Inhalt

1 Einleitung **1**

1.1 Probleme der Energieversorgung 1

1.2 Energiebedarf und -versorgung in der Bundesrepublik 6

1.2.1 Der Energieeinsatz in der Bundesrepublik 6

1.2.2 Der Prozeßwärme- und Raumwärmebedarf in der Bundesrepublik . 7

1.3 Exergie, Energiequalität und Wärmerückgewinnung 11

1.3.1 Exergie 11

1.3.2 Exergieanalyse und Exergieoptimierung 14

2 Wärmerückgewinnung in regionalen Energiesystemen mit zeitlichen Bedarfsschwankungen **27**

2.1 Entwicklung eines Modells zur Energie-, Kosten- und CO_2-Optimierung (*ECCO*) 27

2.1.1 Definitionen und Begriffserläuterungen 27

2.1.2 Stochastische Optimierung des Primärenergieeinsatzes 30

2.1.3 Berechnung des Primärenergieeinsatzes unter Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung 35

2.1.4 Nebenbedingungen der Optimierung 44

2.1.5 Berechnung der verfügbaren Abwärmemengen 45

2.1.6 Kohlendioxid-Emissionen und CO_2-Rückhaltung 47

2.1.7 Die Kosten der Energieversorgung 51

2.1.8 Umsetzung des Optimierungsmodells auf dem Computer 58

2.2 Die Datenbasis: Konstruktion einer Modellstadt 62

2.2.1 Energiebedarf und -versorgung der Haushalte und Kleinverbraucher in der Modellstadt 62

2.2.2 Energiebedarf und -versorgung der Industriebetriebe in der Modellstadt 65

2.2.3 Sonstige Angaben und Annahmen zur Modellstadt 68

2.3 Ergebnisse der Optimierung mit *ECCO* 70

2.3.1 Das "Ideal"-Szenario: maximale Energieeinsparung und minimale CO_2-Emissionen 70

2.3.2 Interaktive Reduzierung der Kosten des Ideal-Szenarios 83

2.3.3 Änderungen des Bedarfsprofils: Sinkender Raumwärmebedarf . . . 89

2.3.4 Änderungen des Bedarfsprofils: Steigender Strombedarf 95

2.4 Zusammenfassung und Kritik des Modells *ECCO* 99

3 Statische Optimierung der Wärmerückgewinnung in nationalen Energiesystemen **105**
3.1 Statische Energieoptimierung 106
3.1.1 Die allgemeinen nicht-linearen Modellgleichungen 106
3.1.2 Das Modell der linearen Energieoptimierung *LEO* 108
3.2 Die Kosten der Wärmerückgewinnung im statischen Vektoroptimierungsmodell *LEO-II* 115
3.2.1 Aufstellung der Kostenfunktion 115
3.2.2 Vektoroptimierung des Brennstoffeinsatzes und der Kosten des Energiesystems 118
3.3 Die Auswirkungen der CO_2-Rückhaltung im statischen Vektoroptimierungsmodell *LEO-II* 124
3.3.1 Aufstellung der CO_2-Funktion 124
3.3.2 Vektoroptimierung von Brennstoffeinsatz, Kosten und CO_2-Emissionen 126
3.4 Zusammenfassung der Vektoroptimierung mit *LEO-II* 130

4 Zusammenfassung, Konsequenzen, Ausblick **131**
4.1 Zusammenfassung 131
4.2 Konsequenzen der Modellergebnisse 133
4.3 Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen des Modells *ECCO* 136

ANHANG **138**

A Ergänzungen zur Exergieanalyse **138**
A.1 Exergieanalyse eines Wärmetauschers 138
A.2 Exergieanalyse der Raumheizung 140

B Simulation der Fluktuationen des Energiebedarfs im Rahmen der stochastischen Optimierung **142**

C Lineare Programmierung und Vektoroptimierung **145**
C.1 Lineare Programmierung mit Hilfe des Simplex-Algorithmus 145
C.2 Vektoroptimierung 147

D Daten für die regionale Optimierung **150**
D.1 Energiebedarf der Modellstadt 150
D.2 Energieversorgungstechniken in der Modellstadt 156
D.3 Brennstoffe zum Betrieb der Energieversorgungstechniken 159
D.4 Nutzbare Abwärme in der Modellstadt 160
D.5 Versorgungspfade in der Modellstadt 161
D.6 Beispiele zur Kostenberechnung 164

E Ergänzende Ergebnis-Tabellen für die regionale Optimierung **165**

F Daten für die statische Optimierung mit *LEO* und *LEO-II* **174**

LITERATURVERZEICHNIS **177**

NACHWORT **184**