markt)</b>	<b>273</b>
<b>E. Verlauf des verwendeten Erdgas-Lastflusses</b>	<b>275</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>277</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>279</b>