

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole und Indizes</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2 Methoden der Energiesystemanalyse</b>	<b>5</b>
2.1 Massen- und Energiebilanz . . . . .	5
2.2 „Pinch“-Analyse . . . . .	6
2.2.1 Grundlagen . . . . .	6
2.2.1.1 Heiße und kalte Ströme . . . . .	6
2.2.1.2 Minimale Temperaturdifferenz . . . . .	7
2.2.1.3 Heiße und kalte Summenkurve . . . . .	8
2.2.1.4 Der „Pinch“ und seine Bedeutung für den Heiz- und Kühlbedarf eines Prozesses . . . . .	10
2.2.1.5 Das Wärmestromprofil . . . . .	12
2.2.1.6 Auswahl geeigneter Betriebsmittel . . . . .	14
2.2.2 Integration von Wärmekraftmaschinen und Wärmepumpen . . . . .	15
2.2.2.1 Wärmekraftmaschinen . . . . .	15
2.2.2.2 Wärmepumpen . . . . .	18
2.2.3 Gitterdarstellung eines Wärmeübertragernetzwerkes . . . . .	18
2.2.4 Abschätzung und Optimierung der Gesamtkosten eines Wärmeübertragernetzwerkes . . . . .	19
2.2.5 Vergleich von Summenkurven und Wärmestromprofil . . . . .	22
2.2.6 „Pinch“-Analyse eines Standortes . . . . .	22
2.3 Exergetische Analyse . . . . .	25
2.3.1 Grundlagen . . . . .	25
2.3.2 Berechnung der thermomechanischen Exergie eines Stoffstromes . . . . .	28
2.3.3 Berechnung der stofflichen und chemischen Exergie . . . . .	30
2.3.3.1 Umgebungsmodelle in der Literatur . . . . .	30
2.3.3.2 Wahl eines geeigneten Umgebungssystems und Berechnung der stofflichen Exergie . . . . .	32
2.3.3.3 Berechnung der chemischen Exergie . . . . .	33
2.3.4 Exergie der Wärme . . . . .	35
2.3.4.1 Exergie eines Wärmestroms und Exergieverlust durch Wärmeübertragung . . . . .	35
2.3.4.2 Exergetische Summenkurven . . . . .	36
2.3.5 Entwurf von Wärmeübertragernetzwerken mit Hilfe der Exergie . . . . .	38
2.3.6 Exergetische Prozeßoptimierung . . . . .	41

2.3.7	Allgemeingültige Regeln zum Auffinden von Exergieverlusten . . . . .	43
2.4	Optimierung von Wärmeübertragernetzwerken . . . . .	44
2.5	Thermodynamisches Minimum des Energiebedarfs der Prozesse . . . . .	50
2.5.1	Ammoniakherzeugung . . . . .	50
2.5.2	Harnstoffherzeugung . . . . .	52
2.5.3	Düngemittelkomplex . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Beschreibung des betrachteten Düngemittelkomplexes</b>	<b>54</b>
3.1	Der Ammoniakprozess . . . . .	55
3.1.1	Dampfspaltung . . . . .	56
3.1.2	Konvertierung . . . . .	59
3.1.3	Gasreinigung . . . . .	60
3.1.4	Methanisierung . . . . .	62
3.1.5	Synthesegasverdichtung . . . . .	63
3.1.6	Ammoniaksynthese . . . . .	64
3.1.7	Purgegasaufbereitung . . . . .	66
3.1.8	Kälteherzeugung . . . . .	67
3.1.9	HD-Dampferherzeugung und Zusatzkessel . . . . .	67
3.1.10	Wärmeübertragernetzwerk der Ammoniakanlage . . . . .	68
3.2	Der Harnstoffprozess . . . . .	70
3.2.1	Verdichtung der Edukte . . . . .	71
3.2.2	Harnstoffsynthese . . . . .	71
3.2.3	Aufbereitung der Harnstofflösung . . . . .	74
3.2.4	Aufbereitung der Nebenprodukte und Rückgewinnung der Einsatzstoffe	75
3.2.5	Kondensat-Aufbereitung . . . . .	75
3.2.6	Granulation . . . . .	76
3.2.7	Wärmeübertragernetzwerk der Harnstoffanlage . . . . .	77
3.3	Energieversorgung und Dampfsystem . . . . .	79
<b>4</b>	<b>„Pinch“-Analyse des Düngemittelkomplexes</b>	<b>81</b>
4.1	Ermittlung der relevanten Prozeßdaten . . . . .	81
4.2	Analyse der Ammoniakanlage . . . . .	88
4.2.1	Wärmeintegrationsanalyse der Prozeßströme . . . . .	88
4.2.2	Berücksichtigung der HD-Dampferherzeugung . . . . .	90
4.2.3	Weitere Maßnahmen zur Optimierung der Ammoniakanlage . . . . .	102
4.3	Analyse der Harnstoffanlage . . . . .	104
4.3.1	Wärmeintegrationsanalyse der Prozeßströme . . . . .	104
4.3.2	Einsatz einer Wärmepumpe in der Harnstoffanlage . . . . .	107
4.3.3	Harnstoffanlage mit MD-Dampf Import . . . . .	109
4.3.4	ND-Dampferherzeugung aus der Abwärme der Harnstoffanlage . . . . .	110
4.3.5	Nutzung der Reaktionswärme aus dem Reaktor 21R001 . . . . .	113
4.3.6	Analyse der Temperaturniveaus im Dampfsystem der Harnstoffanlage	114
4.4	Gemeinsame Analyse von Ammoniak- und Harnstoffanlage . . . . .	115

4.4.1	Einfluß des Schlüsselparameters $\Delta T_{min}$ auf den Heizbedarf und den Flächenbedarf des Düngemittelkomplexes . . . . .	118
4.4.2	Optimierung der HD-Dampferzeugung in der Ammoniakanlage . . . . .	119
4.4.3	„Pinch“-Analyse des Standortes mit den Standortsummenkurven . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Exergetische Analyse</b>	<b>127</b>
5.1	Ammoniakanlage . . . . .	127
5.1.1	Prozeßluftverdichtung . . . . .	128
5.1.2	Primär-Reformer . . . . .	129
5.1.3	Sekundär-Reformer . . . . .	133
5.1.4	Konvertierung und Speisewasservorwärmung . . . . .	134
5.1.5	Kohlendioxidentfernung aus dem Synthesegas . . . . .	135
5.1.6	Methanisierung und Kondensatstrippung . . . . .	136
5.1.7	Synthesegasverdichtung . . . . .	137
5.1.8	Ammoniaksynthese und Ammoniakabscheidung . . . . .	138
5.1.9	Kälteerzeugung durch eine Kompressionskältemaschine . . . . .	141
5.1.10	Purgegas-Reinigung und Wasserstoffrückgewinnung . . . . .	142
5.1.11	Zusatzkessel . . . . .	143
5.1.12	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der Exergieverlust-Analyse für die Ammoniakanlage . . . . .	144
5.2	Harnstoffanlage . . . . .	152
5.2.1	Harnstoffsynthese . . . . .	153
5.2.2	Kohlendioxidverdichter . . . . .	155
5.2.3	Abtrennung der inerten Komponenten . . . . .	156
5.2.4	Aufarbeitung des Prozeßkondensats . . . . .	156
5.2.5	Konzentrierung der Harnstofflösung . . . . .	157
5.2.6	Granulator . . . . .	158
5.2.7	Fließbettkühler . . . . .	159
5.2.8	Entstaubung . . . . .	161
5.2.9	Dampfsystem . . . . .	161
5.2.10	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der Exergieverlust-Analyse für die Harnstoffanlage . . . . .	162
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der exergetischen Analyse . . . . .	168
5.4	Neue Verfahrenskonzepte zur Herstellung von Harnstoff . . . . .	170
<b>6</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse</b>	<b>171</b>
6.1	Zusammenfassende Beurteilung der „Pinch“-Analyse . . . . .	171
6.2	Zusammenfassende Beurteilung der exergetischen Analyse . . . . .	174
6.3	Vergleich von „Pinch“-Analyse und exergetischer Analyse . . . . .	177
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>183</b>