

# Mehrzielentscheidungen in der industriellen Produktion

von  
Jutta Geldermann



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ausgangslage und Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung und Lösungsweg .....	3
<b>2</b>	<b>UMWELTRECHTLICHE ANFORDERUNGEN AN DEN BETRIEB INDUSTRIELLER ANLAGEN</b> .....	<b>5</b>
2.1	<b>Internationale Verpflichtungen</b> .....	<b>5</b>
2.1.1	UNECE Konvention über den grenzüberschreitenden Ferntransport von Luftschadstoffen und ihre Folgeprotokolle .....	6
2.1.2	Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen (NEC-Richtlinie 2001/81/EG) .....	8
2.1.3	Richtlinie über die Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie 96/61/EG) .....	9
2.1.4	Lösemittel-Richtlinie (1999/13/EG) .....	13
2.1.5	Richtlinie zur VOC-Begrenzung in Farben und Lacken (2004/42/EG) .....	14
2.1.6	Chemikalienpolitik der EU .....	15
2.2	<b>Rechtsgrundlagen in Deutschland</b> .....	<b>16</b>
2.2.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) .....	17
2.2.2	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) .....	18
2.2.3	Wasserhaushaltsgesetz (WHG) .....	18
2.3	<b>Konsequenzen für die Errichtung und den Betrieb von industriellen Anlagen</b> .....	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>TECHNIKBEWERTUNG</b> .....	<b>21</b>
3.1	<b>Ansätze zur integrierten Technikbewertung</b> .....	<b>21</b>
3.1.1	Technikfolgenabschätzung .....	21
3.1.2	Technologiefrüherkennung .....	24
3.1.3	Technikbewertung .....	24
3.1.4	Schlussfolgerungen für die Technikbewertung in der industriellen Produktion .....	25
3.2	<b>Bewertung der Umweltauswirkungen von Techniken und industrieller Produktion</b> .....	<b>25</b>
3.2.1	Prinzip der Nachhaltigkeit .....	26
3.2.2	Monetarisierung von Umweltschäden .....	26
3.2.3	Ökobilanzierung .....	28
3.2.3.1	Wirkungsabschätzung .....	28
3.2.3.2	Auswertung der Ökobilanz .....	30
3.2.4	Stoffstrommanagement .....	31
3.2.5	Ansätze zum produktionsintegrierten Umweltschutz .....	33
3.2.6	Fazit für die industrielle Produktion .....	34

<b>3.3</b>	<b>Techno-ökonomische Bewertung von Emissionsminderungsmaßnahmen .....</b>	<b>34</b>
3.3.1	Primäre und sekundäre Emissionsminderungsmaßnahmen.....	34
3.3.2	Abgrenzungsprobleme bei der Zuordnung von Emissionsminderungskosten .....	37
3.3.3	Erhebung der wirtschaftlichen Parameter zur Schätzung der Investitionen .....	39
3.3.4	Schätzung der jährlichen Kosten einer Emissionsminderungsmaßnahme .....	41
<b>3.4</b>	<b>Der Referenzanlagenansatz zur Klassifizierung von Emissionsminderungsmaßnahmen .....</b>	<b>44</b>
3.4.1	Dokumentation der Referenzanlagen.....	46
3.4.2	Emissionsfaktoren zur Maßnahmencharakterisierung .....	46
<b>3.5</b>	<b>Fallbeispiel 1: Der Einsatz der Clusteranalyse zur Definition von Referenzanlagen....</b>	<b>47</b>
3.5.1	Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Klassenbildung .....	48
3.5.2	Durchführung der Clusteranalysen.....	50
3.5.2.1	Clusteranalyse nach Prozessen (qualitative Variablen) .....	50
3.5.2.2	Clusteranalyse nach Kapazitäten (quantitative Variablen).....	50
3.5.3	Kritische Würdigung des Einsatzes der Clusteranalyse.....	51
<b>3.6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>BESTIMMUNG VON BESTEN VERFÜGBAREN TECHNIKEN .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Zur Bestimmung der relevanten Sektoren über die Verbrauchskapazität.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Fallbeispiel 2: BVT-Bestimmung in der Lack- und Klebstoffverarbeitung .....</b>	<b>56</b>
4.2.1	BVT-Kandidaten in Industriebereichen der Klebstoffanwendung .....	58
4.2.2	BVT-Kandidaten in Industriebereichen der Lackanwendung .....	61
4.2.2.1	Lacksysteme .....	63
4.2.2.2	BVT-Kandidaten in ausgewählten Sektoren.....	65
4.2.3	Schlussfolgerungen aus dem Fallbeispiel .....	69
<b>4.3</b>	<b>Medienübergreifende Technikbewertung zur Identifikation der besten verfügbaren Techniken .....</b>	<b>69</b>
4.3.1	Identifizierung der zu bewertenden Optionen und Stoff- und Energiebilanz .....	70
4.3.2	Wirkungsabschätzung und Entscheidungsunterstützung.....	72
4.3.3	Schlussfolgerungen.....	73
<b>4.4</b>	<b>Einsatz der Informationstechnologie zur Unterstützung des Informationsaustauschs nach Artikel 16(2) der IVU-Richtlinie .....</b>	<b>74</b>
4.4.1	Data Mining zur Auswertung der BVT-Merkblätter.....	75
4.4.1.1	Graphische Modellierung .....	76
4.4.1.2	Erstellung einer Entscheidungstabelle .....	78
4.4.2	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	79
<b>4.5</b>	<b>Zur Bedeutung der besten verfügbaren Techniken für die Betrachtung des technischen Fortschritts .....</b>	<b>79</b>

<b>5</b>	<b>BETRIEBLICHES STOFFSTROMMANAGEMENT .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Prozessbezogenes Energie- und Stoffstrommanagement.....</b>	<b>82</b>
<b>5.2</b>	<b>Anforderungen an ein rechnergestütztes Instrument zur Modellbildung.....</b>	<b>83</b>
5.2.1	Abbildung von Produktionssystemen mittels Stoffstromnetzen.....	84
5.2.2	Weitere Möglichkeiten der Prozessmodellierung .....	85
5.2.3	Spezifizierung der Stoffstromnetz-Transitionen durch Produktionsfunktionen.....	86
<b>5.3</b>	<b>Fallbeispiel 3: Innerbetriebliches Stoff- und Energiestrommanagement in der Industrielackierung zur Anlagenoptimierung.....</b>	<b>88</b>
5.3.1	Durchführung der Betriebs- und Prozessanalyse.....	89
5.3.2	Beschreibung des Referenzfalls und Identifizierung der einsetzbaren VOC-Emissionsminderungsmaßnahmen .....	91
5.3.3	Ergebnisse der umweltbezogenen Charakterisierung der identifizierten Maßnahmenkombinationen.....	92
5.3.4	Besonderheiten des Energiestrommanagements .....	95
5.3.5	Schlussfolgerungen aus dem Fallbeispiel .....	99
<b>5.4</b>	<b>Fallbeispiel 4: Erfüllung der Bilanzierungsverpflichtungen gemäß Lösemittel-Richtlinie .....</b>	<b>99</b>
5.4.1	Erstellung einer Lösemittelbilanz und eines Reduzierungsplans .....	100
5.4.2	Entwicklung und Einsatz des Stoffflussmodells IMPROVE.....	102
5.4.3	Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens zum verbesserten Einsatz von Wasserlacken.....	103
5.4.4	Schlussfolgerungen aus dem Fallbeispiel .....	104
<b>5.5</b>	<b>Stoffstrommanagement als Basis für die operative Produktionsplanung .....</b>	<b>105</b>
<b>5.6</b>	<b>Fallbeispiel 5: Planung des Arbeitsablaufs in der Autoreparaturlackierung anhand zeitbasierter Materialflüsse .....</b>	<b>107</b>
5.6.1	Durchführung der REFA-Zeitstudien .....	108
5.6.2	Identifizierung zeitintensiver Arbeitsschritte .....	111
5.6.3	Ablaufplanung und Ermittlung optimaler Auftragsreihenfolgen .....	112
5.6.4	Schlussfolgerungen aus dem Fallbeispiel .....	115
<b>5.7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>116</b>
<b>6</b>	<b>MULTIKRITERIELLE ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG .....</b>	<b>119</b>
<b>6.1</b>	<b>Entscheidungstheoretische Modelle.....</b>	<b>120</b>
6.1.1	Aggregationsmodelle.....	121
6.1.2	Spieltheoretische Modelle .....	121
6.1.3	Taktische Gruppenentscheidungsmodelle .....	122
<b>6.2</b>	<b>MADM-Modelle zur Unterstützung von Gruppenentscheidungen.....</b>	<b>122</b>
6.2.1	Nutzwertanalyse .....	124
6.2.2	Analytischer Hierarchie Prozess (AHP).....	125
6.2.3	PROMETHEE.....	126
6.2.4	Vergleich der drei Methoden anhand des Fallbeispiels 3.....	130
6.2.5	Schlussfolgerungen aus der Anwendung.....	134

<b>6.3</b>	<b>Sensitivitätsanalysen</b> .....	<b>134</b>
6.3.1	Sensitivitätsanalysen für multiattributive Entscheidungsmodelle .....	135
6.3.2	Sensitivitätsanalysen für PROMETHEE.....	137
6.3.2.1	Grafische Sensitivitätsanalyse für einzelne Gewichtungsfaktoren .....	137
6.3.2.2	Erweiterung der Sensitivitätsanalyse zum Optimierungsmodell zur Ermittlung des Stabilitätsintervalls .....	141
6.3.2.3	Sensitivitätsanalysen zur Untersuchung weiterer Modellparameter.....	142
6.3.3	Zusammenfassung der vorgestellten Sensitivitätsanalysen.....	143
<b>6.4</b>	<b>Konzeption eines integrierten multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems</b> .....	<b>144</b>
<b>6.5</b>	<b>Praktische Anwendung der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung</b> .....	<b>147</b>
6.5.1	Entscheidungstheoretische Aspekte in der Ökobilanzierung .....	147
6.5.2	Moderierte Workshops zur Entscheidungsunterstützung.....	150
<b>6.6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>151</b>
<b>7</b>	<b>STOFFFLUSS- UND OPTIMIERMODELLE ZUR ANALYSE DER AUSWIRKUNGEN NEUER UMWELTGESETZLICHER REGELUNGEN</b> .....	<b>155</b>
<b>7.1</b>	<b>Erstellung von Kostenfunktionen und deren Verwendung in internationalen Protokoll-Verhandlungen</b> .....	<b>156</b>
7.1.1	Struktur und wesentliche Eigenschaften von Energie- und Stoffflussmodellen .....	158
7.1.2	Anforderungen an VOC-Kostenfunktionen.....	158
<b>7.2</b>	<b>Aufbau des Stofffluss- und Optimiermodells ARGUS</b> .....	<b>159</b>
7.2.1	Graphische Darstellung des Stoffflussmodells.....	160
7.2.2	Verknüpfung länderspezifischer und techno-ökonomischer Daten .....	162
7.2.3	Mathematische Modellformulierung .....	164
7.2.3.1	Zielfunktion .....	164
7.2.3.2	Nebenbedingungen .....	165
7.2.4	Implementierung des Stofffluss- und Optimiermodells ARGUS.....	169
<b>7.3</b>	<b>Bestimmung der länderspezifischen Daten für die Anwendung von ARGUS</b> .....	<b>169</b>
7.3.1	Bestimmung der Aktivitäten auf Sektorebene .....	170
7.3.2	Darstellung des gegenwärtigen Implementierungsstandes von VOC-Emissionsminderungsmaßnahmen .....	173
7.3.3	Anwendungen des Stofffluss- und Optimiermodells ARGUS.....	174
<b>7.4</b>	<b>Fallbeispiel 6: Erarbeitung eines Maßnahmenplans zur Umsetzung der NEC-Richtlinie in Österreich</b> .....	<b>176</b>
7.4.1	Modellierung der Szenarien und Übergangsfristen .....	178
7.4.2	Exemplarische Ermittlung der Emissionsentwicklung .....	178
7.4.2.1	Referenzanlagen im Sektor Metallentfettung in Österreich .....	180
7.4.2.2	Modellergebnisse .....	182
7.4.3	Unsicherheitsbetrachtungen.....	183
7.4.4	Schlussfolgerungen aus dem Fallbeispiel .....	184

<b>7.5</b>	<b>Fallbeispiel 7: Einsatz von ARGUS für das betriebliche Informationsmanagement in der Lackindustrie .....</b>	<b>184</b>
7.5.1	Vorgehensmodell zur Produktprogrammplanung .....	185
7.5.2	Informationsbeschaffung .....	185
7.5.3	Einsatz von ARGUS zur Analyse der zukünftigen Entwicklungen auf dem Lackanwendermarkt .....	186
7.5.4	Ausgewählte Ergebnisse für die Produktprogrammplanung von Autoreparaturlacken .....	187
7.5.5	Schlussfolgerungen aus dem Fallbeispiel .....	188
<b>7.6</b>	<b>Kritische Diskussion des Modells ARGUS .....</b>	<b>189</b>
7.6.1	Unsicherheiten bei der Stoffflussmodellierung .....	191
7.6.2	Modellerweiterungen zur simultanen Betrachtung von mehreren Schadstoffen .....	192
7.6.2.1	Kombinierte Kostenfunktionen für VOC und NO <sub>x</sub> für den Verkehrssektor .....	193
7.6.2.2	Modellerweiterung für die gemeinsame Betrachtung von Versauerung und Eutrophierung .....	194
7.6.2.3	Monetarisierung der potentiellen Umweltauswirkungen .....	194
7.6.2.4	Einsatz von Mehrzielentscheidungsmodellen .....	194
<b>7.7</b>	<b>Fallbeispiel 8: Anwendung der Szenario-Technik für den Sektor der Metalloberflächenlackierung .....</b>	<b>196</b>
<b>7.8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>199</b>
<b>8</b>	<b>INTEGRIERTE ANLAGENPLANUNG AUF DER GRUNDLAGE DER PINCH-ANALYSE ... 201</b>	
<b>8.1</b>	<b>Integrierte Optimierung von Energie- und Stoffstromnetzen .....</b>	<b>201</b>
8.1.1	Pinch-Analyse für Wärmeströme .....	202
8.1.2	Pinch-Analyse für Wasserströme .....	203
8.1.3	Pinch-Analyse für VOC-Ströme .....	204
8.1.4	Betriebsübergreifende Ansätze .....	205
8.1.5	Die Pinch-Analyse als Transportproblem .....	206
<b>8.2</b>	<b>Fallstudie 9: Anwendung der Pinch-Analyse zur Optimierung der Serienlackierung von Personenwagen .....</b>	<b>208</b>
8.2.1	Beschreibung des Trocknungsprozesses .....	208
8.2.2	Modellbeschreibung .....	208
8.2.3	Ergebnisse der Berechnungen .....	210
8.2.4	Schlussfolgerungen aus dem Fallbeispiel .....	212
<b>8.3</b>	<b>Multi Objective Pinch Analysis (MOPA) .....</b>	<b>212</b>
<b>8.4</b>	<b>Metrik zum Vergleich der Ressourceneffizienz .....</b>	<b>215</b>

<b>8.5</b>	<b>Fallbeispiel 10: Dynamische Technikanpassung mit Hilfe von BVT</b> .....	<b>217</b>
8.5.1	Zustand und Schutz der Umwelt in industriellen Schwellenländern .....	218
8.5.2	Industriestrukturen.....	219
8.5.2.1	China .....	219
8.5.2.2	Chile .....	220
8.5.3	Politische Rahmenbedingungen und Möglichkeiten der Finanzierung.....	220
8.5.4	Dynamische Kapazitätsplanung .....	221
<b>8.6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>223</b>
<b>9</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>225</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>229</b>