

Dynamische Energie- und Emissionsoptimierung regionaler Energiesysteme

Dissertation zur Erlangung des
naturwissenschaftlichen Doktorgrades
der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität
Würzburg

vorgelegt von
Thomas Johann Christian Bruckner

aus Furth im Wald

Würzburg

1996

Eingereicht am:
bei der Fakultät für Physik und Astronomie

1. Gutachter:	Prof. Dr. R. Kümmel
2. Gutachter:	Prof. Dr. H. Reiss

der Dissertation

1. Prüfer:	Prof. Dr. R. Kümmel
2. Prüfer:	Prof. Dr. J. Fricke

der mündlichen Prüfung

Tag der mündlichen Prüfung:

Doktorurkunde ausgehändigt am:

Für Sabine und Tobias

“We acknowledge our obligation to contribute to the prosperity and welfare of all peoples, to dispel the ignorance which imprisons humankind in superstition, conflict and error, and to work for international amity and peace.

In pursuit of these goals,

- We shall seek to apply the physical sciences to the problems of society such as energy, the environment and renewable resources. . . .

We call upon all governments, non-governmental organizations, international agencies, sister disciplines, regional and international foundations, the international scientific unions, national academies, and others to join with us in common cause.”

“The Tokyo Declaration of Physical Societies“
(Europhys. News **26**, 114, 1995)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Problemstellung	4
1.2	Exergie	5
1.3	Optimierung von Energieversorgungssystemen	7
1.3.1	Ressourcenschonung und Emissionsminderung	7
1.3.2	Minimierung der betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten	8
1.3.3	Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Optimierung regionaler Energiesysteme mit <i>deeco</i>	8
2	Modellentwicklung	10
2.1	Grundlagen der Systemanalyse und Modellbildung	10
2.2	Grundlegende Definitionen und Modellannahmen	11
2.2.1	Physikalisch-technische, ökonomische und ökologische Aspekte	11
2.2.2	Informations- und modelltechnische Aspekte	20
2.3	Energetische Prozesse	29
2.3.1	Bedarfsprozeß	29
2.3.2	Umwandlungsprozeß	33
2.3.3	Kollektorprozeß	37
2.3.4	Speicherprozeß	39
2.3.5	Import-Export-Prozeß	43
2.3.6	Vernetzungsprozeß	45
2.4	Energetische Verknüpfungsstruktur energietechnischer Prozesse	48
2.5	Informationstechnische Verknüpfungsstruktur energietechnischer Prozesse	52
2.6	Optimierung des Energieversorgungssystems	59
2.6.1	Optimierung der verallgemeinerten variablen Kosten	61
2.6.2	Optimierung der verallgemeinerten fixen Kosten	66
2.6.3	Optimierung der verallgemeinerten Kosten	68
2.7	Modellkritik	68
2.8	Umsetzung des Optimierungsmodells auf dem Computer	70

3	Anwendung des Modells <i>deeco</i> auf „Würzburg“ und „Heidingsfeld“	73
3.1	Beschreibung der modellierten Energiesysteme	73
3.1.1	Modellstadt „Würzburg“	73
3.1.2	Modellgemeinde „Heidingsfeld“	75
3.2	Szenarienbeschreibung	76
3.2.1	Szenarien für „Würzburg“	77
3.2.2	Szenarien für „Heidingsfeld“	80
3.3	Optimierungsergebnisse	80
3.3.1	„Würzburg“	80
3.3.2	„Heidingsfeld“	82
3.4	Ergebnisdiskussion	83
3.4.1	„Würzburg“	83
3.4.2	„Heidingsfeld“	88
3.5	Schlußfolgerungen	88
4	Zusammenfassung	90
	Anhänge:	92
A	Notation	92
B	Überblick über Energieoptimierungsmodelle (Stand der Forschung)	100
B.1	Optimierung nationaler Energiesysteme	100
B.2	Optimierung regionaler und kommunaler Energiesysteme	101
B.3	Simulation und Optimierung energietechnischer Anlagen; Kraftwerkseinsatzopti- mierung	102
C	Bestimmung von Nettoenthalpie- und Abwärmeströmen	105
D	Beschreibung weiterer energietechnischer Prozesse	107
D.1	Bedarfsprozesse	107
D.2	Umwandlungsprozesse	107
D.2.1	Konventionelle Öl- bzw. Gaskessel (inkl. Gasspitzenkessel)	108
D.2.2	Gasbrennwertkessel	108
D.2.3	Außenluft- und Erdreich-Elektrowärmepumpen	109
D.2.4	Außenluft- und Erdreich-Gaswärmepumpen	110
D.2.5	Block- und Kleinheizkraftwerke	110
D.2.6	Entnahmekondensations-Heizkraftwerke	111
D.3	Vernetzungsprozesse	111
D.3.1	Nettoenthalpietransport durch Fern- bzw. Nahwärmeleitungen	111

D.3.2	Nettoenthalpieanpassung durch Nachheizen bzw. Beimischen	112
E	Dynamische Optimierung	114
E.1	Dynamische Beschreibung von Energieversorgungssystemen	114
E.2	Dynamische Energie-, Emissions- und Kostenoptimierung	115
E.2.1	Dynamische Programmierung nach Bellman	117
E.2.2	Modellspezifische Anpassungen	121
E.2.3	Interaktive dynamische Optimierung	123
	Literaturverzeichnis	125

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Enquete-Kommission des deutschen Bundestages „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ sieht es als erforderlich an, „die heutige Energieversorgung . . . grundlegend zu modernisieren und dabei Möglichkeiten und Realisierungswege zu finden, negative Folgewirkungen zu minimieren oder zu beseitigen. Dazu existiert ein großer Handlungs-, Entscheidungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf, so daß die Aufgabe, die aus dem Energiebereich stammenden Spurengasemissionen zu reduzieren, als zentrale Querschnittsaufgabe von Politik, Wirtschaft, Forschung und Technologie anzusehen ist“ [Enq90], S.428. Auch die Deutsche Physikalische Gesellschaft hat mehrmals auf die Gefahren einer anthropogenen Klimaänderung hingewiesen und in ihrem „Energiememorandum 1995“ [DPG95] mit Nachdruck die Notwendigkeit von Maßnahmen zur Reduktion klimarelevanter Emissionen betont. Bei der Erreichung des Zieles, die nationalen CO₂-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland zu reduzieren, wird den Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, zur rationelleren Energienutzung und -umwandlung, zur Energieeinsparung sowie zum Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien eine zentrale Rolle zugeschrieben [Enq90], S.429. Während die einzelnen Emissionsminderungspotentiale dieser Maßnahmen z.T. sehr detailliert untersucht sind, besteht noch große Unsicherheit darüber, inwieweit diese Potentiale summiert werden dürfen [Enq90], S.497. Die Enquete-Kommission stellt dazu fest: „Konkurrenzbeziehungen bestehen . . . nicht nur zwischen Windenergie und Solarstrom, sondern auch bei den Nutzungssystemen erneuerbarer Energiequellen, die Wärme bereitstellen. Dies betrifft dezentrale Solarkollektoranlagen, solare Nahwärmesysteme, Anlagen zur Nutzung von Biomasse und Wärmepumpen, die erheblich zur Deckung vor allem des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs beitragen. Aufgrund des begrenzten Detaillierungsgrades bei den vorliegenden Einzelstudien konnten die Summenwerte [der Emissionsminderungspotentiale] nicht um den genannten Konkurrenzeffekt bereinigt werden“ [Enq90], S.499. Konkurrenzeffekte und Nutzungsrestriktionen spielen eine wichtige, bisher aber häufig vernachlässigte Rolle bei der Beurteilung von Vorschlägen zur Emissionsminderung, was die Enquete Kommission dazu bewogen hat, einen erheblichen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet zu konstatieren [Enq90], S.497.

Techniken der rationellen Energieverwendung bzw. der Nutzung regenerativer Energiequellen zeichnen sich im Vergleich zu konventionellen Techniken i.allg. durch einen höheren Komplexitätsgrad aus: Energieeinspar- und Schadstoffreduktionspotentiale sind meist keine unabhängigen Kenngrößen der entsprechenden Technik, sondern werden beeinflusst durch die zeitlich fluktuierende Energienachfrage, durch das variable Verhältnis von Wärme- und Strombedarf (z. B. bei der Kraft-Wärme-Kopplung) sowie durch das veränderliche Angebot regenerativer Energiequellen (z. B. solare Einstrahlung). Damit wird eine unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten möglichst optimale Auswahl von Energietechniken zu einem komplexen Ent-

scheidungsproblem, das immer die „vor Ort“ vorhandene Energiebedarfssituation im Auge behalten muß. Hilfestellung beim Entwurf optimaler Energiesysteme können Energiemodelle leisten, die sich auf kommunaler und regionaler Ebene aber bisher weitgehend auf die Modellierung einzelner Teile des Energiesystems beschränkten. In jüngster Zeit wird angesichts der bedeutenden Rolle, die Kommunen bei der Umsetzung nationaler Emissionsreduktionsverpflichtungen zufällt, die Entwicklung und der Einsatz von lokalen Energieoptimierungsmodellen gefordert, die nicht nur das Verhalten einzelner Teile des Energiesystems simulieren, sondern dazu in der Lage sind, dieses als Ganzes zu optimieren [IEA95]. In dieser Arbeit soll das Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungsmodell *deeco* (**d**ynamic **e**nergy, **e**mission and **c**ost **o**ptimization model) beschrieben werden, das diese Forderung erfüllt und dazu dient, folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Primärenergieeinspar- und Emissionsminderungspotentiale lassen sich durch die optimale Kombination von konventionellen Techniken mit solchen der rationellen Energieverwendung sowie der thermischen Nutzung der Solarenergie im Bereich der regionalen bzw. kommunalen Energieversorgung realisieren?
- Welche Kosten sind mit dem Einsatz dieser Techniken verbunden?
- Welche Konkurrenzeffekte treten bei gleichzeitiger Implementierung von Techniken der rationellen Energieverwendung mit solchen der thermischen Nutzung der Solarenergie auf?

Bevor *deeco* in Kap. 2 vorgestellt wird, sollen im folgenden einige grundlegende Begriffe eingeführt und die Problemstellung konkretisiert werden. Ein Überblick über andere Energieoptimierungsmodelle und den Stand der Forschung im Bereich der Energiesystemmodellierung befindet sich im Anhang B.

1.2 Exergie

Die Nutzung von Energie stellt keinen Selbstzweck dar, sondern ist immer auf die Befriedigung von Bedürfnissen oder Wünschen ausgerichtet. Die dabei zu erbringende energiebezogene Dienstleistung wird als *Energiedienstleistung* bezeichnet und umfaßt die „durch Nutzenergie dem Endverbraucher zur Verfügung stehenden Dienstleistungen, wie z.B. warme oder kühle Räume; helle Straßen, Arbeitsplätze und Wohnräume; Kraftunterstützung in Produktion, Transport und Verkehr oder Kommunikation ...“ [Enq94], S.674. Energiedienstleistungen werden von Energieumwandlungsprozessen erbracht, die irreversibel sind und somit zu einer Entwertung der eingesetzten Energie führen. Quantitativ läßt sich der Wert bzw. genauer die *Qualität* (Def. s.u.) einer Energiemenge unter Heranziehung der Größe „Exergie“ bestimmen [Fri84], S.24 u. [Bae89], S.134:

Die *Exergie* einer Energie ist derjenige Anteil an dieser Energie, der sich unter Mitwirkung einer vorgegebenen Umgebung unbeschränkt in jede andere Energieform – insbesondere auch in Arbeit – umwandeln läßt. Den verbleibenden Rest nennt man *Anergie*¹.

Für abgeschlossene Systeme lautet der **1. Hauptsatz der Thermodynamik** [Bae89], S.134:

Bei allen Prozessen bleibt die Summe aus Exergie und Anergie konstant.

Beide Anteile für sich genommen können sich jedoch ändern.

¹Dabei ist es nicht notwendig, daß die Arbeit tatsächlich extrahiert wird. Die Probleme, die auftreten, wenn die Extraktion der Arbeit aufgrund von äußeren Bedingungen nicht möglich ist, werden in [Kle91] ausführlich diskutiert. Dort wird auch beschrieben, in welchen Fällen man auf die Verwendung des Exergiebegriffes verzichten sollte.

Nach dem **2. Hauptsatz der Thermodynamik** gilt nämlich [Bae89], S.135, [Fri84], S.24:

1. **Bei allen irreversiblen Prozessen verwandelt sich Exergie in Anergie.**
2. **Nur bei reversiblen Prozessen bleibt die Exergie konstant.**
3. **Es ist unmöglich, Anergie in Exergie zu verwandeln.**

Der 2. Hauptsatz beschreibt demnach die Entwertung von Energie (= Exergieverminderung), die mit allen irreversiblen Prozessen unvermeidlich verbunden ist. Bei potentieller, kinetischer, mechanischer und elektrischer Energie handelt es sich um reine Exergieformen. Da Wärme nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden kann, gilt dies jedoch nicht für sie: Die maximale Arbeit, die sich mittels einer Wärme-Kraft-Maschine aus einer Wärmemenge der Temperatur T gewinnen läßt, wird durch den Carnotwirkungsgrad begrenzt. Der Exergiestrom \dot{B}_Q , der an einen Wärmestrom \dot{E}_Q der Temperatur T gebunden ist, beträgt somit [Bae89], S.137:

$$\dot{B}_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot \dot{E}_Q . \quad (1.1)$$

Dabei ist T_0 die Temperatur der Umgebung. Der Exergiestrom \dot{B}_H , der einem Enthalpiestrom \dot{E}_H zugeordnet wird, der die spezifische Enthalpie h und Entropie s mit sich trägt, ergibt sich aus [Bae89], S.142:

$$\dot{B}_H = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] . \quad (1.2)$$

Dabei ist \dot{m} der Massenstrom, der den Enthalpiestrom trägt, h_0 die spezifische Enthalpie und s_0 die spezifische Entropie eines strömenden Massenelements im Umgebungszustand. Chemische Energie, die in fossilen Primärenergieträgern enthalten ist, kann in guter Näherung als reine Exergie angesehen werden [Bae89, Ros92, And93], da sich durch deren Verbrennung (im Prinzip) Temperaturen erreichen lassen, die sehr viel größer als die Umgebungstemperatur T_0 sind. Es ist in diesem Zusammenhang nützlich, den Begriff der Qualität einer Enthalpie, definiert als [Goo87]

$$\text{Qualität} := \text{Exergie} / \text{Enthalpie}$$

einzuführen, der zur Bewertung von Wärme- und Abwärmemengen verwendet werden kann.

Die *Exergieanalyse* (Second Law Analysis) beschäftigt sich mit der Untersuchung von Ineffizienzen und Verlusten energietechnischer und industrieller Prozesse [Bae89, Ken84, Gag80, Gag83, Goo90, Goo89]. Ihre Aufgabe besteht in der Quantifizierung von Exergieverlusten. Dabei lassen sich zwei Arten von Exergieverlustmechanismen unterscheiden [Kug90], S.34:

1. Exergieverlust durch Irreversibilitäten, die im Systeminneren stattfinden (z.B. Reibung oder Mischung unterschiedlich warmer Massenströme).
2. Exergieverlust durch Exergieabgabe an die Systemumgebung ohne weitere Nutzung dieser Exergie (z.B. Abgabe von Abgas mit einer Temperatur oberhalb der Umgebungstemperatur).

Die Exergieanalyse dient dazu, Prozesse mit hohen Exergieverlusten zu identifizieren, die dann entweder verbessert oder ersetzt werden können. Dabei ist zu beachten, daß sich eine Verminderung der Exergieverluste nicht alleine durch Verkleinern der prozeßinternen Irreversibilitäten erreichen läßt, sondern daß auch dafür Sorge getragen werden muß, daß die einen energietechnischen Prozeß verlassenden Exergieströme (gebunden an Wärme- oder Enthalpieströme) weiterverwendet werden können [Gro91], S.17. Aufgabe der *Exergieoptimierung eines Energieversorgungssystems* ist es, eine Vernetzung der darin enthaltenen Prozesse zu finden, die eine optimale Weiterverwendung dieser Exergieströme ermöglicht. Diese Form der Exergieoptimierung ist deshalb deutlich von derjenigen einzelner Prozesse zu unterscheiden, die im folgenden nicht mehr

betrachtet werden soll, d.h. die Eigenschaften der Techniken der Energieversorgung werden in dieser Arbeit als vorgegeben angesehen.

1.3 Optimierung von Energieversorgungssystemen

Bei der Optimierung von Energieversorgungssystemen sind neben Sicherheitsaspekten vor allem ökonomische und ökologische Kriterien zu beachten. Wichtige Ziele sind dabei insbesondere die Minimierung der betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten, die Schonung natürlicher Ressourcen und die Minderung von Schadstoff- und Treibhausgasemissionen.

1.3.1 Ressourcenschonung und Emissionsminderung

Die Senkung des Einsatzes nicht-regenerativer (= fossiler bzw. nuklearer) Energieträger in einem Energieversorgungssystem stellt einen wichtigen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen dar. Im wesentlichen stehen dafür 5 Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Senkung des Exergiebedarfs durch Reduzierung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (z.B. Absenken der Raumtemperatur).
2. Senkung des Exergiebedarfs durch Reduzierung der Nachfrage nach Nutzenergie (z.B. Wärmedämmung) ohne Änderung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen.
3. Senkung des prozeßinternen Exergieverlustes durch Verbesserung der Wirkungsgrade energietechnischer Prozesse (z.B. Verbesserung des Turbinenwirkungsgrades von Kraftwerken).
4. Rückgewinnung und Verwendung von Exergieströmen, die bisher ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden (z.B. durch Kraft-Wärme-Kopplung, Abwärmerückgewinnung in Industriebetrieben), sowie Entnahme des für eine Energiedienstleistung notwendigen Anergieanteils aus der Umwelt (z.B. Wärmepumpen zur Raumheizung). Die hier angesprochene Form der Wärmerückgewinnung führt zu einer Verknüpfung der verschiedenen Prozesse eines Energieversorgungssystems (Systemintegration).
5. Substitution nicht-regenerativer Primärenergie durch Nutzung des Exergiegehaltes regenerativer Energiequellen (z.B. Solarenergie, Windenergie, Biogas).

Punkt 1 betrifft das sog. Suffizienzproblem und ist eng an den Entwurf neuer zukunftsfähiger, d.h. insbesondere dauerhaft umweltgerechter Produktions- und Lebensstile gebunden [Wup95]. Eine vertiefte Diskussion dieser wichtigen Möglichkeit zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung soll in dieser Arbeit nicht geführt werden. Die Punkte 2-4 lassen sich im wesentlichen unter dem Stichwort „Rationelle Energieverwendung“ und Punkt 5 unter „Nutzung regenerativer Energiequellen“ zusammenfassen.

Die Minderung der durch den Betrieb energietechnischer Prozesse entstehenden Emissionen (CO_2 , NO_x , SO_2 , etc.) stellt einen wesentlichen Beitrag zum Schutz der Umwelt dar. Zusätzlich zu den angesprochenen Möglichkeiten der Primärenergieeinsparung, die i.allg. gleichzeitig zu einer Minderung der mit dem Primärenergieeinsatz verbundenen Emissionen führen, läßt sich eine Reduktion der Emissionen durch folgende Maßnahmen erreichen:

6. Rückhaltung und Entsorgung der Schadstoffe durch sog. „end-of-the-pipe“-Technologien (z.B. Entschwefelung und Entstickung von Kraftwerken, CO_2 -Rückhaltung und -Entsorgung [Blo92, Kue91, Fri89]). Diese Maßnahmen sind mit einem Mehrverbrauch an Primärenergie verbunden und bewirken damit eine Minderung des energetischen Wirkungsgrades energietechnischer Prozesse.
7. Energieträgersubstitution (z.B. Verwendung von Erdgas statt Kohle zur Verminderung der CO_2 -Emissionen).

1.3.2 Minimierung der betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten

Neben dem Primärenergieeinsatz und den Emissionen stellen die Kosten, die zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung aufgebracht werden müssen, ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung eines Energieversorgungssystems dar. Auch wenn die Bereitschaft wächst, zugunsten der Umwelt (und damit letztendlich zugunsten der heute und zukünftig lebenden Generationen) mehr Geld als bisher für umweltverträglichere Energieversorgungssysteme aufzubringen, bedeutet dies nicht, daß die Kosten der Energieversorgung an Bedeutung verlieren. Sie werden zu einem zentralen Faktor der Bewertung unterschiedlicher Maßnahmen der rationellen Energieverwendung und der Nutzung regenerativer Energiequellen. Aufgabe der Optimierung von Energiesystemen ist es heute, ganz im Sinne des *Ökonomischen Prinzips*,² diejenigen Maßnahmen zu identifizieren, die im Vergleich zu anderen Alternativen entweder bei gleichem Kostenaufwand einen maximalen Beitrag zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung leisten oder bei gleichem Umweltschutzeffekt mit minimalen Kosten verbunden sind. Es gibt keine Maßnahme, die unter allen Umständen die hier aufgestellten Forderungen erfüllt: Die realisierbaren Primärenergieeinspar- und Emissionsminderungspotentiale stellen keine allgemeingültigen Kenngrößen der einzelnen Maßnahmen dar, sondern sind i.allg. abhängig von der vor Ort vorhandenen Energiebedarfsstruktur, vom zeitlich variablen Angebot regenerativer Energiequellen sowie davon, inwieweit bereits ressourcenschonende und emissionsmindernde Maßnahmen getroffen wurden. Es kann zum Auftreten von Konkurrenzeffekten kommen, die dazu führen, daß die Einsparpotentiale einzelner Maßnahmen nicht additiv sind (vgl. z.B. [UN92, Gro93]). Deshalb ist es notwendig, bei gegebener Energiebedarfssituation und gegebenem Zustand des Energieversorgungssystems diejenigen Maßnahmen aus Abschnitt 1.3.1 ausfindig zu machen, die diesen Gegebenheiten am besten angepaßt sind. Das Optimierungsmodell *deeco* leistet Hilfestellung bei einer solchen Maßnahmenauswahl.

1.3.3 Räumlich und zeitlich hochaufgelöste Optimierung regionaler Energiesysteme mit *deeco*

Das Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungsmodell *deeco* erlaubt die räumlich und zeitlich hochaufgelöste Optimierung lokaler bzw. regionaler Energiesysteme mit zeitlich fluktuierendem Bedarf unter Einbeziehung des dynamischen Verhaltens von Energiespeichern. Hauptaufgabe dieses Modells, das in Kap. 2 genauer beschrieben wird, ist es, das Zusammenwirken von Techniken der rationellen Energieverwendung mit solchen der Nutzung regenerativer Energiequellen, insbesondere der thermischen Nutzung der Solarenergie, detailliert zu untersuchen. Dazu ist es notwendig, den nichtlinearen Einfluß zeitlich variabler intensiver Größen (Außen-, Bedarfs-, Abwärme-, Speichertemperaturen, etc.) auf die Wirkungsgrade der beteiligten Energieversorgungstechniken explizit zu modellieren. Besonders bei Wärmepumpen hängt die Leistungszahl sehr sensibel von der zu überbrückenden Temperaturdifferenz ab; bekanntlich divergiert die Leistungszahl im reversiblen Fall bei verschwindender Temperaturdifferenz [Bae89], S.388. Aber auch die Wirkungsgrade anderer Energietechniken, wie z.B. Solarkollektoren, Gasbrennwertkessel und Heizkraftwerke, hängen von den herrschenden Temperaturverhältnissen ab. *deeco* läßt beliebige, nichtlineare Abhängigkeiten der Wirkungsgrade von intensiven Größen zu. Die explizite Form dieser Abhängigkeiten variiert von Technik zu Technik. Die entsprechenden funktionalen Beziehungen sind Programmodulen zugeordnet, deren Gesamtheit eine „Technikmodulbibliothek“ bildet, auf die im Anwendungsfall zurückgegriffen werden kann. Durch Erstellen weiterer Programmodule (z.B. für Photovoltaik oder Windanlagen) läßt sich *deeco* leicht an neue Fragestellungen anpassen. In der vorliegenden Arbeit werden hinsichtlich der Nutzung regenerativer

²Es lautet: Ziel wirtschaftlichen Handelns ist es, mit gegebenen Mitteln einen möglichst großen Nutzen zu erzielen, oder einen gegebenen Nutzen mit möglichst geringem Einsatz an Mitteln zu erreichen [Gra88].

Energiequellen Solarkollektoranlagen und Wärmespeicher explizit beschrieben. Um jedoch das Optimierungsmodell flexibel gegenüber möglichen Erweiterungen zu gestalten, werden in der abstrakten Modellbeschreibung formal auch andere Techniken der Nutzung regenerativer Energiequellen berücksichtigt. Die konkrete Ausgestaltung der entsprechenden Module ist nicht Ziel dieser Arbeit.

Es ist beim gegenwärtigen Stand der Computertechnologie nicht möglich, ein Energiesystem mit einer Vielzahl von alternativen Energieversorgungstechniken und damit einer **Vielzahl von Optimierungsvariablen**,³ die über **nichtlineare** Beziehungen miteinander verknüpft sind, in voller Allgemeinheit **dynamisch** zu optimieren. Deshalb sollen in Kap. 2 Näherungen aufgezeigt werden, mit deren Hilfe es gelingt, das angesprochene Optimierungsproblem angemessen genau zu bearbeiten. Nach einer kurzen Einführung in die Grundbegriffe der Systemanalyse und Modellbildung (Abschnitt 2.1) beginnt die eigentliche Darstellung des Modells *deeco* ab Abschnitt 2.2 mit der Wiedergabe grundlegender Definitionen und Modellannahmen. In Kap. 2.3 wird ausführlich auf die Modellierung energietechnischer Prozesse eingegangen, deren energetische und informationstechnische Verknüpfung zu einem Energieversorgungssystem in Kap. 2.4 u. 2.5 beschrieben wird. Das eigentliche Optimierungsverfahren wird in Kap. 2.6 dargestellt. Im Anschluß daran soll durch beispielhafte Anwendung des Modells *deeco* auf die Modellgemeinden „Würzburg“ und „Heidingsfeld“ seine Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt werden.

³Es handelt sich bei diesen um die im Energieversorgungssystem auftretenden, den einzelnen Energieumwandlungstechniken zugeordneten Energieströme.

Kapitel 2

Modellentwicklung

2.1 Grundlagen der Systemanalyse und Modellbildung

In der Systemanalyse wird unter einem *System* die Gesamtheit von (näher zu definierenden) Elementen und ihren Beziehungen untereinander verstanden [Wal88]. Es ist nützlich, folgende Präzisierungen dieses Begriffes zu unterscheiden:

1. Strukturelles Systemkonzept:

„Ein *System* ist die Anhäufung oder Sammlung von Objekten, welche durch eine regelmäßige Wechselwirkung oder gegenseitige Abhängigkeit zusammenhängen“ [Gor78], S.1.

2. Funktionales Systemkonzept:

Das betrachtete System ist ein „schwarzer Kasten, welcher durch bestimmte Zusammenhänge zwischen seinen äußeren Eigenschaften gekennzeichnet ist“ [Epp79], S.8. Es wird in diesem Fall nur nach der „Input-Output-Relation“ gefragt und nicht nach dem genauen inneren Aufbau.

3. Hierarchisches Systemkonzept:

Das hierarchische Systemkonzept unterteilt Systeme in Haupt- und Subsysteme.

Im folgenden soll das Spannungsverhältnis zwischen System und Modell näher beleuchtet werden. Meyer schreibt dazu: „Der Begriff *System* umschreibt eine Realität mit allen für den Untersuchungszweck relevanten Wechselwirkungen zwischen ihren Bestandteilen . . . Das mathematische *Modell* soll, soweit es der Untersuchungszweck erfordert, diese Realität mit Hilfe mathematischer Zeichen und unter Benutzung mathematischer Regeln abbilden“ [Mey86], S.2. Im Gegensatz zur obigen Begriffsbestimmung, in der nicht streng zwischen System und Modell unterschieden wird, wird jetzt deutlich, „daß zwischen dem, was mit System, und dem, was mit Modell bezeichnet wird, ein gewisses Spannungsverhältnis existiert. Während der Begriff System für eine in bestimmter, zweckorientierter Weise abgegrenzte Wirklichkeit steht, meint der Begriff Modell eine Abbildung dieser Wirklichkeit mit Hilfe eines anderen Mediums¹ . . .“ [Mey86], S.16. Meist bezeichnet ein Modell in diesem Zusammenhang jedoch nicht die gesamte Abbildungsvorschrift, sondern nur deren Ergebnis [Sch91], also das „Bild der Wirklichkeit“. In dieser Arbeit wird Wert darauf gelegt, die Modellannahmen soweit wie möglich explizit anzugeben. „Sie sind für den Entscheidungsträger unentbehrlich, will er die Aussagefähigkeit der Modellergebnisse sachlich beurteilen: und dies gehört zu seinen Aufgaben. Jedes Modell macht 'Wenn-dann-Aussagen'. Der Wissenschaftler ist daher verpflichtet, den Entscheidungsträger genau über den jeweiligen Annahmenkomplex zu informieren, nicht zuletzt um ihn instand zu setzen, sich unterschiedliche Ergebnisse konkurrierender Modellbauer zu erklären und diese zu beurteilen“ [Han76]. Die Modellannahmen geben an, welche Teile des (realen) Systems als für den Untersuchungszweck

¹Je nach Art dieses Mediums unterscheidet man z.B. mentale, verbale und mathematische Modelle.

relevant angesehen werden und wie diese Teile (und ihre Wechselwirkungen) modelliert werden. Ihre Kenntnis ist notwendig, um zu entscheiden, ob die Modellergebnisse formal korrekt aus ihnen ableitbar sind (Modellverifikation) und ob das Modell ein sinnvolles und genügend genaues Abbild des (realen) Systems darstellt (Modellvalidierung) [Hoo89]. An dieser Stelle ist es notwendig, eine Besonderheit von Optimierungsmodellen anzusprechen. „Für optimierende Modelle ist charakteristisch, daß sie mit Hilfe mathematischer Funktionen nur solche Systeme abbilden, über deren Gestalt teilweise oder insgesamt noch keine Entscheidung gefallen ist“ [Mey86], S.21. Dies bedeutet, daß Optimierungsmodelle, wie Entscheidungsmodelle insgesamt, nicht als Abbild von bereits existierenden physikalischen oder ökonomischen Systemen anzusehen sind, sondern als formale Abbilder des Entscheidungsproblems [Din82], S.29. „Entscheidungsmodelle können ... nicht als Rekonstruktionen unabhängig vorgegebener Strukturkomplexe gedacht werden, sie sind vielmehr als Konstruktionen zu denken, mit denen einem Problem regelmäßig eine Eigenschaft hinzugefügt wird, die ihm ursprünglich nicht zukam: Entscheidbarkeit“ [Bre80]. Die Modellannahmen eines Energieoptimierungsmodells betreffen somit z.B. nicht nur die Eigenschaften eines existierenden Energieversorgungssystems, sondern auch die problemadäquate Auswahl der zu optimierenden Größe (z.B. Primärenergieeinsatz) sowie die Zulassung geeigneter Energieversorgungsalternativen. Eine weitere Schwierigkeit bei der Beurteilung von Modellannahmen tritt auf, wenn, wie in dieser Arbeit, ein Modell entworfen wird, das nicht dazu dient, ein spezielles System (z.B. das Energieversorgungssystem einer bestimmten Stadt) zu optimieren, sondern dazu, ein Schema aufzustellen, mit dessen Hilfe verschiedene Systeme untersucht werden können. Dieses sog. Modellschema [Geo87, Geo88, Kue92] wird erst im Laufe einer konkreten Studie (z.B. durch Vorgabe von bestimmten Parametern, Systemelementen, etc.) zu einem eigentlichen Modell.² Dies führt zu einer Aufspaltung der Verantwortlichkeit im Modellierungsprozeß. Der Modellanwender, der das Modellschema im Rahmen einer Studie zu einem Modell erweitert, nimmt am Modellbildungsprozeß teil. Er hat z.B. die Aufgabe zu prüfen, ob die Modellannahmen, die in diesem Falle vom Ersteller des Modellschemas i.allg. nur postuliert werden, vom konkreten System (im Rahmen der gewählten Genauigkeit) tatsächlich erfüllt werden. Je nach Blickwinkel können Modellannahmen somit als Aussagen über die Beziehung zwischen Modell und Realität oder als Forderungen an das durch ein Modellschema zu beschreibende System angesehen werden.

2.2 Grundlegende Definitionen und Modellannahmen

2.2.1 Physikalisch-technische, ökonomische und ökologische Aspekte

Definition 1 (Energieversorgungssystem) In der Energiewirtschaft wird unter einem *Energiesystem* ein „technisch-wirtschaftliches Gesamtsystem, das zur Deckung des Energiebedarfs dient“ [WEC92], S.5, verstanden. Der Energiebedarf ist hierbei jedoch keine unabänderliche Größe, sondern unterliegt unterschiedlichen Einflüssen (Preise, Gesetze, Anspruchsniveau der Verbraucher, etc.). Das Energiesystem ist somit ein System, das sowohl die technische Seite der Energieversorgung als auch die energienutzende Gesellschaft und die sie umgebende Umwelt umfaßt. Wird der Energiebedarf als gegeben angesehen, so wird ein Teil des Energiesystems von der Betrachtung ausgeschlossen. Übrig bleibt ein sog. *Energieversorgungssystem*. Als *Energieversorgungsmodell* wird im folgenden ein mathematisches Modell verstanden, das die in einem Energieversorgungssystem auftretenden Energieströme und die damit verknüpften Techniken beschreibt und zur Bestimmung des (optimalen) Energieträger- und Technikmixes verwendet wird.

²*deeco* ist somit im Sinne dieser Notation strenggenommen ein Modellschema. Im folgenden soll aber auch weiterhin meist kurz vom „Modell *deeco*“ gesprochen werden.

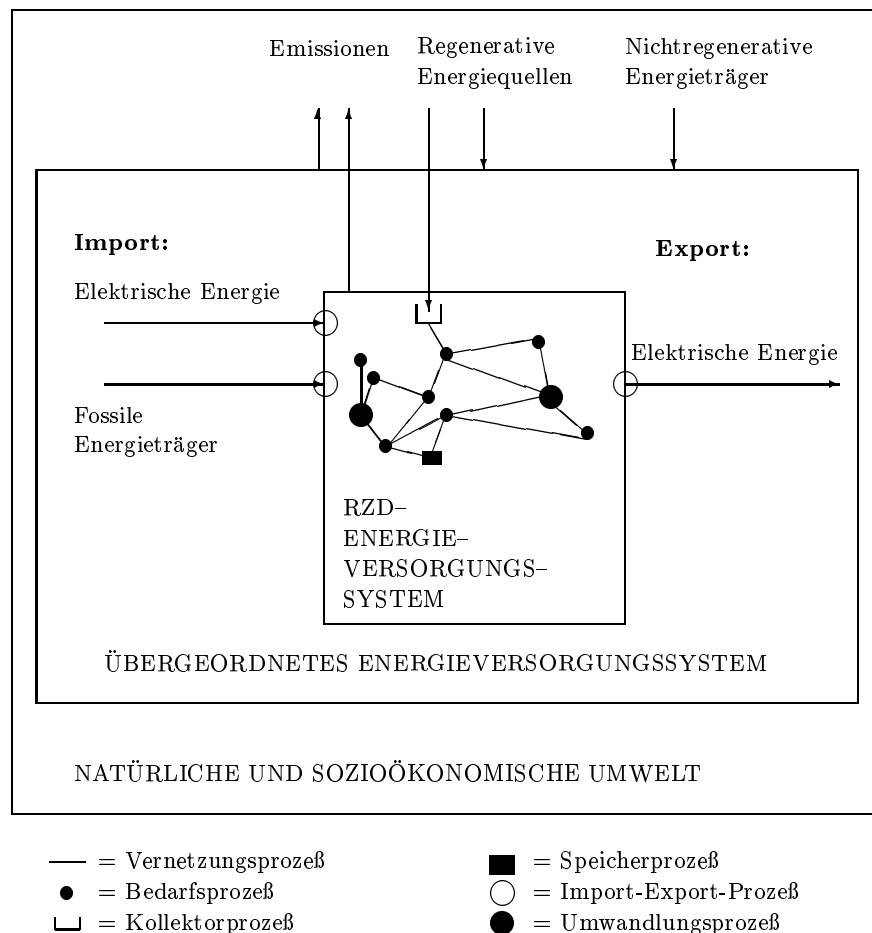


Abbildung 2.1: Räumlich und zeitlich disaggregiertes Energieversorgungssystem (RZD-EVS) eingebettet in ein übergeordnetes EVS (s.u.). Beide befinden sich in der ihnen gemeinsamen natürlichen und sozioökonomischen Umwelt. Die Art und Weise der Verknüpfung der energietechnischen Prozesse des RZD-EVS ist rein exemplarisch und nicht repräsentativ. Auf die Angabe der elektrischen, mechanischen und chemischen Energieströme, die Prozesse weitgehend verlustlos miteinander verbinden, wird der Übersichtlichkeit wegen verzichtet. Erkennbar sind nur Wärmeströme, deren Transport mit Hilfe von Vernetzungsprozessen erfolgt.

Modellzweck:³ Das dynamische Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungsmodell *deeco* dient dazu, die Entscheidungsfindung im Rahmen der Erstellung und Umsetzung kommunaler und regionaler Energieversorgungskonzepte bei vorgegebenem, fluktuierendem Energiebedarf zu unterstützen.⁴ Die durch die optimale Kombination von konventionellen Energieversorgungstechniken mit solchen der rationellen Energieverwendung bzw. der Nutzung regenerativer Energiequellen erreichbaren Primärenergieeinspar- und Emissionsminderungspotentiale sollen quantifiziert und evtl. auftretende Konkurrenzeffekte zwischen diesen Techniken analysiert werden. Die mit der Realisierung von Maßnahmen zur Primärenergieeinsparung und Emissionsminderung verbundenen Kosten sollen abgeschätzt werden, um solche Maßnahmen identifizieren zu können, die hohe Einsparpotentiale bei geringen Kosten versprechen und somit einer detaillierten technischen und betriebswirtschaftlichen Untersuchung unterzogen werden sollten.

³Teile der folgenden Ausführungen sind publiziert in [Gro95].

⁴„Ergebnisse von Energie- und Umweltmodellen dürfen (...) nie als direkte Empfehlung interpretiert werden. Sie sind nur ein Input in die Entscheidungsfindung“ [Wal88], S.174.

Definition 2 (RZD-Energieversorgungssysteme) *Räumlich und zeitlich disaggregierte Energieversorgungssysteme (RZD-EVS) sind Energieversorgungssysteme (EVS), in denen (im Prinzip) jeder energietechnische Prozeß⁵ in seiner zeitlichen Variabilität berücksichtigt wird. Die (räumliche) Aggregation von Prozessen ist nur erlaubt, wenn dabei keine wesentliche Information verlorengeht. Zeitlich disaggregiert bedeutet, daß alle temporal variierenden Größen, die für das EVS relevant sind, wie z.B. Energiebedarfs-, Abwärme- oder Wetterdaten, in Form von Zeitreihen vorliegen müssen, die alle interessierenden Eigenschaften (z.B. Autokorrelationen innerhalb der Zeitreihen, Korrelationen zwischen den Zeitreihen) der zugrundeliegenden kontinuierlichen Funktionen⁶ genügend genau widerspiegeln.⁷*

Modellannahme 1 (System und Umgebung) *Das Optimierungsmodell deeco wird auf ein RZD-EVS, das in ein übergeordnetes EVS eingebettet ist, angewendet. Beide befinden sich in der ihnen gemeinsamen natürlichen und sozioökonomischen Umwelt.⁸*

Modellannahme 2 (Eigenschaften des RZD-EVS) *RZD-EVS dienen (unterstützt durch das übergeordnete EVS) zur Deckung des Energiebedarfs eines wohldefinierten Gebietes. Dieses Gebiet ist in guter Näherung räumlich homogen hinsichtlich des Wettergeschehens (Außentemperatur, Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit, etc.), des Transports elektrischer Energie zu jedem beliebigen Punkt des RZD-EVS, der Preise der Energieträger für einheitliche Nutzergruppen (z.B. private Haushalte) und anderer Kosten, die mit dem Bau bzw. Betrieb des RZD-EVS verbunden sind. Alle aufgeführten Eigenschaften des RZD-EVS sind somit innerhalb des Gebietes ortsunabhängig. Die elektrischen Leitungsverluste innerhalb des EVS sind klein⁹ und können in guter Näherung dem elektrischen Energiebedarf der Endabnehmer zugeschlagen werden. Darüber hinaus wird angenommen, daß die beim Transport von Wärme auftretende Zeitverzögerung zwischen Produktion und Konsum vernachlässigt werden kann. Dies beschränkt die Größe der im Modell zugelassenen zusammenhängenden Wärmeversorgungssysteme.¹⁰ Der Verkehrssektor bleibt von den Betrachtungen dieser Arbeit ausgeschlossen.*

Die maximale Größe des RZD-EVS wird durch das Modell, sofern die hier genannten Anforderungen erfüllt sind, nicht näher festgelegt. In der Praxis wird man sich aber bei der Anwendung von deeco auf den kommunalen Bereich, d.h. auf Städte bzw. Stadtteile, beschränken, um die Datenmenge und den Rechenaufwand in vernünftigen Grenzen zu halten.

Modellannahme 3 (Innere Struktur des RZD-EVS) *Das betrachtete RZD-Energieversorgungssystem läßt sich in Subsysteme zerlegen, die durch verlustfreie Energieströme miteinander verbunden sind. Die kleinsten derartigen Subsysteme, die im Modell deeco betrachtet und per definitionem nicht mehr weiter zerlegt werden sollen, werden als energietechnische Prozesse bezeichnet. Ihre Beschreibung erfolgt mit Hilfe der "Black-Box"-Methode. Die Verknüpfung einzelner Prozesse zum Gesamtsystem läßt sich graphentheoretisch modellieren (s. Abschnitt 2.4).*

Das Gesamtmodell bedient sich somit des hierarchischen Systemkonzeptes, wobei das Hauptsystem durch ein strukturelles und die kleinsten Subsysteme (=Prozesse) durch ein funktionales

⁵Genaue Definition s. Def.4.

⁶Der Übergang von kontinuierlichen Funktionen zu Zeitreihen wird in [Gro91] ausführlich besprochen.

⁷In der Praxis haben sich für die hier interessierenden Fragestellungen Zeitreihen bewährt, die aus Einstunden-Mittelwerten bestehen [Dub86], S.53.

⁸Das übergeordnete EVS und die Umwelt bilden somit im systemanalytischen Sinne die Umgebung des zu untersuchenden (Energieversorgungs-) Systems.

⁹Gemäß [Enq94], S.181 betragen die elektrischen Leitungsverluste auf der Niederspannungsebene 2%, auf der Mittelspannungsebene 1% und auf der Hochspannungsebene 1%. Auf der Transformatorstufe Mittelspannung/Niederspannung ist mit 1,5% Verlusten zu rechnen; auf der Stufe Hochspannung/Mittelspannung mit 0,5%. Die gesamten Netzverluste in den alten Bundesländern betrugen 1992 4,7% des Gesamtverbrauchs. In der untersuchten Kommune Würzburg summierten sich die Netzverluste 1993 auf 1,8% [WVV94].

¹⁰Typische Transportgeschwindigkeiten in Wärmeversorgungssystemen liegen im Bereich von 1 m/s [Buc83].

Systemkonzept beschrieben werden (s. Abschnitt 2.1 u. Abb. A.1 in Anhang A).

Modellannahme 4 (Zulässige energietechnische Prozesse) *Zur Modellierung der Prozesse des zu untersuchenden RZD-EVS sind folgende Prozeß(-typen) ausreichend:*

Bedarfsprozesse, die eine Energiedienstleistung erbringen und dazu Energie in Form von Wärme, elektrischer bzw. mechanischer Energie nachfragen und dabei evtl. Abwärme produzieren;

Umwandlungsprozesse, die chemische (oder nukleare) Energie in Wärme, elektrische oder mechanische Energie umwandeln;

Vernetzungsprozesse, die als Bindeglieder zwischen Prozessen fungieren, deren Energienachfrage und -angebot nicht direkt kompatibel zueinander sind;

Speicherprozesse, die Wärme, elektrische, mechanische oder chemische Energie speichern;

Import-Export-Prozesse, die elektrische Energie aus dem übergeordneten EVS aufnehmen bzw. an dieses abgeben und den Import von Brennstoffen beschreiben, sowie

Kollektorprozesse, die Wärme, elektrische, mechanische oder chemische Energie durch Nutzung regenerativer Energiequellen (z.B. Solarenergie¹¹) bereitstellen.

Modellannahme 5 (Eigenschaften des übergeordneten EVS) *Das übergeordnete EVS stellt dem RZD-EVS Endenergie zur Verfügung, die von diesem alleine nicht bereitgestellt werden kann (= Energieimport) und ist in der Lage, aus diesem überschüssige Energie aufzunehmen (= Energieexport). Elektrische Energie läßt sich importieren¹² und exportieren. Alle fossilen und nuklearen Energieträger, die im RZD-EVS benötigt werden, sind zu importieren. Der Export bzw. Import von Wärme oder mechanischer Energie wird nicht zugelassen. Das übergeordnete EVS ist so groß, daß die spezielle Energieversorgungsstruktur des RZD-EVS und die darin stattfindenden Aktivitäten (in guter Näherung) keinen Einfluß auf die intensiven Eigenschaften des übergeordneten EVS ausüben. Somit soll z.B. der mittlere Wirkungsgrad der Erzeugung elektrischer Energie im übergeordneten EVS nicht durch die Menge elektrischer Energie beeinflußt werden, die vom RZD-EVS nachgefragt oder produziert wird.*

Verallgemeinert man den Sprachgebrauch der Thermodynamik, so kann man davon sprechen, daß das übergeordnete EVS ein „Reservoir“ für das RZD-EVS darstellen soll. Ein EVS kann dann als übergeordnetes EVS für ein RZD-EVS wirken, wenn seine Energieumwandlungskapazitäten für alle Energieformen sehr viel größer sind als die entsprechenden maximalen Bedarfswerte im RZD-EVS.

Modellannahme 6 (Eigenschaften der Umwelt) *Die (natürliche und sozioökonomische) Umwelt stellt nicht-regenerative Primärenergieträger, wie Kohle oder Erdgas, sowie regenerative Energiequellen, wie Solar- oder Windenergie, bereit. Sie nimmt die energiebedingten Emissionen auf, die vom übergeordneten und vom RZD-EVS verursacht werden und bietet alle (evtl. zeitabhängigen) Informationen, die zur Bestimmung des Energiebedarfs notwendig sind.*

Der begrenzten Emissionsaufnahmekapazität der Umwelt kann durch Optimierung der Zielfunktion „Emissionen“ Rechnung getragen werden. Es lassen sich beliebige Emissionen behandeln, für die brennstoff- oder technikabhängige spezifische Emissionen angegeben werden können. Zu den wichtigsten zählen die biologisch schädlichen Gase NO_x und SO₂ sowie die klimawirksamen Emissionen von CO₂ und CH₄.

¹¹Der Begriff Solarenergie wird in dieser Arbeit in seinem engeren Sinne verwendet, d.h. er bezieht sich auf die unmittelbare Gewinnung von Wärme und elektrischer Energie aus der solaren Strahlung mit Hilfe einer geeigneten Umwandlungstechnik und nicht auf die indirekte Nutzung z.B. durch Windenergieanlagen.

¹²Die Begriffe „Import“ und „Export“ werden im folgenden stets im hier definierten Sinne verwendet. Sie beziehen sich nicht auf den Energieaustausch mit dem Ausland.

Definition 3 (Umweltdatenvektor) Die Darstellung der Umwelt erfolgt im Modell *deeco* mit Hilfe des *Umweltdatenvektors* \mathcal{U} . \mathcal{U} enthält als Komponenten die Außentemperatur, die solare Einstrahlung und weitere Größen (z.B. Auslastungsfaktoren von Industrieprozessen), die zur Berechnung des Energiebedarfs, der anfallenden Abwärme und des Angebotes regenerativer Energiequellen benötigt werden.

Im folgenden soll unter EVS (sofern nicht näher bezeichnet) stets ein räumlich und zeitlich disaggregiertes Energieversorgungssystem (RZD-EVS) verstanden werden.

Definition 4 (Energietechnische Prozesse) (*Energietechnische*) Prozesse repräsentieren Subsysteme des EVS, die nicht mehr weiter zerlegt werden sollen und durch verlustlose Energieströme miteinander verbunden sind. Im folgenden soll der Begriff „Prozeß“ in Anlehnung an [Goo92] sowohl für das entsprechende Subsystem an sich, als auch (im engeren Sinne) für die Gesamtheit der in ihm ablaufenden Vorgänge stehen. Vorgänge innerhalb des EVS, bei denen Irreversibilitäten auftreten bzw. die mit Entropieproduktion verbunden sind, dürfen nur im Inneren von Prozessen stattfinden. Die extensiven und intensiven¹³ Größen der Energieströme, die die Prozesse miteinander verbinden, bleiben somit zwischen den einzelnen Prozessen konstant und werden nur im Rahmen von Prozessen verändert. Die Zerlegung des Energieversorgungssystems in Subsysteme, die als Prozesse aufgefaßt werden können, ist nicht eindeutig. Die Wahl der Systemgrenzen erfolgt deshalb aus praktischen Überlegungen heraus immer so, daß die in ein solches Subsystem ein- bzw. aus ihm austretenden Energieströme bequem gemessen werden können, was in der Technischen Thermodynamik häufig durch den Begriff *Kontrollraum* angedeutet wird.

Im folgenden sollen die wichtigsten extensiven und intensiven Größen, die für die physikalische Beschreibung energietechnischer Prozesse notwendig sind, entsprechend der Terminologie der Technischen Thermodynamik [Bae89] erläutert werden.

Definition 5 (Energieströme) Alle für die Beschreibung des Energieversorgungssystems relevanten Energieströme werden an den Systemgrenzen der beteiligten Prozesse gemessen und geben die Energiemenge an, die pro Zeiteinheit über diese Grenze in den Prozeß ein- bzw. aus diesem austritt. Energieströme besitzen somit die Dimension einer Leistung [W]. Aus Anschaulichkeitsgründen werden alle Energieströme, die Prozesse miteinander verbinden, positiv gewählt. Energieströme, die in das betrachtete (Sub-)System eintreten, erhalten den Index En (=Entrance). Die austretenden Energieströme werden durch den Index Ex (=Exit) gekennzeichnet. Mit Ein- bzw. Austrittspunkt ist im folgenden immer die Stelle an der Systemgrenze eines Prozesses gemeint, an der ein Energiestrom in dieses (Sub-)System ein- bzw. aus diesem austritt. Folgende Energieströme werden im Modell *deeco* berücksichtigt (s. Abb. 2.2):

1. *Elektrische und mechanische Energie:* Der mit dem Transport von elektrischer¹⁴ (mechanischer) Energie verbundene Energiestrom \dot{E}_{El} (\dot{E}_{Mech}) ist durch die Angabe seiner Quantität am Ein- bzw. Austrittspunkt vollständig bestimmt.
2. *Wärmestrom:* Den Energiestrom, der die Systemgrenzen nicht als (mechanische oder elektrische) Arbeit und nicht an Massenströme gebunden überschreitet, bezeichnet man als Wärmestrom \dot{E}_Q (Definition gemäß [Bae89], S.56). Ein Wärmestrom wird charakterisiert durch die Quantität der übertragenen Energie \dot{E}_Q und ihrer Qualität, repräsentiert durch

¹³Der Gebrauch der Begriffe „extensiv“ und „intensiv“ orientiert sich am Sprachgebrauch der Thermodynamik [Rei85], S.170.

¹⁴In dieser Arbeit, die sich mit Fragestellungen der Einsatzplanung energietechnischer Anlagen beschäftigt, ist die Betrachtung der elektrischen Wirkleistung ausreichend. Die Bereitstellung der erforderlichen Blindleistung erfolgt auf der Ebene der Momentanoptimierung und Netzbetriebsführung. Sie beeinflusst den Anlageneinsatz nicht [Dub86], S.61.

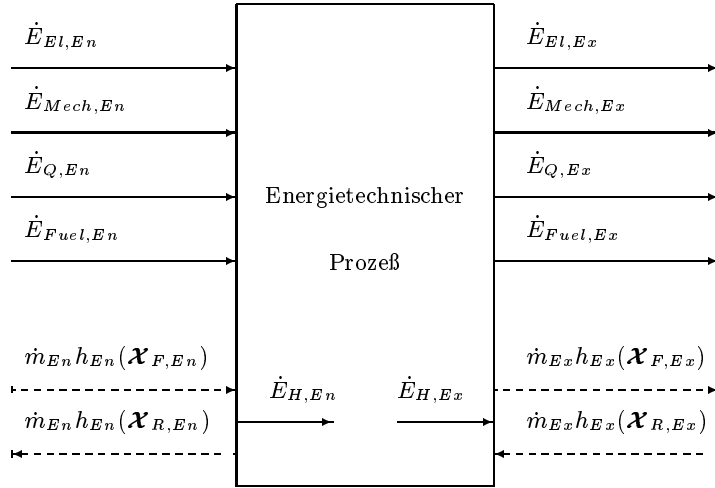


Abbildung 2.2: Energieflußorientierte Beschreibung energietechnischer Prozesse. Die Energiestromrichtung wird mittels durchgezogener, die Massenstromrichtung mit Hilfe unterbrochener Pfeile angedeutet. Die auftretenden Symbole werden im Text erläutert.

die Temperatur T_Q in Kelvin [K] gemessen an der Stelle, an der der Wärmestrom die Systemgrenze überschreitet. Sofern nicht anders vermerkt, werden Temperaturen in dieser Arbeit stets in [K] angegeben.

3. *Enthalpieströme:* Die Bestimmung von Enthalpieströmen erfolgt durch Messung des Massenstroms \dot{m} und der intensiven Größen (z.B. Temperatur, Druck, chemische Zusammensetzung), die zur Berechnung der spezifischen Enthalpie h (bezogen auf eine Masseneinheit) des betrachteten Mediums notwendig sind. Der Enthalpiestrom \dot{H} ergibt sich dann zu

$$\dot{H} = \dot{m}h. \quad (2.1)$$

Die spezifische Enthalpie h ist wie die spezifische innere Energie u nur bis auf eine Integrationskonstante eindeutig bestimmt. Treten mehrere Enthalpieströme in ein System ein bzw. aus diesem aus, so ist bei der Aufstellung von Energiebilanzen darauf zu achten, daß alle Integrationskonstanten auf den gleichen thermochemischen Referenzzustand bezogen sind. Häufig wird auf die Aufstellung eines solchen Referenzzustandes verzichtet und statt dessen nur mit Hilfe von Enthalpiedifferenzen gerechnet. Dabei ist es nützlich, die energetisch relevanten Massenströme, die die Systemgrenze eines Prozesses überschreiten, in 2 qualitativ unterschiedliche Klassen einzuteilen:

- (a) *Chemische bzw. nukleare Energie:*

Der einem Brennstoffstrom zugeordnete Enthalpiestrom \dot{E}_{FueI} berechnet sich bei Kenntnis des (unteren, auf eine Masseneinheit bezogenen) Heizwertes h_{LHV} aus (s. z.B. [Bae89], S.294):

$$\dot{E}_{FueI} = \dot{m}h_{LHV}. \quad (2.2)$$

Dabei ist \dot{m} der Massenstrom des Brennstoffes.

Werden im Systeminneren Kernbrennstoffe im Rahmen nuklearer Reaktionen gespalten, so findet dadurch eine Wärmeabgabe an das Medium statt, das die Brennstoffe umgibt. Der Zahlenwert des „Heizwertes“ h_N eines Kernbrennstoffes wird in dieser Arbeit

gleichgesetzt mit der so definierten Wärmeabgabe einer Masseneinheit des betrachteten Kernbrennstoffes (Wärmeäquivalenzmethode [WEC92], S.79). Damit berechnet sich der dem Kernbrennstoffstrom zugeordnete Enthalpiestrom \dot{E}_{Fuel} ¹⁵ aus

$$\dot{E}_{Fuel} = \dot{m}h_N. \quad (2.3)$$

\dot{m} ist der Massenstrom des Kernbrennstoffes.

(b) *Thermische Energie:*

Als Wärmetransportmittelströme werden im Modell *deeco* solche Massenströme angesehen, die das zum Prozeß gehörende System chemisch unverändert durchströmen.¹⁶ Die spezifische Enthalpie des Massenstromes gemessen an der Stelle, an der der Massenstrom in das System eintritt, soll sich jedoch von der an der Stelle, an der er austritt, unterscheiden. Wird der größere dieser beiden spezifischen Enthalpiewerte mit h_F und der kleinere mit h_R bezeichnet,¹⁷ so berechnet sich der Energieübertrag \dot{E}_H auf das System aus

$$\dot{E}_H = \dot{m}(h_F - h_R). \quad (2.4)$$

Jedem Wärmetransportmittelstrom, der zwei energietechnische Prozesse verbindet, wird im Modell *deeco* ein zweiter Wärmetransportmittelstrom zugeordnet, der das Wärmetransportmedium vom Endprozeß zum Anfangsprozeß zurückführt. Der durch diesen Wärmetransportmittelkreislauf bewirkte Energieübertrag \dot{E}_H läßt sich somit auch als *Nettoenthalpiestrom*¹⁸ betrachten, der beide Prozesse verbindet.

Definition 6 (Vorlauf und Rücklauf) *Vor-* und *Rücklauf* bezeichnen in dieser Arbeit je einen der beiden Stränge einer Wärmetransportmittelleitung (als Teil des oben angesprochenen Wärmetransportmittelkreislaufes). Im Vorlauf fließt der Massenstrom in Richtung des Nettoenthalpiestromes. Im Rücklauf bewegt er sich entgegengesetzt dazu. Somit ist die Vorlauftemperatur die Temperatur des Wärmetransportmittels vor der Wärmeabgabe [WEC92], S.383.

In der ingenieurwissenschaftlichen Literatur ([Sch89], S.134) bezeichnet man den Energieübertrag auf das System, der durch eine Veränderung des Enthalpiegehaltes eines Massenstromes bewirkt wird, der das System chemisch unverändert durchströmt, ebenfalls als „Wärmestrom“. Da diese Bezeichnung auch in der Energiewirtschaft sehr gebräuchlich ist, wird in dieser Arbeit der Begriff „Wärmestrom“ ebenfalls in diesem Sinne verwendet, wenn dadurch die Anschaulichkeit erhöht wird. Im allgemeinen wird jedoch der genauere Begriff „Nettoenthalpiestrom“ verwendet.

Definition 7 (Nettoenthalpieströmen zugeordnete intensive Größen) Jedem Nettoenthalpiestrom werden die intensiven Größen (Temperaturen, Drücke, etc.), die zur Berechnung der spezifischen Enthalpien im Vorlauf und Rücklauf und damit zur Bestimmung des Nettoenthalpiestromes selbst benötigt werden, zugeordnet. Um den Überblick zu erleichtern, werden diese intensiven Größen zu Vektoren zusammengefaßt: Der Vektor \mathcal{X}_F umfaßt alle intensiven Größen, die zur Berechnung der spezifischen Enthalpie im Vorlauf herangezogen werden. \mathcal{X}_R steht für die entsprechenden Größen im Rücklauf und

$$\mathcal{J} := (\mathcal{X}_F, \mathcal{X}_R)^\dagger \quad (2.5)$$

¹⁵Die Gleichheit mit dem entsprechenden Symbol für (konventionelle) Brennstoffe ist beabsichtigt, da im folgenden auf eine getrennte Untersuchung von (konventionellen) Brennstoffen und Kernbrennstoffen verzichtet werden soll.

¹⁶genauer: Das Wärmetransportmittel darf mit den anderen Stoffströmen, die am Prozeß beteiligt sind (z.B. Produktströme), chemisch nicht reagieren. Erlaubt ist dagegen eine Mischung des Wärmetransportmittels mit Wasserdampf, wie dies z.B. häufig bei Trocknungsprozessen mit heißer Luft der Fall ist.

¹⁷Der Index F erinnert dabei an „Flow“ (= Vorlauf) und R an „Return“ (= Rücklauf).

¹⁸Man kann in diesem Zusammenhang auch von einer Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion sprechen.

für alle intensiven Größen, die so dem Nettoenthalpiestrom zugeordnet werden. Die konkrete Form von \mathcal{J} wird im Anhang C für beispielhafte Wärmetransportmittel wieder gegeben. Treten im folgenden Vektoren als Komponenten von übergeordneten Vektoren auf, so stehen sie immer stellvertretend für ihre Komponenten. Das Symbol \dagger gibt im Zusammenhang mit Vektoren an, daß es sich bei ihnen um transponierte Zeilenvektoren, also um Spaltenvektoren handelt.

Nettoenthalpieströme, die die zu einem Prozeß gehörenden (Sub-)Systemgrenze überschreiten, können dem System Energie zuführen, wenn der Nettoenthalpiestrom in das System eintritt¹⁹ oder Energie abführen, wenn er austritt. Sie können somit sowohl zum „Heizen“ als auch zur Abfuhr von Wärme verwendet werden, die entweder bewußt erzeugt wird (z.B. in Heizkesseln) oder als Nebenprodukt (Abwärme) anfällt. Da die Rückgewinnung und Nutzung von Abwärme eine wesentliche Rolle bei der Optimierung von Energiesystemen spielen kann, s. z.B. [Gro91], wird im Anhang C auf den in der Literatur nicht eindeutig definierten Begriff *Abwärme* näher eingegangen. Wenn in dieser Arbeit von Abwärmestrom gesprochen wird, so handelt es sich dabei physikalisch gesehen immer um einen Nettoenthalpiestrom. Nettoenthalpieströme, die Abwärmeströme darstellen, können bei Bedarf durch den hochgestellten Index W (für „Waste Heat“) kenntlich gemacht werden. Wärmeströme im physikalisch engeren Sinne (Leitungs- oder Strahlungswärme), die durch die Angabe ihrer Quantität \dot{E}_Q und ihrer Temperatur T_Q beschrieben werden, lassen sich formal als Nettoenthalpieströme mit $\dot{E}_H = \dot{E}_Q$ und $T_F = T_Q$ modellieren und werden deshalb im folgenden nicht mehr getrennt aufgeführt. Die „Rücklauftemperatur“ T_R ist dabei unbestimmt und darf nicht in die Berechnung anderer Größen einfließen.

Definition 8 (Primärenergieeinsatz) Es ist nützlich, zwischen *regenerativer* Primärenergie (Solarenergie, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse, etc.) und *nicht-regenerativer* Primärenergie (fossile Energieträger und Kernenergie) zu unterscheiden. Im Modell *deeco* wird nur der nicht-regenerative *Primärenergieeinsatz* \dot{E}_P bewertet, so daß auf die Angabe eines Bestimmungsverfahrens für den regenerativen verzichtet werden kann. Der Begriff *variabler Primärenergieeinsatz* \dot{E}_P^{Var} (angegeben in [W]) bezeichnet denjenigen (nicht-regenerativen) Primärenergieeinsatz, der mit dem Betrieb eines energietechnischen Prozesses verbunden ist. Jedem Brennstoffstrom bzw. elektrischen Energiestrom, der die Grenze des EVS überschreitet, läßt sich ein dazugehöriger Primärenergieeinsatz zuordnen. Für Brennstoffe wird dieser aus \dot{E}_{Fuel} unter Berücksichtigung eines pauschalen (mittleren) Wirkungsgrades für die Bereitstellung des Brennstoffes berechnet.²⁰ Bei elektrischen Energieströmen erfolgt seine Bestimmung auf der Basis eines mittleren Wirkungsgrades der Produktion elektrischer Energie im übergeordneten EVS. Der Primärenergieeinsatz ist positiv, falls die Brennstoffe bzw. die elektrische Energie vom EVS nachgefragt werden. Beim Export elektrischer Energie erfolgt eine Gutschrift für den Primärenergieeinsatz, der dadurch im übergeordneten EVS nicht mehr zur Produktion derselben Menge elektrischer Energie aufgebracht werden muß. In diesem Falle ist der vermiedene Primärenergieeinsatz negativ zu zählen.

Es ist nützlich, einen allgemeinen Energiestrom \dot{E}_α zu definieren, der durch die Angabe von $\alpha \in \{El, Mech, Q, H, Fuel, P\}$ näher spezifiziert wird. Treten mehrere gleichartige Energieströme in

¹⁹Es sei daran erinnert, daß Nettoenthalpieströme stets positiv gewählt werden.

²⁰Bei der Bestimmung des Primärenergieeinsatzes handelt es sich somit nicht um eine Messung im strengen Sinne. Auf eine detaillierte Untersuchung der Gewinnung, der Aufbereitung und des Transports von Primärenergieträgern wird in dieser Arbeit verzichtet. Ein Simulationsmodell, daß sich auf der Basis von Jahresmittelwerten des Energiebedarfs mit dieser Fragestellung beschäftigt ist GEMIS (**G**esamt-**E**missions-**M**odell integrierter **S**ysteme) [Sim90, Hes95].

einen Prozeß ein bzw. aus diesem aus, so werden sie durchnummeriert. $\dot{E}_{H,i,Ex}$ bezeichnet somit z.B. den i-ten Nettoenthalpiestrom, der den Prozeß verläßt.

Anmerkung: Die chemischen, elektrischen, mechanischen Energie- und Nettoenthalpieströme, die die einzelnen energietechnischen Prozesse miteinander verbinden, bilden (wie später detailliert erläutert wird, s. Abschnitt 2.6) die Optimierungsvariablen des Modells *deeco*. Der Primärenergieeinsatz im gesamten EVS stellt neben den Gesamtemissionen und den Gesamtkosten (s.u.) eine Komponente der zu minimierenden Zielfunktion dar (s.a. Gl. 2.99).²¹

Definition 9 (Speicherenergieinhalt) Neben den Energieströmen, die die zu einem Prozeß gehörende Systemgrenze überschreiten, wird zur Beschreibung nichtstationärer Vorgänge (s. z.B. [Bae89], S.69) in Energiespeichern auch der *Energieinhalt* E^S (gemessen in [J]) des zum (Speicher-)Prozeß gehörenden Systems benötigt. Der Begriff des Energieinhalts ist bei der Beschreibung konkreter Speicherprozesse, s. Abschnitt 2.3.4, näher zu definieren. Bei Wärmespeichern unter konstantem Druck wird darunter z.B. der Enthalpieinhalt verstanden.

Definition 10 (Emissionen) Der Betrieb eines energietechnischen Prozesses kann mit der Abgabe von Schadstoffen bzw. klimarelevanten Spurengasen in die Umwelt verbunden sein, die (gemessen in [kg/s]) im folgenden *variable Emissionen* genannt werden. Von besonderem Interesse sind dabei die Emissionen von CO_2 , SO_2 und NO_x . Die verschiedenen Emissionssorten \dot{P}_ν^{Var} (pro Zeiteinheit), $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$ bilden die Komponenten des Emissionsvektors $\dot{\mathcal{P}}^{Var}$. Die Zahl der Komponenten dieses Vektors ist im Modell *deeco* variabel, um bei Bedarf weitere Emissionen (z.B. CH_4) in die Betrachtungen miteinbeziehen zu können.

Definition 11 (Monetäre Kosten) Die *variablen monetären Kosten* \dot{M}^{Var} geben diejenige Geldmenge (pro Zeiteinheit) an, die für den Betrieb eines energietechnischen Prozesses aufgebracht werden muß. Diese Geldmenge (angegeben in [DM/s] oder anderen Währungseinheiten pro Zeiteinheit) umfaßt neben einer Vergütung von Energieströmen, die immer dann zu bezahlen ist, wenn diese die Grenze des EVS überschreiten, weitere Kosten, die betriebsbedingt anfallen, wie z.B. Emissionssteuern. Die variablen monetären Kosten können negativ sein, wenn elektrische Energie vom EVS ins übergeordnete EVS exportiert wird.

Definition 12 (Verallgemeinerte Kosten) Der Betrieb eines EVS erfordert den Einsatz von Primärenergie und Geld und ist mit Emissionen verbunden. All diese Größen können in einem allgemeinen Sinne als variable „Kosten“ des Energiesystems angesehen werden. Um die Schreibweise zu vereinfachen und um die Symmetrie des Optimierungsproblems deutlich zu machen, wird der Vektor der *verallgemeinerten variablen Kosten* $\dot{\mathcal{C}}^{Var} = (\dot{E}_P^{Var}, \dot{\mathcal{P}}^{Var}, \dot{M}^{Var})^\dagger$ definiert, der sich aus dem variablen Primärenergieeinsatz \dot{E}_P^{Var} , den damit verbundenen variablen Emissionen $\dot{\mathcal{P}}^{Var}$ und variablen (monetären) Kosten \dot{M}^{Var} zusammensetzt.

Energietechnische Prozesse finden in Anlagen statt, für deren Herstellung, Wartung und Beseitigung *fixe monetäre Kosten* \dot{M}^{Fix} (pro Zeiteinheit) aufzubringen sind. Daneben ist damit aber i.allg. auch ein „investiver“ nicht-regenerativer Primärenergieeinsatz verbunden, der zur Abgabe „investiver Emissionen“ führt. Der *fixe Primärenergieeinsatz* \dot{E}_P^{Fix} (pro Zeiteinheit) ergibt sich aus diesem investiven Primärenergieeinsatz geteilt durch die Lebensdauer der entsprechenden Anlage. Analog lassen sich die damit einhergehenden *fixen Emissionen* $\dot{\mathcal{P}}^{Fix}$ (pro Zeiteinheit) berechnen. Die fixen monetären Kosten enthalten neben der Abschreibung und Verzinsung des investierten Kapitals i.allg. auch die Kapitalsteuern, die Versicherungen sowie die als fest angenommenen Bedienungs- und Wartungskosten. Die Berechnung der fixen monetären Kosten

²¹Als Zielfunktion eines Optimierungsproblems wird diejenige Größe angesehen, die zu optimieren (d.h. zu maximieren oder minimieren) ist. Die Zielfunktion dient somit als Gütekriterium zur Bewertung verschiedener (Energieversorgungs-) Alternativen.

erfolgt mit Hilfe der Annuitätenmethode, die z.B. in ([Win 91], S.301) ausführlich beschrieben wird. Diese Methode der Investitionsrechnung erlaubt die Umrechnung der Kosten einer Investition, die während ihrer gesamten technischen oder ökonomischen Lebensdauer anfallen, auf zeitlich konstante Kosten (pro Zeiteinheit). Alle investiven Größen werden zum Vektor der *verallgemeinerten fixen Kosten* $\dot{\mathbf{C}}^{Fix} = (\dot{E}_P^{Fix}, \dot{\mathbf{P}}^{Fix}, \dot{M}^{Fix})^\dagger$ zusammengefaßt. Die verallgemeinerten Gesamtkosten \mathbf{C}_E des betrachteten Energieversorgungssystems setzen sich additiv aus den verallgemeinerten variablen und fixen Kosten aller am Energieversorgungssystem beteiligten Prozesse zusammen. Eine gewichtete Linearkombination der Jahresmittelwerte der Komponenten des Vektors der verallgemeinerten Gesamtkosten bildet in dieser Arbeit die Zielfunktion, die zu minimieren ist.

Definition 13 (Flüsse, Attribute, Einflußgrößen) Extensive Größen, in Form von Energieströmen, die Prozesse miteinander verbinden, oder verallgemeinerten variablen Kosten (z.B. Schadstoffströme, aber auch die mit der Verwendung von Brennstoffen verbundenen Kosten), werden im folgenden als *Flüsse* bezeichnet. Intensive Größen, die an Flüsse gebunden sind, wie z.B. Temperaturen von Wärmeströmen, Drücke und Temperaturen von Nettoenthalpieströmen, usw., werden als *Attribute*²² bezeichnet, da diese immer nur in Verbindung mit Flüssen auftreten und diese näher kennzeichnen. Als weitere Attribute könnten auch die intensiven Eigenschaften der Brennstoffströme (z.B. der Schwefelgehalt) angesehen werden. Da aber Prozesse, die diese Eigenschaften verändern (z.B. Raffinerieprozesse) im Modell *deeco* nicht betrachtet werden, bilden die den Wärme- und Enthalpieströmen zugeordneten intensiven Größen die einzigen relevanten Attribute in *deeco*. Intensive Größen (z.B. die Außentemperatur), die nicht an Flüsse oder Prozesse gebunden sind und extensive Größen, die nicht als (z.B. durch den Betreiber des Energieversorgungssystems) beeinflussbar angesehen werden, heißen (*prozeßexterne*) *Einflußgrößen*.

2.2.2 Informations- und modelltechnische Aspekte

Es ist für das Verständnis des Modells *deeco* entscheidend, den Unterschied zwischen (physikalischen) Größen an sich (z.B. Energieströme oder intensive Größen) und der Kenntnis über die Festlegung ihrer Höhe innerhalb des Systems deutlich zu machen. Wird beispielsweise Energie vom Prozeß A zum Prozeß B transportiert, so ist es für die Modellbildung wichtig zu wissen, ob A oder B primär die Höhe dieses Energiestroms festlegt. Geschieht dies durch den Prozeß B, so findet eine Informationsübertragung (über die Höhe des Energiestroms) von B nach A statt, die entgegengesetzt zur eigentlichen Energiestromrichtung erfolgt. Es ist deshalb nützlich, die bisherigen Definitionen und Modellannahmen durch solche zu ergänzen, die diese informations- und modelltechnischen Aspekte deutlicher zum Ausdruck bringen.

Definition 14 (Eingabe-, Ausgabe- und Zustandsgrößen, Parameter) Ein energietechnischer Prozeß wird im Modell *deeco* mit Hilfe des funktionalen Systemkonzeptes dargestellt (s. Abschnitt 2.1), also als Vorgang, der innerhalb eines „schwarzen Kastens“ abläuft. Die mathematische Beschreibung dieses Vorganges erfolgt mit Hilfe von *Input-Output-Relationen*, die die mathematischen Beziehungen wiedergeben, die zwischen Eingabegrößen²³ (Inputs) $\mathbf{x}(t)$ und Ausgabegrößen (Outputs) $\mathbf{y}(t)$ in Abhängigkeit von evtl. vorhandenen Zustandsgrößen²⁴ $\mathbf{z}(t)$

²²Diese Bezeichnungsweise wird von R. Kühner [Kue92] übernommen.

²³Dabei werden alle Eingabegrößen eines betrachteten Prozesses zu einem Vektor zusammengefaßt. Analog wird mit den Ausgabe- und Zustandsgrößen verfahren. In der Literatur wird statt des Begriffes „Eingabegröße“ häufig auch der Begriff „Einganggröße“ verwendet. Da im Rahmen dieser Arbeit aber erhebliche Verwechslungsgefahr zwischen datenmäßigem Eingang und energetischem Eingang besteht, wird eine Bezeichnungsweise gewählt, die stärker den Datenflußcharakter der entsprechenden Größen betont.

²⁴Bei den Zustandsgrößen handelt es sich z.B. um die Energieinhalte der im Energieversorgungssystem vorhandenen Speicher.

unter Einbeziehung vorgegebener Parameter bestehen, und *Zustandstransformationsgleichungen*, die die zeitliche Entwicklung der Zustandsgrößen in Abhängigkeit von Eingabegrößen, Zustandsgrößen und Parametern beschreiben. *Eingabegrößen* sind dabei solche Größen, die von der Systemumgebung herrührend das Systemverhalten beeinflussen und *Ausgabegrößen* solche, die im System entstehen [Pap91], S.547. (*Prozeßinterne*) *Zustandsgrößen* repräsentieren zu einem gegebenen Zeitpunkt gerade diejenige Information über die Vorgeschichte des Prozesses, die für die zeitliche Entwicklung nach diesem Zeitpunkt relevant ist [Kno85]. Zu den Zustandsgrößen gehören die Energieinhalte der im Energieversorgungssystem vorhandenen Speicher. Daneben werden in *deeco* auch solche Größen als Zustandsgrößen modelliert, die sich aus Eingabegrößen und Parametern berechnen lassen, ohne aber selbst (direkt) Ausgabegrößen zu sein. Dazu zählen zum Beispiel der Energiebedarf der Bedarfsprozesse und das (maximale) Energieangebot der Kollektorprozesse. Eingabegrößen stellen mathematisch gesehen unabhängige Variablen, Ausgabegrößen abhängige dar. In vielen Fällen besteht eine gewisse Freiheit bei der Wahl der unabhängigen Variablen, die es erlaubt, solche auszuwählen, die der Modellstruktur am besten angepaßt sind. *Parameter* sind Größen, die Einfluß auf die Input-Output-Relationen und Zustandstransformationsgleichungen nehmen, aber weder als Eingabe- oder Ausgabegröße noch als Zustandsgröße angesehen werden. Sie stellen die Koeffizienten der Input-Output-Relationen und Zustandstransformationsgleichungen dar und sind meist zeitunabhängig. Auf ihre explizite Angabe wird deshalb häufig verzichtet. Parameter sind charakteristisch für den betrachteten Prozeß und lassen sich während der Optimierung nicht beeinflussen. Im Rahmen von Sensitivitäts- bzw. Szenarienrechnungen können Parameter jedoch bewußt variiert werden. Im Modell *deeco* wird ein determiniertes Prozeßverhalten angenommen, d.h. die Ausgabegrößen eines Prozesses sind bei gegebenen Parametern eindeutige Funktionen der Eingabe- und Zustandsgrößen. In vielen Fällen nimmt die Input-Output-Relation folgende einfache Gestalt an, die in der Systemtheorie ausführlich diskutiert wird ([Unb90], S.69) und den Betrachtungen der nachfolgenden Abschnitte zugrunde liegt:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{z}(t), \mathbf{x}(t), t). \quad (2.6)$$

Die Zustandstransformationsgleichung lautet:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{z}(t), \mathbf{x}(t), t). \quad (2.7)$$

Dabei sind \mathbf{f} und \mathbf{g} geeignet zu wählende vektorwertige Funktionen. Sowohl die Input-Output-Relationen als auch die Zustandstransformationsgleichung können somit explizite Funktionen der Zeitvariablen t sein. Dies gilt im folgenden auch dann, wenn aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die explizite Angabe dieser Variablen verzichtet wird.

Definition 15 (Datenfluß) Unter *Datenfluß* wird in dieser Arbeit der Fluß von Information verstanden, der außerhalb der Systemgrenzen der Prozesse stattfindet, das zeitlich variable Verhalten der Prozesse beeinflusst und im Rahmen der gegebenen Input-Output-Relationen und Zustandstransformationsgleichungen ausreicht, um zusammen mit den prozeßinternen Zustandsgrößen (und den Parametern) dieses Verhalten zu beschreiben. Die Datenflußrichtung wird immer bezüglich Prozessen angegeben, d.h. entweder gibt ein Prozeß Information (z.B. an andere Prozesse) ab oder er nimmt Information auf, die von anderen Prozessen abgegeben wird bzw. ihm von der Umwelt zur Verfügung gestellt wird.

Flüsse und Attribute können sowohl die Rolle von Eingabe- als auch die von Ausgabegrößen annehmen. Prozeßexterne Einflußgrößen stellen immer Eingabegrößen dar.

Die bisher definierten Begriffe sollen anhand eines einfachen Beispiels veranschaulicht werden: Der Energieinhalt eines Energiespeichers $E^S(t)$ zum Zeitpunkt t stellt eine Zustandsgröße dar und läßt sich durch Lösen folgender Differentialgleichung²⁵ bestimmen, s. z.B. [Soe79], S.518:

$$\frac{dE^S(t)}{dt} = \dot{E}_{En}(t) - \dot{E}_{Ex}(t) - \dot{E}^L \left[\dot{E}_{En}(t), \dot{E}_{Ex}(t), E^S(t), \mathbf{U}(t) \right]. \quad (2.8)$$

Dabei gibt $\dot{E}_{En}(t)$ den Energiezufluß, $\dot{E}_{Ex}(t)$ den Energieabfluß und $\dot{E}^L \left[\dot{E}_{En}, \dot{E}_{Ex}, E^S, \mathbf{U} \right]$ den Energieverlust des Speichers (pro Zeiteinheit) an. $\dot{E}_{En}(t)$ und $\dot{E}_{Ex}(t)$ stellen (extensive) Eingabegrößen dar, da sie angeben, wie stark der Speicher be- bzw. entladen wird, und somit von außen her Einfluß auf das Speicherverhalten nehmen. Besonders $\dot{E}_{Ex}(t)$ macht deutlich, daß die Richtung des Energiestromes nicht mit der Richtung des dazugehörigen Datenflusses, der die Information über die Höhe des bedarfsseitig benötigten Energiestroms enthält, verwechselt werden darf. Es ist in diesem Zusammenhang oft hilfreich, sich unter Eingabegrößen solche Größen vorzustellen, auf die der Prozeß reagiert. Ausgabegrößen können als Antwort des Prozesses verstanden werden.²⁶ Handelt es sich bei dem betrachteten Energiespeicher um einen gutdurchmischten Warmwasserspeicher, der durch einen Solarkollektor beladen wird, so stellt die Temperatur, mit der das warme Wärmetransportmittel vom Kollektor kommend in den Speicher eintritt, eine Eingabegröße dar. Die Temperatur des Wärmetransportmittels, das den Speicher in Richtung auf den Kollektor zu verläßt, ist eine Ausgabegröße. Sie stimmt (in Abwesenheit von Wärmeaustauschern) mit der Temperatur des Wassers im Speicher überein und ist somit nur abhängig von der Zustandsgröße, d.h. vom Speicherenergieinhalt, da dieser bei gegebener Bezugstemperatur die Speichertemperatur eindeutig festlegt. Zur Berechnung der Energieverluste des Wärmespeichers ist neben der Speichertemperatur die Temperatur der Speicherumgebung (enthalten in $\mathbf{U}(t)$) wesentlich. Da diese meist nicht direkt beeinflussbar ist, handelt es sich bei ihr um eine prozeßexterne Einflußgröße.

Da ein und dieselbe Größe physikalisch gesehen aus einem Prozeß austreten, zugleich aber eine informationstechnische Eingabegröße dieses Prozesses sein kann, ist eine deutliche Unterscheidung dieser beiden Bedeutungsebenen notwendig. In der mathematischen Formulierung wird dies durch die Angabe von Indizes erreicht. Für diese gilt:

- Massenstrom : Der Index F kennzeichnet den Vorlauf ("Flow"), R den Rücklauf ("Return").
- Energiestrom : Der Index En steht für "Entrance" und kennzeichnet Energieströme, die in einen Prozeß (physikalisch gesehen) eintreten; Ex steht für "Exit" und kennzeichnet Energieströme, die aus einem Prozeß austreten.
- Datenfluß : Der Index In steht für (informationstechnischen) "Input" (Eingabegröße), Out für "Output" (Ausgabegröße).

Somit bezeichnet z.B. $\dot{E}_{H,Ex,In}$ einen Nettoenthalpiestrom (Index H), der das zu einem Prozeß gehörende System physikalisch gesehen verläßt (Index Ex) und zugleich eine informationstechnische Eingabegröße (Index In) darstellt.

Neben der mathematischen ist eine sprachliche Unterscheidung der beiden Bedeutungsebenen notwendig: Die physikalische Flußrichtung wird in Bezug auf das zu einem Prozeß gehörende System durch Verben wie „eintreten“, „austreten“, „verlassen“, „durchströmen“ oder „überschreiten“ deutlich gemacht, die alle eine physikalische Aktivität (im weitesten Sinne „fließen“) bezeichnen. Bei der Angabe der Datenflußrichtung wird nicht von Größen gesprochen, die in einen Prozeß „eintreten“ oder „austreten“, sondern nur von „Eingabegrößen“ oder „Ausgabegrößen“.

²⁵Das Modell *deeco* beschränkt sich auf Systeme mit sog. konzentrierten Speichern [Sch91a], zu deren Beschreibung gewöhnliche Differentialgleichungen mit der Zeitvariablen t ausreichen.

²⁶Weitere Beispiele dazu finden sich in Definition 16.

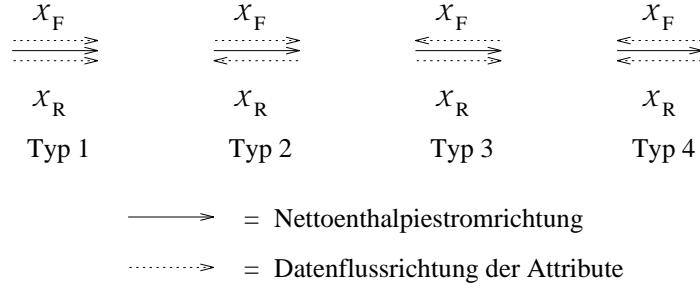


Abbildung 2.3: Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme.

Die Abbildung zeigt, wie sich bei Kenntnis der Nettoenthalpiestromrichtung durch Typeneinteilung eindeutig die Datenflußrichtung der Attribute ergibt, die dem Nettoenthalpiestrom zugeordnet sind.

Definition 16 (Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme) Es ist nützlich, die auftretenden Nettoenthalpieströme in verschiedene Typen einzuteilen, die sich durch die Richtung des Datenflusses der ihnen zugeordneten intensiven Größen unterscheiden. Ein Nettoenthalpiestrom wird dabei durch die transportierte Enthalpie (pro Zeiteinheit) \dot{E}_H und die damit verbundenen intensiven Größen \mathcal{X}_F und \mathcal{X}_R gekennzeichnet (s. Abb. 2.3).

1. Typ: Datenfluß von \mathcal{X}_F und \mathcal{X}_R parallel zur Richtung des Energieflusses.
Beispiel: Ein Abwärmeproduzent, der sowohl die Vorlauftemperatur der Abwärme als auch die Rücklauftemperatur, auf die er die gefaßte Abwärmemenge (s.a. Anh. C) bezieht, als Informationen an die Prozesse weitergibt, die durch den Abwärmestrom mit dem Abwärmeproduzenten verknüpft sind.
2. Typ: Datenfluß von \mathcal{X}_F parallel und von \mathcal{X}_R antiparallel zur Richtung des Energieflusses.
Beispiel: Bei der Entladung eines gutdurchmischten Wärmespeichers legt der Speicherprozeß nur die Vorlauftemperatur des Nettoenthalpiestroms fest. Die Rücklauftemperatur erhält dieser als Information vom Prozeß, an den die Wärme abgegeben wird.
3. Typ: Datenfluß von \mathcal{X}_F antiparallel und von \mathcal{X}_R parallel zur Richtung des Energieflusses.
Beispiel: Ein spezieller Wärmeproduzent, der in der Lage ist, eine beliebige Vorlauftemperatur, die vom zu versorgenden Prozeß gefordert wird, bereitzustellen, aber bestimmte Anforderungen an die Rücklauftemperatur stellt.
4. Typ: Datenfluß von \mathcal{X}_F und \mathcal{X}_R antiparallel zur Richtung des Energieflusses.
Beispiel: Ein Wärmekonsument, der die von ihm geforderte Vor- und Rücklauftemperatur des nachgefragten Nettoenthalpiestromes als Information an die ihn versorgenden Prozesse weitergibt.

Anmerkung:

Auf die Angabe des an einem Nettoenthalpiestrom beteiligten Massenstromes kann verzichtet werden, da dieser durch die zum Nettoenthalpiestrom gehörenden Größen $\mathcal{J} = (\mathcal{X}_F, \mathcal{X}_R)^\dagger$ und \dot{E}_H vollständig bestimmt ist (s. Def. 5 u. Anh. C).

Die Information über die Höhe eines Attributes eines Nettoenthalpiestromes kann direkt mit Hilfe des Wärmetransportmittelstroms, der den Nettoenthalpiestrom trägt, übermittelt werden. In diesem Falle wird dazu einfach die entsprechende intensive Größe im Wärmetransportmittelstrom gemessen. Die Datenflußrichtung des Attributes stimmt dann mit der Massenstromrichtung des dazugehörigen Wärmetransportmittelstroms überein. Sind beide Richtungen entgegengesetzt, so wird die Information über die Höhe des Attributes zunächst unabhängig vom Wärmetransportmittelstrom übertragen (z.B. durch eine elektronische Steuerleitung oder indirekt durch einen Rückkopplungsmechanismus). Der informationsaufnehmende Prozeß reagiert darauf aber

so, daß der von ihm abgegebene Wärmetransportmittelstrom tatsächlich die gewünschte Eigenschaft hinsichtlich der Höhe des betrachteten Attributes besitzt. Da Prozesse i.allg. nur dann Informationen austauschen, wenn sie auch durch Energieströme verbunden sind, können die Datenflüsse der Attribute²⁷ mit Hilfe der Typeneinteilung gedanklich den Nettoenthalpieströmen zugeordnet werden.

Sprechweise:

Intensive Größen, die Nettoenthalpieströmen zugeordnet sind, die in einen Prozeß ein- bzw. aus einem Prozeß austreten, werden zusammenfassend als die dem „Prozeß zugeordneten intensiven Größen“ bzw. die „zum Prozeß gehörenden Attribute“ bezeichnet.

Definition 17 (Differentielle Kenngrößen) Bei der Angabe von Input-Output-Relationen sind folgende *differentielle Kenngrößen* hilfreich, die jeweils am Arbeitspunkt des betrachteten Prozesses zu bestimmen sind:

Im folgenden²⁸ sei $\alpha, \beta \in \{El, Mech, Q, H, Fuel, P\}$.

$$\lambda_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha,En}}{\partial \dot{E}_{\beta,Ex}}, \quad \varepsilon_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha,Ex}}{\partial \dot{E}_{\beta,En}}, \quad \mu_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha,Ex}}{\partial \dot{E}_{\beta,Ex}}, \quad \sigma_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha,En}}{\partial \dot{E}_{\beta,En}}. \quad (2.9)$$

Somit gibt z.B. λ_H^{El} an, um wieviele Einheiten ein elektrischer Energiestrom, der in einen Prozeß eintritt, zunehmen muß, wenn dessen Nettoenthalpieabgabe um eine Einheit ansteigt. Grob gesprochen handelt es sich bei λ_{β}^{α} um einen (differentiellen) spezifischen Energieeinsatz und bei $\varepsilon_{\beta}^{\alpha}$ um einen differentiellen Wirkungsgrad. μ_{β}^{α} ist nützlich zur Beschreibung der gekoppelten Produktion verschiedener Energieformen (z.B. elektrische Energie und Wärme bei Blockheizkraftwerken) und σ_{β}^{α} zur gekoppelten Nutzung verschiedener Energieformen (z.B. Abwärme und elektrische Energie beim Einsatz von Elektrowärmepumpen). Energieströme, die unabhängig vom Auslastungsgrad des betrachteten Prozesses sind, werden mit $\dot{E}_{\alpha,Ex,0}$ bzw. $\dot{E}_{\alpha,En,0}$ ($\alpha \in \{El, Mech, Q, H, Fuel, P\}$)²⁹ bezeichnet.

Die Technische Thermodynamik (s. z.B. [Bae89]) analysiert energietechnische Prozesse und gibt Beziehungen (z.B. in Form von Kennlinien) an, die die an der Grenze des zu einem Prozeß gehörenden Systems meßbaren extensiven und intensiven Größen (evtl. unter Berücksichtigung prozeßinterner Zustandsgrößen) miteinander verbinden. Dadurch wird es möglich, den betrachteten Prozeß bezüglich seines physikalischen Verhaltens allein mit Hilfe dieser Input-Output-Relationen und evtl. vorhandener Zustandstransformationsgleichungen zu beschreiben. Eine Kenntnis des genauen inneren Aufbaus der den Prozessen zugeordneten Systeme, der beliebig komplex sein darf, ist für den Zweck der Optimierung von Energiesystemen nicht notwendig, wenn darauf verzichtet wird, die Prozesse an sich zu optimieren. Das Optimierungsmodell *deeco* erlaubt somit keine Optimierung von energietechnischen Einzelanlagen (z.B. Wärmepumpen, Blockheizkraftwerke). Es untersucht das optimale Zusammenwirken vieler solcher Anlagen.

Im Modell *deeco* werden an die Form der Input-Output-Relationen gewisse Forderungen gestellt, die im folgenden näher diskutiert werden sollen.

Bei der thermodynamischen Beschreibung energietechnischer Prozesse muß zwischen stationärem und instationärem Betrieb unterschieden werden. Bei letzterem ändern sich im Gegensatz zum

²⁷Die Datenflußrichtung der Energieströme selbst spielt bei der Verknüpfung von Prozessen (s. Kap. 2.5) eine untergeordnete Rolle und braucht deshalb den Energieströmen (außer bei der Aufstellung der Input-Output-Relationen) nicht fest zugeordnet werden.

²⁸Werden Nettoenthalpieströme durch hinzufügen weiterer Indizes näher charakterisiert, so gelten die differentiellen Kenngrößen sinngemäß auch für diese, z.B. $\mu_{El}^{H,l} := \frac{\partial \dot{E}_{H,l,Ex}}{\partial \dot{E}_{El,Ex}}$, wobei $\dot{E}_{H,l,Ex}$ den l -ten Abwärmestrom eines Bedarfsprozesses darstellen kann.

²⁹Auch hier darf H durch weitere Indizes (z.B. l) näher charakterisiert werden (s.o.).

stationären Betrieb die den Prozeß charakterisierenden Größen (z.B. die an ihm beteiligten³⁰ Energieströme) im Laufe der Zeit. Im Modell *deeco* wird angenommen, daß sich die betrachteten Prozesse zu jedem Zeitpunkt trotz zeitlich variierender Größen (z.B. Außentemperatur, solare Einstrahlung etc.) hinreichend genau durch Input-Output-Relationen beschreiben lassen, die durch Messung oder Berechnung einer Vielzahl unterschiedlicher stationärer Betriebspunkte gewonnen und als stationäre Kennlinien bezeichnet werden. Alle Vorgänge im Energieversorgungssystem werden somit als quasi-stationär³¹ betrachtet. Zeitverzögerungen durch endliche Energietransportzeiten und Energiespeichereffekte außerhalb von Energiespeichern (z.B. in Fernwärmeleitungen) bleiben unberücksichtigt. Neben den (algebraischen) Input-Output-Relationen treten im Modell *deeco* nur Zustandstransformationsgleichungen in Form gewöhnlicher Differentialgleichungen auf. Partielle Differentialgleichungen (z.B. zur Beschreibung der Wärmeleitung mit endlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit) gehören deshalb nicht zum Formalismus von *deeco*.

Modellannahme 7 (Verwendung stationärer Kennlinien) *Alle im Modell deeco zugelassenen Prozesse lassen sich bezüglich der interessierenden Fragestellungen durch Input-Output-Relationen beschreiben, die auf stationären Kennlinien beruhen.*

Das Modell *deeco* berücksichtigt bei der Optimierung von Energieversorgungssystemen (und nicht nur von Einzelanlagen) intensive Größen. Im wesentlichen handelt es sich dabei um die zeitlich variable Einflußnahme dieser Größen auf die energetischen Wirkungsgrade (und auf weitere Größen, die in die Input-Output-Relationen der Prozesse eingehen). Es ist jedoch für ein Optimierungsmodell wie *deeco*, das eine Vielzahl von Energieversorgungsalternativen vergleichen soll, aufgrund der durch den Computereinsatz vorgegebenen Beschränkungen (Speicherplatz bzw. Rechenzeit) und aufgrund der Handhabbarkeit eines solchen Modells nicht möglich, die Prozesse mit der für die Simulation von Einzelanlagen üblichen Genauigkeit abzubilden. Andererseits wäre dies auch nicht sinnvoll, da *deeco* nur die Konkurrenz bzw. das Zusammenwirken von Energieversorgungstechniken untersuchen und nicht eine möglichst exakte Beschreibung der Einzelprozesse erreichen will. Im folgenden sollen wesentliche Modellannahmen diskutiert werden, die eine Berücksichtigung der intensiven Größen mit einer für die Problemstellung angepaßten Genauigkeit erlauben. Für die hier geführte qualitative Diskussion, die zur Motivation der quantitativen Beziehungen (s. Modellannahmen 13 - 18) dienen soll, ist es ausreichend, sich die folgenden (zunächst eindeutigen) Input-Output-Relationen eines Prozesses vorzustellen:

$$y_{Fl} = f_{Fl}(\mathbf{x}_{Fl}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) \quad (2.10)$$

und

$$y_{Att} = f_{Att}(\mathbf{x}_{Fl}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}). \quad (2.11)$$

Dabei steht y_{Fl} (y_{Att}) für eine beliebige Ausgabegröße in Gestalt eines Flusses (Attributes). \mathbf{x}_{Fl} (\mathbf{x}_{Att} bzw. \mathbf{x}_{Inf}) bezeichnet alle Eingabegrößen eines Prozesses in Form eines Flusses (Attributes bzw. einer prozeßexternen Einflußgröße) und \mathbf{z} alle an einem Prozeß beteiligten Zustandsgrößen. f_{Fl} und f_{Att} sind entsprechend den gegebenen Input-Output-Relationen geeignet zu wählende Funktionen. Die grundlegende Näherung des Modells *deeco* besteht darin, die Funktion f_{Fl} in einen Teil, der nur von den Eingabegrößen \mathbf{x}_{Att} und \mathbf{x}_{Inf} sowie \mathbf{z} abhängig ist, und einen, der zur extensiven Größe \mathbf{x}_{Fl} proportional ist, zu zerlegen.

³⁰Darunter sollen im folgenden immer die Energieströme verstanden werden, die in das zum Prozeß gehörende System ein- bzw. aus diesem austreten.

³¹Dies bedeutet, daß die im Modell betrachteten Prozesse quasi trägheitslos auf Lastschwankungen reagieren können. Bei dem im Modell *deeco* zugrundegelegten Zeitraster (Einstunden-Mittelwerte) trifft dies (bei in Betrieb befindlichen Anlagen, abgesehen von Anfahrvorgängen) selbst auf große Einheiten, wie z.B. thermische Kraftwerke, Gasturbinen und Heizkraftwerke zu [Dub86], S.86.

Modellannahme 8 (Linearität der extensiven Input-Output-Relationen) *Um die Methoden der linearen Optimierung anwenden zu können, werden nur Prozesse betrachtet, deren Input-Output-Relationen, die als Ausgabegrößen Flüsse liefern, sich in guter Näherung als lineare Funktionen von Eingabegrößen darstellen lassen, sofern es sich bei diesen Eingabegrößen um Flüsse handelt. Diese Funktionen ergeben sich aus den Taylorentwicklungen der y_{Fl} um den Arbeitspunkt $\mathbf{x}_{Fl,0}$ bis zur ersten Ordnung:*

$$y_{Fl} \approx f_{Fl}(\mathbf{x}_{Fl,0}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) + \nabla_{\mathbf{x}_{Fl}} f_{Fl}(\mathbf{x}_{Fl}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) \big|_{\mathbf{x}_{Fl}=\mathbf{x}_{Fl,0}} \cdot (\mathbf{x}_{Fl} - \mathbf{x}_{Fl,0}), \quad (2.12)$$

d.h.³²

$$y_{Fl} \approx f_{Fl,0}(\mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) + \mathbf{g}_{Fl}(\mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) \cdot \mathbf{x}_{Fl} \quad (2.13)$$

mit

$$f_{Fl,0}(\mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) = f_{Fl}(\mathbf{x}_{Fl,0}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) - \nabla_{\mathbf{x}_{Fl}} f_{Fl}(\mathbf{x}_{Fl}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) \big|_{\mathbf{x}_{Fl}=\mathbf{x}_{Fl,0}} \cdot \mathbf{x}_{Fl,0} \quad (2.14)$$

und

$$\mathbf{g}_{Fl}(\mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) = \nabla_{\mathbf{x}_{Fl}} f_{Fl}(\mathbf{x}_{Fl}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) \big|_{\mathbf{x}_{Fl}=\mathbf{x}_{Fl,0}} \cdot \quad (2.15)$$

Die Größen \mathbf{x}_{Att} , \mathbf{x}_{Inf} und \mathbf{z} dürfen in beliebiger nichtlinearer Form in die Input-Output-Relationen der Prozesse eingehen.

Modellannahme 9 (Keine Optimierung der Attribute) *Bei den mit Hilfe des Modells deeco zu untersuchenden Fragestellungen kann auf die Optimierung der Attribute verzichtet werden.*

Nur die Flüsse, genauer die Energieströme, die Prozesse miteinander verbinden, stellen in *deeco* die Optimierungsvariablen³³ dar, was dazu führt, daß wegen der Linearität der Input-Output-Relationen (Gl. 2.13) bezüglich dieser Optimierung der Simplexalgorithmus³⁴ verwendet werden kann. Dabei ist zu beachten, daß Gl. 2.13 nur dann linear hinsichtlich der auftretenden Flüsse ist, wenn - wie oben vorausgesetzt - die Eingabegrößen in Gestalt von Attributen und prozeßexternen Einflußgrößen sowie die Zustandsgrößen selbst unabhängig von diesen Flüssen sind. Für die prozeßexternen Einflußgrößen ist dies definitionsgemäß der Fall. Um sicherzustellen, daß die Attribute und Zustandsgrößen, die eng an die Energieströme gekoppelt sind, nicht von diesen extensiven Größen beeinflusst werden, muß gefordert werden:

Modellannahme 10 (Unabhängigkeit der Zustandsgrößen von den Flüssen) *Es dürfen nur solche Größen die Funktion von Zustandsgrößen übernehmen, die durch die zu optimierenden Flüsse im Rahmen der gewählten Genauigkeit bei einer zeitlich lokalen Betrachtungsweise nicht beeinflusst werden, d.h. der momentane Wert einer Zustandsgröße $z(t)$ muß unabhängig von den zeitgleich bestimmten Werten dieser Flüsse sein. $\dot{z}(t)$ unterliegt dieser Einschränkung nicht.*

³²Die Multiplikation mit \mathbf{x}_{Fl} ist in der üblichen Weise als Skalarprodukt zu verstehen.

³³Im etwas allgemeiner gehaltenen Modellrahmen NEMESS [Gro95] wird darüber hinaus die Optimierung der (Anlagen-) Kapazitäten, die den Prozessen zugeordnet sind, in Betracht gezogen.

³⁴In der gegenwärtigen Version von *deeco* geht der konstante Teil der Input-Output-Relationen $f_{Fl,0}(\mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z})$ auch dann in die Zielfunktion und in die Nebenbedingungen (s. Kap. 2.6) ein, wenn alle Eingabegrößen des Prozesses, die Flüsse darstellen, verschwinden. Es kann sinnvoll sein, den konstanten Teil in einer solchen Situation Null zu setzen. Auf diese Möglichkeit wird verzichtet, da sie den Übergang vom Simplexalgorithmus zur wesentlich komplexeren Gemischt-Ganzzahligen Linearen Optimierung notwendig machen würde, s. z.B. [Spa92].

Zustandsgrößen können deshalb z.B. insbesondere optimierungsunabhängig vorgegebene Energieströme (z.B. der Energiebedarf eines Prozesses) sein. Beschränkt sich die Optimierung (zunächst) jeweils auf sog. Optimierungszeitintervalle³⁵, die so kurz sind, daß die Speicherenergieinhalte innerhalb dieser Intervalle auch bei variablen Flüssen als praktisch konstant angesehen werden können, so sind auch diese Energieinhalte (näherungsweise und zeitlich lokal gesehen) unabhängig von den zu optimierenden Flüssen. Sie erfüllen somit auch die hier an Zustandsgrößen gestellten Anforderungen (s.a. Abschnitt 2.6.1.2).

Modellannahme 11 (Unabhängigkeit der Attribute von den Flüssen) *Es werden nur Prozesse betrachtet, bei denen die Flüsse, die optimiert werden sollen, die Attribute im Rahmen der gewählten Genauigkeit nicht beeinflussen. Input-Output-Relationen, die als Ausgabegrößen Attribute liefern, besitzen als Eingabegrößen ausschließlich (andere) Attribute, Zustandsgrößen und prozeßexterne Einflußgrößen.*

Somit muß die Funktion f_{Att} unabhängig von x_{Fl} sein. Dies bedeutet, daß z.B. die Vorlauftemperatur eines Fernwärmenetzes der Außentemperatur angepaßt werden kann, daß sie aber nicht selbst Optimierungsvariable ist.³⁶ Die Optimierungsvariable wird in diesem Fall durch die vom Fernwärmenetz an den Verbraucher gelieferte Wärme dargestellt.³⁷ Modellannahme 11 stellt sicher, daß sich die Attribute (zumindest in guter Näherung) bereits ohne die Kenntnis der zu optimierenden Energieströme bestimmen lassen. Diese Modellannahme stellt eine Einschränkung des Anwendungsbereichs von *deeco* dar, die gewisse Prozesse von der Optimierung ausschließt. Es ist aber möglich, viele interessierende Prozesse so zu modellieren, daß diese Abhängigkeit vernachlässigt werden kann. Beispiele für Prozesse, bei denen dies der Fall ist, werden in Abschnitt 2.3.1 - 2.3.6 und im Anhang D diskutiert. Am Beispiel eines einfachen Wärmeaustauschers läßt sich dies verdeutlichen. Die durch ihn übertragene Wärme \dot{E}_Q ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$\dot{E}_Q = kA\Delta T_M. \quad (2.16)$$

Dabei ist k die als temperaturunabhängig angenommene Wärmedurchgangszahl, A die Wärmeaustauscherfläche und ΔT_M die mittlere Temperaturdifferenz (die sog. treibende Temperaturdifferenz [Bae89]). Wird nun eine Zunahme der übertragenen Wärme gewünscht, so kann dies auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Es ist möglich ΔT_M zu erhöhen, was mit einer Änderung der Attribute verbunden und im Modell *deeco* somit ausgeschlossen ist. Derselbe Effekt läßt sich aber auch durch eine Erhöhung der effektiven Wärmeaustauscherfläche³⁸ erreichen, ohne daß sich dabei die Temperaturverhältnisse ändern. Ähnliche Aussagen gelten für das Zuschalten weiterer Wärmeaustauschermodule. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Wärmeaustauscher nur für bestimmte Zeiten freizugeben. Eine höhere (mittlere) Leistung ist dann bei gleichbleibendem A und ΔT_M gleichbedeutend mit einer Erhöhung der (mittleren) Betriebszeit („Taktbetrieb“). Vorausgesetzt wird dabei, daß sich die Betriebstemperaturen in einem Zeitraum einstellen, der kurz ist im Vergleich zur jeweiligen Betriebsdauer, und daß die Verluste in den Betriebspausen vernachlässigbar sind.

Definition 18 (Prozeßinterne Grenzwerte) Zur adäquaten Beschreibung vieler energietechnischer Prozesse reichen eindeutige, d.h. in Form von Gleichungen gegebene Input-Output-

³⁵ Aus rechentechnischen Gründen kann nicht für alle Momente eine Optimierung durchgeführt werden, sondern nur für sog. Optimierungszeitintervalle, s. Def. 31.

³⁶ Dies legt z.B. auch Dubois ([Dub86], S.60) seinen Überlegungen zum optimalen Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungssystemen unter Berücksichtigung von Kurzzeitwärmespeichern zugrunde.

³⁷ Ähnlich wird auch von Spakovsky et al. [Spa92] verfahren, die eine interaktive Variation der Attribute durchführen. Eine Variation der Attribute durch variable Flüsse wird von diesen Autoren (wie hier) ebenfalls nicht berücksichtigt.

³⁸ Dies geschieht z.B. durch Klappen, die vorher nicht zugängliche Teile des Wärmeaustauschers freigeben.

Relationen alleine nicht aus. Die Vorgabe von Maximalwerten für die an den Prozessen beteiligten Energieströme und das nur innerhalb vorgegebener Grenzen variierbare Verhältnis von abgegebener elektrischer Energie und Wärme bei Entnahmekondensations-Heizkraftwerken sind Beispiele für Forderungen, die mathematisch nur mit Hilfe von Ungleichungen dargestellt werden können. Solche Ungleichungen, die neben den bisher besprochenen eindeutigen Input-Output-Relationen zur vollständigen Beschreibung eines Prozesses heranzuziehen sind, werden als *prozeßinterne Grenzwerte* bezeichnet, die sich formal als

$$\mathbf{f}_T(\mathbf{x}_{Fl}, \mathbf{x}_{Att}, \mathbf{x}_{Inf}, \mathbf{z}) \leq \mathbf{0} \quad (2.17)$$

darstellen lassen, wobei \mathbf{f}_T für eine, bezüglich der Attribute, der Zustandsgrößen und der prozeß-externen Einflußgrößen beliebig nichtlineare, vektorwertige Funktion steht. Ihre explizite Form und Komponentenzahl kann erst bei der konkreten Beschreibung eines Prozesses angegeben werden.

Modellannahme 12 (Linearität der prozeßinternen Grenzwerte) *Prozeßinterne Grenzwerte stellen ausschließlich Anforderungen an die zu optimierenden Flüsse. Die Vektorfunktionen \mathbf{f}_T werden als linear bezüglich dieser Flüsse angenommen.*

Im folgenden sollen verschiedene Typen von energietechnischen Prozessen, die sich in RZD-EVS identifizieren lassen, detailliert beschrieben werden. Die Beschreibung beginnt mit einer qualitativen Charakterisierung des jeweiligen Prozeßtyps. Da die Angabe der physikalischen Flußrichtung der Energieströme anschaulicher und gewohnter ist als die Datenflußrichtung, werden in den Prozeßschaubildern (Abb. 2.4-2.9) die physikalischen Flüsse der Energieströme wiedergegeben. Die Prozeßschaubilder wurden dabei so gewählt, daß auf der linken Seite alle Energieströme aufgeführt sind, die in das zum Prozeß gehörende System eintreten. Diese Seite wird im folgenden deswegen auch als *energetische Entrance-Seite* bezeichnet. Entsprechend steht der Begriff *energetische Exit-Seite* für die rechte Seite, wo alle austretenden Energieströme dargestellt werden. Um Verwechslungen von Flüssen und Attributen, die immer Energieströmen zugeordnet sind, mit prozeßexternen Einflußgrößen zu vermeiden, wirken letztere von „oben“ her auf die Systeme ein. Bei ihnen ist ausschließlich die Datenflußrichtung angegeben. Der Datenfluß der Attribute ist prozeßtypunabhängig und wird erst durch Angabe des zugeordneten Nettoenthalpiestromtyps (vgl. Def. 16) näher bestimmt. Welche Richtung des Datenflusses der Energieströme der Modellierung der Prozeßtypen zugrundeliegt, läßt sich im mathematischen Teil der Prozeßtypbeschreibung (Modellannahmen 13 - 18) an der gewählten Form der Input-Output-Relationen sowie der Zustandstransformationsgleichungen erkennen. Die jeweiligen Input-Output-Relationen und Zustandstransformationsgleichungen, die die mathematische „Hülle“ des betrachteten Prozeßtyps bilden, werden i.allg. ohne weitergehende Begründung postuliert. Sie besitzen somit keine Allgemeingültigkeit. Die in dieser Arbeit betrachteten konkreten Beispielprozesse (s.a. Anh. D) lassen sich jedoch in den durch die Modellannahmen 13 - 18 vorgegebenen (formalen) Rahmen einfügen. Die Beschreibung dieser Beispielprozesse kann in dieser Arbeit aus Platzgründen heraus nicht in voller Breite erfolgen. Sie beschränkt sich häufig auf Aspekte, die die Rolle der intensiven Größen deutlich werden läßt. Bezüglich weiterer Details muß auf die jeweils angegebene Literatur verwiesen werden. Aufgrund der Fülle der notwendigen Variablen, besitzen die verwendeten Variablenbezeichnungen nur lokale Gültigkeit, d.h. sie verlieren ihre Ursprungsbedeutung, sobald sie in anderen Beispielen abweichend definiert werden. Für die Beispielprozesse wird eine Programmmodul-„bibliothek“ erstellt, die der Computerversion des Modells *deeco* die explizite Form der Input-Output-Relationen und der Zustandstransformationsgleichungen dieser Prozesse zur Verfügung stellt. Im Gegensatz zu rein linearen Energieoptimierungsmodellen, wird im Modell *deeco* auch der nichtlineare Einfluß zeitlich fluktuierender intensiver Größen auf die Input-Output-Relationen berücksichtigt. Wie die intensiven Größen konkret in diese

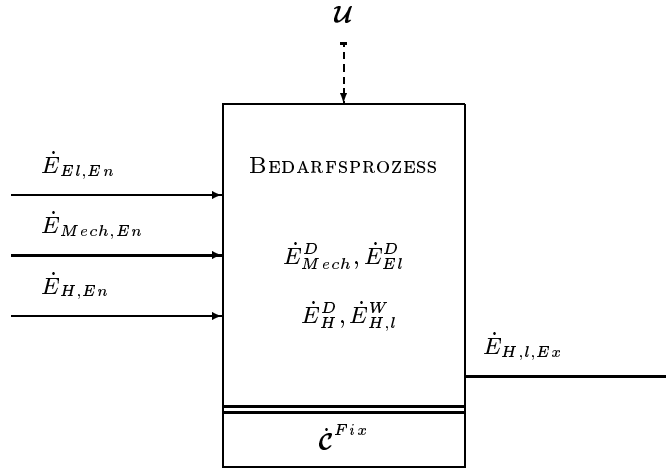


Abbildung 2.4: Bedarfsprozeß. Datenflüsse werden, wie auch bei den folgenden Prozessschaubildern, durch unterbrochene Pfeile, Energieströme mit Hilfe durchgezogener Pfeile deutlich gemacht.

Relationen und in die Zustandstransformationsgleichungen eingehen, ist von Prozeß zu Prozeß verschieden. Es zeigt sich aber, daß die Aussagen der bezüglich der Attribute, der prozeßexternen Einflußgrößen und Zustandsgrößen relativ abstrakt gehaltenen Input-Output-Relationen (Modellannahmen 13 - 18 u. 21) ausreichen, um ein in sich widerspruchsfreies Optimierungsmodell zu erstellen. Weitergehende Forderungen an die Form der Input-Output-Relationen bzw. der Abhängigkeit der differentiellen Kenngrößen von den Attributen, Einfluß- und Zustandsgrößen würde die Zahl der Prozesse, die betrachtet werden können, zu sehr einschränken. Sollen Prozesse bei der Optimierung eines Energieversorgungssystems berücksichtigt werden, die in dieser Arbeit nicht aufgeführt sind, so muß der Modellanwender, sofern sich der Prozeß quantitativ in den Rahmen der hier vorgegebenen Prozeßtypen einfügen läßt, dem Computerprogramm nur ein weiteres Programmodul zur Verfügung stellen. Ein solches Modul enthält Informationen über den Prozeßtyp, die Typen aller Nettoenthalpieströme gemäß Def. 16, die explizite Form der Abhängigkeit der differentiellen Kenngrößen und der auslastungsunabhängigen Energieströme ($\dot{E}_{\alpha,Ex,0}$ bzw. $\dot{E}_{\alpha,En,0}$, $\alpha \in \{El, Mech, Q, H, Fuel, P\}$) von den zeitlich fluktuierenden Attributen, prozeßexternen Einflußgrößen und Zustandsgrößen, die explizite Form der Input-Output-Relationen, die Attribute als Ausgabegrößen liefern, sowie die explizite Form der prozeßinternen Grenzwerte und Zustandstransformationsgleichungen. Die Berücksichtigung von zeitlich fluktuierenden Attributen, Einfluß- und Zustandsgrößen ist mit vertretbarem Daten- und Rechenaufwand nur möglich, wenn dabei gleichzeitig der Genauigkeitsanspruch bei der Modellierung der Einzelanlagen – im Vergleich zu dem in den Ingenieurwissenschaften Üblichen – auf das für die Beantwortung der hier interessierenden Fragen ausreichende Maß gesenkt wird.

2.3 Energietechnische Prozesse

2.3.1 Bedarfsprozeß

Definition 19 (Bedarfsprozesse) *Bedarfsprozesse* bilden das letzte Glied in der Kette der Energieumwandlung, die von der Gewinnung der Primärenergie bis zur Bereitstellung einer Energiedienstleistung reicht. Ein Bedarfsprozeß befindet sich deshalb in unmittelbarer Nähe zur Schnittstelle zwischen Verbraucher und EVS. Der Bedarfsprozeß stellt das Bindeglied zwischen einer nicht meßbaren Energiedienstleistung und meßbaren Energiebedarfsgrößen (z.B. Wärme-

menge pro Zeiteinheit, Vorlauftemperatur und Rücklauftemperatur, etc.) dar. Die Systemgrenzen des Bedarfsprozesses sind dabei so zu legen, daß alle relevanten Daten bequem bestimmbar sind. Je näher sich die Meßpunkte an der Stelle befinden, an der die Energiedienstleistung erbracht wird, desto größer ist der technische Spielraum, der der Optimierung zugrundeliegt. Die so gewonnenen Daten definieren den *Energiebedarf*. Sie lassen sich somit nicht immer einem der gängigen energiewirtschaftlichen Konzepte, wie Endenergiebedarf oder Nutzenergiebedarf, zuordnen. Die Deckung des Bedarfs erfolgt durch Aufnahme von elektrischer oder mechanischer Energie ($\dot{E}_{El,En}$ oder $\dot{E}_{Mech,En}$) bzw. Nettoenthalpie ($\dot{E}_{H,En}$). Bei der Befriedigung einer Energiedienstleistung kann Abwärme entstehen, die vom Bedarfsprozeß nicht weiter genutzt wird und somit anderen Prozessen zur Verfügung steht. Ein Bedarfsprozeß kann dabei verschiedene Arten von Abwärmeströmen produzieren, die durch den Index l unterschieden und zur Menge $\{l\}$ zusammengefaßt werden. Rückgewonnen verlassen sie in Form von Nettoenthalpieströmen $\dot{E}_{H,l,Ex}$ den Bedarfsprozeß. Alle Energieströme, die an einem Bedarfsprozeß beteiligt sein können, sind in Abb. 2.4 wiedergegeben.

Modellannahme 13 (Mathematische Modellierung von Bedarfsprozessen)

Der im wesentlichen durch die natürliche und sozioökonomische Umwelt (dargestellt durch den Umweltdatenvektor \mathbf{U} , Def. 3) determinierte Bedarf an mechanischer Energie³⁹ \dot{E}_{Mech}^D , elektrischer Energie \dot{E}_{El}^D oder Nettoenthalpie \dot{E}_H^D stellt eine Zustandsgröße des Bedarfsprozesses dar. Jeder vorhandene Energiebedarf muß durch einen entsprechenden Energiestrom $\dot{E}_{\alpha,En}$, $\alpha \in \{Mech, El, H\}$, der in den Bedarfsprozeß eintritt, befriedigt werden, d.h. es soll gelten:

$$\dot{E}_{\alpha,En} = \dot{E}_{\alpha}^D(\mathbf{U}), \quad \alpha \in \{El, Mech\} \quad (2.18)$$

sowie

$$\dot{E}_{H,En} = \dot{E}_H^D(\mathcal{J}_{En,In}, \mathbf{U}), \quad (2.19)$$

wobei die Gesamtheit der Komponenten des Vektors \mathcal{J}_{En} , die gemäß der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme (s. Def. 16) (intensive) Eingabegrößen darstellen, mit $\mathcal{J}_{En,In}$ bezeichnet wird. \mathcal{J}_{En} selbst steht für alle intensiven Größen, die dem Nettoenthalpiestrom zugeordnet und neben $\dot{E}_{H,En}$ zur vollständigen Beschreibung dieses Nettoenthalpiestromes erforderlich sind (s. Def. 7). $\mathcal{J}_{En,Out}$ enthält die entsprechenden intensiven Ausgabegrößen. Welche dies sind, d.h. welcher Typ dem Nettoenthalpiestrom zugeordnet wird, ist von Bedarfsprozeß zu Bedarfsprozeß verschieden. Er soll deshalb auch hier (und im folgenden) nicht näher spezifiziert werden.

Die Komponenten des Umweltdatenvektors \mathbf{U} (z.B. Wetterdaten und Auslastungsfaktoren industrieller Prozesse) stellen Eingabegrößen dar. Die vom Bedarfsprozeß nachgefragten Energieströme sind Ausgabegrößen. Die ihnen zugeordneten Attribute können sowohl Eingabe- als auch Ausgabegrößen sein.

Zwischen den zu $\dot{E}_{H,En}$ gehörenden intensiven Ausgabegrößen $\mathcal{J}_{En,Out}$ sowie den (und nur den) Eingabegrößen $\mathcal{J}_{En,In}$ und \mathbf{U} sowie der Zustandsgröße \dot{E}_H^D wird ein beliebig nicht-linearer Zusammenhang zugelassen, der sich formal beschreiben läßt durch:

$$\mathcal{J}_{En,Out} = \mathcal{J}_{En,Out}(\mathcal{J}_{En,In}, \mathbf{U}, \dot{E}_H^D). \quad (2.20)$$

Die Abhängigkeit von $\mathcal{J}_{En,Out}$ vom Energiebedarf \dot{E}_H^D widerspricht nicht der Modellannahme 11, da es sich bei \dot{E}_H^D um eine Zustandsgröße handelt und nicht um einen Energiestrom, der optimiert werden soll.

³⁹Eine Erläuterung der Indizierungssystematik findet sich im Anh. A.

Zu jedem Abwärmestrom $l \in \{l\}$ existiert eine Zustandsgröße $\dot{E}_{H,l}^W$, die die maximal nutzbare Abwärme bei gegebenen Eingabegrößen wiedergibt. Diese Wärme läßt sich mit Hilfe von Nettoenthalpieströmen $\dot{E}_{H,l,Ex}$ rückgewinnen, deren Attribute die Komponenten der Vektoren $\mathcal{J}_{l,Ex}$, $l \in \{l\}$ bilden, und für die gilt:⁴⁰

$$\forall l \in \{l\} \quad \dot{E}_{H,l,Ex} \leq (\text{bzw. } =) \dot{E}_{H,l}^W(\mathcal{J}_{l,Ex,In}, \mathcal{U}), \quad (2.21)$$

wobei die Gesamtheit der Komponenten des Vektors $\mathcal{J}_{l,Ex}$, die Eingabegrößen darstellen, mit $\mathcal{J}_{l,Ex,In}$ bezeichnet wird. Die Einbeziehung dieser Abhängigkeit von $\mathcal{J}_{l,Ex,In}$ ermöglicht es, z.B. Prozesse zu modellieren, bei denen die Höhe der nutzbaren Abwärme beeinflusst wird durch die Rücklaufftemperatur des Nettoenthalpiestromes, der zum Transport der rückgewonnenen Wärme verwendet wird. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn dieser unter Verwendung eines Gegenstrom-Wärmeaustauschers zur Nutzung der Wärme in Abwässern herangezogen wird.

Die intensiven Ausgabegrößen $\mathcal{J}_{l,Ex,Out}$, die der Abwärmemenge $\dot{E}_{H,l,Ex}$ der Sorte $l \in \{l\}$ gemäß der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme (s. Def. 16) zugeordnet sind, müssen folgender Input-Output-Relation gehorchen:

$$\forall l \in \{l\} \quad \mathcal{J}_{l,Ex,Out} = \mathcal{J}_{l,Ex,Out}(\mathcal{J}_{l,Ex,In}, \mathcal{U}, \dot{E}_{H,l}^W). \quad (2.22)$$

Verallgemeinerte variable Kosten treten beim Bedarfsprozeß nicht auf.

Reichen die vorgegebenen Eingabegrößen nicht aus, um den Energiebedarf eindeutig festzulegen, so können auch Zeitreihen des (z.B. direkt gemessenen) Energiebedarfs und Abwärmeangebots herangezogen werden. Die programmtechnische Aufgabe des Bedarfsprozesses beschränkt sich in diesem Fall auf das Einlesen der Bedarfs- und Abwärmedaten aus den Dateien, die die gemessenen extensiven (und evtl. intensiven) Daten enthalten.

Beispiel: Raumwärmebedarf

Im folgenden soll die Beheizung eines Gebäudes als Beispiel für einen Bedarfsprozeß näher betrachtet werden. Aufgabe dieses Bedarfsprozesses ist es, die Energie \dot{E}_H^D bereitzustellen, die aufgrund der Wärmeverluste des Gebäudes notwendig ist, um die Energiedienstleistung „Aufrechterhaltung einer vorgegebenen Raumtemperatur T_I “ von etwa 293 K zu erbringen. Diese Energie wird bei Warmwasser-Zentralheizungssystemen durch ein Wärmetransportmittel (Wasser, Massenstrom \dot{m}) in Form eines Nettoenthalpiestromes $\dot{E}_{H,En}$ (mit der Vorlauftemperatur $T_{F,En}$) geliefert. Nach Abgabe der Wärme $\dot{E}_H^D = \dot{E}_{H,En}$ durch die sog. Heizflächen verläßt das Wärmetransportmittel den Bedarfsprozeß mit der Rücklaufftemperatur $T_{R,En}$. Das System des Bedarfsprozesses besteht aus der zentralen Wärmeverteilung inklusive der beteiligten Heizkörper. $T_{F,En}$ und $T_{R,En}$ lassen sich in den entsprechenden Leitungen im Heizungsraum messen. Der Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,En}$ ergibt sich bei temperaturunabhängig angenommener spezifischer Wärmekapazität⁴¹ c des Wärmetransportmittels wie folgt:

$$\dot{E}_{H,En} = \dot{m}c(T_{F,En} - T_{R,En}). \quad (2.23)$$

Zur Wärmeübertragung zwischen Heizfläche und Raumluft ist ein Temperaturunterschied zwischen beiden erforderlich. Da die Größe der Heizfläche vorgegeben ist, muß die mittlere Temperatur des Wärmetransportmittels erhöht werden, wenn der benötigte Wärmestrom in den Raum

⁴⁰Gelegentlich ist es sinnvoll, anstelle des \leq Zeichens in Gl. 2.21 ein $=$ zu verwenden, d.h. eine vollständige Abgabe der maximal zur Verfügung stehenden Abwärme zu erzwingen, z.B. weil dies aufgrund einer erforderlichen Kühlung des Prozesses notwendig ist. Welches der beiden Zeichen bei der konkreten Modellierung eines Prozesses verwendet wird, ist von Prozeß zu Prozeß sowie evtl. von Abwärmestrom zu Abwärmestrom verschieden.

⁴¹Die Wärmekapazitäten fast aller Materialien variieren mit der Temperatur. Strenggenommen ist damit die angenommene Temperaturunabhängigkeit nicht realisierbar. Für praktische Fälle wird es aber allgemein akzeptiert, mit geeigneten Mittelwerten der Wärmekapazitäten zu rechnen, solange keine Diskontinuitäten, z.B. aufgrund von Phasenübergängen, auftreten [Mie81], S. 2.19. Im folgenden wird stets stillschweigend vorausgesetzt, daß sich die Wärmekapazitäten in guter Näherung durch solche temperaturunabhängigen Mittelwerte beschreiben lassen.

hinein, der bei vernachlässigbaren Verlusten mit \dot{E}_H^D quantitativ übereinstimmt, ansteigt. Die Wärmeleistung einer Heizfläche wird durch die Heizflächengröße, die Vorlauf- und Rücklauftemperatur, die Raumtemperatur und den Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmt. Richarts schreibt dazu: „Heizflächen geben ihre Wärme an den Raum durch Konvektion und Strahlung ab, und zwar je nach Bauart und Einbausituation zu unterschiedlichen Anteilen. Der Strahlungsanteil und der konvektive Anteil addieren sich zur Gesamtwärmeabgabe. Insgesamt ergibt sich eine starke Nichtlinearität für die Abhängigkeit des Wärmestroms von der Temperaturdifferenz. Bei hohen Heizflächentemperaturen tritt ein erhöhter Wärmeaustausch durch Strahlung (entsprechend dem Gesetz von Stefan-Boltzmann) auf. Zusätzlich verstärkt sich die Wirkung der Thermik an der Heizfläche und führt zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten und damit auch zu höheren Wärmeübergangskoeffizienten. Diese Nichtlinearität wird im Fachschrifttum einheitlich mit dem Exponenten⁴² n für die Umrechnung der Wärmeleistung von Heizkörpern beschrieben“ [Ric82], S.23:

$$\dot{E}_H^D = \dot{E}_{H,Max}^D \left(\frac{\Delta T_M}{\Delta T_{M,Max}} \right)^n. \quad (2.24)$$

Dabei ist $\dot{E}_{H,Max}^D$ die Heizkörper-Wärmeleistung im Auslegungszustand, d.h. bei maximaler Wärmeabgabe, ΔT_M die mittlere (=logarithmische) Temperaturdifferenz (s.u.) zwischen Heizfläche und Innenraum und $\Delta T_{M,Max}$ ist die entsprechende Temperaturdifferenz im Auslegungszustand. Richarts empfiehlt bei Optimierungsrechnungen die Verwendung von $n = 1,33$ für Glieder- und Plattenheizkörper sowie $n = 1,25$ für Flächenheizungen (Fußbodenheizung, Deckenheizung) [Ric82], S.24. Einsetzen der mittleren Temperaturdifferenz⁴³

$$\Delta T_M = \frac{(T_{F,En} - T_I) - (T_{R,En} - T_I)}{\ln \frac{T_{F,En} - T_I}{T_{R,En} - T_I}} \quad (2.25)$$

in Gl. 2.24 liefert zusammen mit Gl. 2.23 (s.[Ric82], S.24 u. S.42) für die Vorlauftemperatur $T_{F,En}$:

$$T_{F,En} = \frac{1}{1-B} \left\{ (1-B)T_I - B(T_{F,En,0} - T_{R,En,0}) \frac{\dot{E}_H^D}{\dot{E}_{H,Max}^D} \right\}. \quad (2.26)$$

Dabei ist $T_{F,En,0}$ ($T_{R,En,0}$) die Vorlauf (Rücklauf-)temperatur im Auslegungszustand und für B gilt:

$$B = \exp \left\{ \ln \frac{T_{F,En,0} - T_I}{T_{R,En,0} - T_I} \cdot \left(\frac{\dot{E}_H^D}{\dot{E}_{H,Max}^D} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\}. \quad (2.27)$$

Die Rücklauftemperatur $T_{R,En}$ ergibt sich unter Verwendung von Gl. 2.23 bei konstantem \dot{m} aus

$$T_{R,En} = T_{F,En} - \frac{\dot{E}_H^D}{\dot{E}_{H,Max}^D} (T_{F,En,0} - T_{R,En,0}). \quad (2.28)$$

Bei vorgegebenem zeitabhängigen Energiebedarf \dot{E}_H^D , z.B. in Form einer an vorhandenen Gebäuden gemessenen Zeitreihe, die bei in Planung befindlichen Gebäuden auch mit Hilfe geeigneter Programme (z.B. TAS [UEC]) simuliert werden kann, ist die Vor- und Rücklauftemperatur ($T_{F,En}$ und $T_{R,En}$) bei entsprechend vorgegebenen Normwerten (= Werte der auftretenden Größen im Auslegungszustand) alleine eine Funktion der gewünschten Innentemperatur T_I . T_I kann, sofern diese Temperatur konstant ist, als Parameter angesehen werden. Bei variablen Werten für die Innentemperatur, wie sie z.B. bei vorhandener Nachtabenkung auftreten, ist T_I als Komponente des Umweltdatenvektors \mathbf{U} zu betrachten.

⁴²DIN 4703, Teil 1 und 2, Wärmeleistung von Raumheizkörpern.

⁴³Diese Gleichung wird z.B. in [Els73], S.597 hergeleitet.

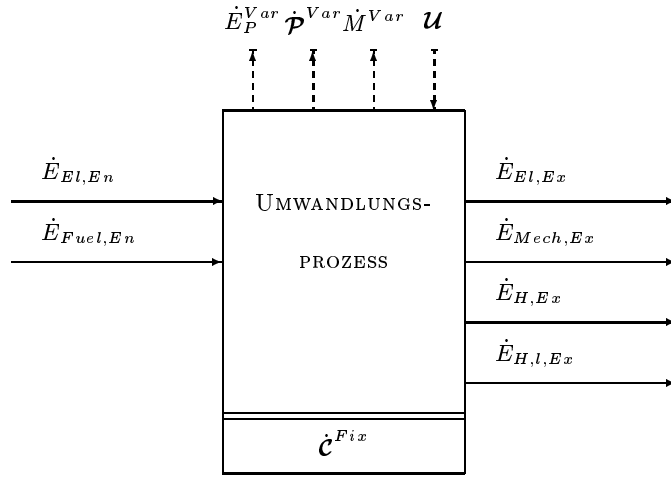


Abbildung 2.5: Umwandlungsprozeß.

Bei üblichen $90^\circ\text{C}/70^\circ\text{C}$ Heizsystemen beträgt die Vorlauftemperatur am kältesten Tag, d.h. bei maximaler Wärmeabgabe, 90°C (und die Rücklauftemperatur 70°C). An Tagen mit 15°C Außentemperatur liegt die Vorlauftemperatur etwa bei 36°C [Ric82], S.26. Diese starke Schwankung kann im Rahmen der Untersuchung von Konkurrenzeffekten bei der gleichzeitigen Nutzung von Techniken der rationellen Energieverwendung und solchen der Nutzung der Solarthermie aufgrund des erheblichen Einflusses dieser Temperatur auf die Wirkungsgrade der Techniken (z.B. Wärmepumpen) nicht vernachlässigt werden. Dieser empirische Befund erzwingt somit im Modell *deeco* die explizite Berücksichtigung zeitabhängiger intensiver Größen.

Beim Raumwärmebedarfsprozeß stellen (so wie er hier modelliert wird) der Wärmebedarf $\dot{E}_{H,En}$ und alle Komponenten von \mathcal{J}_{En} (insbesondere $T_{F,En}$ und $T_{R,En}$) Ausgabegrößen dar (d.h. $\mathcal{J}_{En} = \mathcal{J}_{En,Out}$, Nettoenthalpiestromtyp 4, s. Def. 16), die neben dem vorgegebenem Energiebedarf nur vom Umweltdatenvektor \mathbf{u} (genauer: von seiner Komponente T_I), der eine Eingabegröße darstellt, abhängig sind.

2.3.2 Umwandlungsprozeß

Definition 20 (Umwandlungsprozesse) *Umwandlungsprozesse* dienen zur Erzeugung von Wärme $\dot{E}_{H,Ex}$, elektrischer Energie $\dot{E}_{El,Ex}$ oder mechanischer Energie $\dot{E}_{Mech,Ex}$ aus chemischer Energie⁴⁴ $\dot{E}_{Fuel,En}$, die in Brennstoffen enthalten ist. Sie umfassen z.B. Kraftwerke, Heizkraftwerke, Dieselmotoren oder Heizkessel. Die Umwandlung der chemischen Energie $\dot{E}_{Fuel,En}$ der Brennstoffe in andere Energieformen verursacht neben den verallgemeinerten fixen Kosten die verallgemeinerten variablen Kosten \dot{M}^{Var} , \dot{E}_P^{Var} und $\dot{\mathcal{P}}^{Var}$. Darüber hinaus können verschiedene, nutzbare Abwärmeströme entstehen. $\{l\}$ bezeichnet die Menge⁴⁵ dieser Abwärmeströme, die mit Hilfe von Nettoenthalpieströmen $\dot{E}_{H,l,Ex}$, $l \in \{l\}$ rückgewonnen werden können. Viele Umwandlungsprozesse benötigen zur Erfüllung ihrer Aufgaben (z.B. für Steuerzwecke) elektrische (Hilfs-)Energie $\dot{E}_{El,En}$. Alle Energieströme, die an einem Umwandlungsprozeß beteiligt sein können, sind in Abb. 2.5 wiedergegeben.

⁴⁴Darunter wird im folgenden auch die in Kernbrennstoffen enthaltene nukleare Energie subsumiert.

⁴⁵Zur Bezeichnung dieser Menge wird dasselbe Symbol verwendet wie zur Beschreibung der Menge der Abwärmeströme eines Bedarfsprozesses. Diese Übereinstimmung ist beabsichtigt. Sobald Unterscheidungsbedarf besteht (s. Kap. 2.4) wird dieses Symbol, ebenso wie alle anderen auftretenden Größensymbole, durch Hinzufügen eines prozeßunterscheidenden Index näher bezeichnet.

Modellannahme 14 (Mathematische Modellierung von Umwandlungsprozessen)

Die Ausgabegrößen des Prozesses, die Attribute des Nettoenthalpiestromes $\dot{E}_{H,Ex}$ sind, müssen folgender Input-Output-Relation gehorchen:

$$\mathcal{J}_{Ex,Out} = \mathcal{J}_{Ex,Out}(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathcal{U}). \quad (2.29)$$

$\mathcal{J}_{Ex,Out}$ bezeichnet dabei die dem Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,Ex}$ gemäß der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme (s. Def. 16) zugeordneten intensiven Ausgabegrößen; $\mathcal{J}_{Ex,In}$ die entsprechenden Eingabegrößen.

Für die intensiven Ausgabegrößen $\mathcal{J}_{l,Ex,Out}$, die dem wärmerückgewinnenden Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,l,Ex}$ der Sorte $l \in \{l\}$ gemäß der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme (s. Def. 16) zugeordnet sind, soll gelten:

$$\forall l \in \{l\} \quad \mathcal{J}_{l,Ex,Out} = \mathcal{J}_{l,Ex,Out}(\mathcal{J}_{l,Ex,In}, \mathcal{U}), \quad (2.30)$$

wobei die entsprechenden intensiven Eingabegrößen mit $\mathcal{J}_{l,Ex,In}$ bezeichnet werden.

$\mathcal{J}_{\{l\},Ex,In}$ stellt im folgenden die Gesamtheit aller intensiven Eingabegrößen dar, die Nettoenthalpieströmen zugeordnet sind, die zur Rückgewinnung von Wärme herangezogen werden.

Die für die Energieumwandlung erforderliche elektrische Energie und der Verbrauch an chemischer Energie $\dot{E}_{\alpha,En}$, $\alpha \in \{El, Fuel\}$ sollen folgender Beziehung gehorchen:

$$\dot{E}_{\alpha,En} = \dot{E}_{\alpha,En,0}(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathcal{J}_{\{l\},Ex,In}, \mathcal{U}) + \sum_{\beta \in \{El, Mech, H\}} \lambda_{\beta}^{\alpha}(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathcal{J}_{\{l\},Ex,In}, \mathcal{U}) \cdot \dot{E}_{\beta,Ex}. \quad (2.31)$$

$\dot{E}_{\alpha,En,0}$ stellt dabei einen auslastungsunabhängigen Bedarf an elektrischer oder chemischer Energie dar.

Die Rückgewinnung der Abwärme der Sorte $l \in \{l\}$ wird mathematisch beschrieben durch:⁴⁶

$$\dot{E}_{H,l,Ex} \leq (\text{bzw. } =) \dot{E}_{H,l,Ex,0}(\mathcal{J}_{l,Ex,In}, \mathcal{U}) + \sum_{\beta \in \{El, Mech, H\}} \mu_{\beta}^{H,l}(\mathcal{J}_{l,Ex,In}, \mathcal{U}) \cdot \dot{E}_{\beta,Ex}. \quad (2.32)$$

Dabei stellt die rechte Seite der (Un-)Gleichung den maximal nutzbaren Abwärmestrom dar; die linke den davon tatsächlich wiedergewonnenen Teil. $\dot{E}_{H,l,Ex,0}$ bezeichnet einen auslastungsunabhängig anfallenden, nutzbaren Abwärmestrom. Die variablen Emissionen $\dot{\mathcal{P}}^{Var}$, die mit der Umwandlung der chemischen Energie $\dot{E}_{Fuel,En}$ verbunden sind, ergeben sich bei bekanntem $\dot{E}_{Fuel,En}$ aus

$$\dot{\mathcal{P}}^{Var} = \varpi_{Fuel} \dot{E}_{Fuel,En}. \quad (2.33)$$

Dabei ist ϖ_{Fuel} der Vektor der spezifischen Emissionsfaktoren, dessen brennstoff- und technikabhängigen Komponenten $\varpi_{\nu, Fuel}$, $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$, als auslastungsunabhängig angenommen werden und angeben, welche Mengen des betrachteten Schadstoffes oder klimarelevanten Gases bei der Umwandlung einer Einheit chemischer Energie anfallen.

Der variable Primärenergieeinsatz \dot{E}_P^{Var} des Umwandlungsprozesses umfaßt nur den Primärenergieaufwand, der durch den Betrieb des Prozesses verursacht wird und über den brennstoffgebundenen Primärenergieeinsatz hinausgeht. Man kann sich darunter z.B. den Primärenergieaufwand zur Beseitigung der Feststoffe, die durch die Rauchgasreinigung eines Kraftwerkes auftreten, vorstellen. Der brennstoffgebundene Primärenergieeinsatz geht bereits beim Import des Brennstoffes ins EVS mit Hilfe eines Import-Export-Prozesses (s. Kap. 2.3.5) in die Gesamtprimärenergiebilanz des EVS ein. Entsprechende Überlegungen gelten für die variablen monetären Kosten \dot{M}^{Var} . Auch hier werden nur solche gewertet, die über die reinen Brennstoffkosten hinausgehen.

⁴⁶Siehe auch Fußnote zu Gl. 2.21.

Es wird angenommen:

$$\dot{E}_P^{Var} = \pi_{Fuel} \dot{E}_{Fuel,En} \quad (2.34)$$

und

$$\dot{M}^{Var} = \kappa_{Fuel} \dot{E}_{Fuel,En}. \quad (2.35)$$

Der auf eine Einheit der chemischen Energie $\dot{E}_{Fuel,En}$ bezogene spezifische Primärenergieeinsatz π_{Fuel} und die ebenfalls darauf bezogenen spezifischen Kosten κ_{Fuel} sind i.allg. technik- und brennstoffabhängig. Beide Kenngrößen werden aber als auslastungsunabhängig angenommen.

Die Werte der Eingabegrößen $\dot{E}_{H,Ex}$, $\dot{E}_{El,Ex}$ und $\dot{E}_{Mech,Ex}$ können durch Ungleichungen in Form von prozeßinternen Grenzwerten (s. Def. 18 und Modellannahme 12) begrenzt sein, was z.B. die Modellierung von Entnahmekondensations-Heizkraftwerken ermöglicht.

Beispiel: Gegendruck-Heizkraftwerk

Im folgenden soll ein Gegendruck-Heizkraftwerk als Beispiel für einen Umwandlungsprozeß näher beschrieben werden. Bei diesem handelt es sich im wesentlichen um ein konventionelles Kondensationskraftwerk. Der einzige Unterschied zwischen diesem und jenem besteht darin, daß beim Gegendruck-Heizkraftwerk die Wärme, die bei der Kondensation des Abdampfes nach dem Verlassen der Turbine entsteht, nicht an die Umwelt abgegeben wird (z.B. im Kühlturm oder durch Frischwasserkühlung), sondern an Bedarfsprozesse, die Wärme nachfragen. Diese Art der Kraft-Wärme-Kopplung führt zu einer starren Kopplung der produzierten elektrischen Energie $\dot{E}_{El,Ex}$ mit der gleichzeitig abgegebenen Wärme⁴⁷ $\dot{E}_{H,1,Ex}$, die durch die sog. Stromkennziffer σ_{Cog} beschrieben wird:

$$\sigma_{Cog} := \frac{\dot{E}_{El,Ex}}{\dot{E}_{H,1,Ex}}. \quad (2.36)$$

Bei der reinen Erzeugung elektrischer Energie in Kondensationskraftwerken wird eine möglichst tiefe Kondensationstemperatur T_{Con} angestrebt (z.B. $T_{Con} = 303$ K entsprechend einem Kondensationsdruck von 0,04 bar [Kug90], S.61). Damit die von Gegendruck-Heizkraftwerken erzeugte Wärme genutzt werden kann, muß diese aber i.allg. auf einem im Vergleich dazu höheren Temperaturniveau⁴⁸ T_M abgegeben werden. Bei sonst identischen Betriebsparametern, d.h. insbesondere bei gleicher Brennstoffzufuhr, ist deshalb die im Heizkraftwerk produzierte elektrische Energie $\dot{E}_{El,Ex}$ kleiner als die elektrische Energieproduktion $\dot{E}_{El,Con}$ eines, abgesehen vom wärmerückgewinnenden Teil, baugleichen Kondensationskraftwerks. Die Differenz $\dot{E}_{El,Con} - \dot{E}_{El,Ex}$ entspricht derjenigen elektrischen Energie, die mit der Wärme $\dot{E}_{H,1,Ex}$ hätte erzeugt werden können, wenn diese in einer Turbine bei T_M aufgenommen und die Abwärme dieser Turbine bei T_{Con} abgegeben worden wäre, d.h. es gilt⁴⁹:

$$\dot{E}_{El,Con} - \dot{E}_{El,Ex} = \eta_G \left\{ 1 - \frac{T_{Con}}{T_M} \right\} \cdot \dot{E}_{H,1,Ex}, \quad (2.37)$$

wobei $1 - \frac{T_{Con}}{T_M}$ den Carnotwirkungsgrad darstellt und der Faktor η_G die im realen Prozeß auftretenden Irreversibilitäten berücksichtigt. Es gilt $\eta_G \approx 0,7$ [Boh85], S.427. Die sog. Stromverlustkennziffer τ_{Cog} wird definiert als

$$\tau_{Cog} := \frac{\dot{E}_{El,Con} - \dot{E}_{El,Ex}}{\dot{E}_{H,1,Ex}} \quad (2.38)$$

⁴⁷Beim Gegendruck-Heizkraftwerk tritt nur eine Abwärmesorte auf ($l = 1$). Der Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,Ex}$ (s. Abb. 2.5) bleibt Prozessen vorbehalten, bei denen dieser, zumindest innerhalb gewisser Grenzen, unabhängig von $\dot{E}_{El,Ex}$ variiert werden kann, was hier aber (im Gegensatz z.B. zu Entnahmekondensations-Heizkraftwerken) nicht der Fall ist.

⁴⁸Im Sinne einer thermodynamischen Mitteltemperatur, bei der die Wärmeabgabe stattfindet [Bae89], S.99.

⁴⁹Eine strengere Ableitung der hier wiedergegebenen Beziehungen findet sich in [Boh85], S.425ff.

und ergibt sich zu:

$$\tau_{Cog} = \eta_G \left\{ 1 - \frac{T_{Con}}{T_M} \right\}. \quad (2.39)$$

Bezeichnet $T_{1,F,Ex}$ die Vorlauf- und $T_{1,R,Ex}$ die Rücklauftemperatur des Nettoenthalpiestromes $\dot{E}_{H,1,Ex}$, so läßt sich T_M bei Verwendung von Wasser als Wärmetransportmittel folgendermaßen (s. [Boh85], S.429) darstellen:

$$T_M = (T_{1,F,Ex} + \Delta T) - (T_{1,F,Ex} - T_{1,R,Ex}) \frac{n-1}{2n}. \quad (2.40)$$

Dabei stellt ΔT die Temperaturdifferenz⁵⁰ in den wärmeabführenden Wärmeaustauschern der einzelnen, insgesamt n , Erwärmungsstufen dar.

Unter der Annahme, daß die aus dem Brennstoffstrom $\dot{E}_{Fuel,En}$ mit einem Kesselwirkungsgrad von η_{Boi} bereitgestellte Wärme $\dot{E}_{H,Boi}$ im Gegendruck-Heizkraftwerk vollständig in elektrische Energie und nutzbare Wärme umgewandelt wird, gilt:

$$\dot{E}_{H,Boi} = \dot{E}_{El,Ex} + \dot{E}_{H,1,Ex}. \quad (2.41)$$

Daraus folgt:

$$\dot{E}_{H,1,Ex} = (1 - \eta_{Cog}) \dot{E}_{H,Boi}, \quad (2.42)$$

wobei η_{Cog} den Wirkungsgrad der Produktion elektrischer Energie aus $\dot{E}_{H,Boi}$ im Gegendruck-Heizkraftwerk darstellt, d.h. $\eta_{Cog} := \frac{\dot{E}_{El,Ex}}{\dot{E}_{H,Boi}}$. Die Stromkennziffer und die Stromverlustkennziffer ergibt sich somit zu:

$$\sigma_{Cog} = \frac{\eta_{Cog}}{1 - \eta_{Cog}} \quad (2.43)$$

bzw.

$$\tau_{Cog} = \frac{\eta_{Con} - \eta_{Cog}}{1 - \eta_{Cog}}. \quad (2.44)$$

Dabei ist η_{Con} der Wirkungsgrad der Produktion elektrischer Energie aus $\dot{E}_{H,Boi}$ im reinen Kondensationsbetrieb, d.h. $\eta_{Con} := \frac{\dot{E}_{El,Con}}{\dot{E}_{H,Boi}}$. Auflösen von Gl. 2.44 nach η_{Cog} und Einsetzen in Gl. 2.43 liefert:

$$\sigma_{Cog} = \frac{\eta_{Con} - \tau_{Cog}}{1 - \eta_{Con}}. \quad (2.45)$$

Für den Umwandlungsprozeß „Gegendruck-Heizkraftwerk“ nimmt somit Gl. 2.32 gemäß Gl. 2.36, 2.39 und 2.45 folgende konkrete Form an:

$$\dot{E}_{H,1,Ex} = \mu_{El}^{H,1}(\mathcal{J}_{1,Ex,In}, \mathbf{u}) \dot{E}_{El,Ex} \quad (2.46)$$

mit

$$\mu_{El}^{H,1}(\mathcal{J}_{1,Ex,In}, \mathbf{u}) = \sigma_{Cog}^{-1} = \left\{ \frac{\eta_{Con} - \eta_G \left\{ 1 - \frac{T_{Con}}{T_M} \right\}}{1 - \eta_{Con}} \right\}^{-1}. \quad (2.47)$$

Die eingesetzte chemische Energie $\dot{E}_{Fuel,En}$ ergibt sich wegen $\dot{E}_{Fuel,En} = \frac{1}{\eta_{Boi}} \cdot \dot{E}_{H,Boi}$ aus Gl. 2.41 und 2.36 zu

$$\dot{E}_{Fuel,En} = \frac{1}{\eta_{Boi}} \left(1 + \sigma_{Cog}^{-1} \right) \cdot \dot{E}_{El,Ex}. \quad (2.48)$$

⁵⁰Die Variation dieser Temperaturdifferenz bei variablen Nettoenthalpieströmen $\dot{E}_{H,1,Ex}$ wird gemäß Modellannahme 11 vernachlässigt. Sie stellt damit eine Auslegungsgröße dar. Darüber hinaus werden nur solche $T_{1,F,Ex}$ und $T_{1,R,Ex}$ betrachtet, die dazu führen, daß $T_M > T_{Con}$ gilt.

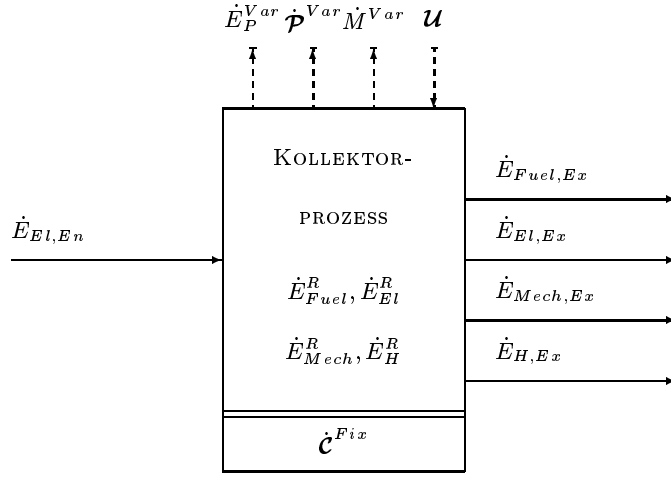


Abbildung 2.6: Kollektorprozeß

Aufgrund von Gl. 2.45 gilt:

$$\dot{E}_{FueI,En} = \frac{1}{\eta_{Boi}} \cdot \frac{1 - \tau_{Cog}}{\eta_{Con} - \tau_{Cog}} \dot{E}_{El,Ex}. \quad (2.49)$$

Für ein Gegendruck-Heizkraftwerk nimmt somit Gl. 2.31 gemäß Gl. 2.39 folgende konkrete Form an:

$$\dot{E}_{FueI,En} = \lambda_{El}^{FueI}(\mathcal{J}_{1,Ex,In}, \mathcal{U}) \dot{E}_{El,Ex} \quad (2.50)$$

mit

$$\lambda_{El}^{FueI}(\mathcal{J}_{1,Ex,In}, \mathcal{U}) = \frac{1}{\eta_{Boi}} \cdot \frac{1 - \eta_G \left\{ 1 - \frac{T_{Con}}{T_M} \right\}}{\eta_{Con} - \eta_G \left\{ 1 - \frac{T_{Con}}{T_M} \right\}}. \quad (2.51)$$

$\mu_{El}^{H,1}$ und λ_{El}^{FueI} sind somit gemäß Gl. 2.40 allein eine Funktion der Vor- und Rücklauftemperaturen $T_{1,F,Ex}$ und $T_{1,R,Ex}$ (beide enthalten in $\mathcal{J}_{1,Ex,In}$) sowie der Parameter η_{Boi} , η_{Con} , η_G , n , ΔT und T_{Con} . Die zum Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,1,Ex}$ gehörenden Attribute $T_{1,F,Ex}$ und $T_{1,R,Ex}$ stellen somit Eingabegrößen dar. Intensive Ausgabegrößen treten beim Gegendruck-Heizkraftwerk nicht auf.

2.3.3 Kollektorprozeß

Definition 21 (Kollektorprozesse) *Kollektorprozesse* nehmen Energieströme aus regenerativen Energiequellen (Sonne, Wind, etc.) auf, wandeln sie in eine nutzbare Form um und geben diese dann als elektrische Energie $\dot{E}_{El,Ex}$ (z.B. bei Photovoltaikanlagen) bzw. mechanische Energie $\dot{E}_{Mech,Ex}$ (z.B. bei der Nutzung der Windenergie), chemische Energie $\dot{E}_{FueI,Ex}$ (z.B. bei der Biomassenutzung) oder als Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,Ex}$ (z.B. bei thermischer Nutzung der Solarenergie) an andere Prozesse ab. Physikalisch gesehen tritt regenerative Energie in den Kollektorprozeß ein. Die zu ihrer Bestimmung erforderlichen Daten (z.B. die Windgeschwindigkeit) sind aber bereits im wesentlichen im Umweltdatenvektor \mathcal{U} enthalten, so daß auf die explizite Angabe der regenerativen Energie verzichtet werden kann. Ihre Nutzung und der Betrieb des Kollektorprozesses können (teilweise indirekt) mit verallgemeinerten variablen Kosten \dot{M}^{Var} , \dot{E}_P^{Var} und $\dot{\mathcal{P}}^{Var}$ verbunden sein und den Einsatz elektrischer Hilfsenergie $\dot{E}_{El,En}$ erforderlich machen. Alle Energieströme (abgesehen vom regenerativen Energieeinsatz), die an Kollektorprozessen beteiligt sein können, sind in Abb. 2.6 wiedergegeben.

Modellannahme 15 (Mathematische Modellierung von Kollektorprozessen)

Wie bereits angesprochen, wird in *deeco* auf die explizite Bestimmung des Energiestroms verzichtet, der regenerativen Energiequellen entnommen wird. Statt dessen erfolgt mit Hilfe des Umweltatenvektors direkt die Berechnung der maximalen Energiemenge \dot{E}_α^R , $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$, die vom betrachteten Kollektorprozeß abgegeben werden kann und die als Zustandsgröße betrachtet wird. Die Energieströme, $\dot{E}_{\alpha,Ex}$, $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$, die den Kollektorprozeß verlassen, müssen folgende (Un-) Gleichung erfüllen:⁵¹

$$\dot{E}_{\alpha,Ex} \leq (\text{bzw. } =) \dot{E}_\alpha^R(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathbf{u}), \quad \alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}, \quad (2.52)$$

wobei die Abhängigkeit von $\mathcal{J}_{Ex,In}$ hier und im folgenden nur dann zu berücksichtigen ist, wenn ein Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,Ex}$ abgegeben, d.h. wenn $\alpha = H$ gesetzt wird. $\mathcal{J}_{Ex,In}$ bezeichnet dabei die dem austretenden Nettoenthalpiestrom gemäß der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme (s. Def. 16) zugeordneten intensiven Eingabegrößen.

Für den elektrischen Hilfsenergieaufwand soll folgende Beziehung gelten:

$$\dot{E}_{El,En} = \dot{E}_{El,En,0}(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathbf{u}) + \lambda_\alpha^{El}(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathbf{u}) \dot{E}_{\alpha,Ex}, \quad \alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}. \quad (2.53)$$

$\dot{E}_{El,En,0}(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathbf{u})$ stellt dabei einen auslastungsunabhängigen Bedarf an elektrischer Energie dar.

Die Input-Output-Relationen der Attribute des Nettoenthalpiestroms $\dot{E}_{H,Ex}$ müssen folgende Form besitzen:

$$\mathcal{J}_{Ex,Out} = \mathcal{J}_{Ex,Out}(\mathcal{J}_{Ex,In}, \mathbf{u}, \dot{E}_H^R). \quad (2.54)$$

$\mathcal{J}_{Ex,Out}$ bezeichnet dabei die dem austretenden Nettoenthalpiestrom gemäß der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme (s. Def. 16) zugeordneten intensiven Ausgabegrößen.

Die verallgemeinerten variablen Kosten für die Bereitstellung von $\dot{E}_{\alpha,Ex}$, $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$ ergeben sich aus:

$$\dot{E}_P^{Var} = \pi_\alpha \dot{E}_{\alpha,Ex}, \quad (2.55)$$

$$\dot{\mathcal{P}}^{Var} = \varpi_\alpha \dot{E}_{\alpha,Ex}, \quad (2.56)$$

$$\dot{M}^{Var} = \kappa_\alpha \dot{E}_{\alpha,Ex}. \quad (2.57)$$

Dabei gibt der spezifische Primärenergieeinsatz π_α an, wieviele Einheiten (nicht-regenerative) Primärenergie (z.B. als Aufwand für den Anbau von Energiepflanzen und deren Transport) zur Bereitstellung einer Einheit von $\dot{E}_{\alpha,Ex}$, $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$ aufzuwenden sind. ϖ_α stellt den Vektor der spezifischen Emissionen dar. Seine Komponenten $\varpi_{\nu,\alpha}$ bzw. die spezifischen variablen Kosten κ_α geben an, welche Menge des Schadstoffes oder klimarelevanten Gases $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{NO}_x, \text{SO}_2, \dots\}$ bei der Bereitstellung einer Einheit der abgegebenen Energie emittiert wird bzw. welche Kosten dabei aufzubringen sind.

Beispiel: Thermische Nutzung der Solarenergie⁵²

Die von einer Kollektoranlage maximal abgebbare (nützliche) Wärmeleistung \dot{E}_H^R läßt sich mit Hilfe der Hottel-Whillier-Bliss-Gleichung ([Hot42], [Hot55] und [Bli59]) berechnen, die für die

⁵¹Gelegentlich ist es sinnvoll, anstelle des \leq Zeichens in Gl. 2.52 ein $=$ zu verwenden, d.h. eine vollständige Abgabe der maximal zur Verfügung stehenden Energie zu erzwingen, um z.B. die Beladung eines Energiespeichers sicherzustellen. Welches der beiden Zeichen bei der konkreten Modellierung eines Prozesses verwendet wird, ist von Prozeß zu Prozeß verschieden.

⁵²Eine ausführliche Beschreibung der thermischen Nutzung der Solarenergie findet man in [Duf80], [Bec79] und [Duf76]. Die physikalischen Grundlagen erläutert Fricke in [Fri84], S.316ff.

meisten Flachkollektorarten gültig ist und bei der ein konstanter Massenstrom \dot{m} des Wärmetransportmittels durch den Kollektor angenommen wird:

$$\dot{E}_H^R = \theta(t) F_{Rem} A_C \{ \eta_0 I - k_C (T_{R,Ex} - T_A) \}. \quad (2.58)$$

Dabei ist A_C die Kollektorfläche, k_C der Gesamtkollektorstromkoeffizient, η_0 der optische Wirkungsgrad und F_{Rem} der sog. Wärmeabfuhrfaktor. T_A gibt die Außentemperatur und I die solare Einstrahlung bezogen auf eine Kollektorflächeneinheit an. $T_{R,Ex}$ ist die Temperatur des aufzuheizenden Wärmetransportmittels am Kollektoreingang. $\theta(t)$ schaltet die Pumpen, die den Massenstrom \dot{m} antreiben, ab, sobald die nützliche Wärmeleistung kleiner wird als ein vorzugebendes Vielfaches Γ der elektrischen Energie, die zum Transport des Wärmetransportmittels benötigt wird. Gl. 2.58 stellt für den Prozeß „Thermische Nutzung der Solarenergie“ die konkrete Form der Abhängigkeit der maximal nutzbaren Energie \dot{E}_H^R von der Komponente $T_{R,Ex}$ des Vektors $\mathcal{J}_{Ex,In}$ sowie von den Komponenten I und T_A von \mathcal{U} dar (s. rechte Seite von Gl. 2.52). Mit der als temperaturunabhängig angenommenen spezifischen Wärmekapazität c (bezogen auf die Masseneinheit) ergibt sich aufgrund von

$$\dot{E}_H^R = \dot{m} c (T_{F,Ex} - T_{R,Ex}) \quad (2.59)$$

für die Ausgabegröße $T_{F,Ex}$:

$$T_{F,Ex} = T_{R,Ex} + \frac{\dot{E}_H^R}{\dot{m} c} = T_{R,Ex} + \frac{\theta(t) F_{Rem} A_C \{ \eta_0 I - k_C (T_{R,Ex} - T_A) \}}{\dot{m} c}, \quad (2.60)$$

d.h. $T_{F,Ex}$ ist bei gegebenen Anlagenparametern alleine eine Funktion der Außentemperatur, der solaren Einstrahlung und der Temperatur $T_{R,Ex}$ (also - wie gemäß Gl. 2.54 zu zeigen war - von \mathcal{U} und $\mathcal{J}_{Ex,In}$). In diesem Beispiel wird $\dot{E}_{H,Ex}$ als Typ 2 Nettoenthalpiestrom modelliert, bei dem (s. Def. 16) $T_{R,Ex}$ als Komponente von \mathcal{J}_{Ex} eine Eingabegröße und $T_{F,Ex}$ eine Ausgabegröße darstellt. Die weiteren Komponenten von \mathcal{J}_{Ex} (z.B. die Drücke) sind zeitlich konstant und werden deshalb nicht näher betrachtet. Zum Transport des Wärmetransportmittels durch die Kollektoren ist ein elektrischer Energieaufwand $\dot{E}_{El,En}$ erforderlich, der im einfachsten Fall als proportional zur Kollektorfläche angenommen werden kann:

$$\dot{E}_{El,En} = \theta(t) a A_C. \quad (2.61)$$

Der Proportionalitätsfaktor a gibt dabei den spezifischen elektrischen Pumpenenergiebedarf bezogen auf eine Kollektorflächeneinheit an. $\dot{E}_{El,En}$ besitzt somit gemäß Gl. 2.53 nur einen lastungsunabhängigen Anteil. Dieser ist aufgrund der Definition von $\theta(t)$ implizit abhängig von $T_{R,Ex}$, T_A und I , also von $\mathcal{J}_{Ex,In}$ und \mathcal{U} . Nennenswerte verallgemeinerte variable Kosten treten bei der thermischen Nutzung der Solarenergie nicht auf. Die verallgemeinerten fixen Kosten können in guter Näherung als proportional zur Kollektorfläche angenommen werden.

2.3.4 Speicherprozeß

Definition 22 (Speicherprozesse) *Speicherprozesse* dienen zur Speicherung von Wärme, elektrischer, mechanischer oder chemischer Energie (z.B. in Form von Biogas). Sie umfassen nicht nur den eigentlichen Speicher, sondern auch alle zu ihm gehörenden Belade-, Entlade- und Hilfseinrichtungen, d.h. die gesamte Speicheranlage. Jeder Speicherprozeß kann nur eine Energieform $\alpha \in \{H, El, Mech, Fuel\}$ und im Falle von Brennstoffen nur eine Brennstoffsorte speichern. Wärmespeicher können Wärme verschiedener Herkunft aufnehmen und an verschiedene energetische Prozesse wieder abgeben. $\{k\}$ bzw. $\{l\}$ steht für die Menge der entsprechenden

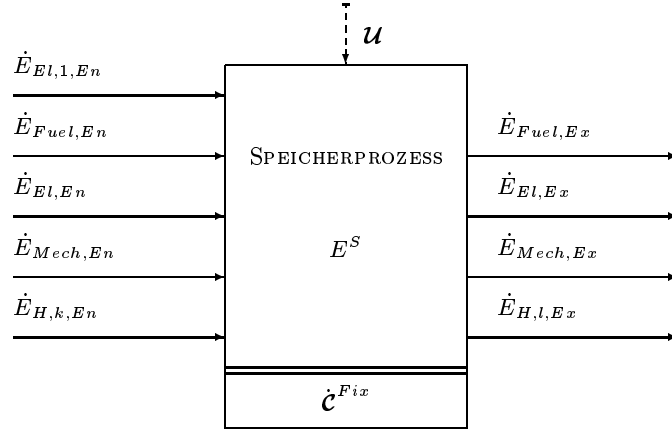


Abbildung 2.7: Speicherprozeß.

Beladeströme $\dot{E}_{H,k,En}$, $k \in \{k\}$ bzw. Entladeströme $\dot{E}_{H,l,Ex}$, $l \in \{l\}$. Der elektrische Energiestrom $\dot{E}_{El,1,En}$ dient nicht zur Bereitstellung von zu speichernder elektrischer Energie, sondern dazu, einen evtl. vorhandenen elektrischen Hilfsenergiebedarf zur Verfügung zu stellen. Die Energieströme $\dot{E}_{\alpha,En}$ bzw. $\dot{E}_{\alpha,Ex}$, $\alpha \in \{El, Mech, Fuel\}$, dienen zur Beladung bzw. Entladung des Energiespeichers. Abb. 2.7 zeigt die Energieströme, die bei Speicherprozessen auftreten können (aber nicht müssen).

Modellannahme 16 (Mathematische Modellierung von Speicherprozessen)

Charakteristisch für einen Speicherprozeß ist das Auftreten prozeßinterner Zustandsgrößen. Die folgende mathematische Modellierung beschränkt sich auf Speicherprozesse mit nur einer Zustandsgröße. Mögliche Erweiterungen werden am Ende des Abschnitts diskutiert. Es handelt sich bei dieser Zustandsgröße um den Energieinhalt des Speichers E^S , der sich durch Energiezufuhr, Energieentnahme und Energieverluste, die von der Energiezufuhr, -entnahme und vom Energieinhalt des Speichers selbst sowie vom Umweltdatenvektor abhängig sein können, zeitlich verändert. Diese Variation des Energieinhalts wird beschrieben durch eine Zustandstransformationsgleichung folgender Gestalt:

$$\frac{dE^S}{dt} = \dot{E}_{En} - \dot{E}_{Ex} - \dot{E}^L(\dot{E}_{En}, \dot{E}_{Ex}, E^S, \mathbf{u}). \quad (2.62)$$

Dabei gilt:

$$\dot{E}_{En} = \dot{E}_{\alpha,En} \quad (2.63)$$

und

$$\dot{E}_{Ex} = \dot{E}_{\alpha,Ex} \quad (2.64)$$

mit $\alpha \in \{Fuel, El, Mech\}$, falls es sich um einen Speicher für chemische, elektrische oder mechanische Energie handelt, bzw.

$$\dot{E}_{En} = \sum_{k \in \{k\}} \dot{E}_{H,k,En} \quad (2.65)$$

und

$$\dot{E}_{Ex} = \sum_{l \in \{l\}} \dot{E}_{H,l,Ex} \quad (2.66)$$

für Wärmespeicher, die durch Nettoenthalpieströme $\dot{E}_{H,k,En}$, $k \in \{k\}$, be- sowie durch $\dot{E}_{H,l,En}$, $l \in \{l\}$, entladen werden. Die Speicherverluste $\dot{E}_0^L(\dot{E}_{En}, \dot{E}_{Ex}, E^S, \mathbf{u})$ werden im Modell *deeco* als von \dot{E}_{En} und \dot{E}_{Ex} linear abhängig angenommen, d.h.

$$\dot{E}_0^L(\dot{E}_{En}, \dot{E}_{Ex}, E^S, \mathbf{u}) = \dot{E}_0^L(E^S, \mathbf{u}) + \varrho_{En}(E^S, \mathbf{u})\dot{E}_{En} + \varrho_{Ex}(E^S, \mathbf{u})\dot{E}_{Ex} \quad (2.67)$$

mit den Kenngrößen $\varrho_{En}(E^S, \mathbf{u})$ und $\varrho_{Ex}(E^S, \mathbf{u})$ sowie dem lastunabhängigen Energieverlust $\dot{E}_0^L(E^S, \mathbf{u})$, die durch Untersuchung konkreter Speicheranlagen zu bestimmen sind. Damit ergibt sich:

$$\frac{dE^S}{dt} = (1 - \varrho_{En}(E^S, \mathbf{u}))\dot{E}_{En} - (1 + \varrho_{Ex}(E^S, \mathbf{u}))\dot{E}_{Ex} - \dot{E}_0^L(E^S, \mathbf{u}). \quad (2.68)$$

Die Input-Output-Relationen intensiver Ausgabegrößen müssen folgende Form besitzen:

$$\forall l \in \{l\} \quad \mathcal{J}_{l,Ex,Out} = \mathcal{J}_{l,Ex,Out}(E^S, \mathcal{J}_{l,En,In}, \mathbf{u}) \quad (2.69)$$

und

$$\forall k \in \{k\} \quad \mathcal{J}_{k,En,Out} = \mathcal{J}_{k,En,Out}(E^S, \mathcal{J}_{k,En,In}, \mathbf{u}). \quad (2.70)$$

Die Energieentnahme $\dot{E}_{\alpha,Ex}$ mit $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, (H, l)\}$ und die Energiezufuhr $\dot{E}_{\alpha,En}$ mit $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, (H, k)\}$ sind nicht determiniert, werden aber durch prozeßinterne Grenzwerte begrenzt, die von der Zustandsgröße, von Eingabegrößen, die Attribute darstellen, und vom Umweltdatenvektor abhängig sein können (s. Def. 18).

Sind $E^{S,Min}(\mathbf{u})$ und $E^{S,Max}(\mathbf{u})$ die von der verwendeten Speicheranlage abhängigen zulässigen Minimal- und Maximalwerte der Zustandsgröße, so muß zu jedem Zeitpunkt folgende Bedingung erfüllt sein:

$$E^{S,Min}(\mathbf{u}) \leq E^S \leq E^{S,Max}(\mathbf{u}). \quad (2.71)$$

Für den elektrischen Hilfsenergiebedarf soll gelten:

$$\dot{E}_{El,1,En} = \dot{E}_{El,1,En,0}(E^S, \mathbf{u}) + \sigma^{El,1}(E^S, \mathbf{u})\dot{E}_{En} + \lambda^{El,1}(E^S, \mathbf{u})\dot{E}_{Ex}. \quad (2.72)$$

Dabei sind $\sigma^{El,1}(E^S, \mathbf{u})$, $\lambda^{El,1}(E^S, \mathbf{u})$ und $\dot{E}_{El,1,En,0}(E^S, \mathbf{u})$ in Erweiterung von Def. 17 als lastunabhängige Kenngrößen anzusehen, die durch Analyse konkreter Speicheranlagen bestimmt werden können.

Die bisherige Diskussion bezog sich auf Speicherprozesse mit nur einer Zustandsgröße. Diese Beschränkung bietet erhebliche numerische Vorteile bei der Anwendung eines vollständig dynamischen Optimierungsverfahrens (s. Anhang E.2). Sie ist aber im Rahmen eines quasidynamischen Optimierungsverfahrens (s. Abschnitt 2.6.1.2) nicht zwingend erforderlich. Die hier wiedergegebene Beschreibung läßt sich bei ausschließlicher Anwendung des quasidynamischen Optimierungsverfahrens sinngemäß, d.h. insbesondere unter Beachtung der Modellannahmen 7-12, auch auf Speicherprozesse mit mehr als einer Zustandsgröße erweitern. Dies erlaubt z.B. die näherungsweise Modellierung von temperatur-geschichteten Wärmespeichern in Form von Speichern mit endlich vielen, voneinander getrennten Schichten, wobei jeder Schicht eine einheitliche Temperatur zugeordnet wird.⁵³

Speicherprozesse verursachen (direkt) keine verallgemeinerten variablen Kosten. Die Größe der Speicher, d.h. ihr maximaler Energieinhalt, ist optimierungsunabhängig vorzugeben. Die verallgemeinerten fixen Kosten sind eine Funktion der Speichergröße.

Beispiel: Temperatur-ungeschichteter Wärmespeicher

Zur Speicherung von Wärme werden heute überwiegend Speicher eingesetzt, die diese Wärme mit Hilfe des Mediums Wasser in Form von sensibler Wärme speichern. Diese Speicher besitzen

⁵³Es handelt sich dabei um ein vor allem im Bereich der Simulation von thermischen Solaranlagen häufig verwendetes Näherungsverfahren, s. z.B. [Duf80], S.332.

i.allg. keine einheitliche Temperatur, d.h. sie sind mehr oder weniger temperatur-geschichtet. Im folgenden soll als ein möglicher Grenzfall eines solchen Speichers ein sog. gut-durchmischter Speicher modelliert werden (s. z.B. [Duf80], S.330), bei dem z.B. durch ein Rührwerk eine im ganzen Speicher einheitliche Temperatur T_S realisiert wird. Ist $(Mc)_S$ die Gesamtwärmekapazität (bei konstantem Druck) des Speichers, so läßt sich der Energieinhalt E^S (genauer: Enthalpieinhalt) des Speichers wie folgt angeben

$$E^S = (Mc)_S(T_S - T_{S,0}). \quad (2.73)$$

Dabei ist $T_{S,0}$ die gewählte Bezugstemperatur zur Berechnung des Speicherenergieinhalts (z.B. $T_{S,0}=273$ K). Ist k_S die Wärmedurchgangszahl der Speicherhülle, A_S die Fläche der Speicherhülle und T_A die Außentemperatur⁵⁴, so ergeben sich die Wärmeverluste \dot{E}^L des Speichers zu:

$$\dot{E}^L = (kA)_S(T_S - T_A), \quad (2.74)$$

d.h. es gilt

$$\varrho_{En}(E^S, \mathbf{u}) = \varrho_{Ex}(E^S, \mathbf{u}) = 0 \quad (2.75)$$

und

$$\dot{E}_0^L(E^S, \mathbf{u}) = (kA)_S \left\{ \frac{E^S}{(Mc)_S} + T_{S,0} - T_A \right\}. \quad (2.76)$$

Die zeitliche Entwicklung des Energieinhalts eines Speichers, der durch einen Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,1,En}$ be- und durch $\dot{E}_{H,1,Ex}$ entladen wird, läßt sich beschreiben durch:

$$\frac{dE^S}{dt} = \dot{E}_{H,1,En} - \dot{E}_{H,1,Ex} - \dot{E}^L. \quad (2.77)$$

Für den Speicherprozeß „Temperatur-ungeschichteter Wärmespeicher“ nimmt somit Gl. 2.62 folgende konkrete Gestalt an:

$$\frac{dE^S}{dt} = \dot{E}_{H,1,En} - \dot{E}_{H,1,Ex} - (kA)_S \left\{ \frac{E^S}{(Mc)_S} + T_{S,0} - T_A \right\}. \quad (2.78)$$

Die Temperaturen $T_{1,F,En}$ und $T_{1,R,Ex}$ der Wärmetransportmittelströme, die in den Speicher eintreten, stellen intensive Eingabegrößen dar. Sind im Speicher keine Wärmeaustauscher angebracht, so stimmen die Ausgabegrößen $T_{1,F,Ex}$ und $T_{1,R,En}$ mit der Speichertemperatur überein:

$$T_{1,F,Ex} = T_{1,R,En} = T_S = \frac{E^S}{(Mc)_S} + T_{S,0}. \quad (2.79)$$

Die anderen Komponenten der in Gl. 2.69 und 2.70 angegebenen Vektoren $\mathcal{J}_{1,Ex,Out}$ und $\mathcal{J}_{1,En,Out}$ (z.B. die Drücke) sind zeitunabhängig und müssen deshalb nicht näher betrachtet werden.

Bei drucklosen Warmwasser-Wärmespeichern ist sicherzustellen, daß $273 \text{ K} \leq T_S \leq 373 \text{ K}$ stets erfüllt ist, d.h. Gl. 2.71 nimmt folgende konkrete Gestalt an:

$$(Mc)_S(273 \text{ K} - T_{S,0}) \leq E^S \leq (Mc)_S(373 \text{ K} - T_{S,0}). \quad (2.80)$$

Diese Gleichung stellt zusammen mit Gl. 2.78 indirekt Anforderungen an die Eingabegrößen $\dot{E}_{H,1,Ex}$ und $\dot{E}_{H,1,En}$, die aber ansonsten keinen weiteren Einschränkungen unterliegen. Gut-durchmischte Speicher besitzen keinen nennenswerten elektrischen Hilfsenergiebedarf.

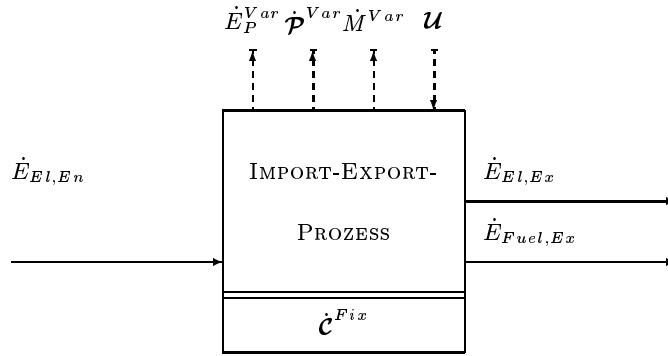


Abbildung 2.8: Import-Export-Prozeß.

2.3.5 Import-Export-Prozeß

Definition 23 (Import-Export-Prozesse) *Import-Export-Prozesse* beschreiben die energetische Anknüpfung des EVS an das übergeordnete EVS (vgl. Abb. 2.1). Modelltechnisch gesehen bündeln diese Prozesse alle Informationen, die zur vollständigen Bewertung des Energieaustausches zwischen beiden Versorgungssystemen erforderlich sind. Diese Informationen beziehen sich dabei nicht nur auf Anlagen an der Schnittstelle zwischen den Systemen, sondern auch auf Teile des übergeordneten EVS (z.B. bei Verwendung des mittleren Wirkungsgrades der Elektrizitätserzeugung im übergeordneten Kraftwerkspark). Nichtsdestoweniger sollen aber Import-Export-Prozesse im folgenden modellmäßig als Teil des EVS betrachtet werden, wodurch sich eine explizite Modellierung des übergeordneten EVS vermeiden läßt. Ein Import-Export-Prozeß erlaubt die alternative Wahrnehmung zweier verschiedener Aufgaben: Er kann entweder elektrische Energie oder eine bestimmte Brennstoffsorte vom übergeordneten EVS *importieren* und diese an andere Prozesse des EVS mit Hilfe der ihn verlassenden Energieströme $\dot{E}_{\alpha,Ex}$, $\alpha \in \{El, Fuel\}$, weiterleiten oder aber er nimmt elektrische Energie, die ein anderer Prozeß des EVS abgegeben hat, in Form des Energiestroms $\dot{E}_{El,En}$ auf und *exportiert* diesen ins übergeordnete EVS. Die entsprechenden Energieströme des übergeordneten EVS treten nicht explizit in Erscheinung (s. Abb. 2.8). Diese Form der Modellierung der Import-Export-Prozesse führt zu einer gewissen Verwechslungsgefahr,⁵⁵ die aber aufgrund der dadurch realisierbaren modelltechnischen Vereinfachungen unter Beachtung der Notwendigkeit einer einheitlichen Notation in Kauf genommen wird. Import-Export-Prozesse bringen die zur Erzeugung der elektrischen Energie bzw. zur Bereitstellung fossiler Brennstoffe im übergeordneten EVS aufgebrauchten verallgemeinerten variablen Kosten \dot{M}^{Var} , \dot{E}_P^{Var} und $\dot{\mathcal{P}}^{Var}$ in die Gesamtbilanz (Monetäre Kosten, Primärenergie, Emissionen) des EVS ein. Wird im EVS ein Überschuß von elektrischer Energie erzeugt und ins übergeordnete EVS exportiert, so wird die anderenfalls dort produzierte elektrische Energie um den entsprechenden Betrag verringert. Dadurch werden verallgemeinerte variable Kosten im übergeordnete EVS vermieden. Import-Export-Prozesse addieren diese negativ zu zählenden Kosten zur Kostenbilanz des EVS. Die verallgemeinerten fixen Kosten der Import-Export-Prozesse berücksichtigen den Anteil der (verallgemeinerten) Anlagenkosten des übergeordnete EVS, der dem EVS aufgrund des Energieimports anzulasten ist bzw. der aufgrund des Exports von elektrischer Energie vermieden werden kann.

⁵⁴Dies gilt für freistehende Speicher. Befindet sich der Speicher in Gebäuden oder ist er in Erdreich eingebettet, so ist hier statt T_A die Temperatur an der Außenseite der Speicherhülle anzugeben.

⁵⁵Der Index *Ex* bezieht sich z.B. weiterhin auf den energetischen Ausgang eines Prozesses (Exit) und darf nicht mit dem Export von Energie aus dem EVS in Verbindung gebracht werden.

Modellannahme 17 (Mathematische Modellierung von Import-Export-Prozessen)

Alle in Abb. 2.8 ausgewiesenen Energieströme stellen Eingabegrößen dar. Es gibt keine Input-Output-Relationen, die diese miteinander verknüpfen würden. Der durch den Import von Energie verursachte bzw. durch den Export vermiedene Primärenergieeinsatz⁵⁶ \dot{E}_P^{Var} bestimmt sich aus:

$$\dot{E}_P^{Var} = \pi_{El,Ex} \cdot \dot{E}_{El,Ex} + \pi_{Fuel,Ex} \cdot \dot{E}_{Fuel,Ex} - \pi_{El,En} \cdot \dot{E}_{El,En}. \quad (2.81)$$

$\dot{E}_{El,Ex}$ und $\dot{E}_{Fuel,Ex}$ beziehen sich dabei auf den Import von Energie; $\dot{E}_{El,En}$ auf den Export (s.o.). Die spezifischen Primärenergieeinsätze $\pi_{El,Ex}$ bzw. $\pi_{Fuel,Ex}$ geben an, wieviele Einheiten Primärenergie zur Bereitstellung (inkl. des Primärenergiegehaltes des Brennstoffes selbst) einer Einheit elektrischer bzw. chemischer Energie im übergeordneten EVS aufgebracht werden müssen. $\pi_{El,En}$ weist aus, wieviele Einheiten Primärenergie durch den Export einer Einheit elektrischer Energie vom EVS an das übergeordnete EVS vermieden werden.⁵⁷ Die mit dem Primärenergieeinsatz verbundenen (bzw. vermiedenen) Emissionen ergeben sich zu:

$$\dot{\mathcal{P}}^{Var} = \varpi_{El,Ex} \dot{E}_{El,Ex} + \varpi_{Fuel,Ex} \dot{E}_{Fuel,Ex} - \varpi_{El,En} \dot{E}_{El,En}. \quad (2.82)$$

Dabei sind $\varpi_{El,Ex}$, $\varpi_{Fuel,Ex}$ und $\varpi_{El,En}$ die Vektoren der spezifischen Emissionsfaktoren. Die Komponenten $\varpi_{\nu,El,Ex}$ bzw. $\varpi_{\nu,Fuel,Ex}$ weisen aus, welche Menge des Schadstoffes bzw. klimarelevanten Gases $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$ bezogen auf die Bereitstellung einer Einheit elektrischer bzw. chemischer Energie im übergeordneten EVS emittiert wird. Die Bereitstellung der chemischen Energie schließt die Gewinnung, die Aufbereitung und den Transport zum EVS, aber nicht die Nutzung im EVS mit ein. Die Emissionen, die bei der Nutzung eines Brennstoffes in Umwandlungsprozessen auftreten, werden dort betrachtet (s.o.). Die Komponenten $\varpi_{\nu,El,En}$ von $\varpi_{El,En}$ geben an, welche Menge des Stoffes $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$ bezogen auf den Export einer Einheit elektrischer Energie durch diesen Export im übergeordneten EVS vermieden wird.

Die variablen monetären Kosten bestimmen sich aus:

$$\dot{M}^{Var} = \kappa_{El,Ex} \dot{E}_{El,Ex} + \kappa_{Fuel,Ex} \dot{E}_{Fuel,Ex} - \kappa_{El,En} \dot{E}_{El,En}. \quad (2.83)$$

Die spezifischen Kosten $\kappa_{El,Ex}$ bzw. $\kappa_{El,En}$ beziehen sich auf die (ins EVS) importierte bzw. exportierte elektrische Energie und unterscheiden sich i.allg. deutlich. Ursache dafür ist, daß die Vergütung für eine vom Energieversorgungssystem abgegebene Einheit elektrischer Energie meist geringer ist, als die Kosten, die für den Bezug einer Einheit elektrischer Energie aufgebracht werden müssen (vgl. Einspeisegesetz für elektrische Energie aus regenerativen Energiequellen). $\kappa_{Fuel,Ex}$ gibt die spezifischen Brennstoffkosten bezogen auf eine Einheit chemische Energie an. Diese können je nach Abnehmergruppe (Private Haushalte, Industrieunternehmen, öffentliche Versorger) unterschiedlich hoch gewählt werden.

Das Modell *deeco* erlaubt die zeitabhängige Vorgabe der spezifischen Primärenergieeinsätze, Emissionsfaktoren und Kosten, was z.B. die Berücksichtigung zeitlich variabler Stromtarife ermöglicht.

⁵⁶ \dot{E}_P^{Var} kann unter Umständen negativ werden. Da es sich dabei aber nicht um einen Energiestrom handelt, der Prozesse miteinander verbindet, widerspricht dies nicht der Aussage, daß im Modell *deeco* alle Energieströme, die Optimierungsvariablen darstellen, positiv gewählt werden.

⁵⁷ $\pi_{El,Ex}$ sollte stets zumindest geringfügig größer als $\pi_{El,En}$ gewählt werden, um zu verhindern, daß importierte elektrische Energie re-exportiert wird. Ähnliche Überlegungen gelten bezüglich der variablen Emissionen und Kosten (s.u.).

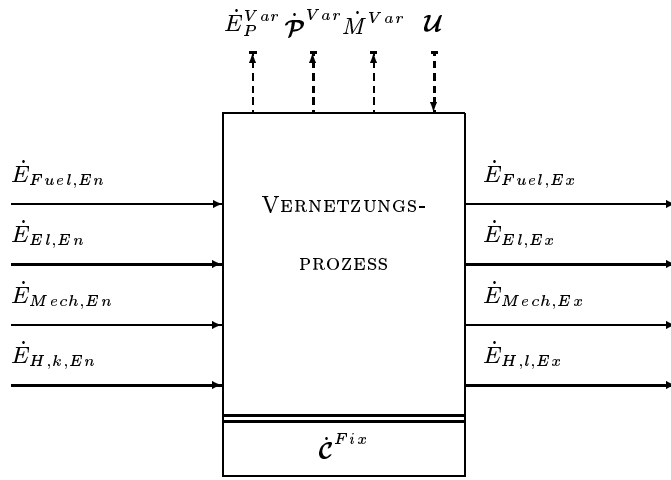


Abbildung 2.9: Vernetzungsprozeß.

2.3.6 Vernetzungsprozeß

Definition 24 (Vernetzungsprozesse) *Vernetzungsprozesse* dienen zur Verbindung von unterschiedlichen Energieströmen bzw. von Nettoenthalpieströmen unterschiedlicher Qualität, d.h. von solchen, denen unterschiedliche intensive Größen zugeordnet sind. Aufgrund ihrer sehr flexiblen (und damit auch teilweise sehr abstrakten) Struktur, übernehmen Vernetzungsprozesse die Funktion von Bindegliedern zwischen Prozessen, deren Energienachfrage und -angebot nicht direkt kompatibel zueinander sind. Mit ihrer Hilfe gelingt die Vernetzung unterschiedlichster Prozesse und damit der Aufbau von Energieversorgungssystemen, die ein hohes Maß an Systemintegration und damit verbunden ein weites Feld von Optimierungsmöglichkeiten aufweisen. Beispiele für Vernetzungsprozesse sind Wärmeaustauscher sowie der (verlustbehaftete) Wärme- (genauer: Enthalpie-)transport, das Nachheizen von Enthalpieströmen oder deren Kühlung durch Wärmepumpeneinsatz. $\{k\}$ bezeichnet die Menge der in den Vernetzungsprozeß eintretenden Nettoenthalpieströme $\dot{E}_{H,k,En}$. $\{l\}$ steht für die Menge der austretenden $\dot{E}_{H,l,Ex}$. Prinzipiell ist die Zahl dieser Ströme nicht beschränkt. Es lassen sich damit z.B. auch Absorptionswärmepumpen oder die Mischung verschiedener Nettoenthalpieströme modellieren. Neben Nettoenthalpieströmen können bei Vernetzungsprozessen auch chemische, elektrische bzw. mechanische Energieströme ($\dot{E}_{Fuel,En}$, $\dot{E}_{El,En}$ bzw. $\dot{E}_{Mech,En}$) aufgenommen werden, z.B. bei gasmotorisch, elektrisch bzw. mechanisch angetriebenen Wärmepumpen. Vernetzungsprozesse können aber auch elektrische oder mechanische Energie ($\dot{E}_{El,Ex}$ bzw. $\dot{E}_{Mech,Ex}$) abgeben, beispielsweise durch Elektrizitätserzeugung aus industrieller Abwärme mit Hilfe sog. ORC-Anlagen.⁵⁸ Die Elektrolyse von Wasser ist ein Beispiel für einen Vernetzungsprozeß, bei dem chemische Energie $\dot{E}_{Fuel,Ex}$ den Prozeß verläßt. In manchen Fällen treten bei der Transformation⁵⁹ der Energieströme verallgemeinerte variable Kosten \dot{M}^{Var} , \dot{E}_P^{Var} und $\dot{\mathcal{P}}^{Var}$ auf. Alle Energieströme, die an Vernetzungsprozessen beteiligt sein können, sind in Abb. 2.9 wiedergegeben.

Modellannahme 18 (Mathematische Modellierung von Vernetzungsprozessen)

Die Menge $\{k\}$ zerfällt in zwei Teilmengen, $\{k\}_{In}$ und $\{k\}_{Out}$, die die in den Prozeß eintretenden Nettoenthalpieströme (informationstechnisch, s. Abschnitt 2.2.2) in Eingabe- bzw. Ausgabegrößen unterteilen. Entsprechendes gilt für $\{l\}$.

⁵⁸ORC = **O**rganic **R**ankine **C**ycle, s. z.B. [Kug90], S.274.

⁵⁹Es ist möglich, die bereits beschriebenen Umwandlungsprozesse (s. Abschnitt 2.3.2) als vereinfachte Vernetzungsprozesse anzusehen. Aus Anschaulichkeitsgründen heraus wird von dieser Möglichkeit jedoch kein Gebrauch gemacht.

Auch jeder chemische, elektrische oder mechanische Energiestrom ist - je nachdem welcher konkrete Prozeß ins Auge gefaßt wird - entweder eine Eingabe- oder Ausgabegröße. Im folgenden stehe $\{\alpha\}_{En,In}$ bzw. $\{\alpha\}_{Ex,In}$ für die Menge aller Energieströme $\dot{E}_{\alpha,En}$, $\alpha \in \{(H, k), Fuel, El, Mech\}$, bzw. $\dot{E}_{\alpha,Ex}$, $\alpha \in \{(H, l), Fuel, El, Mech\}$, die Eingabegrößen darstellen; $\{\alpha\}_{En,Out}$ und $\{\alpha\}_{Ex,Out}$ für die entsprechenden Mengen der Ausgabegrößen.

$\mathcal{J}_{l,Ex,Out}$ bezeichnet die dem austretenden Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,l,Ex}$ gemäß der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme (s. Def. 16) zugeordneten intensiven Ausgabegrößen und $\mathcal{J}_{l,Ex,In}$ die entsprechenden Eingabegrößen. $\mathcal{J}_{\{l\},Ex,In}$ gibt die Gesamtheit aller $\mathcal{J}_{l,Ex,In}$, $l \in \{l\}$ an. Analog sind $\mathcal{J}_{k,En,Out}$, $\mathcal{J}_{k,En,In}$ und $\mathcal{J}_{\{k\},En,In}$ zu interpretieren.

Die Input-Output-Relationen der intensiven Ausgabegrößen müssen folgende Form besitzen:

$$\forall l \in \{l\} \quad \mathcal{J}_{l,Ex,Out} = \mathcal{J}_{l,Ex,Out}(\mathcal{J}_{l,Ex,In}, \mathcal{J}_{\{k\},En,In}, \mathcal{U}) \quad (2.84)$$

sowie

$$\forall k \in \{k\} \quad \mathcal{J}_{k,En,Out} = \mathcal{J}_{k,En,Out}(\mathcal{J}_{k,En,In}, \mathcal{J}_{\{l\},Ex,In}, \mathcal{U}). \quad (2.85)$$

Der Zusammenhang zwischen den Energieströmen, die am Prozeß beteiligt sind, soll durch folgende Beziehungen beschrieben werden:

$$\dot{E}_{\alpha,En} = \dot{E}_{\alpha,En,0} + \sum_{\beta \in \{\alpha\}_{Ex,In}} \lambda_{\beta}^{\alpha} \cdot \dot{E}_{\beta,Ex} + \sum_{\beta \in \{\alpha\}_{En,In}} \sigma_{\beta}^{\alpha} \cdot \dot{E}_{\beta,En}, \quad \alpha \in \{\alpha\}_{En,Out} \quad (2.86)$$

und

$$\dot{E}_{\alpha,Ex} = \dot{E}_{\alpha,Ex,0} + \sum_{\beta \in \{\alpha\}_{En,In}} \varepsilon_{\beta}^{\alpha} \cdot \dot{E}_{\beta,En} + \sum_{\beta \in \{\alpha\}_{Ex,In}} \mu_{\beta}^{\alpha} \cdot \dot{E}_{\beta,Ex}, \quad \alpha \in \{\alpha\}_{Ex,Out}. \quad (2.87)$$

Dabei darf jeder in diesen Gleichungen auftretende auslastungsunabhängige Energiestrom $\dot{E}_{\alpha,En,0}$ bzw. $\dot{E}_{\alpha,Ex,0}$ sowie jede differentielle Kenngröße λ_{β}^{α} , σ_{β}^{α} , $\varepsilon_{\beta}^{\alpha}$ oder μ_{β}^{α} abhängig sein von $\mathcal{J}_{\{l\},Ex,In}$, $\mathcal{J}_{\{k\},En,In}$ und \mathcal{U} . Die konkrete Form dieser funktionalen Abhängigkeit ist i.allg. von Größe zu Größe und natürlich von Prozeß zu Prozeß verschieden. Ähnlich wie in Gl. 2.32 kann ein Teil der Beziehungen in Gl. 2.86 u. 2.87 auch als Ungleichung formuliert werden.

Es wird angenommen, daß nur mit dem Einsatz chemischer Energie verallgemeinerte variable Kosten verbunden sind. Die anderen Energieströme sind weitgehend „sauber“. Ihre Verwendung verursacht i.allg. vor Ort keine Emissionen und damit auch keine (primärenergetischen und monetären) Aufwendungen für deren Rückhaltung und Entsorgung. Die verallgemeinerten variablen Kosten lassen sich somit in vollkommener Analogie zu denen des Umwandlungsprozesses berechnen (s. Gl. 2.33, 2.34 und 2.35). Auf die explizite Wiedergabe der entsprechenden Gleichungen kann deshalb hier verzichtet werden.

Beispiel: Elektrowärmepumpe zur Wärmerückgewinnung

Im folgenden soll eine Elektrowärmepumpe als Beispiel für einen Vernetzungsprozeß näher beschrieben werden. Bei den am weitesten verbreiteten Wärmepumpen⁶⁰ handelt es sich um sog. Kaldampf-Kompressionswärmepumpen, die im wesentlichen aus einem Verdampfer, einem Verdichter mit Antriebsmotor, einem Kondensator und einer Drosselvorrichtung (Expansionsventil) bestehen. „Der Verdichter saugt Kältemitteldampf aus dem Verdampfer an und komprimiert ihn auf den Kondensationsdruck. Für diesen Verdichtungsvorgang wird mechanische Energie benötigt, die durch einen Elektromotor [unter Verwendung von $\dot{E}_{El,En}$] bereitgestellt wird. Dem hohen Druck im Kondensator entspricht auch ein hohes Temperaturniveau $[T_{Con}]$,⁶¹ das für

⁶⁰ Ausführliche Darstellungen findet man in [Cub77] u. [Kir76].

⁶¹ Wie bereits angesprochen, besitzt die in den Beispielprozessen verwendete Notation nur lokale Gültigkeit. T_{Con} ist deshalb von der Kondensationstemperatur des Prozesses „Gegendruck-Heizkraftwerk“ (s. Abschnitt 2.3.2) zu unterscheiden.

die Übertragung der im Kondensator freiwerdenden Kondensationsenthalpie $[= \dot{E}_{H,1,Ex}]$ an den Wärmeträger [...] benötigt wird. Für die Wärmeübertragung vom Kältemittel an das Heizmedium ist ein Temperaturgefälle $[\Delta T_{Con}]$ erforderlich. Ebenso muß der Verdampfer auf einem gegenüber der Wärmequelle [...] niedrigeren Temperaturniveau $[T_{Vap}]$ gehalten werden, damit die für die Verdampfung notwendige Wärme $[= \dot{E}_{H,1,En}]$ übertragen werden kann. Auch hier ist ein Temperaturgefälle $[\Delta T_{Vap}]$, diesmal jedoch in Richtung auf das Kältemittel, notwendig. Die Temperaturabsenkung geschieht durch die Druckabsenkung im Expansionsorgan“ [Ric82], S.28. Ein realer Wärmepumpenprozeß stellt einen komplizierten thermodynamischen Prozeß dar, der durch eine Reihe von Bestimmungsgleichungen, die das Verhalten der einzelnen Komponenten festlegen und alle simultan erfüllt sein müssen, beschrieben werden kann, s. z.B. [Buk83]. Aus der Menge der in diesen Bestimmungsgleichungen auftretenden Variablen können z.B. T_{Con} und T_{Vap} als unabhängige ausgewählt werden,⁶² die ausreichen, alle anderen Variablen eindeutig zu bestimmen. Damit ein Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,1,Ex}$ den Vernetzungsprozeß „Elektrowärmepumpe“ verlassen kann, muß ein elektrischer Energiestrom $\dot{E}_{El,En}$ aufgenommen werden. Der Zusammenhang zwischen diesen Größen wird durch den reziproken Wirkungsgrad $\lambda_{H,1}^{El}$ beschrieben (vgl. Gl. 2.86):

$$\dot{E}_{El,En} = \lambda_{H,1}^{El} \dot{E}_{H,1,Ex}. \quad (2.88)$$

Bezüglich der Abhängigkeit von $\lambda_{H,1}^{El}$ von T_{Vap} und T_{Con} werden in der Literatur verschiedene Ansätze diskutiert, die sich erheblich in ihrem Detaillierungsgrad unterscheiden [Naj72, Buk83, Ric82, Mie81]. In [Ric82], S.36 wird für die Verwendung von Auslegungsrechnungen folgende einfache Beziehung vorgeschlagen, wobei stets $T_{Con} > T_{Vap}$ vorausgesetzt sei:

$$\lambda_{H,1}^{El} = \left\{ \eta_G \frac{T_{Con}}{T_{Con} - T_{Vap}} \right\}^{-1}. \quad (2.89)$$

Dabei gibt der Gütefaktor η_G das Verhältnis der effektiven Leistungszahl zur Carnotschen Leistungszahl wieder. Für den praktischen Gebrauch empfiehlt Richarts $\eta_G = 0,5$ [Ric82], S.36. Soll eine möglichst vollständige Rückgewinnung der zur Verfügung gestellten Abwärme erfolgen, so muß die Verdampfertemperatur T_{Vap} um eine für den Wärmeübergang im Verdampfer notwendige Temperaturdifferenz ΔT_{Vap} unterhalb der kältesten Temperatur des Abwärmestromes, also der Rücklauftemperatur $T_{1,R,En}$, liegen. Somit gilt:

$$T_{Vap} = T_{1,R,En} - \Delta T_{Vap}. \quad (2.90)$$

Die Temperatur im Kondensator muß die Vorlauftemperatur $T_{1,F,Ex}$ des Nettoenthalpiestromes, der den Prozeß verläßt, um einen bestimmten Betrag ΔT_{Con} übersteigen, d.h.:

$$T_{Con} = T_{1,F,Ex} + \Delta T_{Con}. \quad (2.91)$$

Gl. 2.86 nimmt somit für den Vernetzungsprozeß „Elektrowärmepumpe“ in bezug auf die aufgenommene elektrische Energie folgende konkrete Gestalt an:

$$\dot{E}_{El,En} = \left\{ \eta_G \frac{T_{1,F,Ex} + \Delta T_{Con}}{T_{1,F,Ex} + \Delta T_{Con} - T_{1,R,En} + \Delta T_{Vap}} \right\}^{-1} \dot{E}_{H,1,Ex}. \quad (2.92)$$

In diesem Falle ist $\lambda_{H,1}^{El}(\mathcal{J}_{1,Ex,In}, \mathcal{J}_{1,En,In}, \mathcal{U})$ gemäß Gl. 2.89, 2.90 und 2.91 allein eine Funktion der zeitlich variablen Temperaturen $T_{1,R,En}$ (Komponente von $\mathcal{J}_{1,En,In}$) und $T_{1,F,Ex}$ (Komponente von $\mathcal{J}_{1,Ex,In}$) sowie der in Anlehnung an [Mie81] lastunabhängig angenommenen Parametern $\eta_G, \Delta T_{Con}$ und ΔT_{Vap} . Sind die Verluste der Elektrowärmepumpe vernachlässigbar, so gilt:

$$\dot{E}_{H,1,Ex} = \dot{E}_{El,En} + \dot{E}_{H,1,En}. \quad (2.93)$$

⁶²Diese Auswahl ist wie auch bei vielen anderen Prozessen nicht eindeutig und orientiert sich an der Aufgabenstellung.

Aufgelöst nach $\dot{E}_{H,1,En}$ läßt sich daraus für den Vernetzungsprozeß „Elektrowärmepumpe“ die konkrete Form von Gl. 2.86 in bezug auf $\dot{E}_{H,1,En}$ bestimmen:

$$\dot{E}_{H,1,En} = \left\{ 1 - \left(\eta_G \frac{T_{1,F,Ex} + \Delta T_{Con}}{T_{1,F,Ex} + \Delta T_{Con} - T_{1,R,En} + \Delta T_{Vap}} \right)^{-1} \right\} \dot{E}_{H,1,Ex}. \quad (2.94)$$

Verallgemeinerte variable Kosten treten bei Elektrowärmepumpen nicht auf.

2.4 Energetische Verknüpfungsstruktur energietechnischer Prozesse

Die Deckung des Energiebedarfs erfordert den Transport (und die Umwandlung) von Energie, die entweder mit Hilfe von Kollektorprozessen direkt der Umwelt oder vermittelt über Import-(Export)-Prozesse dem übergeordneten EVS entnommen wird (vgl. Abb. 2.1). Aufgrund der i.allg. geringen Verluste und des geringen Hilfsenergieaufwands beim Transport von chemischer Energie innerhalb des EVS ist eine physikalische Beschreibung dieses Energietransportprozesses in vielen Anwendungsfällen nicht notwendig (aber mit Hilfe eines geeignet gestalteten Vernetzungsprozesses dennoch möglich). Die Kosten der entsprechenden Verbindungsleitungen (z.B. für den Erdgastransport) lassen sich den fixen Kosten der Prozesse zuordnen, die die chemische Energie nutzen oder speichern. Bezüglich des (fixen) Primärenergieaufwandes zur Herstellung dieser Leitungen und den damit verbundenen Emissionen gelten ähnliche Überlegungen. Es ist unüblich, mechanische Energie über größere Entfernungen zu transportieren. Auch hier kann deshalb meistens auf die explizite Modellierung eines entsprechenden Vernetzungsprozesses verzichtet werden. Der Transport von Wärme, vor allem über größere Distanzen (z.B. von einem Heizkraftwerk zum entfernt gelegenen Industriebetrieb), ist mit nennenswerten Verlusten verbunden, so daß in diesem Fall der Wärmetransport, der dann mit Hilfe von Wärmetransportmittelströmen (erzwungene Konvektion) durchgeführt wird, als eigenständiger Vernetzungsprozeß modelliert werden muß. Aufgrund von Modellannahme 2 ist das EVS räumlich homogen hinsichtlich des Transports elektrischer Energie. Darüber hinaus können die elektrischen Leitungsverluste entweder vernachlässigt werden oder aber, sofern sie beim Transport zum Endabnehmer auftreten, dem Energiebedarf zugeschlagen werden. Eine physikalische Beschreibung dieses Transportprozeßtyps ist deshalb nicht notwendig. Die fixen Kosten des Stromnetzes werden im Modell *deeco* ebenfalls nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, daß ein Großteil der Kosten auf das eigentliche Verteilungssystem entfällt und unabhängig vom Standort der elektrizitätserzeugenden Anlagen ist. Diese Kosten bilden somit nur einen vom Ergebnis der Optimierung unabhängigen Beitrag zu den fixen Kosten des EVS, der bei einem Vergleich der verschiedenen Energieversorgungsoptionen bezüglich ihrer Kosten unberücksichtigt bleiben kann. Die Kosten der Verbindungsleitungen zwischen Produktionsanlagen für elektrische Energie und Verteilungsnetz sowie Transformatoren u.ä. können den fixen Kosten der Umwandlungs- bzw. Kollektorprozessen zugeordnet werden. Auch bezüglich des (fixen) Primärenergieaufwandes zur Herstellung des Stromnetzes und den damit verbundenen Emissionen gelten entsprechende Überlegungen.

Physikalisch gesehen sind die in Abschnitt 2.3 definierten Prozesse gemäß Modellannahme 3 durch verlustfreie Energieströme miteinander verbunden. Ein Energiestrom, der einen Prozeß verläßt, muß aber nicht notwendigerweise vollständig in einen einzigen anderen Prozeß eintreten. Umgekehrt ist es nicht erforderlich, daß ein Energiestrom, der in einen Prozeß eintritt, nur von einem einzigen anderen Prozeß abgegeben wird. Es ist deshalb notwendig, Bilanzen für das Aufspalten und Zusammenfließen von Energieströmen aufzustellen:

Definition 25 (Bilanzpunkte) Ein *Bilanzpunkt* bezeichnet die Stelle (außerhalb eines Prozesses), an dem sich ein beliebiger Energiestrom in mehrere Energieströme aufspaltet oder an dem sich mehrere Energieströme zu einem einzigen vereinen. Auch der Fall mehrerer zusammenfließender und sich anschließend anders aufspaltender Energieströme sei, ebenso wie der Grenzfall eines ein- und ausströmenden Energiestroms, miteingeschlossen. Notwendig ist aber, daß es sich bei diesen Energieströmen um solche gleicher Energieform handelt und, darüber hinaus, daß Wärme- bzw. Nettoenthalpieströme gleiche Qualität, d.h. identische Attribute, besitzen. Jede Änderung der Energieform oder Qualität wäre mit Entropieproduktion verbunden und müßte somit gemäß Def. 4 im Inneren eines Prozesses stattfinden. Die Attribute der an einem Bilanzpunkt beteiligten Energieströme müssen deshalb sog. *Identitätsgleichungen* erfüllen. Die Energieströme selbst unterliegen aufgrund der Energieerhaltung einer *Mengenbilanz*.⁶³ Es ist zu beachten, daß Bilanzpunkte keine räumliche Ausdehnung besitzen und daß Identitätsgleichungen immer in räumlicher Einheit mit Mengenbilanzen auftreten. Ein Bilanzpunkt steht somit für eine Mengenbilanz und gleichzeitig für eine (oder u.U. mehrere) Identitätsgleichung(en), falls die der Mengenbilanz unterworfenen Energieströme Attribute besitzen.

Im folgenden soll die Struktur, die durch Prozesse, Bilanzpunkte und sie verbindende Energieströme gebildet wird, in der Sprache der Graphentheorie⁶⁴ näher beschrieben werden.

Definition 26 (Graph) Ein *Graph* (N, L) ist ein geordnetes Paar zweier Mengen N (Nodes) und L (Links), wobei N eine endliche, nichtleere Menge, dessen Elemente *Knoten* genannt werden, und L eine Menge ungeordneter Paare von Knoten aus N darstellt. Jedes Element $(j, j') \in L$ (mit $j, j' \in N$) heißt *Kante* und man sagt, diese Kante *verbinde* j und j' [Fou92]. Handelt es sich bei L um eine Menge aus geordneten Paaren, so wird von einem *gerichteten Graphen* oder *Digraphen* gesprochen. Die gerichteten Kanten werden als *Pfeile* bezeichnet und durch geordnete Tupel der Form $\langle j, j' \rangle$ dargestellt. In diesem Fall heißt j *Vorgänger* von j' und j' *Nachfolger* von j . Jeder Knoten eines Digraphen, der keinen Vorgänger besitzt, heißt *Quelle*; jeder Knoten, dem kein Nachfolger zugeordnet ist, wird als *Senke* bezeichnet.

Der Nutzen der Graphentheorie besteht darin, die bei einem EVS mit einer Vielzahl von Prozessen i.allg. sehr komplexe energetische Verknüpfung dieser Prozesse adäquat abzubilden. Während mechanische und chemische Energieströme sowie Nettoenthalpieströme meist nur ganz bestimmte Prozesse miteinander verbinden, ermöglicht das in vielen Fällen sehr gut ausgebaute Elektrizitätsnetz eine nahezu beliebige Verknüpfung von elektrizitätserzeugenden Prozessen und solchen, die elektrische Energie aufnehmen. Es ist deshalb sinnvoll das elektrische Verteilungsnetz vom übrigen EVS gedanklich zu trennen und zu definieren:

Definition 27 (Rein-elektrisches EVS und nicht-elektrisches EVS) Alle Prozesse und Bilanzen des EVS, die nicht ausschließlich durch elektrische Energieströme verbunden sind, sowie alle sie verbindenden chemischen oder mechanischen Energie- bzw. Nettoenthalpieströme bilden das zum EVS gehörende *nicht-elektrische EVS*. Die restlichen Prozesse und Bilanzen sowie die elektrischen Energieströme bilden das *rein-elektrische EVS*.

Modellannahme 19 (Modellierung des rein-elektrischen EVS) *Über das elektrische Verteilungsnetz ist jeder Prozeß, der elektrische Energie erzeugt, (im Prinzip) mit jedem elektrizitätsnachfragenden Prozeß verbunden. Es existieren im Gegensatz zum nicht-elektrischen EVS*

⁶³Die hier verwendeten Begriffe werden von Kühner [Kue92] übernommen.

⁶⁴Die verwendeten Begriffe entsprechen den Begriffsdefinitionen, wie sie von Neumann im Kap. 6 „Graphen und Netzwerke“ in [Gal87] angegeben werden. Weitere Informationen zur Graphentheorie finden sich z.B. in [Fou92] und [Zim87]. Ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Thermoökonomie bzw. der Modellierung nationaler Energiesysteme (EFOM-Modell) wird in [Val94] bzw. [Ode94] dargestellt.

keine selektiven Verknüpfungen, so daß auf eine graphentheoretische Modellierung des rein-elektrischen EVS verzichtet werden kann. Es tritt deshalb (abgesehen von den zu ihm gehörenden Prozessen) mathematisch nur in Form einer (globalen) Bilanz für elektrische Energie in Erscheinung (s. Gl. 2.103).

Modellannahme 20 (Modellierung des nicht-elektrischen EVS) *Das nicht-elektrische EVS läßt sich als Graph modellieren, dessen Knoten von Prozessen⁶⁵ sowie von Bilanzpunkten und dessen Kanten von verlustlosen Energieströmen \dot{E}_α , $\alpha \in \{Fuel, Mech, H\}$ gebildet werden. Der dadurch entstehende Graph sei durch folgende Eigenschaften ausgezeichnet:⁶⁶*

1. Bilanzpunkte (mit Ausnahme der globalen Bilanz für die elektrische Energie) stellen graphentheoretisch gesehen einen Teil der Knoten des Graphen⁶⁷ dar. Sie repräsentieren Mengenbilanzen sowie gegebenenfalls Identitätsgleichungen (s. Def. 25).
2. Ein energietechnischer Prozeß, der Teil des nicht-elektrischen EVS ist, wird i.allg. ebenfalls durch einen Knoten dargestellt. Die einzige Ausnahme von dieser Regel bilden Bedarfsprozesse. Diese werden (sofern von ihnen Abwärme produziert wird) in einen Bedarfsteil und einen abwärmeproduzierenden Teil zerlegt, denen jeweils ein eigener Knoten zugeordnet wird. Diese Zerlegung⁶⁸ ist möglich, da bei Bedarfsprozessen (s. Modellannahme 13) keine direkte Verknüpfung⁶⁹ von in den Prozeß ein- und aus diesem austretenden Energieströmen durch Input-Output-Relationen besteht. Die beiden Teile eines Bedarfsprozesses werden im folgenden formal als zwei eigenständige Prozesse betrachtet. Einer von ihnen produziert ausschließlich Abwärme; dem anderen wird der eigentliche Energiebedarf zugeordnet.
3. Die Energiestromrichtung definiert eine gerichtete Verknüpfung der Knoten, d.h. es handelt sich um einen gerichteten Graphen, der aus Knoten und gerichteten Kanten (=Pfeilen) besteht.
4. Der Graph besitzt keine Schlingen (d.h. ein Energiestrom, der einen Prozeß verläßt, darf nicht wieder in denselben Prozeß eintreten), keine parallelen Pfeile und keine isolierten Knoten. Diese Eigenschaften machen den Graphen zu einem (schlichten) Digraphen (= directed graph).
5. Der Graph ist zyklensfrei, d.h. Energie, die von einem Prozeß erzeugt wird, darf nicht von Prozessen verwendet werden, die diesen Prozeß versorgen. (Eine Ausnahme von dieser Eigenschaft bilden Bedarfsprozesse. Bei diesen darf die von ihnen produzierte Abwärme zu ihrer Energieversorgung beitragen. Um dennoch einen zyklensfreien Graphen zu erhalten, werden abwärmeproduzierende Bedarfsprozesse in zwei formal getrennte Prozesse zerlegt, s.o.)
6. Die direkte Verbindung zweier Prozesse oder zweier Bilanzpunkte durch (verlustlose) Energieströme ist verboten, d.h. Prozesse sind energetisch (direkt) ausschließlich mit Bilanzpunkten und Bilanzpunkte nur mit Prozessen verknüpft (der Graph ist somit bipartit).⁷⁰

Definition 28 (Versorgungspfad) Eine Pfeilfolge des Graphen, die eine Quelle mit einer Senke verbindet, heißt *Versorgungspfad*. Die Senken des Graphen werden von den nicht-abwärmeproduzierenden Bedarfs(teil)prozessen gebildet. Jeder Prozeß des nicht-elektrischen EVS, der

⁶⁵Genau genommen werden manchen Bedarfsprozessen 2 Knoten zugeordnet (s.u.).

⁶⁶Ein Beispiel für die graphentheoretische Modellierung eines EVS ist in Abb. 3.2 wiedergegeben. Die dort ausgewiesenen Bilanzpunkte (= schwarze Punkte) bilden zusammen mit den gezeigten Prozessen (Kästchen) die Menge der Knoten des betrachteten EVS.

⁶⁷Der Begriff *Graph* steht im folgenden (sofern er nicht in der Mehrzahl oder mit unbestimmtem Artikel auftritt) immer als Abkürzung für „Graph, der das nicht-elektrische EVS beschreibt“.

⁶⁸Diese Zerlegung spielt im Modell eine wesentliche Rolle, da sie dazu führt, daß der Graph des nicht-elektrischen EVS zyklensfrei wird (s.u.).

⁶⁹Dazu zählt nicht die Verknüpfung über \mathcal{U} .

⁷⁰Um eine Kontrolle dieser Verknüpfungsstruktur zu ermöglichen, müssen die Knoten des Graphen stets einer der beiden Mengen $\{a\}$ oder $\{b\}$ (s.u.) zugeordnet werden können (s.a. Abb. 3.2).

weder einen chemischen oder mechanischen Energie- noch einen Nettoenthalpiestrom aufnimmt, stellt eine Quelle des Graphen dar.

Definition 29 (Mengendefinitionen)

- $\{j\}$ Menge aller Knoten, $\{j\} = \{a\} \cup \{b\}$
- $\{a\}$ Menge aller Prozesse
- $\{b\}$ Menge aller Bilanzpunkte
- $\{d\}$ Menge aller Bedarfs(teil)prozesse
- $\{c\}$ Menge aller Umwandlungsprozesse
- $\{o\}$ Menge aller Kollektorprozesse
- $\{s\}$ Menge aller Speicherprozesse
- $\{p\}$ Menge aller Import-Export-Prozesse
- $\{n\}$ Menge aller Vernetzungsprozesse
- $s(j)$ Menge der (unmittelbaren) Nachfolger des Knoten j
- $p(j)$ Menge der (unmittelbaren) Vorgänger des Knoten j

Im Gegensatz zur Standardgraphentheorie reicht es zur Beschreibung der Verknüpfungsstruktur des nicht-elektrischen EVS nicht aus, nur die Knoten und Kanten des Graphen anzugeben, da die Knoten, sofern es sich um Prozesse handelt, eine innere Struktur besitzen, die durch die Gesamtheit der den Prozeß modellierenden Input-Output-Relationen, Zustandstransformationsgleichungen (und prozeßinternen Grenzwerte) gegeben ist. Es ist z.B. von entscheidender Bedeutung, ob es sich bei einem Nettoenthalpiestrom, der einen Umwandlungsprozeß verläßt, um $\dot{E}_{H,Ex}$ oder um einen Abwärmestrom $\dot{E}_{H,l,Ex}$ handelt (s. Abschnitt 2.3.2), da beide in unterschiedlicher Art und Weise in die Input-Output-Relationen eingehen. Die vollständige Beschreibung der Verknüpfung eines Prozesses mit einem Bilanzpunkt umfaßt deshalb:

1. Die Angabe des beteiligten Prozesses $a \in \{a\}$ und des Bilanzpunktes $b \in \{b\}$,
2. die Angabe der Richtung der Verknüpfung, die durch die Energiestromrichtung gegeben ist und mit Hilfe des geordneten Tupels $\langle a, b \rangle$ (falls der Energiestrom von a nach b fließt) bzw. $\langle b, a \rangle$ (im umgekehrten Falle) dargestellt wird und
3. die eindeutige Kennzeichnung des Energiestromes der beide miteinander verbindet. Da im Kap. 2.3 bereits alle an den Prozessen beteiligten Energieströme detailliert definiert wurden, liegt es nahe, die dort verwendete Notation auch für die verknüpfenden Energieströme zu übernehmen. Bei Kenntnis der Energiestromrichtung steht eindeutig fest, ob der betrachtete Energiestrom den Prozeß verläßt oder in diesen eintritt, so daß auf die Angabe der Indizes „Ex“ und „En“ verzichtet werden kann. Der die Verknüpfung bewirkende Energiestrom \dot{E}_α wird ausreichend durch die Angabe von $\alpha \in \{Fuel, Mech, (H, i)\}$ gekennzeichnet. Das Tupel (H, i) steht dabei für den i -ten Nettoenthalpiestrom, der einen Prozeß verläßt bzw. in einen Prozeß eintritt, d.h die im Kap. 2.3 betrachteten und hier relevanten Energieströme werden in folgender Art und Weise dargestellt:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{Fuel} &: \dot{E}_\alpha, \alpha = Fuel, \\ \dot{E}_{Mech} &: \dot{E}_\alpha, \alpha = Mech, \\ \dot{E}_{H,k} &: \dot{E}_\alpha, \alpha = (H, k), k \in \{k\}, \\ \dot{E}_{H,l} &: \dot{E}_\alpha, \alpha = (H, l), l \in \{l\} \end{aligned}$$

und zur Vereinheitlichung der Notation wird gesetzt:

$$\dot{E}_H : \dot{E}_\alpha, \alpha = (H, 0).$$

Zusammenfassend wird im Modell *deeco* die Verknüpfung eines Bilanzpunktes $b \in \{b\}$ mit einem Prozeß $a \in \{a\}$ durch den Energiestrom \dot{E}_α , der den Prozeß a verläßt bzw. in diesen eintritt, durch das geordnete Tupel $\langle (a, \alpha), b \rangle$ bzw. $\langle b, (a, \alpha) \rangle$ beschrieben.

Definition 30 (Energetischer Ein- bzw. Ausgang) Das Tupel (a, α) definiert eindeutig die Stelle, an der ein Energiestrom in einen Prozeß eintritt bzw. aus diesem austritt, und wird deshalb auch als *energetischer Ein- bzw. Ausgang* bezeichnet. Die Menge $\{\alpha\}_{En,a}$ repräsentiert alle energetischen Eingänge und $\{\alpha\}_{Ex,a}$ alle energetischen Ausgänge eines Prozesses a . Darüber hinaus ist es hilfreich, die Menge der *Vorgängerausgänge* $P(b)$ eines Bilanzpunktes b zu definieren, die alle Ausgänge (a, α) von Vorgängerknoten $a \in p(b)$ des Bilanzpunktes umfaßt, die über die Energieströme $\dot{E}_{\alpha,Ex,a}$, $\alpha \in \{Fuel, Mech, (H, l)\}$, $l \in \{l\}$ mit dem Bilanzpunkt verknüpft sind. Entsprechend definiert $S(b)$ die Menge der *Nachfolgereingänge*, die als Elemente alle Eingänge (a, α) enthält, die über die Energieströme $\dot{E}_{\alpha,En,a}$ mit dem Bilanzpunkt verknüpft sind.

In Abb. 3.2 im Abschnitt 3.2.1 ist ein Beispiel für die graphentheoretische Modellierung eines EVS wiedergegeben.

2.5 Informationstechnische Verknüpfungsstruktur energietechnischer Prozesse

Input-Output-Relationen, Zustandstransformationsgleichungen und prozeßinterne Grenzwerte stellen Bedingungen an die Eingabe-, Ausgabe- und Zustandsgrößen einzelner Prozesse. Diese Prozesse sind aber nicht autonom, sondern durch verlustlose Energieströme über Bilanzpunkte hinweg miteinander verbunden. Die an diesen Bilanzpunkten zu erfüllenden Mengenbilanzen und Identitätsgleichungen stellen Anforderungen an Energieströme und die ihnen zugeordneten intensiven Größen, die an verschiedenen Prozessen beteiligt sind. Insgesamt ergibt sich dadurch ein i.allg. hochdimensionales System nichtlinearer, gekoppelter Gleichungen und Ungleichungen, die zu jedem Zeitpunkt simultan gelöst werden müssen. Diese (Un-)Gleichungen beschreiben das (potentielle) Verhalten des gesamten EVS. Innerhalb des EVS können die Ausgabegrößen eines Prozesses zu Eingabegrößen anderer Prozesse werden. Erweitert man die Definition 14 auf das EVS als Ganzes, so stellen die Komponenten des Umweltdatenvektors \mathcal{U} die fundamentalen Eingabegrößen und die Komponenten der verallgemeinerten variablen und fixen Kosten $\dot{\mathcal{C}}^{Var}$ bzw. $\dot{\mathcal{C}}^{Fix}$ die fundamentalen Ausgabegrößen dieses (Energieversorgungs-)Systems dar.⁷¹ Das angesprochene (Un-)Gleichungssystem determiniert aber i.allg. noch nicht das Systemverhalten, da die Mengenbilanzen (abgesehen vom Fall eines einströmenden und eines ausströmenden Energiestroms) nicht eindeutig festlegen, wie die in einen Bilanzpunkt einströmende bzw. ausströmende Energie auf die einzelnen Energieströme aufgeteilt wird. Es besteht damit die Möglichkeit, aus den zulässigen Lösungen des Gleichungssystems diejenigen auszuwählen, die in einem noch genauer zu definierenden Sinne als optimal angesehen werden. Im folgenden soll zunächst diskutiert werden, wie sich zu jedem Zeitpunkt bzw. innerhalb kurzer, etwa eine Stunde umfassender, sog. Optimierungszeitintervalle (Def. 31, s. Abschnitt 2.6) ein optimales Systemverhalten realisieren läßt (= zeitlich lokale Optimierung, s. Abschnitt 2.6.1). In Abschnitt 2.6.1.2 wird untersucht, wie dies auf einen längeren Optimierungszeitraum (z.B. ein Jahr) verallgemeinert werden kann. Im einfachsten Fall geschieht dies durch sukzessives Anwenden der zeitlich lokalen Optimierung auf alle Intervalle des Optimierungszeitraums (= quasidynamische Optimierung); bei einer Intervalllänge von einer Stunde und einem Optimierungszeitraum von einem Jahr also 8760 mal hintereinander. Im Modell *deeco* stellen, wie bereits angesprochen, die Energieströme, die die Prozesse und Bilanzen miteinander verknüpfen, die Optimierungsvariablen dar; auf die Optimierung der Attribute wird gemäß Modellannahme 9 verzichtet. Die bisher gemachten Modellannahmen gewährleisten die Linearität der Input-Output-Relationen und prozeßinternen Grenzwerte in bezug auf die Optimierungsvariablen. Deshalb und wegen der

⁷¹Eine detaillierte Diskussion dieses Sachverhaltes sowie eine vollständig auf Datenflüssen basierende Darstellung des EVS als Netzwerk im strengen graphentheoretischen Sinne findet sich in [Gro95].

(trivialen) Linearität der Mengenbilanzen, die den Bilanzpunkten zugeordnet sind, läßt sich ihre Bestimmung mit Hilfe des Simplexalgorithmus (s. Abschnitt 2.6) durchführen. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß alle Koeffizienten der entsprechenden linearen Gleichungen bereits vor der Optimierung bekannt sind. Da in diese Koeffizienten gemäß Abschnitt 2.3 neben Parametern auch prozeßexterne Einflußgrößen, Zustandsgrößen und Attribute eingehen, ist es erforderlich anzugeben, wie diese Größen, die per definitionem oder gemäß den Modellannahmen 10 und 11 zeitlich lokal gesehen optimierungsunabhängig sind, bestimmt werden können. Parameter und prozeßexterne Einflußgrößen sind vorgegeben und werden, ebenso wie die Zustandsgrößen, als innerhalb der Optimierungszeitintervalle (annähernd) konstant angesehen. Die Berechnung der Zustandsgrößen erfolgt mit Hilfe der Zustandstransformationsgleichung und wird im Abschnitt 2.6.1.2 ausführlich beschrieben. Im folgenden soll gezeigt werden, wie und unter welchen Voraussetzungen sich die Attribute berechnen lassen.

Eine Betrachtung der Input-Output-Relationen von Kap. 2.3 zeigt, daß die Relationen, die als Ausgabegrößen Attribute liefern, nur von anderen Attributen, von prozeßexternen Einflußgrößen oder Zustandsgrößen abhängig sind. Die Gesamtheit dieser Relationen bildet ein von den Optimierungsvariablen unabhängiges System nichtlinearer gekoppelter Gleichungen, die zu jedem Zeitpunkt simultan zu lösen sind. Eine Möglichkeit bestünde darin, die Lösung dieses Gleichungssystems durch geeignete, auf beliebig nichtlineare Gleichungssysteme anwendbare Iterationsverfahren numerisch zu bestimmen, was aber durch die i.allg. große Anzahl von Gleichungen erschwert wird. Sinnvoller ist es deshalb, einen problemangepaßten Algorithmus zu entwickeln, der eine effiziente, d.h. rechenzeitparende Bestimmung der Attribute erlaubt. Dieser Algorithmus, der darüber hinaus die Eindeutigkeit der Lösung garantiert, nutzt aus, daß die hier zu betrachtenden Gleichungen in besonderer Art und Weise gekoppelt sind: Die Input-Output-Relationen der einzelnen Prozesse sind eindeutig und durch die strikte Trennung der Attribute in intensive Eingabegrößen- und Ausgabegrößen bereits, soweit man sich auf den Prozeß an sich beschränkt, entkoppelt. Die Input-Output-Relationen verschiedener Prozesse sind hinsichtlich der Attribute ausschließlich über die Identitätsgleichungen der Bilanzpunkte miteinander gekoppelt. Um die Frage beantworten zu können, inwieweit die intensiven Ausgabegrößen eines Prozesses, vermittelt über Identitätsgleichungen sowie eigene oder zu anderen Prozessen gehörende Input-Output-Relationen, mit den intensiven Eingabegrößen desselben Prozesses verknüpft sind, was zur Vermeidung eines iterativen Verfahrens ausgeschlossen sein soll, ist es notwendig, den Datenfluß der Attribute im EVS detailliert zu verfolgen. Da Attribute immer Energieströmen zugeordnet sind, erfolgt der Datenfluß ausschließlich entlang der Kanten des Graphen, der das nicht-elektrische EVS beschreibt. Durch zusätzliche Angabe der Datenflußrichtung der Attribute in bezug auf die Energiestromrichtung (Def. 16) gelingt die vollständige Beschreibung des Datenflusses der Attribute. Darauf aufbauend läßt sich ein Algorithmus angeben, der in der Lage ist, alle Attribute des EVS zu bestimmen. (Der Leser, der sich nicht für die Details dieses Algorithmus interessiert, kann direkt mit Abschnitt 2.6 fortfahren.)

Datenfluß der Attribute

Modellannahme 21 (Graphentheoretische Beschreibung des Attributdatenflusses)

*Der Datenfluß der Attribute, die den Nettoenthalpieströmen des EVS zugeordnet sind, läßt sich durch einen Graphen modellieren, der folgende Eigenschaften besitzen soll:*⁷²

1. Jedes Attribut, das Ausgabegröße eines Prozesses ist, muß sich eindeutig über die entsprechenden Input-Output-Relationen aus prozeßexternen Einflußgrößen, prozeßinternen Zu-

⁷²Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, daß es sich bei diesen Attributen um die intensiven Größen (Drücke, Temperaturen, etc.) handelt, die den Nettoenthalpieströmen des EVS zugeordnet sind (s.a. Def. 13).

standsgrößen und Attributen, die Eingabegrößen des betrachteten Prozesses sind, berechnen lassen oder unabhängig davon, z.B. als Teil einer gemessenen Zeitreihe, vorgegeben sein.

2. Attribute sind im Modell *deeco* stets Nettoenthalpieströmen zugeordnet (s. Def. 16). Der Datenfluß der Attribute läuft entlang der Kanten des gemäß Kap. 2.4 zum EVS gehörenden Graphen. Obwohl es sich bei diesem Graphen um einen gerichteten handelt, dessen Knoten somit durch Pfeile (=gerichtete Kanten) verbunden sind, wird hier nur von Kanten gesprochen, da der Datenfluß eines Attributs parallel oder antiparallel zum Nettoenthalpiestrom verlaufen kann. Der Graph des EVS repräsentiert streng genommen nur die energetische Seite dieses Systems. Wird jedem Nettoenthalpiestrom des Graphens auch sein Typ gemäß Def. 16 zugeordnet, so ist dadurch auch die Datenflußrichtung der Attribute bekannt. Diese Kombination aus gerichtetem Graphen und Typeneinteilung der Pfeile des Graphen liefert eine ausreichende Beschreibung der Topologie der Datenflüsse der Attribute im EVS.

Die folgenden Annahmen (Punkt 3. und 4.) werden gemacht, um die Existenz und Eindeutigkeit der Lösungen des Algorithmus zur Bestimmung der Attribute (s.u.) zu gewährleisten. Sie stellen keine zu starke Einschränkung des Anwendungsbereichs von *deeco* dar und müssen, sofern sie sich auf Prozesse beziehen, zusätzlich zu den in den Modellannahmen 13 - 18 angesprochenen Bedingungen erfüllt sein. Die im Abschnitt 2.3 angegebenen Beispielprozesse fügen sich in den Rahmen dieser Modellannahmen ein.

3. Gemäß Def. 7 sind die Attribute eines Nettoenthalpiestroms, der an einem Prozeß beteiligt ist, durch die Angabe von $\mathcal{J} = (\mathcal{X}_F, \mathcal{X}_R)^\dagger$ eindeutig festgelegt. Input-Output-Relationen, die als Ausgabegrößen Attribute liefern, müssen folgende Eigenschaften besitzen (s.a. Abb. 2.10):

- (a) Sie stellen keinen funktionalen Zusammenhang zwischen $\mathcal{X}_{F,En}$ und $\mathcal{X}_{R,En}$ her,⁷³ wenn $\mathcal{X}_{F,En}$ und $\mathcal{X}_{R,En}$ dem gleichen Nettoenthalpiestrom zugeordnet sind.⁷⁴ Es ist zu beachten, daß diese Forderung nur die Attribute eintretender Nettoenthalpieströme betrifft und nicht die von austretenden.
- (b) Die Input-Output-Relationen bewirken keinen funktionalen Zusammenhang zwischen den Attributen verschiedener Nettoenthalpieströme, die sich auf der energetischen Entrance-Seite des Prozesses befinden.

Gemäß Modellannahme 20 ist der Graph, der das nicht-elektrische EVS beschreibt, zyklenfrei. Da die Datenflußrichtung eines Attributes sowohl parallel als auch antiparallel zum dazugehörigen Nettoenthalpiestrom verlaufen kann, gilt dies i.allg. nicht für den Graphen, der den Datenfluß der Attribute wiedergibt. Treten in diesem Graphen Zyklen auf, so wird durch die hier gemachten Modellannahmen 3.a) und 3.b) gewährleistet, daß es bei der Bestimmung der Attribute nicht zu einer „Selbstkonsistenzschleife“ kommt, die ein iteratives Vorgehen erfordern würde (s. Abb. 2.10).

4. Bilanzpunkte dürfen nur Nettoenthalpieströme des gleichen Typs verknüpfen. Die Typeneinteilung gemäß Def. 16 kann somit auch zur Klassifizierung der Bilanzpunkte, an denen Nettoenthalpieströme bilanziert werden, verwendet werden (s. Abb. 2.11). Darüber hinaus gelten folgende Einschränkungen für die Zahl der zu einem Bilanzpunkt hinfließenden und daraus abfließenden Nettoenthalpieströme:

- (a) Typ 1 Bilanzpunkte werden von ausschließlich einem Nettoenthalpiestrom mit Energie beliefert und geben diese an evtl. mehrere Nettoenthalpieströme ab.
- (b) Typ 2 und Typ 3 Bilanzpunkte besitzen nur einen zu- und einen abfließenden Nettoenthalpiestrom.
- (c) Typ 4 Bilanzpunkte geben ausschließlich einen Nettoenthalpiestrom ab und werden von evtl. mehreren Nettoenthalpieströmen versorgt.

⁷³D.h. $\mathcal{X}_{F,En}$ geht nicht in die Berechnung von $\mathcal{X}_{R,En}$ ein und umgekehrt.

⁷⁴Gl. 2.28 steht nur scheinbar im Widerspruch zu dieser Anforderung, da in ihr $T_{F,En}$ nur als Abkürzung für die rechte Seite der Gl. 2.26 steht und keine Eingabegröße darstellt.

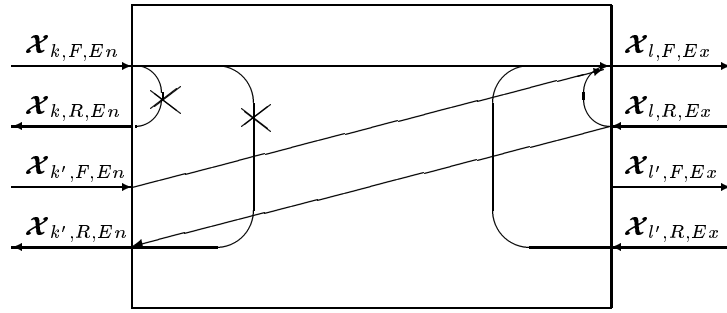


Abbildung 2.10: Beispiele für erlaubte und verbotene (\times) funktionale Beziehungen zwischen den Attributen eines Prozesses, die Eingabe- bzw. Ausgabegrößen sind. Die Pfeile stellen die Datenflußrichtung dar.

Die hier angesprochenen Einschränkungen stellen keine allzu strengen Bedingungen an das EVS: Die Aufteilung von anfallender Abwärme auf verschiedene Versorgungspfade kann meist als Typ 1 Bilanzpunkt modelliert werden, da Abwärmeströme häufig Typ 1 Nettoenthalpieströme sind. Die Versorgung eines Bedarfsprozesses durch verschiedene Versorgungspfade wird durch einen Typ 4 Bilanzpunkt ermöglicht. Soll ein Typ 2 oder 3 Nettoenthalpiestrom auf mehrere Nettoenthalpieströme aufgeteilt oder sollen umgekehrt mehrere zu einem zusammengefaßt werden, so ist dies nicht mit Hilfe eines einfachen Bilanzpunktes realisierbar. Solche Prozesse können aber trotzdem unter Verwendung von Vernetzungsprozessen modelliert werden.

An jedem Bilanzpunkt müssen neben den Bilanzgleichungen für die Energieströme auch die evtl. vorhandenen Identitätsgleichungen für die Attribute erfüllt sein. Dies bedeutet, daß die Attribute der Nettoenthalpieströme, die einen Bilanzpunkt verlassen, gleich den entsprechenden Attributen der eintretenden sind und umgekehrt. Darüber hinaus müssen aber bei mehreren eintretenden bzw. austretenden Nettoenthalpieströmen auch die Attribute der eintretenden bzw. austretenden untereinander gleich sein. Der physikalische Grund für diese Bedingung ist die Forderung, daß außerhalb von Prozessen, also insbesondere an Bilanzpunkten, keine Entropieproduktion auftreten darf, was z.B. beim Mischen von Massenströmen, die Enthalpieströme tragen und unterschiedliche Temperaturen besitzen, der Fall wäre. Da im Modell *deeco* auf eine Optimierung der Attribute verzichtet wird (s. Modellannahme 9), werden die Input-Output-Relationen, die als Ausgabegrößen Attribute liefern, als eindeutige Relationen modelliert (s. Kap. 2.3). Die Identitätsforderung stellt zusammen mit der Eindeutigkeit der Input-Output-Relationen starke Anforderungen an die Attribute, wenn mehrere Nettoenthalpieströme in einen Bilanzpunkt ein- bzw. aus diesem austreten, was dazu führen kann, daß diese Forderungen nicht gleichzeitig erfüllt werden können. Um dies zu vermeiden, d.h. um mit den bisher gemachten Modellannahmen konsistent zu bleiben, werden die oben genannten Einschränkungen an die Zahl der in die Bilanzpunkte ein- bzw. aus diesen austretenden Nettoenthalpieströme getroffen. Ein Blick auf Abb. 2.11 zeigt darüber hinaus, daß jeder Bilanzpunkt nur solche Attributdatenflüsse aufnimmt, die Ausgabegrößen von Prozessen darstellen, die mit dem betrachteten Bilanzpunkt durch Nettoenthalpieströme energetisch verknüpft sind. Diese Datenflüsse werden durch den Bilanzpunkt ohne Änderung weitergegeben, so daß die Identitätsgleichungen automatisch erfüllt werden.

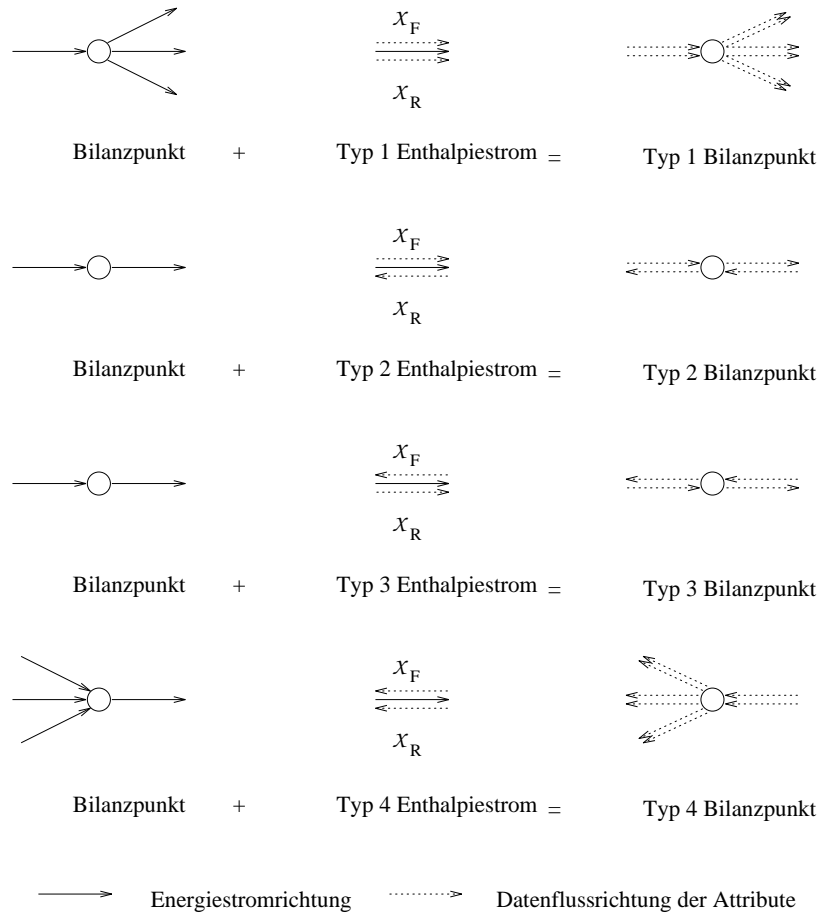


Abbildung 2.11:

Typeneinteilung der Bilanzpunkte: Die Abbildung zeigt anhand der Bilanzpunkte, wie der Graph, der das nicht-elektrische EVS beschreibt, durch Zuordnen von Typen zu den auftretenden Nettoenthalpieströmen in den Graphen übergeht, der den Datenfluß der Attribute wiedergibt. Im Falle des Typ 1 bzw. Typ 4 Bilanzpunktes dürfen auch mehr als die drei gezeichneten Nettoenthalpieströme aus- bzw. eintreten.

Berechnung der Attribute

Im folgenden soll ein Algorithmus angegeben werden, der es erlaubt, ausgehend von prozeßexternen Einflußgrößen und prozeßinternen Zustandsgrößen sowie evtl. direkt vorgegebenen (z.B. in Form einer Zeitreihe vorliegenden) Attributen alle zunächst noch nicht bekannten Attribute des EVS zu bestimmen. Da Attribute auch von anderen Attributen abhängen können, nämlich diejenigen, die Eingabegrößen eines Prozesses darstellen, muß diese Bestimmung schrittweise erfolgen, sofern eine mehrmalige Iteration (aus Rechenzeitgründen) vermieden werden soll: Immer dann, wenn ein Attribut zur Berechnung eines anderen mit herangezogen wird, muß es bereits vorher bestimmt worden sein. Die dazu erforderliche Kenntnis der gegenseitigen Abhängigkeit der Attribute ist vollständig im Graphen enthalten, der den Datenfluß der Attribute beschreibt; dieser Graph bildet sozusagen den „Fahrplan“, dem die schrittweise Bestimmung der Attribute zu folgen hat. Da dieser Graph eine sehr komplexe Struktur besitzen kann, ist es notwendig, diese zumindest etwas zu ordnen, wobei der folgende Satz der Graphentheorie sehr hilfreich ist:

Sei G ein gerichteter zyklensfreier Graph. Dann kann man die Knoten von G derart numerieren, daß für jeden Pfeil die Nummer des Knotens, bei dem er startet, kleiner ist als die Nummer des Knotens, an dem er endet [Wal87], S.53.

Etwas formaler lautet dieser Satz [Har65], S.269:

Sei G ein zyklensfreier Digraph mit g Knoten. Dann lassen sich (1.) die ganzen Zahlen von 1 bis g (Stufen genannt) den Knoten von G so zuordnen, daß jeder Stufe genau ein Knoten angehört, und (2.) für jeden Pfeil $\langle j, j' \rangle$ von G die Stufe des Knotens j kleiner ist, als die Stufe von j' (Stufenanordnung der Knoten eines zyklensfreien Digraphen).

Bezogen auf den zyklensfreien Digraphen (s. Modellannahme 20), der die energetische Verknüpfungsstruktur des nicht-elektrischen EVS beschreibt, bedeutet dies: Es ist möglich, die Prozesse und Bilanzen (also die Knoten) so anzuordnen, daß jeder Knoten nur Energie aufnimmt, die von Knoten abgegeben wurde, die einer niedrigeren Stufe angehören, und nur an solche Knoten Energie abgibt, die höherliegen.

Die Stufenanordnung der Knoten (und damit auch der Prozesse) erlaubt es nun, bei der Bestimmung der Attribute sukzessive vorzugehen: Zuerst werden die noch nicht bekannten attributiven Ausgabegrößen berechnet, die Nettoenthalpieströmen zugeordnet sind, die in den Prozeß eintreten, der sich auf der höchsten Stufe befindet. Die Information über die Höhe dieser Attribute wird dann, vermittelt über die Identitätsgleichungen der Bilanzpunkte, sofort an alle tieferliegenden Prozesse weitergegeben und dort gespeichert. Dieses Vorgehen wird dann für den zweithöchst gelegenen Prozeß wiederholt, usw. Auf der niedrigsten Stufe kehrt sich die Vorgehensweise um, d.h. beginnend mit dem sich dort befindenden Prozeß erfolgt nun die schrittweise Berechnung der attributiven Ausgabegrößen, die Nettoenthalpieströmen zugeordnet sind, die aus den Prozessen austreten. Etwas detaillierter läßt sich das Vorgehen folgendermaßen beschreiben:

Da Bilanzpunkte stets Energie aufnehmen und wieder abgeben, kann sich auf der höchsten Stufe nur ein Prozeß befinden, der darüber hinaus keinen energetischen Ausgang besitzt. Die Attribute, die Ausgabegrößen dieses Prozesses darstellen und zu Nettoenthalpieströmen gehören, die in den Prozeß eintreten, sind gemäß Modellannahme 21 Punkt 3.a) und 3.b) unabhängig von den attributiven Eingabegrößen dieser Nettoenthalpieströme. Nach Modellannahme 21 Punkt 1 lassen sich die attributiven Ausgabegrößen dieses Prozesses in diesem Falle eindeutig über die entsprechenden Input-Output-Relationen aus prozeßexternen Einflußgrößen und prozeßinternen Zustandsgrößen berechnen (oder sind unabhängig davon, z.B. als Teil einer gemessenen Zeitreihe, vorgegeben). Diese Ausgabegrößen werden dann, vermittelt über Bilanzpunkte, die sie unverändert passieren, an stufenmäßig tieferliegende Prozesse weitergegeben. Dort übernehmen sie die Rolle von Eingabegrößen und werden zur Berechnung der attributiven Ausgabegrößen von Nettoenthalpieströmen, die in den Prozeß eintreten, herangezogen, sobald der Algorithmus die Stufe dieses Prozesses erreicht, d.h. alle Input-Output-Relationen höherliegender Prozesse bereits abgearbeitet hat. Bildlich gesprochen „sammelt“ dabei jeder Prozeß solange Informationen (über die Höhe der attributiven Eingabegrößen auf seiner energetischen Exit-Seite) auf, bis er in der Lage ist, alle attributiven Ausgabegrößen auf seiner energetischen Entrance-Seite zu berechnen. Erst dann wird er „aktiv“, d.h. erst dann übermittelt er die Information über die Höhe dieser Größen an alle tieferliegenden Prozesse, die energetisch mit ihm verknüpft sind. Sobald der Algorithmus die Stufe 1 erreicht, sind im EVS alle Attribute bekannt, deren Datenfluß antiparallel zum dazugehörigen Energiestrom verläuft. Diese Attribute können deshalb zur Berechnung der noch unbekannten Attribute herangezogen werden, deren Datenfluß parallel zum Energiestrom ist, was die Asymmetrie der zugelassenen funktionalen Beziehungen im Hinblick auf ein- und austretende Energieströme erklärt (s. Abb. 2.10). Auch die Berechnung dieser Attribute erfolgt sukzessive; jetzt aber auf der Stufe 1 beginnend und auf der Stufe g endend.

Die hier wiedergegebene qualitative Diskussion des Algorithmus zur Bestimmung der Attribute soll im folgenden stärker formalisiert wiederholt werden, um ein genaues Verfolgen der Datenflüsse der Attribute zu ermöglichen.

Algorithmus zur Bestimmung der Attribute:

Die g Knoten des Graphen, der das nicht-elektrische EVS beschreibt, seien wie oben beschrieben (Satz über die Stufenanordnung der Knoten eines zyklensfreien Digraphen) g verschiedenen Stufen zugeordnet, die durch die ganze Zahl $f \in \{1, 2, \dots, g\}$ unterschieden werden. $\{a\}$ sei die Menge aller Prozesse und $\{b\}$ die Menge aller Bilanzpunkte des EVS.

1. Start: Setze $f := g$.
2. Befindet sich auf der Stufe f ein Prozeß $a \in \{a\}$?
Falls „Nein“, gehe zu 3.
Falls „Ja“, bestimme die Menge $\{\alpha\}_{En,a}$ aller energetischen Eingänge von a (s. Def. 30).
Für jedes $(a, \alpha) \in \{\alpha\}_{En,a}$ mit $\alpha = (H, k)$, d.h. für jeden energetischen Eingang, bei dem ein Nettoenthalpiestrom in den Prozeß eintritt,
 - (a) bestimme unter Verwendung der gegebenen Input-Output-Relationen alle Attribute, die diesem Nettoenthalpiestrom zugeordnet sind und zugleich Ausgabegrößen darstellen, deren Datenfluß somit antiparallel zum Energiestrom verläuft,
 - (b) suche den (durch Angabe des energetischen Eingangs eindeutig bestimmten) Bilanzpunkt m , der über den betrachteten Nettoenthalpiestrom direkt mit a verbunden ist ($m \in p(a) \cap \{b\}$),
 - (c) bestimme die Menge $p(m)$ der Vorgänger von m , d.h. alle Prozesse a' , die Energie an den Bilanzpunkt m abgeben,
 - (d) gib die unter 2.a) berechneten Attribute an alle Prozesse $a' \in p(m)$ weiter und speichere sie dort als attributive Eingabegrößen ab. (Dies sind die Attribute, die dem Nettoenthalpiestrom, der a mit m verbindet, zugeordnet sind und deren Datenfluß zur Nettoenthalpiestromrichtung entgegengesetzt verläuft. Da die Attribute an einem Bilanzpunkt Identitätsgleichungen erfüllen, stimmen diese Attribute mit den Attributen überein, die der Nettoenthalpiestrom besitzt, der die Bilanz m mit dem Prozeß a' verbindet, und deren Datenfluß ebenfalls entgegengesetzt zur Nettoenthalpiestromrichtung verläuft. Diese Attribute stellen dann Eingabegrößen des Prozesses a' dar.)
3. Erniedrige den Stufenindex f um eins. Prüfe ob $f = 1$.
Falls „Nein“, gehe zu 2.
Falls „Ja“, gehe zu 4.
4. Befindet sich auf der Stufe f ein Prozeß $a \in \{a\}$?
Falls „Nein“, gehe zu 5.
Falls „Ja“, bestimme die Menge $\{\alpha\}_{Ex,a}$ aller energetischen Ausgänge von a (s. Def. 30).
Für jedes $(a, \alpha) \in \{\alpha\}_{Ex,a}$ mit $\alpha = (H, l)$, d.h. für jeden Ausgang, bei dem ein Nettoenthalpiestrom den Prozeß verläßt,
 - (a) bestimme unter Verwendung der gegebenen Input-Output-Relationen alle Attribute, die diesem Nettoenthalpiestrom zugeordnet sind und zugleich Ausgabegrößen darstellen, deren Datenfluß somit parallel zum Energiestrom verläuft,
 - (b) suche den (durch die Angabe des energetischen Ausgangs) eindeutig bestimmten Bilanzpunkt m , der über den betrachteten Nettoenthalpiestrom direkt mit a verbunden ist ($m \in s(a) \cap \{b\}$),
 - (c) bestimme die Menge $s(m)$ der Nachfolger von m , d.h. alle Prozesse a' , die Energie aufnehmen, die vom Bilanzpunkt m abgegeben wurde,
 - (d) gib die unter 4.a) berechneten Attribute an alle Prozesse $a' \in s(m)$ weiter und speichere sie dort als attributive Eingabegrößen ab. (Dies sind die Attribute, die dem Nettoenthalpiestrom, der a mit m verbindet, zugeordnet sind und deren Datenfluß zur Nettoenthalpiestromrichtung parallel verläuft. Da die Attribute an einem Bilanzpunkt Identitätsgleichungen erfüllen, stimmen diese Attribute mit den Attributen überein, die der

Nettoenthalpiestrom besitzt, der die Bilanz m mit dem Prozeß a' verbindet, und deren Datenfluß ebenfalls parallel zur Nettoenthalpiestromrichtung verläuft. Diese Attribute stellen dann Eingabegrößen des Prozesses a' dar.)

5. Erhöhe den Stufenindex f um eins. Prüfe ob $f = g$.

Falls „Nein“, gehe zu 4.

Falls „Ja“, gehe zu 6.

6. Stop.

Ausgehend von der höchsten Stufe werden im 2. Schritt des Algorithmus Attribute von Prozessen über Bilanzen an Prozesse weitergegeben, deren Datenflußrichtung antiparallel zum Nettoenthalpiestrom verläuft. Die Stufeneinteilung der Knoten stellt sicher, daß kein Prozeß mit Nettoenthalpie versorgt wird, die von einem Prozeß stammt, der einer höheren Stufe angehört. Somit erhält auch kein Knoten einer Stufe Attribute von niedrigeren Stufen als Eingabegrößen, solange Attribute betrachtet werden, deren Datenflußrichtung antiparallel zum Nettoenthalpiestrom ist. Da alle Attribute, die Eingabegrößen eines Prozesses sind, Ausgabegrößen anderer Prozesse sein müssen, besitzt damit jeder Prozeß, der einer bestimmten Stufe angehört, spätestens sobald der Algorithmus diese Stufe erreicht, die notwendigen Eingabegrößen (auf seiner energetischen Exit-Seite) um alle Attribute auf seiner energetischen Entrance-Seite zu bestimmen, die Ausgabegrößen des betrachteten Prozesses sind. Zu beachten ist dabei, daß diese Attribute, die Ausgabegrößen sind, voraussetzungsgemäß (s. Modellannahme 21) nicht von den attributiven Eingabegrößen der Entrance-Seite abhängen dürfen. Die Berechnung der Attribute, deren Datenfluß antiparallel zum Nettoenthalpiestrom verläuft, endet mit dem Erreichen der niedrigsten Stufe. Im 4. Schritt des Algorithmus werden in ähnlicher Art und Weise ausgehend von der niedrigsten Stufe alle Attribute bestimmt, deren Datenfluß parallel zum Nettoenthalpiestrom ist. Da im 4. Schritt bereits alle Attribute, deren Datenfluß antiparallel zur Nettoenthalpiestromrichtung verläuft, bekannt sind, können diese bei der Berechnung der Attribute, deren Datenfluß parallel zur Nettoenthalpiestromrichtung ist, berücksichtigt werden. Die Modellannahme 21 Punkt 3.a) verbietet deshalb nur eine Abhängigkeit von $\mathcal{X}_{F,En}$ und $\mathcal{X}_{R,En}$. $\mathcal{X}_{F,Ex}$ darf dagegen eine Funktion von $\mathcal{X}_{R,Ex}$ sein und umgekehrt. Dies ermöglicht es, z.B. den Einfluß der Rücklauftemperatur auf die Vorlauftemperatur bei solarthermischen Kollektoranlagen zu beschreiben (s. Gl. 2.60).

Die Existenz und Eindeutigkeit der Lösung des hier beschriebenen Algorithmus bei einer beliebigen (aber endlichen) Anzahl von Stufen ist weitgehend einsichtig. Auf die Wiedergabe des exakten Beweises, der aufgrund der notwendigen Formalisierung nur wenig zum weiteren Verständnis von *deeco* beitragen würde, soll deshalb verzichtet werden. Er gelingt durch vollständige Induktion über alle Stufen.

2.6 Optimierung des Energieversorgungssystems

Definition 31 (Optimierungszeitraum, Intervalle) Der *Optimierungszeitraum*, für den die Optimierung des EVS erfolgen soll, wird in (Optimierungszeit-) *Intervalle* mit geeigneter (evtl. variabler) Länge eingeteilt. *deeco* konzentriert sich auf die Untersuchung von Fluktuationen des Energiebedarfs bzw. -angebotes, die schnell sind im Vergleich zu strukturellen Änderungen des Energiebedarfs aufgrund technischen Fortschritts, Wirtschaftswachstums oder geänderten Verbraucherverhaltens. Um das Optimierungsproblem handhabbar zu halten, ist es notwendig, sich auf eine der beiden Zeitskalen zu beschränken. Aus diesem Grund werden in *deeco* strukturelle Veränderungen des Energiebedarfs und -angebotes während der eigentlichen Optimierung vernachlässigt. Sie lassen sich aber im Rahmen geeignet definierter Szenarien untersuchen. Die Wahl eines Optimierungszeitraumes von der Länge eines Jahres, aufgeteilt in Einstunden-Intervalle, ist der Problemstellung i.allg. gut angepaßt. *deeco* ist in diesem Sinne statisch hinsichtlich struktureller Veränderungen die mehrere Jahre betreffen und dynamisch in Bezug auf

saisonale, wöchentliche und tägliche Fluktuationen des Energiebedarfs und -angebotes.

Alle bisher definierten Größen sind Momentanwerte, d.h. sie geben den Wert der betrachteten Größe bezogen auf eine infinitesimal kleine Zeiteinheit zum Zeitpunkt t an. Auf die explizite Angabe des Zeitarguments t wird in dieser Arbeit i.allg. verzichtet, um die Formeln übersichtlich zu halten. Neben den Momentanwerten werden im folgenden Mittelwerte über (Optimierungszeit-) Intervalle der Länge τ benötigt, die durch den hochgestellten Index τ kenntlich gemacht werden:

$$\tau G(t) := \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} G(t') dt'. \quad (2.95)$$

Dabei steht G als Platzhalter für eine beliebige Größe. Mittelwerte über den Optimierungszeitraum Θ werden durch den Index Θ charakterisiert:

$$\Theta G := \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta G(t') dt'. \quad (2.96)$$

Modellannahme 22 (Zielfunktion) *Eine gewichtete Linearkombination des während des Optimierungszeitraums im gesamten EVS auftretenden nicht-regenerativen Primärenergieeinsatzes, der Emissionen und (monetären) Kosten bildet die Zielfunktion des Vektoroptimierungsmodells deeco, die zu minimieren ist.*

Die Zielfunktion des Optimierungsproblems ergibt sich somit aus einer gewichteten Linearkombination der Komponenten des Vektors der verallgemeinerten Gesamtkosten $\Theta \dot{\mathbf{C}}_E$, gemittelt über den Optimierungszeitraum Θ , der in der Regel ein Jahr umfaßt:

$$\Theta \dot{\mathbf{C}}_E := \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta [\dot{\mathbf{C}}_E^{Var}(t) + \dot{\mathbf{C}}_E^{Fix}(t)] dt. \quad (2.97)$$

Dabei geben die Komponenten von $\dot{\mathbf{C}}_E^{Var}(t) = (\dot{E}_{P,E}^{Var}, \dot{\mathbf{P}}_E^{Var}, \dot{M}_E^{Var})^\dagger$ den variablen nicht-regenerativen Primärenergieeinsatz, die variablen Emissionen und variablen Kosten an, der bzw. die beim Betrieb des gesamten EVS zum Zeitpunkt t anfallen.

Die Komponenten von $\dot{\mathbf{C}}_E^{Fix}(t) = (\dot{E}_{P,E}^{Fix}, \dot{\mathbf{P}}_E^{Fix}, \dot{M}_E^{Fix})^\dagger$ stehen für die entsprechenden verallgemeinerten fixen Kosten. Für den Vektor der verallgemeinerten Gesamtkosten gilt:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{C}}_E(t) &= (\dot{E}_{P,E}, \dot{\mathbf{P}}_E, \dot{M}_E)^\dagger \\ &= (\dot{E}_{P,E}^{Var}, \dot{\mathbf{P}}_E^{Var}, \dot{M}_E^{Var})^\dagger + (\dot{E}_{P,E}^{Fix}, \dot{\mathbf{P}}_E^{Fix}, \dot{M}_E^{Fix})^\dagger. \end{aligned} \quad (2.98)$$

Die Zielfunktion $\Theta \Phi$ ist somit definiert durch:

$$\Theta \Phi = \rho_P \frac{\Theta \dot{E}_{P,E}}{\Theta \dot{E}_{P,E,0}} + \sum_\nu \rho_\nu \frac{\Theta \dot{P}_{\nu,E}}{\Theta \dot{P}_{\nu,E,0}} + \rho_M \frac{\Theta \dot{M}_E}{\Theta \dot{M}_{E,0}} \quad (2.99)$$

mit geeignet vorzugebenden Gewichtungsfaktoren ρ_P, ρ_ν und ρ_M . Der Index ν durchläuft dabei alle zu untersuchenden Emissionsarten. $\Theta \dot{E}_{P,E,0}$, $\Theta \dot{P}_{\nu,E,0}$ und $\Theta \dot{M}_{E,0}$ geben die Komponenten des Vektors der verallgemeinerten Kosten des gewählten Referenzsystems an.

Die Berechnung von $\dot{\mathbf{C}}_E^{Var}(t)$ wird in Abschnitt 2.6.1 (Gl. 2.100) durchgeführt; die von $\dot{\mathbf{C}}_E^{Fix}(t)$ in Abschnitt 2.6.2.

Im folgenden soll zunächst diskutiert werden, wie sich die verallgemeinerten variablen Kosten minimieren lassen. Im Anschluß daran wird untersucht, wie dies Eingang in die Minimierung der verallgemeinerten (fixen und variablen) Gesamtkosten finden kann.

2.6.1 Optimierung der verallgemeinerten variablen Kosten

Im Modell *deeco* wird zwischen 2 verschiedenen Optimierungsstufen unterschieden: Optimierung innerhalb eines Optimierungszeitintervalls τ (zeitlich lokale Optimierung) und Optimierung innerhalb des Optimierungszeitraums Θ (zeitlich globale Optimierung). Wie im folgenden genauer ausgeführt werden soll, führt die Berücksichtigung von Energiespeichern aufgrund der zu ihrer adäquaten Modellierung erforderlichen Einbeziehung von Differentialgleichungen (s. Gl. 2.62) dazu, daß es sich bei der zeitlich globalen Optimierung um ein dynamisches Optimierungsproblem handelt. Die Optimierungszeitintervalle werden durch diese Differentialgleichungen miteinander verknüpft, so daß unabhängig voneinander durchgeführte Optimierungen innerhalb aller Optimierungszeitintervalle eines Optimierungszeitraums i.allg. nicht zum gleichen Ergebnis führen, wie eine diese Verknüpfung berücksichtigende zeitlich globale Optimierung. Anschaulich gesprochen kann es bei einer den gesamten Optimierungszeitraum umfassenden Betrachtung sinnvoll sein, einen momentan bestehenden Energiebedarf nicht durch Entladen eines (gefüllten) Energiespeichers zu decken, sofern eine solche Entladung zu einem späteren Zeitpunkt mit besserem Wirkungsgrad erfolgen kann. Eine isolierte zeitlich lokale Optimierung würde dagegen i.allg. nicht auf eine sofortige Entladung verzichten.

2.6.1.1 Zeitlich lokale Optimierung

Die im folgenden aufgeführte Zielfunktion und die zu betrachtenden Nebenbedingungen gelten zunächst nur für einen Zeitpunkt, d.h. für infinitesimal kleine Zeitintervalle. Im Kap. 2.6.1.2 wird gezeigt, wie ihre Gültigkeit auf kleine, aber endliche Optimierungsintervalle τ ausgedehnt werden kann.

Mit Hilfe der bisher vorgenommenen Definitionen läßt sich der Vektor der verallgemeinerten variablen Kosten $\dot{\mathbf{c}}_E^{Var}$ wie folgt angeben:

$$\dot{\mathbf{c}}_E^{Var} = \sum_{c \in \{c\}} \dot{\mathbf{c}}_c^{Var} + \sum_{o \in \{o\}} \dot{\mathbf{c}}_o^{Var} + \sum_{p \in \{p\}} \dot{\mathbf{c}}_p^{Var} + \sum_{n \in \{n\}} \dot{\mathbf{c}}_n^{Var}. \quad (2.100)$$

Dabei werden die einzelnen Prozessen zugehörigen Größen (wie auch im folgenden) durch die Angabe von entsprechenden Indizes (z.B. c , o , p oder n) unterschieden. Der (momentane) variable Primärenergieeinsatz, die damit verbundenen Emissionen und Kosten des EVS setzen sich somit additiv aus den Beiträgen der einzelnen Umwandlungsprozesse $\{c\}$ (s. Gl. 2.33, 2.34, 2.35 sowie 2.31), der Kollektorprozesse $\{o\}$ (s. Gl. 2.52 u. 2.55 - 2.57), der Import-Export-Prozesse $\{p\}$ (s. Gl. 2.81 - 2.83) und der Vernetzungsprozesse $\{n\}$ (s. Gl. 2.86) zusammen. Die anderen Prozesse tragen nicht zu den verallgemeinerten variablen Kosten bei (s. Abschnitt 2.3).

Als zeitlich lokale Zielfunktion wird eine entsprechend Gl. 2.99 gewichtete Linearkombination der Komponenten von $\dot{\mathbf{c}}_E^{Var}$ herangezogen, die mit Φ^{Var} bezeichnet wird:

$$\Phi^{Var} := \rho_P \frac{\dot{E}_{P,E}^{Var}}{\Theta \dot{E}_{P,E,0}} + \sum_{\nu} \rho_{\nu} \frac{\dot{P}_{\nu,E}^{Var}}{\Theta \dot{P}_{\nu,E,0}} + \rho_M \frac{\dot{M}_E^{Var}}{\Theta \dot{M}_{E,0}}. \quad (2.101)$$

Definition 32 (Optimierungsgrößenvektor) Die *Optimierungsvariablen* (der zeitlich lokalen Optimierung) werden gebildet von den Energieströmen des EVS, die die einzelnen Prozesse energetisch miteinander verbinden. Es ist für spätere Anwendungen zweckmäßig, diese Optimierungsvariablen zu einem einzigen *Optimierungsgrößenvektor* \mathbf{O} zusammenzufassen, um sie formal gemeinsam ansprechen zu können.

Folgende Nebenbedingungen müssen zu jedem Zeitpunkt, d.h. zeitlich lokal, erfüllt sein:

1. Primäre Nebenbedingungen:
Alle Optimierungsvariablen müssen nicht-negativ sein.
2. Prozeßinterne Grenzwerte für Energieströme:
Alle prozeßinternen Grenzwerte, die sich auf Energieströme beziehen, müssen eingehalten werden (s. Def. 18).
3. Input-Output-Relationen für Energieströme und verallgemeinerte variable Kosten:
Alle Input-Output-Relationen, die Energieströme untereinander sowie Energieströme und verallgemeinerte variable Kosten miteinander verknüpfen, sind zu beachten:
 Bedarfsprozesse : Gl. 2.18, 2.19, 2.21,
 Umwandlungsprozesse : Gl. 2.31, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35,
 Kollektorprozesse : Gl. 2.52, 2.53, 2.55, 2.56, 2.57,
 Speicherprozesse : Gl. 2.63, 2.64, 2.65, 2.66, 2.67, 2.72,
 Import-Export-Prozesse : Gl. 2.81, 2.82, 2.83,
 Vernetzungsprozesse : Gl. 2.86, 2.87.
4. Prozeßinterne Grenzwerte für Zustandsgrößen:
Alle prozeßinternen Grenzwerte, die sich auf Zustandsgrößen beziehen, müssen eingehalten werden (Gl. 2.71).
5. Lokale Energiebilanz an Bilanzpunkten $b \in \{b\}$ des nicht-elektrischen EVS :

$$\forall b \in \{b\} \quad \sum_{(a,\alpha) \in P(b)} \dot{E}_{\alpha,Ex,a} = \sum_{(a',\alpha') \in S(b)} \dot{E}_{\alpha',En,a'}. \quad (2.102)$$

Dabei gibt $P(b)$ die Menge der energetischen Vorgängerausgänge (s. Kap. 2.4, Def. 30) und $S(b)$ die Menge der energetischen Nachfolgereingänge des Bilanzpunktes b an.

6. Globale Energiebilanz der elektrischen Energie:
Da das Stromnetz nicht explizit modelliert wird, ist es ausreichend, eine globale Energiebilanz für elektrische Energie zu erfüllen.⁷⁵

$$\sum_{a \in \{a\}} \dot{E}_{El,Ex,a} = \sum_{a \in \{a\}} \dot{E}_{El,En,a}. \quad (2.103)$$

Aufgrund der Linearität des zeitlich lokalen Optimierungsproblems, kann zu dessen Lösung der sehr effiziente Simplexalgorithmus herangezogen werden [Dan63]. Eine Einführung in dieses Standardverfahren der linearen Optimierung findet sich in [Fou81] und [Pap91]. Numerische Details werden in [Pre92] diskutiert.

2.6.1.2 Zeitlich globale Optimierung

Die zeitlich lokale Zielfunktion (Gl. 2.101) dient zur Minimierung des *momentanen* (variablen) Primärenergieeinsatzes und der damit verbundenen Emissionen bzw. Kosten. Wichtiger als diese Momentanwerte ist aber ihr Mittelwert, gebildet über einen längeren Zeitraum Θ , der in der Regel ein Jahr umfaßt. Die verallgemeinerten variablen Kosten, die vom EVS während des Zeitraums Θ verursacht werden, ergeben sich aus

$${}^{\Theta}\dot{\mathcal{C}}_E^{Var} = \frac{1}{\Theta} \int_0^{\Theta} \dot{\mathcal{C}}_E^{Var}(t) dt. \quad (2.104)$$

Als zeitlich globale Zielfunktion ${}^{\Theta}\Phi^{Var}$ wird eine entsprechend Gl. 2.99 gewichtete Linearkombination der Komponenten von ${}^{\Theta}\dot{\mathcal{C}}_E^{Var}$ verwendet.

⁷⁵In der Summe auf der rechten Seite dieser Gleichung sei auch $\dot{E}_{El,1,En}$ aus Abschnitt 2.3.4 enthalten.

Definition 33 (Zustandsgrößenvektor, Einflußgrößenvektor) Es ist hilfreich, neben dem Vektor der zeitlich lokalen Optimierungsvariablen \mathcal{O} (s. Def. 32) einen *Zustandsgrößenvektor* \mathcal{S} , der die prozeßinternen Zustandsgrößen⁷⁶ sämtlicher Prozesse des EVS umfaßt, und einen *Einflußgrößenvektor* \mathcal{R} , der für die Gesamtheit aller im EVS auftretenden prozeßexternen Einflußgrößen steht, zu definieren.

Die zeitlich globale Zielfunktion ${}^{\Theta}\Phi^{Var}$ läßt sich formal schreiben als:

$${}^{\Theta}\Phi^{Var}[[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t), \Theta]] = \frac{1}{\Theta} \int_0^{\Theta} \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t)] dt. \quad (2.105)$$

Die doppelten eckigen Klammern deuten dabei an, daß es sich bei ${}^{\Theta}\Phi^{Var}$ nicht um eine Funktion von $\mathcal{S}(t)$, $\mathcal{O}(t)$ und $\mathcal{R}(t)$ sondern um ein Funktional handelt. Anfangs- und Endzustand sollen übereinstimmen, so daß auf eine Bewertung des Endzustandes verzichtet werden kann. Gemäß Modellannahme 13 - 18 und Abschnitt 2.5 lassen sich alle Attribute des EVS aus den Zustandsgrößen und den prozeßexternen Einflußgrößen (sowie aus den vorgegebenen, z.B. in Form einer Zeitreihe vorliegenden Attributen) berechnen. Werden die vorgegebenen Attribute im folgenden formal zu den prozeßexternen Einflußgrößen gerechnet, so kann auf die explizite Angabe der Attribute in der Zielfunktion verzichtet werden.

Die Differentialgleichungen, die das Verhalten der prozeßinternen Zustandsgrößen der Speicherprozesse beschreiben (s. Gl. 2.62 zusammen mit Gl. 2.63 - 2.68), lassen sich mit Hilfe einer geeigneten Vektorfunktion \mathbf{F} wie folgt zusammenfassen:

$$\dot{\mathcal{S}}(t) = \mathbf{F}[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t)]. \quad (2.106)$$

Die zeitlich lokalen Nebenbedingungen, die Anforderungen an die Energieströme stellen (s. Abschnitt 2.6.1.1), definieren den *zulässigen Steuerbereich* $\Omega[\mathcal{S}(t), \mathcal{R}(t)]$. Es handelt sich dabei um die primären Nebenbedingungen, die prozeßinternen Grenzwerte für Energieströme, die Input-Output-Relationen für Energieströme und verallgemeinerte variable Kosten, die lokalen Energiebilanzen an nicht-elektrischen Bilanzpunkten und die globale Bilanz der elektrischen Energie. Die zeitlich lokalen Nebenbedingungen, die sich auf die Zustandsgrößen (Gl. 2.71) beziehen (d.h. die prozeßinternen Grenzwerte für die Zustandsgrößen), definieren den *zulässigen Zustandsbereich* $\Gamma[\mathcal{R}(t)]$.

Da nun zusätzlich zu den in Abschnitt 2.6.1.1 aufgeführten zeitlich lokalen Nebenbedingungen auch die Differentialgleichungen der prozeßinternen Zustandsgrößen berücksichtigt werden müssen, handelt es sich bei der Minimierung der zeitlich globalen Zielfunktion um ein dynamisches Optimierungsproblem:

Minimiere (bei vorgegebenem Anfangswert $\mathcal{S}(t=0)$)

$${}^{\Theta}\Phi^{Var}[[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t), \Theta]] \quad (2.107)$$

unter Beachtung von ($\forall t \in [0, \Theta]$)

$$\dot{\mathcal{S}} = \mathbf{F}[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t)], \quad (2.108)$$

$$\mathcal{O} \in \Omega[\mathcal{S}(t), \mathcal{R}(t)], \quad (2.109)$$

$$\mathcal{S} \in \Gamma[\mathcal{R}(t)]. \quad (2.110)$$

⁷⁶Die bei der Modellierung der Bedarfs- und Kollektorprozesse auftretenden Zustandsgrößen sind unabhängig von der Optimierung. Im Rahmen der Diskussion der zeitlich globalen Optimierung sollen deshalb unter Zustandsgrößen allein die optimierungsabhängigen Speicherenergieinhalte verstanden werden (Zustandsgrößen im engeren Sinne).

Die Vielzahl der (prinzipiell erlaubten) Prozesse und der damit verbundenen Optimierungsvariablen sowie der Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen erschwert den Einsatz üblicher Verfahren (Minimumprinzip von Pontryagin oder Dynamische Programmierung [Pap91]) zur Lösung des dynamischen Optimierungsproblems. So wächst z.B. der Rechenaufwand der Dynamischen Programmierung exponentiell mit der Zahl der prozeßinternen Zustandsgrößen [Pap91], S.371.⁷⁷ Der konstruktive Einsatz des Minimumprinzips von Pontryagin stößt vor allem durch die auftretenden Ungleichungsnebenbedingungen für die Zustandsgrößen (Gl. 2.71) auf Schwierigkeiten [Neu77], S.165. Im folgenden soll deshalb ein dem Modell angepaßtes Optimierungsverfahren vorgestellt werden, daß auf eine vollkommen exakte Lösung des Optimierungsproblems verzichtet und als Quasidynamische Optimierung bezeichnet wird. Wie und unter welchen Umständen die Methode der Dynamischen Programmierung zur (näherungsweisen) Lösung des hier beschriebenen dynamischen Optimierungsproblems herangezogen werden kann, wird im Anhang E aufgezeigt.

Definition 34 (Quasidynamische Optimierung) Unter *Quasidynamischer Optimierung*, dem in dieser Dissertation verwendeten Verfahren, wird die Simulation des Betriebs des EVS bei zeitlich lokaler Optimierung unter Einbeziehung der Systemvergangenheit verstanden, s.a. [Bru92] u. [Gro93]. Für jeden Zeitpunkt des Optimierungszeitraums werden dabei die Optimierungsvariablen unter Berücksichtigung des jeweils herrschenden Systemzustandes (gegeben durch die momentanen Werte der Zustandsgrößen) durch Minimieren der zeitlich lokalen Zielfunktion berechnet. Diese Optimierung beeinflußt über die Zustandstransformationsgleichungen die zukünftigen Werte der Zustandsgrößen. Im Gegensatz zur vollkommen dynamischen Optimierung bezieht die Quasidynamische Optimierung diese Auswirkungen auf die Zukunft jedoch nicht in die zeitlich lokal stattfindende Berechnung der Optimierungsvariablen mit ein. Unter Zukunft wird dabei der für den betrachteten Zeitpunkt noch verbleibende Teil des Optimierungszeitraums verstanden.⁷⁸

Die mit Hilfe eines vollkommen dynamischen Optimierungsverfahrens berechneten Werte der zeitlich globalen Zielfunktion ließen sich in der Realität nur dann reproduzieren, wenn dasselbe Optimierungsverfahren auch zur Steuerung des realen Energiesystems eingesetzt werden würde. Für relativ kleine Energiesysteme, bei denen der zukünftige (im obigen Sinne) Energiebedarf relativ gut vorhergesagt werden kann, z.B. für industrielle Energieversorgungssysteme bzw. dann, wenn der Optimierungszeitraum sehr kurz ist, ist der Einsatz solcher Optimierungsverfahren sinnvoll und heute bereits erprobt ([Kre93] bzw. [Dub86]). Für kommunale und regionale Energiesysteme bei Optimierungszeiträumen bis zu einem Jahr stellen diese Verfahren, vor allem wegen des starken Einflusses der schwer vorhersagbaren Außentemperatur auf den Raumwärmebedarf, aber noch nicht den Stand der Technik dar. Für diese Energiesysteme ist die Methode der Quasidynamischen Optimierung ein problemangepaßtes Verfahren, das bei Bedarf durch Anwendung der Methode der Dynamischen Programmierung auf Subsysteme dieses Energiesystems ergänzt werden kann (s. Anhang E). Konkrete Anwendungsfälle des Verfahrens der Dynamischen Programmierung auf Systeme mit einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage, einem Kraft- und einem Heizwerk sowie einem Wärme- bzw. einem (supraleitenden) elektrischen Energiespeicher sind in [Kun94], [Sch94a] und [Kun96] beschrieben.

Zur numerischen Simulation wird im Modell *deeco* das Polygonzugverfahren von Euler–Cauchy [Jor73],[Sto90] mit angepaßter Schrittweitensteuerung verwendet. Dieses Verfahren 1. Ordnung ist im Bereich der Systemsimulation üblich [Bos87] und wird auch bei der numerischen Umsetzung der Dynamischen Programmierung eingesetzt [Bie80].⁷⁹

⁷⁷Entscheidend ist in diesem Zusammenhang die Zahl der Speicherenergieinhalte, d.h. die Anzahl der im EVS zugelassenen Energiespeicher. Mehr als 3-4 Energiespeicher führen bereits zu massiven numerischen Problemen [Bie80], S.97.

⁷⁸Zur näheren Begriffsbestimmung von Optimierung, Simulation, etc. siehe Anhang E.1.

⁷⁹Dieses im Vergleich zu elaborierteren Methoden der numerischen Integration (z.B. Runge-Kutta-Verfahren) relativ einfache Verfahren kann bei den hier angenommenen Genauigkeitsansprüchen akzeptiert werden, wenn man

Algorithmus der Quasidynamischen Optimierung:

Der Algorithmus beginnt mit $t = 0$ und den Anfangswerten $\mathcal{S}(t = 0)$. Unter der Annahme, daß sich die Zustandsgrößen in einem Zeitintervall $[t, t + \Delta t[$ mit $\Delta t \leq 1\text{h}$ wenig ändern und die prozeßexternen Einflußgrößen $\mathcal{R}(t)$, die in Form von Einstunden-Mittelwerten vorliegen, konstant sind, werden zunächst alle noch fehlenden Attribute berechnet (s. Abschnitt 2.5). Gemäß den Input-Output-Relationen für die Attribute sind dann auch diese im Intervall der Länge Δt konstant. Zeitlich lokale Optimierung unter Beachtung der durch den zulässigen Steuerbereich $\Omega[\mathcal{S}(t), \mathcal{R}(t)]$ repräsentierten zeitlich lokalen Nebenbedingungen wird dazu benutzt, den Optimierungsgrößenvektor $\mathcal{O}(t)$, der im betrachteten Intervall ebenfalls konstant angenommen wird, zu bestimmen. Das hier angesprochene Verfahren der zeitlich lokalen Optimierung, das im Abschnitt 2.6.1.1 zunächst für infinitesimal kurze Zeitintervalle definiert wurde, kann wegen der innerhalb des Zeitintervalls $[t, t + \Delta t[$ herrschenden bzw. in guter Näherung angenommenen Konstanz aller am Optimierungsverfahren beteiligten Größen auch auf die durch Mittelung im Zeitintervall $[t, t + \Delta t[$ entstandenen Mittelwerte dieser Größen übertragen werden. Es wird im folgenden ebenfalls als zeitlich lokale Optimierung bezeichnet.

Mit Hilfe des Optimierungsgrößenvektors können die Zustandsgrößen \mathcal{S} am Ende des Intervalls berechnet werden:⁸⁰

$$\mathcal{S}(t + \Delta t) = \mathcal{S}(t) + \mathbf{F}[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t)] \cdot \Delta t. \quad (2.111)$$

$\mathcal{S}(t + \Delta t)$ wird akzeptiert, falls die Abweichung $\Delta \mathcal{S}(t, \Delta t) := \mathcal{S}(t + \Delta t) - \mathcal{S}(t)$ von $\mathcal{S}(t)$ klein ist, d.h. falls für jede Komponente $\Delta S_\iota(t, \Delta t)$ von $\Delta \mathcal{S}(t, \Delta t)$ gilt

$$|\Delta S_\iota(t, \Delta t)| \leq \delta \cdot |S_\iota(t)|. \quad (2.112)$$

Dabei ist δ eine feste, genügend klein gewählte Zahl und $S_\iota(t)$ die ι -te Komponente von $\mathcal{S}(t)$.

Sind die Abweichungen zu groß, so wird das betrachtete Zeitintervall solange halbiert und das Verfahren solange wiederholt, bis die Bedingung 2.112 erfüllt ist. Die Angabe von prozeßinternen Grenzwerten für die maximale Be- und Entladung von Energiespeichern (s. Modellannahme 16) gewährleistet, daß dieses Verfahren nach einer endlichen Zahl von Halbierungsschritten abbricht.

Durch diese Methode wird der Optimierungszeitraum Θ in Ξ disjunkte, i.allg. unterschiedlich lange Intervalle zerlegt, die mit Hilfe des Index $\xi, \xi \in \{1, \dots, \Xi\}$, unterschieden und Optimierungszeitintervalle genannt werden:

$$\tau_\xi = [t_{\xi-1}, t_\xi[. \quad (2.113)$$

Aufgrund der vorausgesetzten Konstanz aller an der Optimierung im Intervall τ_ξ beteiligten Größen, kann der Optimierungsgrößenvektor in diesem Intervall ebenso als konstant betrachtet werden, d.h. es gilt:

$$\tau_\xi \mathcal{O} := \frac{1}{t_\xi - t_{\xi-1}} \int_{t_{\xi-1}}^{t_\xi} \mathcal{O}(t) dt = \mathcal{O}(t_{\xi-1}). \quad (2.114)$$

Mit Hilfe des Optimierungsgrößenvektors $\tau_\xi \mathcal{O}$ können die Mittelwerte der verallgemeinerten variablen Kosten (zusammengefaßt zu $\tau_\xi \dot{\mathcal{C}}_E^{Var}$) im Intervall τ_ξ berechnet werden (s. Gl. 2.100). Der Optimierungsgrößenvektor enthält darüber hinaus die Information über die Höhe der in die einzelnen Prozesse eintretenden bzw. aus ihnen austretenden Energieströme.

im Auge behält, daß z.B. die Energiebedarfsdaten i.allg. nur in der Form von Einstunden-Mittelwerten vorliegen. Die verwendete Näherung ist darüber hinaus wesentliche Bedingung dafür, daß das zeitlich-lokale Optimierungsproblem linear bleibt, was die Verwendung des leistungsstarken Simplexalgorithmus ermöglicht.

⁸⁰Modelltechnisch betrachtet stellt Gl. 2.111 eine Berechnungsvorschrift für $\mathcal{S}(t + \Delta t)$ in Form einer (Modell-) Gleichung dar. Strenggenommen ist aber der so berechnete Wert nur ein Näherungswert für den tatsächlichen Wert des Zustandsgrößenvektors am Ende des Intervalls. Da die modelltechnischen Aspekte in dieser Arbeit im Vordergrund stehen, wird hier und bei ähnlich gearteten Fällen im folgenden auf die Verwendung des \approx -Zeichens verzichtet.

Die Quasidynamische Optimierung liefert die Mittelwerte der vom EVS im Zeitraum Θ verursachten verallgemeinerten variablen Kosten:

$$\Theta \dot{\mathbf{c}}_E^{Var} = \frac{1}{\Xi} \sum_{\xi=1}^{\Xi} \tau_{\xi} \dot{\mathbf{c}}_E^{Var}. \quad (2.115)$$

Analog dazu werden die auf den Zeitraum Θ bezogenen Mittelwerte der in die einzelnen Prozesse eintretenden bzw. aus ihnen austretenden Energieströme bestimmt. Mit ihrer Hilfe ist es möglich zu untersuchen, zu welchen Anteilen die verschiedenen Versorgungspfade an der Bedarfsdeckung beteiligt sind.

Anmerkungen:

Selbstkonsistenzbedingung der Speicherenergieinhalte:

Die Methode der Quasidynamischen Optimierung beginnt bei einem zunächst beliebig vorgegebenen Wert für $\mathbf{S}(t = 0)$ und liefert am Ende des Verfahrens den Vektor $\mathbf{S}(t = \Theta)$. Um die Verringerung des Primärenergieeinsatzes (und damit verbunden aller verallgemeinerten variablen Kosten) durch ein Entleeren der Energiespeicher unter ihren Anfangsenergieinhalt $\mathbf{S}(t = 0)$ zu verhindern, wird $\mathbf{S}(t = 0) = \mathbf{S}(t = \Theta)$ gefordert. Diese Bedingung läßt sich im Rahmen der Quasidynamischen Optimierung nur durch ein iteratives Verfahren erfüllen, bei dem der Endwert $\mathbf{S}(t = \Theta)$ solange als Anfangswert eines anschließenden Optimierungslaufes verwendet wird, bis $\mathbf{S}(t = \Theta)$ um weniger als (z.B.) 1% von $\mathbf{S}(t = 0)$ abweicht (Konvergenzkriterium).

Sicherstellung der Speicherbeladung:

Steht zu einem bestimmten Zeitpunkt mehr Energie in Form von Abwärme bzw. aus regenerativen Energiequellen zur Verfügung, als von den Bedarfsprozessen momentan nachgefragt wird, so ist es i.allg. sinnvoll, diese Energie zu speichern. Diese Speicherung bewirkt keine Verbesserung der zeitlich lokalen Zielfunktion, kann aber zeitlich global gesehen vernünftig sein. Das Verfahren der Quasidynamischen Optimierung führt somit (im Gegensatz zu dem der vollkommen dynamischen Optimierung, das in der Lage ist zu beurteilen, inwieweit eine Speicherung unter Berücksichtigung der dazu erforderlichen Hilfsenergie sinnvoll ist) nicht automatisch zu einer optimalen Beladung der Energiespeicher. Solange aber der mit der Speicherung verbundene Hilfsenergiebedarf klein ist, sollte deshalb bei diesem Verfahren zu jedem Zeitpunkt versucht werden, überschüssige Energie zu speichern. Dies wird durch Verwendung des „=“ - Zeichens in Gl. 2.21, 2.32 und 2.52 erreicht, sofern die entsprechenden Energieströme zur Speicherung vorgesehen sind. Dadurch wird die Beladung der angeschlossenen Speicherprozesse erzwungen. Um eine dann mögliche Überladung der Speicher, d.h. ein Überschreiten des maximalen Speicherinhalts, zu verhindern, sind die Energiespeicher so zu modellieren, daß der gemäß Gl. 2.111 berechnete Wert des Speicherenergieinhalts am Ende eines Optimierungszeitintervalls nur dann übernommen wird, wenn dieser kleiner als der vorgegebene Maximalwert ist. Ist er größer, so ist als neuer Speicherenergieinhalt der Maximalwert zu verwenden, d.h. ein Energieüberschuß, der von den vorhandenen Speichern nicht mehr aufgenommen werden kann, tritt modelltechnisch als zusätzlicher Speicherungsverlust in Erscheinung. Die Verwendung der Quasidynamischen Optimierung erfordert somit eine diesem Verfahren angepaßte Modellierung der Prozesse.

2.6.2 Optimierung der verallgemeinerten fixen Kosten

Die verallgemeinerten fixen Kosten des gesamten EVS ergeben sich additiv aus den entsprechenden Werten der Einzelprozesse $a \in \{a\}$:

$$\dot{\mathbf{c}}_E^{Fix} = \sum_{a \in \{a\}} \dot{\mathbf{c}}_a^{Fix}. \quad (2.116)$$

Aufgrund der zeitlichen Konstanz dieser Größen läßt sich die Integration des 2. Terms auf der rechten Seite von Gl. 2.97 trivial durchführen.

Das Modell *deeco* erlaubt zwei verschiedene Einsatzmöglichkeiten: (1.) Optimierung des Betriebs bestehender kommunaler oder regionaler Energiesysteme und (2.) Identifizierung optimaler Investitionsentscheidungen beim Auf- oder Umbau solcher Energiesysteme.

ad 1.: Bei dieser Einsatzart sind alle Investitionsentscheidungen bereits getroffen. Die Maximalleistung der energietechnischen Prozesse bzw. andere Kenngrößen (wie z.B. die Kollektorfläche bei solarthermischen Anlagen oder das Volumen von Warmwasser-Wärmespeichern), die die „Größe“ der entsprechenden Anlage charakterisieren, liegen somit, ebenso wie die dadurch bestimmbar verallgemeinerten fixen Kosten, fest. Die Optimierungsaufgabe beschränkt sich darauf, den Betrieb der Prozesse optimal zu gestalten, wozu die Methode der Quasidynamischen Optimierung der verallgemeinerten variablen Kosten verwendet werden kann.

ad 2.: Dieser Modus dient dazu herauszufinden, mit welchen Kombinationen aus konventionellen Energieumwandlungstechniken, Techniken der rationellen Energieverwendung und/oder Nutzung regenerativer Energiequellen, Energiespeichern sowie Maßnahmen zur Schadstoffrückhaltung sich ein gegebener Energiebedarf möglichst optimal decken läßt. Dazu werden die vorgegebenen Bedarfsprozesse modellmäßig in sinnvoller Art und Weise mit vielen unterschiedlichen konventionellen, primärenergieeinsparenden oder emissionsmindernden Prozessen verknüpft. Eine Optimierung dieses hypothetischen Energiesystems unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten erlaubt es, diejenigen Prozesse zu identifizieren, die nicht nur prinzipiell zugelassen, sondern auch tatsächlich eingesetzt werden. Bei dieser Einsatzart von *deeco* darf sich aber die Optimierung nicht nur auf die verallgemeinerten variablen Kosten beschränken. Die mit dem Bau der energietechnischen Prozesse verbundenen verallgemeinerten fixen Kosten sind ebenfalls mit in die Betrachtung einzubeziehen. Leider ist es nicht möglich, beide Kostenarten getrennt zu minimieren: Die Größe der energietechnischen Prozesse determiniert ihre verallgemeinerten fixen Kosten. Gleichzeitig definiert die vorgegebene Größe aber auch die maximale Leistung von energietechnischen Prozessen und nimmt damit Einfluß auf den bei der Quasidynamischen Optimierung zu beachtenden zulässigen Steuerbereich. Andererseits ist eine gleichzeitige exakte Optimierung beider Kostenarten für praktisch relevante Fälle mit vertretbarem Rechenzeitaufwand und Speicherplatzbedarf nicht realisierbar: Eine Optimierung des Betriebs des Energiesystems unter gleichzeitiger Bestimmung der optimalen Maximalleistung der Prozesse würde zu einer Kopplung jedes Optimierungszeitintervalls mit jedem anderen führen.⁸¹ Wie dies genau zustandekommt und welche Konsequenzen dies hat, wird in [Gro91] und [Gro95] ausführlich besprochen. Diese Kopplung verhindert das sukzessive Vorgehen der Quasidynamischen Optimierung und würde strenggenommen eine gleichzeitige Optimierung aller Optimierungszeitintervalle erforderlich machen. Während in *deeco* die zeitlich lokale Optimierung ein lineares Optimierungsproblem darstellt, gilt dies, aufgrund der i.allg. nichtlinearen Abhängigkeit der Wirkungsgrade von den intensiven Größen, z.B. von den Temperaturen der Wärmespeicher und damit gemäß Gl. 2.73 auch von den Wärmespeicherenergieinhalten, die Zustandsgrößen darstellen, für die zeitlich globale Optimierung nicht mehr. Diese Nichtlinearität und die Vielzahl der Optimierungsvariablen und zu beachtenden Nebenbedingungen⁸² verhindern eine simultane, exakte Optimierung aller Optimierungszeitintervalle und damit eine gleichzeitige Minimierung der verallgemeinerten variablen und fixen Kosten.

⁸¹Die bereits besprochenen Zustandstransformationsgleichungen führen im Gegensatz dazu nur zu einer Kopplung zeitlich aufeinander folgender Zeitintervalle!

⁸²In der in Kap. 3 beschriebenen Anwendung von *deeco* auf die Modellstadt „Würzburg“ ergäben sich bei 8760 Optimierungszeitintervallen etwa 1 Mio. Optimierungsvariablen und 1,4 Mio. Nebenbedingungen.

2.6.3 Optimierung der verallgemeinerten Kosten

Im Modell *deeco* wird deshalb ähnlich wie im Modell ECCO [Gro93] auf die Methode der interaktiven Minimierung der (verallgemeinerten) Kosten zurückgegriffen [Gro91], S.53. Dabei wird zunächst unter Zugrundelegung eines möglichst großen Satzes von Energieversorgungsprozessen eine Optimierung der verallgemeinerten variablen Kosten durchgeführt, deren Ergebnis zusammen mit der Berechnung der verallgemeinerten fixen Kosten dazu verwendet werden kann, Energieversorgungsprozesse (= alle Prozesse außer den Bedarfsprozessen) zu identifizieren, die teuer (im hier verallgemeinerten Sinne) sind, aber nur einen geringen Beitrag zur Versorgung des EVS leisten. Diese werden dann aus dem Satz der betrachteten Prozesse ausgeschlossen. Das Verfahren wird solange wiederholt bis dadurch keine Verbesserung der Gesamtzielfunktion mehr erreicht werden kann. Diese Vorgehensweise, die auf eine strenge Optimierung der Gesamtzielfunktion verzichtet, ist gerechtfertigt, da im Modell *deeco* die Minimierung des Primärenergieeinsatzes und der Emissionen im Vergleich zur Kostenminimierung im Vordergrund steht. Der fixe Primärenergieaufwand und die fixen Emissionen sind aber (im Gegensatz zu den fixen monetären Kosten) i.allg. klein, verglichen mit den entsprechenden variablen Werten.

Zusammenfassend wird angenommen:

Modellannahme 23 (Interaktive Reduzierung der verallgemeinerten Gesamtkosten)

Die verallgemeinerten Gesamtkosten lassen sich mit der gewünschten Genauigkeit durch Minimieren der verallgemeinerten variablen Kosten in Verbindung mit interaktiver Selektion der zugelassenen Energieversorgungsprozesse minimieren.

Das Computerprogramm *deeco* liefert im Anschluß an die Quasidynamische Optimierung der verallgemeinerten variablen Kosten die im Optimierungszeitraum aufgetretene Maximalleistung der Prozesse, mit deren Hilfe die Berechnung der verallgemeinerten fixen Kosten erfolgen kann.

Es ist im Modell *deeco* möglich, physikalisch getrennt modellierte Prozesse des gleichen Prozeßtyps in bezug auf die verallgemeinerten fixen Kosten als aggregierten Prozeß (= Prozeßaggregat) zu beschreiben. Die verallgemeinerten fixen Kosten dieses Prozeßaggregats sind dann eine Funktion seiner Größe und diese ergibt sich aus dem Maximalwert (im Zeitraum Θ) der aufaddierten Leistungen aller beteiligten Prozesse, sofern keine Maximalleistung des Prozeßaggregates vorgegeben ist, d.h. sofern das Programm beliebig viele Prozeß(einheiten) zur Energieversorgung heranziehen kann. Umgekehrt kann jedoch auch die maximale Leistung des Prozeßaggregats vorgegeben werden. In diesem Falle ist bei der zeitlich lokalen Optimierung (s. Abschnitt 2.6.1.1) zusätzlich zu den dort angegebenen Nebenbedingungen zu berücksichtigen, daß die aufaddierte Leistung der Einzelprozesse die Maximalleistung des Prozeßaggregats nicht übersteigen darf.

2.7 Modellkritik

Bei der Interpretation von Ergebnissen, die von *deeco* geliefert werden, ist es erforderlich,

1. die gemachten Modellannahmen,
2. Rundungsfehler durch den Computereinsatz sowie
3. Beobachtungs- und Bestimmungsfehler der verwendeten Eingabedaten

zu berücksichtigen.

ad 1.) Beim Erstellen dieser Arbeit wurde Wert darauf gelegt, die gemachten Modellannahmen möglichst vollständig herauszuarbeiten, optisch hervorzuheben und somit nicht im fortlaufenden Text „untergehen“ zu lassen. Dieses Vorgehen verdeutlicht zum einen die bei *deeco*, wie bei allen anderen Computermodellen, vorhandene Bedingtheit der Modellergebnisse und erleichtert zum anderen eine Kontrolle des Modells auf seine logische Konsistenz, d.h. eine Modellverifikation.

Gleichzeitig gelingt es dadurch zu zeigen, wodurch diese Modellannahmen hervorgerufen werden (notwendige Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes, Verfügbarkeit von Daten, rechentechnisch notwendige Vereinfachungen, etc.). Die gemachten Annahmen stellen Anforderungen an energietechnische Prozesse, die nicht von allen heute realisierbaren eingehalten werden. Der Anwendungsbereich von *deeco* ist damit zwar eingeschränkt, trotzdem lassen sich aber für viele heute interessant erscheinenden Energietechniken Prozeßvarianten finden, die die gestellten Forderungen erfüllen. Insbesondere umfaßt der Anwendungsbereich von *deeco* alle Techniken, die bereits in seinen Vorgängermodellen ECCO [Gro91] und ECCO-Solar [Bru92] zugelassen waren. Bei der expliziten Modellierung der energietechnischen Prozesse wird soweit wie möglich auf vorhandene Literatur zurückgegriffen. Leider wird darin nicht immer angegeben, inwieweit die beschriebenen Modelle validiert, d.h. an der Realität getestet sind, und welcher Genauigkeitsanspruch der Modellierung zugrundeliegt. Sollte sich bei der zukünftigen Anwendung und damit weiteren Validierung von *deeco* herausstellen, daß einzelne Module den geforderten Genauigkeitsansprüchen (s.u.) nicht gerecht werden, so können diese aufgrund der modulartigen Struktur des Programms einfach durch bessere Module ersetzt werden. Die Interpretation der Optimierungsergebnisse muß die Eigenschaften des verwendeten Optimierungsverfahrens im Auge behalten. Dies bedeutet z.B., daß das mit dem Quasidynamischen Optimierungsverfahren gefundene Ergebnis nicht das exakte dynamische Optimum darstellt. Aus diesem Grund kann eine Quasidynamische Optimierung mit der Zielfunktion „Primärenergieeinsatz“ zu einem (i.allg. geringfügig) höheren Primärenergieeinsatz führen als eine entsprechende Optimierung mit der Zielfunktion „CO₂-Emissionen“, wenn letztere zu einer besseren Annäherung an das exakte dynamische Optimum führt, s.a. [Gro93]. Der im Rahmen der zeitlich lokalen Optimierung eingesetzte Simplexalgorithmus besitzt die Eigenschaft, daß (sofern dies nicht durch Nebenbedingungen verhindert wird) ein Energieversorgungsprozeß bei Zugrundelegung der Zielfunktion „Primärenergieeinsatz“ in bezug auf eine andere Option dann bevorzugt eingesetzt wird, wenn sein Wirkungsgrad besser ist als der des Vergleichsprozesses. Werden nun zwei Prozesse mit nahezu identischen Wirkungsgraden verglichen, so wird im optimierten System der bessere dieser Prozesse eingesetzt, der andere dagegen nicht. Eine geringfügige Verbesserung des Wirkungsgrades des zunächst schlechteren Prozesses, kann in einer solchen Situation zu einer drastischen Veränderung der Anteile der beiden Prozesse an der Bedarfsdeckung führen, ohne daß sich dabei der Wert der Zielfunktion merklich verändert. Dieses Schwellenverhalten⁸³ ist bei der Interpretation der Ergebnisse von linearen Energieoptimierungsmodellen immer im Auge zu behalten. Die ermittelten Anteile der Energieversorgungsprozesse an der Bedarfsdeckung sind als hinreichende Bedingung für die Realisierung des Minimums der Zielfunktion anzusehen. Es ist nicht ausgeschlossen, daß auch ein vollkommen anderer Versorgungsmix zum selben Wert der Zielfunktion bzw. einem nur geringfügig schlechteren führen könnte. Insgesamt gesehen ist das hier diskutierte Problem jedoch bei *deeco* weniger gravierend als bei Modellen, die mit Jahresmittelwerten für die Wirkungsgrade rechnen. In *deeco* werden für jedes Optimierungszeitintervall die momentanen Wirkungsgrade berechnet. Im zeitlichen Verlauf können zwei Techniken mit praktisch gleichem Mittelwert des Wirkungsgrades deshalb abwechselnd die Rolle des „Besseren“ einnehmen, was sich dann auch in den Mittelwerten ihrer Anteile an der Bedarfsdeckung widerspiegeln würde. Abschließend sei darauf hingewiesen, daß sich der mit *deeco* berechnete minimierte Wert der Zielfunktion natürlich immer nur auf die Gesamtheit der zugelassenen energietechnischen Prozesse bezieht. Wird die Menge dieser Prozesse erweitert, so läßt sich damit unter Umständen ein kleinerer Zielfunktionswert realisieren.

ad 2.) Die beschränkte Rechengenauigkeit jedes Computers verursacht Rundungsfehler bei der Durchführung numerischer Operationen. Diese können dazu führen, daß Rechnungen, die das Ergebnis „Null“ haben sollten, zu kleinen aber endlichen Werten führen, was den verwendeten

⁸³Das natürlich nicht nur auf die hier diskutierte Zielfunktion „Primärenergieeinsatz“ beschränkt ist, sondern in ähnlicher Art und Weise auch bei den Emissionen oder monetären Kosten auftreten kann.

Simplexalgorithmus in die Irre laufen läßt. Um dies zu vermeiden, werden alle entsprechend kritischen Operationen kontrolliert und Ergebnisse unterhalb einer vorgegebenen Genauigkeitschwelle von 10^{-6} zu Null gesetzt.

ad 3.) Entscheidenden Einfluß auf die Optimierungsergebnisse haben die technischen und wirtschaftlichen Parameter der energietechnischen Prozesse sowie der zeitlich fluktuierende Energiebedarf, das variable Energieangebot (regenerative Energiequellen, Abwärme) und das Wettergeschehen. Diese zeitlich variablen Größen sind i.allg. im Gegensatz zu den technischen und wirtschaftlichen Parametern von EVS zu EVS verschieden. Sie müssen deshalb vor Ort (stichprobenartig) gemessen bzw. unter Zugrundelegung der Wetterdaten eines möglichst repräsentativen Jahres mit Hilfe von geeigneten Bedarfssimulationsprogrammen ermittelt werden. Ihre Güte ist somit abhängig von der Güte des angewendeten Verfahrens (Messung oder Simulation) und kann hier nicht näher angegeben werden. Da diese Zeitreihen sowohl dem optimierten System als auch dem gewählten Referenzsystem zugrundeliegen, lassen sich Fehler bei ihrer Bestimmung teilweise durch die Bildung relativer, d.h. auf das jeweilige Referenzsystem bezogener Primärenergieeinspar- und Emissionsminderungspotentiale bzw. Kostensteigerungen kompensieren. Die Werte der technischen und wirtschaftlichen Parameter werden anhand repräsentativer Beispiele realer Anlagen bestimmt oder der Literatur entnommen. Sie unterliegen damit einem schnellen Wandel, der durch den technischen Fortschritt und die wirtschaftliche Entwicklung bedingt ist und eine ständige Aktualisierung der Datenbasis von *deeco* erforderlich macht. I.allg. sind die technischen Parameter als wesentlich genauer einzustufen als die wirtschaftlichen, weil letztere nicht nur durch die Anlagentechnik des betrachteten Prozesses beeinflusst werden, sondern auch vom Standort (besonders deutlich z.B. bei erdverlegten Wärmetransportleitungen) und von der (wirtschaftlichen) Stellung der Betreiber und Hersteller der Anlagen. Darüber hinaus unterliegen die Kosten einer branchenabhängigen Inflation. Bei industriellen Produktionsprozessen sind die energietechnischen Investitionen Teil der Gesamtkosten eines Industrieprozesses und deshalb häufig nicht eindeutig zu ermitteln. Berechneten Primärenergieeinspar- oder Emissionsminderungspotentialen ist somit eine größere Genauigkeit zuzuordnen als ermittelten Kostenveränderungen. Die Auswirkungen, die sich durch eine Änderung der Parameter oder zeitlich variabler Größen ergeben, lassen sich mit Hilfe von Szenarien und Sensitivitätsanalysen untersuchen. Orientiert an den Erfahrungen, die mit den Vorgängermodellen ECCO [Gro91] und ECCO-Solar [Bru92] gesammelt wurden, halte ich bei sorgfältig durchgeführter Datenerhebung einen maximalen Fehler der mit *deeco* berechneten relativen Primärenergieeinspar- oder Emissionsminderungspotentialen von $\pm 5\%$ -Punkten und eine Unsicherheit bei der Berechnung der Kostenveränderungen von etwa $\pm 10\%$ -Punkten für erreichbar. Üblicherweise sollte das Optimierungsmodell deshalb zur Identifikation einiger weniger ökologisch und ökonomisch interessanter Energieversorgungsoptionen verwendet werden, die dann vor ihrer Realisierung einer eingehenden ingenieurtechnischen und betriebswirtschaftlichen Untersuchung unterworfen werden.

2.8 Umsetzung des Optimierungsmodells auf dem Computer

Die Umsetzung der quasidynamisch arbeitenden Version des Optimierungsmodells *deeco* auf dem Computer erfolgte in der objektorientierten Programmiersprache C++ (s. z.B. [Pra92]), die sich in sehr guter Art und Weise zur Programmierung der modulartigen Struktur des Modells eignet. Als besonders fruchtbar hat sich der Einsatz der Programmbibliothek "USL C++ Standard Components" [AT&T92] erwiesen. So konnte z.B. der Graph, der das nicht-elektrische EVS beschreibt, mit Hilfe der in dieser Bibliothek zur Verfügung stehenden Routinen zur Verwaltung von Graphen datenmäßig strukturiert erfaßt und bearbeitet werden. In der Modellbeschreibung von *deeco* treten mehrfach Vektoren auf, deren Komponentenanzahl nicht fest ist (z.B. der Emissionsvektor). Diese Datenstrukturen ließen sich sehr gut durch die ebenfalls zu dieser Bibliothek

gehörenden “Associative Arrays“ (auch “Maps“ genannt) realisieren. Der Zugriff auf die Komponenten eines Vektors erfolgt bei diesen Arrays nicht durch Angabe der Komponentenummer (z.B. 4. Komponente), sondern in Form eines Schlüsselwortes (also z.B. direkt durch Angabe der Emissionsart „Staub“). Bei komplexeren Strukturen läßt sich dieses Verfahren auf mehrere Schlüsselwörter ausdehnen. Die Eingabe der Daten des Modellanwenders (prozeßspezifische Parameter, Wetterdaten, Bedarfsdaten, etc.) und die Ausgabe der Optimierungsergebnisse (Mittelwerte der Zielfunktion, der Energieströme, der Anteile der Prozesse an der Bedarfsdeckung, der Attribute, etc.) erfolgt bisher noch in Form von ASCII-Textfiles, die jedoch schon Datenbankformat besitzen, so daß ein zukünftiger direkter Anschluß an eine Datenbank leicht möglich ist. *deeco* ist erweiterbar hinsichtlich der energietechnischen Prozesse, die bei der Optimierung berücksichtigt werden können. Derzeit sind 39 verschiedene Prozesse programmiert. Es handelt sich dabei z.B. um Bedarfsprozesse mit konstanter Energienachfrage; Bedarfsprozesse, die Bedarfs- oder Abwärmedaten aus gemessenen Zeitreihen einlesen; Raumwärmebedarfsprozesse; Heizkessel mit konstantem Wirkungsgrad; konventionelle Gas- und Ölkessel mit variablem Wirkungsgrad; Gasbrennwertkessel; Gas- und Elektrowärmepumpen in Form von Außenluft- oder Erdreichwärmepumpen; Gegendruck-Heizkraftwerke; Entnahmekondensations-Heizkraftwerke; Gasturbinen; Blockheizkraftwerke; Kleinheizkraftwerke; das Nachheizen von Nettoenthalpieströmen (die z.B. Wärmespeichern entnommen werden) durch die beschriebenen Kesselarten; Wärmeaustauscher; den Wärmetransport; Wärmepumpen zur Abwärmenutzung; Import-Export-Prozesse mit zeitlich konstanten oder variablen Parametern des übergeordneten EVS; thermische Solar Kollektoren; Warmwasser-Wärmespeicher und supraleitende-magnetische Energiespeicher. Diese Prozesse können vom Modellanwender sehr flexibel kombiniert und damit zum Aufbau des Graphen, der das nicht-elektrische EVS beschreibt, herangezogen werden. Das Programm überprüft die Übereinstimmung der Eigenschaften des so gebildeten Graphen mit den Modellannahmen 20 (z.B. seine Zyklentreiheit). Der zur Optimierung herangezogene Simplexalgorithmus basiert auf einer Implementierung, wie sie in den “Numerical Recipes“ beschrieben ist [Pre92]. Alle Programmteile wurden einer intensiven Testphase unterzogen.⁸⁴

Das Programm *deeco* besitzt folgende Grobstruktur:

1. Programmstart, Einlesen des Szenariendefinitionsfiles (Länge des Optimierungszeitraums, Faktoren der linearen Zielgewichtung, etc.).
2. Einlesen der Liste der zugelassenen Prozesse mit Angabe der Art des Prozesses (z.B. Brennwertkessel), der vorhandenen Bilanzpunkte (mit Typangabe) sowie der erlaubten energetischen Verknüpfung (bei Nettoenthalpieströmen mit Typenzuordnung).
3. Einlesen der prozeßspezifischen Parameter (z.B. spezifische Emissionsfaktoren).
4. Aufbau des Graphen, der das nicht-elektrische EVS beschreibt; Test auf Zyklentreiheit; Stufenanordnung der Knoten (s. Abschnitt 2.5).
5. Einlesen der zeitabhängigen prozeßexternen Einflußgrößen (z.B. Wetterdaten, vorgegebene Bedarfswerte).
6. Berechnung der noch nicht bekannten Attribute mit Hilfe des in Abschnitt 2.5 beschriebenen Algorithmus.
7. Berechnung der Koeffizienten der zeitlich lokalen Zielfunktion und der zeitlich lokalen Nebenbedingungen (abhängig von Attributen, prozeßexternen Einflußgrößen und prozeßinternen Zustandsgrößen).
8. Optimierung mit dem Simplexalgorithmus.
9. Auswertung der Optimierungsergebnisse und Speicherung zur späteren Mittelwertbildung; Berechnung der prozeßinternen Zustandsgrößen am Ende des Optimierungszeitintervalls; weiter mit Punkt 5, bis der gesamte Optimierungszeitraum durchlaufen wurde.

⁸⁴Dabei wurde ein Fehler in der kommerziell erhältlichen Software des Numerical Recipes Simplexalgorithmus entdeckt (und berichtigt). Dieser Algorithmus sollte deshalb bis zum Erscheinen einer Neuauflage nur nach Rücksprache mit den Autoren von [Pre92] verwendet werden.

10. Kontrolle: Speicherenergieinhalt am Ende des Optimierungszeitraums \approx Speicherenergieinhalt am Anfang; weiter mit Punkt 5 (Zeitpunkt $t=0$), bis diese Bedingung erfüllt ist.
11. Berechnung der Mittelwerte der Zielfunktion, des Primärenergieeinsatzes, der verschiedenen Emissionen und der (monetären) Kosten (jeweils getrennt nach variablen und fixen Anteilen), der Attribute, der prozeßexternen Einflußgrößen, der Zustandsgrößen, der Optimierungsvariablen sowie der Anteile der verschiedenen Energieströme an der Bedarfsdeckung.
12. Ausgabe der Ergebnisse; Programmende.

deeco wurde vollständig neu entwickelt. Es umfaßt derzeit etwa 15000 Zeilen Quellcode (ohne den Quelltext der eingebundenen kommerziellen Programmbibliotheken). Für das im Kapitel 3 beschriebene System der Modellstadt Würzburg beträgt die (maximale) Zahl der Prozesse 45, die der Optimierungsvariablen 114 und die der Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen 161. Die zeitlich lokale Optimierung wird für 8760 Optimierungszeitintervalle wiederholt (dies entspricht einem Optimierungszeitraum von einem Jahr). Die Rechenzeit beträgt dabei für die Szenarien, bei denen alle Prozesse zugelassen sind, auf einer HP Apollo 9000 Workstation (Modell 710) etwa 3 Stunden. Die Selbstkonsistenz der Speicherenergieinhalte ist nach 2-3 Durchläufen erreicht.

Kapitel 3

Anwendung des Modells *deeco* auf „Würzburg“ und „Heidingsfeld“

In einer ersten Anwendung der quasidynamisch arbeitenden Version des Modells *deeco* wurden mit Blick auf Primärenergieeinsparung, Emissionsminderung und Kosten Optionen der rationalen Energieverwendung und Solarthermie für die Energieversorgung zweier unterschiedlich großer und verschieden strukturierter kommunaler Energiesysteme analysiert.¹ Die Energiebedarfsdaten der beiden Modellsysteme orientieren sich an den zeitlich schwankenden Wärme- und Elektrizitätsbedarfsdaten der Stadt Würzburg mit rund 130000 Einwohnern und dem ca. 5000 Einwohner umfassenden Ortskern ihrer Randgemeinde Heidingsfeld. Im weiteren wird von den beiden Modellsystemen kurz als von „Würzburg“ und „Heidingsfeld“ gesprochen. Im Vordergrund dieser Modellanwendung stand der Nachweis der Funktionsfähigkeit des Modells. Im Rahmen der Erstellung der Datenbasis mußte in Anbetracht der beschränkten Mittel für eine eigene Datenerhebung weitgehend auf bereits erhobene Daten der Stadtwerke und des Stadtplanungsamtes Würzburg zurückgegriffen werden. Diese Daten wurden soweit erforderlich durch plausible Annahmen über fehlende Daten ergänzt. Aufgrund des modellartigen Charakters konnten darüber hinaus einige vereinfachende Kostenschätzungen durchgeführt und auf die Einbeziehung des fixen Primärenergieeinsatzes sowie der fixen Emissionen verzichtet werden. Die erhaltenen Ergebnisse sind somit im Hinblick auf den hier beschriebenen Anwendungszweck zu interpretieren. Sie liefern qualitative Aussagen über die den Modellsystemen zugrundeliegenden realen Gemeinden. Die Ermittlung quantitativ belastbarer Werte kann unter Einbeziehung von *deeco* im Rahmen von Energiekonzepten erfolgen, wenn diese mehr Mittel für die Datenerhebung bereitstellen, als dies im Zuge dieser rein wissenschaftlichen Arbeit geleistet werden konnte.

3.1 Beschreibung der modellierten Energiesysteme

3.1.1 Modellstadt „Würzburg“

Konstruktionskriterium der Modellstadt war die Verfügbarkeit von gemessenen, zeitlich hochaufgelösten Wärme- und Elektrizitätsbedarfsdaten (Einstundenmittelwerte des Jahres 1993), die aus Unterlagen der Stadtwerke Würzburg zusammengestellt wurden ([Eck95], siehe Abb. 3.1). Die zeitaufgelösten Wärmebedarfsdaten lagen nur für den Kernbereich Würzburgs vor, der in etwa der Innenstadt entspricht. Sie wurden für den im Jahresmittel wärmebedarfsmäßig dreimal so großen Randbereich (städtische Außenbezirke) hochskaliert. Alternativ dazu hätte man den Wärmebedarf im Randbereich auch anhand von Gebäudesimulationsmodellen bestimmen können. Die Wärmeanschlußdichte, d.h. die maximal nachgefragte Wärmeleistung pro Flächeneinheit, ist im Kernbereich mit 70 MW/km² etwa zweimal so groß wie im Randbereich. Wärme

¹Teile der folgenden Ausführungen sind publiziert in [Gro96] und [Bru97].

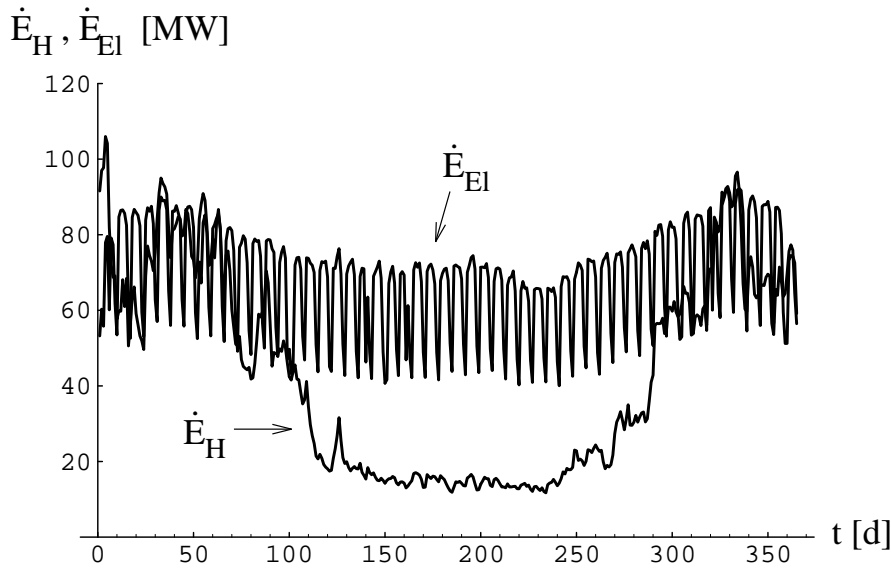


Abbildung 3.1: Gemessener Verlauf des Bedarfs an Wärme \dot{E}_H im Kernbereich und elektrischer Energie \dot{E}_{El} im Gesamtgebiet von „Würzburg“ (Tagesmittelwerte), $t = 0$ ist der 1. Januar 1993.

und elektrische Energie werden in „Würzburg“ im wesentlichen von Haushalten und Kleinverbrauchern nachgefragt. Deren Elektrizitätsnachfrage wird zu einem Bedarfsprozeß „Elektrische Energie“ zusammengefaßt (maximaler Einstundenmittelwert 122 MW, Jahresmittelwert 69 MW). Die Wärmenachfrage des derzeit aus dem Würzburger Heizkraftwerk per Fernheizung versorgten Stadtgebietes bildet den „Wärmebedarfsprozeß Kernbereich“ (maximaler Einstundenmittelwert 125 MW, Jahresmittelwert 43 MW). Die Wärmenachfrage des restlichen, derzeit nicht an das Fernwärmenetz angeschlossenen Stadtgebiets, wird zum „Wärmebedarfsprozeß Randbereich“ aggregiert (maximaler Einstundenmittelwert 374 MW, Jahresmittelwert 129 MW). Die wärmemengenabhängigen Temperaturschwankungen der Wärme, die von den Bedarfsprozessen nachgefragt wird, orientieren sich an denen einer Raumheizung, die am kältesten Tag eine Vorlauftemperatur von 90 °C und eine Rücklauftemperatur von 70 °C hat.

Bei der Berechnung der technischen Optionen mit dem geringsten Primärenergieaufwand oder den geringsten Emissionen wählt *deeco* aus einem vorgegebenen, je nach Szenario variierten Satz von Techniken aus (s.a. Abb. 3.2). Dabei wird die Nutzung von Abwärme aus Industriebetrieben am Stadtrand nicht in „Würzburg“, sondern nur in der Modellgemeinde „Heidingsfeld“ berücksichtigt. Für den Transport der Wärme von den Erzeugungstechniken zu den Bedarfsprozessen stehen verschiedene Wärmeverteilungsnetze mit Wasser als Wärmetransportmittel zur Verfügung. Sie sind den entsprechenden Techniken in den Szenarien zugeordnet. Steinkohlebefeuerte Heizkraftwerke speisen Wärme in ein Kern- und Randbereich bedienendes Fernwärmenetz ein (Transportverluste im Kernbereich 6%, im Randbereich 10%; jährliche, d.h. annuitätisch berechnete Fernwärmenetzkosten im Kernbereich 51 DM pro kW Wärmetransportkapazität, im Randbereich 107 DM/kW). Blockheizkraftwerke, Gaswärmepumpen, Solarkollektoren und Gas(brennwert)kessel mit einer Leistung von 1,5 MW_{th} verteilen ihre Wärme über Nahwärmenetze (insgesamt 258 Nahwärmenetze im Randbereich, 86 im Kernbereich;² Transportverlu-

²Nast et al. [Nas87] haben detailliert untersucht, wie ein Wärmebedarf von 0,5 MW durch verschieden große solare Nahwärmesysteme gedeckt werden kann; die für diese Systeme ermittelten technischen Kenndaten und Kosten werden von mir ebenfalls verwendet. Aus Vergleichbarkeitsgründen wird darüber hinaus auch bei anderen

ste im Kernbereich 5%, im Randbereich 9%; jährliche Nahwärmenetzkosten im Kernbereich 21 DM/kW, im Randbereich 37 DM/kW).³ Die fixen Kosten des Erdgasnetzes bzw. die bei der lokalen Unterverteilung des Erdgases anfallenden Verluste sind (orientiert am bundesdeutschen Durchschnitt) bereits im zugrundegelegten Preis bzw. im spezifischen Primärenergieaufwand (Tabelle 3.1, s.u.) enthalten. Die Verluste beim Transport von Heizöl und Kohle innerhalb des kommunalen Energieversorgungssystems sind vernachlässigbar. Die elektrischen Leitungsverluste betragen in „Würzburg“ 1,8% und sind gemäß Modellannahme 2 in den angegebenen elektrischen Energiebedarf eingerechnet. Die fixen Kosten des Elektrizitätsnetzes werden ebenso wie die fixen Kosten der Bedarfsprozesse als weitgehend optimierungsunabhängig angesehen und gehen deshalb nicht in die Kostenberechnungen ein (s.a. Abschnitt 2.4). Das Wärmetransportmittel Wasser in den Wärmeverteilungsnetzen und den Solarkollektoren wird elektrisch gepumpt, was, ebenso wie der Strombedarf anderer Energietechniken, im optimierungsabhängigen Gesamtelektrizitätsbedarf berücksichtigt wird.

Die Optimierung unter Einschluß der solaren Nahwärmeanlagen erfolgt auf der Grundlage gemessener Zeitreihen aus Einstundenmittelwerten für solare Einstrahlung (Jahresmittelwert 1160 kWh/(m²a)) und Außentemperatur (Jahresmittelwert 9 °C) in Würzburg (s.a. Abb. D.1, S. 113).

3.1.2 Modellgemeinde „Heidingsfeld“

In der Würzburger Stadtrandgemeinde Heidingsfeld ist mit der Firma Unkel eine der größten deutschen Fettschmelzen angesiedelt. Der mittlere Wärmebedarf von 4,4 MW dieses sehr energieintensiven (und intern schon weitgehend energieoptimierten) Industriebetriebs übersteigt den mittleren Raumwärmebedarf (3,5 MW) des Ortskerns von Heidingsfeld. Damit bietet sich dieser Ortskern zusammen mit der nahegelegenen Firma Unkel als Modellgemeinde „Heidingsfeld“ für die Analyse von Primärenergieeinsparung und Emissionsminderung durch die Nutzung industrieller Abwärme an. Im Rahmen der vorgesehenen Sanierung des Ortskerns von Heidingsfeld können die Analyseergebnisse gegebenenfalls Eingang in die Stadtentwicklungsplanung finden.

Im Gegensatz zu Würzburg liegen für Heidingsfeld keine gemessenen Wärmebedarfszeitreihen vor. Andererseits hat das Stadtplanungsamt Würzburg in Vorbereitung der Sanierung eine Bestandsaufnahme der Heidingsfelder Gebäude vorgenommen. Anhand dieser Daten und der Gebäudeklassifizierung des „Instituts Wohnen und Umwelt (IWU)“ [Hes90] habe ich den „Heidingsfelder“ Raumwärmebedarf auf 3,5 MW geschätzt und der Optimierung dieselbe zeitliche Variation wie für „Würzburg“ zugrundegelegt. Für den Elektrizitätsbedarf wird gleiches Verhältnis zum Raumwärmebedarf und gleiche zeitliche Variation wie in „Würzburg“ angenommen. In der Fa. Unkel fluktuieren im Laufe des Tages und der Woche der Wärme- und Elektrizitätsbedarf sowie das Abwärmeangebot erheblich. Die detaillierten Zeitreihen wurden von der Firmenleitung zur Verfügung gestellt; Mittelwerte und Spitzenwerte sind beim Wärmebedarf 4,4 MW und 10 MW, beim Elektrizitätsbedarf 0,78 MW und 1,6 MW sowie beim Abwärmeangebot 0,55 MW und 1,1 MW. Die Temperatur der Abwärme beträgt 83 °C, als Bezugstemperatur für die Berechnung der Abwärmemengen wurde 15 °C verwendet. Für das „Heidingsfelder“ Nahwärmenetz werden eine Wärmeanschlußdichte von 28 MW/km², Verluste von 5% und jährliche Kosten von 81

Techniken, die in ein Nahwärmenetz einspeisen (z.B. Blockheizkraftwerke), ein Netz mit entsprechender Größe zugrundegelegt. 258 ist das Verhältnis des mittleren Raumwärmebedarfs von 129 MW im Randbereich zu den 0,5 MW von Nast et al. Für den dreimal kleineren Wärmebedarf im Kernbereich errechnet sich eine Zahl von 86 Nahwärmenetzen.

³Die Wärmenetzkosten umfassen die Rohrleitungskosten sowie die Kosten der notwendigen Hausübergabestationen. Die Rohrleitungskosten für den Anschluß des Kernbereichs und der verschiedenen Gebiete des Randbereichs an das Heizkraftwerk bei fest vorgegebenen Entfernungen werden gemäß [Buc83] aus den vom Rohrdurchmesser abhängigen Kosten pro Längeneinheit berechnet. Die Kosten der Rohrleitungen für die Verteilung der Wärme aus dem Fernwärmenetz und den Nahwärmenetzen innerhalb des Kernbereichs und der Gebiete des Randbereichs hingegen werden aus den Wärmeanschlußdichten gemäß [BMF77] ermittelt.

DM/kW angenommen.⁴ Alle in das Nahwärmenetz einspeisenden Wärmeversorgungstechniken werden auf dem Unkel'schen Firmengelände oder in seiner unmittelbaren Umgebung platziert.

3.2 Szenarienbeschreibung

Das kommunale Energiesystem (KES) stellt Wärme und Strom zur Verfügung, um die Nachfrage nach Energiedienstleistungen in der betrachteten Kommune zu befriedigen. Das übergeordnete Energiesystem (UES) liefert dem KES Elektrizität und Endenergie in Form von Brennstoffen (Kohle, Öl, Gas) und nimmt überschüssige elektrische Energie aus dem KES auf. Wärme wird ausschließlich im KES erzeugt. Dies geschieht durch Verbrennung der aus dem UES bezogenen Brennstoffe und durch thermische Nutzung der Solarenergie mittels Solarkollektoren und Wärmepumpen. Der Einfachheit halber wird im weiteren „aus dem UES bezogene Energie“ kurz „importierte Energie“ genannt. Zur Stromerzeugung werden nur importierte Brennstoffe herangezogen. Tabelle 3.1 weist die den Optimierungsrechnungen zugrundeliegenden energieträgerspezifischen Größen aus.⁵ Als Strompreis für Import aus dem UES werden aus der Sicht des kommunalen Energieversorgers 14 Pf/kWh unterstellt. Dies entspricht dem Wert, den das Forum für Zukunftsenergien [FfZ96] wiedergibt, bzw. in etwa dem von der Fördergemeinschaft Blockheizkraftwerke in ihrem „City-Gate-Ansatz“ geforderten Mindestabnahmepreis für Strom aus Blockheizkraftwerken von 13 Pf/kWh [E&M96]. Wirkungsgrade sind i.allg. zeitabhängig, z.B. wegen variierender Außen- und Rücklauftemperaturen. Angaben thermischer und elektrischer Wirkungsgrade, η_{th} und η_{el} , beziehen sich in der Regel auf jährliche Mittelwerte und sind – im Rahmen der technisch-physikalisch gegebenen Grenzen – selbst Ergebnis der dynamischen Optimierung. Die Einsatzzeiten der einzelnen Techniken, und im Falle der Wärmepumpen auch die (mono- oder bivalenten) Betriebsweisen, werden vom Programm selbst ermittelt. Die auf den Energieträgereinsatz in einer Energieumwandlungstechnik bezogenen Emissionen werden [Hes95] entnommen.

Die spezifischen Kosten der Energieumwandlungstechniken, bezogen auf die Leistungseinheit MW_{el} bei stromerzeugenden Anlagen und MW_{th} bei nur wärmeerzeugenden Anlagen, enthalten die annuitätischen Investitions-, Wartungs-, Instandhaltungs- und Betriebskosten, nicht aber Brennstoffkosten oder Kosten für elektrische Hilfsenergie. Die Kosten der Techniken, die keine Ausgaben für Steuern und Versicherung, keine Bauzeitinsen sowie keine Grundstücks- und Planungskosten enthalten, werden für Wärmepumpen aus [Cub83], für Solaranlagen aus [Nas87] und im übrigen aus [Hes95] entnommen. Die Schätzung der Wärmedämmkosten beruht – unter Berücksichtigung eines Heizkesselwirkungsgrades von 90% – auf dem erforderlichen Endenergiepreis, ab dem das 50%ige Nutzenergieeinsparpotential gemäß Abb. 7.4-1 von [Hes90] wirtschaftlich werden würde. Eine Erhöhung der spezifischen Kosten der Energietechniken, die im Falle einer 50%igen Wärmebedarfsminderung durch Wärmedämmung aufgrund einer dann kleineren Auslegungsleistung auftreten kann, wurde nicht berücksichtigt. Die Kosten einer Energietechnik ergeben sich durch Multiplikation der spezifischen Kosten der Technik mit der (optimierungsabhängigen) Maximalleistung dieser Technik. Die Ermittlung der Kosten von Kollektoranlagen bzw. Wärmespeichern erfolgt in Abwandlung dieser Regel durch Multiplikation der Kosten pro Kollektorflächeneinheit bzw. pro Volumeneinheit des Wärmespeichers multipliziert mit der gesamten Kollektorfläche bzw. mit dem gesamten Speichervolumen. Die Größen der Kollektoranlagen sowie der Wärmespeicher werden optimierungsunabhängig vorgegeben und auch bei starker Wärmedämmung beibehalten. Die für ein Szenario ausgewiesenen

⁴Die im Vergleich zu den Nahwärmenetzen im Randbereich von „Würzburg“ höheren Wärmeverteilungskosten sind durch eine geringere Wärmeanschlußdichte sowie durch die wegen zu umgehender Gleisanlagen hohen Kosten der Wärmetransportleitung von der Fa. Unkel zum Heidingsfelder Ortskern bedingt.

⁵Aus Gründen der Datenverfügbarkeit konnten die regenerativen Anteile des spezifischen Primärenergieeinsatzes nicht extrahiert werden. Diese Anteile sind aber i.allg. klein, so daß die ausgewiesenen Werte als Näherungswerte für den spezifischen nicht-regenerativen Primärenergieeinsatz herangezogen werden können.

Energieträger		Erdgas		Heizöl L	Kohle	Elektrische Energie	
Abnehmer		Private Haushalte	zentrale Wärmeerzeuger	Private Haushalte	Heizkraftwerke	Öffentliche Versorger	Netz
Preis	DM/GJ Pf/kWh	16,07 5,80	6,62 2,38	11,23 4,03	9,86 3,55	38,89 14,00	27,78 10,00
spezifische Primärenergie	GJ/GJ	1,08	1,07	1,11	1,06	3,22	3,22
vorgelagerte spezifische Emissionen							
SO ₂	kg/GJ	0,0020	0,0014	0,0506	0,0173	0,1417	0,1417
NO _x	kg/GJ	0,0122	0,0115	0,0298	0,0128	0,2325	0,2325
Staub	kg/GJ	0,0007	0,0006	0,0038	0,0016	0,0228	0,0228
CO ₂	kg/GJ	3,012	2,705	8,180	4,706	197,79	197,79
CO ₂ -Äquivalent	kg/GJ	6,209	4,371	8,414	10,235	205,21	205,21

Tabelle 3.1:

Spezifische Größen der Energieträger Erdgas, Heizöl leicht, Steinkohle und Elektrizität (aus dem Kraftwerksmix der BRD gemäß [Pro92], mit Entstickung und Entschwefelung). Ausgewiesen sind für private Haushalte, öffentliche Versorger und das (Einspeisevergütung zahlende) Netz des UES: Energiepreise in DM, Stand 1993, BRD [Sch94, FfZ96]; spezifische Primärenergie (= Primärenergieeinsatz, der dem Umsatz einer Einheit eines Energieträgers im System zuzuordnen ist; enthält neben dem (unteren) Heizwert des Energieträgers Umwandlungsverluste, Energieaufwendungen für den Energietransport, Transportverluste etc. [Hes95]); vorgelagerte spezifische Emissionen sind verbunden mit der Gewinnung, Aufbereitung und Bereitstellung eines Energieträgers [Hes95]; die mit dem Energieeinsatz im System verbundenen Emissionen ergeben sich aus den Optimierungsrechnungen; zentrale Wärmeerzeuger sind Heizkraftwerke, Blockheizkraftwerke, Gasaußenluftwärmepumpen sowie Gas(brennwert)kessel, sofern deren Kesselleistung mindestens 1,5 MW_{th} beträgt; CO₂-Äquivalente messen alle Treibhausgase (s.u.).

Kosten des energie- oder emissionsoptimierten Versorgungssystems setzen sich zusammen aus den Kosten der Energieumwandlungs- und -verteilungstechniken und den Kosten für den Bezug von Primärenergie und Elektrizität aus dem UES, abzüglich einer Einspeisevergütung für die ins UES abgegebene, im KES überschüssige elektrische Energie. Die Berechnung der fixen Kosten orientiert sich am tatsächlichen Bedarf; üblicherweise vorgehaltene Reservekapazitäten bleiben dabei unberücksichtigt.

3.2.1 Szenarien für „Würzburg“

Für die Energieversorgung „Würzburgs“ wurden insgesamt 22 Szenarien untersucht, von denen im folgenden 13 detailliert diskutiert werden sollen, die in Tabelle 3.2 zusammengestellt sind. In den 10 zuerst aufgeführten Szenarien werden jeweils nur einzelne Techniken - ggf. ergänzt durch eine Backup-Technik - zugelassen. Von deren Einheiten (Module) mit den angegebenen Leistungen und mittleren (szenarienspezifischen) Wirkungsgraden⁶ setzt das Programm so viele ein, wie zur Befriedigung des Bedarfs benötigt werden. In allen Szenarien ist der Bezug elektrischer Energie aus dem UES erlaubt. Mit Ausnahme von Szenario ANE erfolgt die Einspeisung der erzeugten elektrischen Energie nur ins KES. In den Szenarien AN und ANE sind bei der Optimierung alle in den vorangehenden Szenarien aufgeführten nicht-solaren Techniken zugelassen. Zusätzlich zu ihnen werden im Szenario AS auch noch große solare Nahwärmanlagen mit saisonalen Wärmespeichern berücksichtigt. Die Installation der Solarkollektoren ist nur (auf dem Erdboden bzw. den großen Flachdächern der Gewerbebetriebe) im Randbereich vorgesehen.

⁶ Angegeben sind in Tabelle 3.2 ausschließlich die Wirkungsgrade, die sich bei Minimierung der Zielfunktion „Nicht-regenerativer Primärenergieeinsatz“ im Fall ohne Wärmedämmung (s.u.) ergeben.

Szenario	Technik	Auslegung
OEK	• individuelle Ölkessel	P: 10kW _{th} , $\eta_{th} = 79\%$
GBWK	• individuelle Gasbrennwertkessel	P: 10kW _{th} , $\eta_{th} = 99\%$
KHKW	• individuelle Kleinheizkraftwerke, gasbefeuert <ul style="list-style-type: none"> • im Randbereich • im Kernbereich 	P: 5 kW _{el} , 12,7 kW _{th} $\eta_{el} = 26\%$, $\eta_{th} = 66\%$ P: 50kW _{el} , 100 kW _{th} $\eta_{el} = 30\%$, $\eta_{th} = 60\%$
	• individuelle Gaskessel <ul style="list-style-type: none"> • Randbereich (hohe Stillstandsverluste) • Kernbereich 	P: 10 kW _{th} , $\eta_{th} = 59\%$ P: 10 kW _{th} , $\eta_{th} = 79\%$
BHKW	• Nahwärme aus Blockheizkraftwerken, gasbefeuert • Nahwärme aus Gaskesseln <ul style="list-style-type: none"> • Randbereich • Kernbereich 	P: 250 kW _{el} , 432 kW _{th} $\eta_{el} = 33\%$, $\eta_{th} = 57\%$ P: 1,5 MW _{th} , $\eta_{th} = 85\%$ P: 1,5 MW _{th} , $\eta_{th} = 87\%$
HKW	• Fernwärme: Heizkraftwerke, steinkohlebefeuert, <ul style="list-style-type: none"> • mit Gegendruckturbinen und/oder • Entnahmekondensationsturbinen <ul style="list-style-type: none"> • Randbereich (1 Modul) • Kernbereich (1 Modul) • Fernwärme aus Gasspitzenkesseln <ul style="list-style-type: none"> • Randbereich • Kernbereich 	P: 50 MW _{el} , 102 MW _{th} $\eta_{el} = 28\%$, $\eta_{th} = 57\%$ $\eta_{el} = 34\%$, $\eta_{th} = 34\%$ P: 57 MW _{el} , 80 MW _{th} P: 64 MW _{el} , 90 MW _{th} P: 10 MW _{th} , $\eta_{th} = 89\%$ P: 10 MW _{th} , $\eta_{th} = 82\%$
EWP	• individuelle Elektrowärmepumpen, Außenluft • individuelle Gaskessel	P: 50 kW _{th} , $\eta_{th} = 362\%$ P: 10 kW _{th} , $\eta_{th} = 79\%$
GWP	• Nahwärme aus Gaswärmepumpen, Außenluft • Nahwärme aus Gaskesseln	P: 1,5 MW _{th} , $\eta_{th} = 179\%$ P: 1,5 MW _{th} , $\eta_{th} = 86\%$
SK	• 258 kleine solare Nahwärmeanlagen <i>ohne</i> Wärmespeicher im Randbereich • Randbereich: Nahwärme aus Gasbrennwertkesseln • Kernbereich: individuelle Ölkessel	je 630 m ² Kollektorfläche Deckungsbeitrag 7% P: 1,5 MW _{th} , $\eta_{th} = 99\%$ P: 10kW _{th} , $\eta_{th} = 79\%$
SM	• 258 mittlere solare Nahwärmeanlagen <i>mit</i> Wärmespeicher im Randbereich • Randbereich: Nahwärme aus Gasbrennwertkesseln • Kernbereich: individuelle Ölkessel	je 2500 m ² Kollektorfläche und je 160 m ³ Wasser-Wärmespeicher, Deckungsbeitrag 25% P: 1,5 MW _{th} , $\eta_{th} = 98\%$. P: 10kW _{th} , $\eta_{th} = 79\%$
SG	• 258 große solare Nahwärmeanlagen <i>mit</i> Wärmespeicher im Randbereich • Randbereich: Nahwärme aus Gasbrennwertkesseln • Kernbereich: individuelle Ölkessel	je 13000 m ² Kollektorfläche und je 27000 m ³ Wasser-Wärmespeicher, Deckungsbeitrag 71% P: 1,5 MW _{th} , $\eta_{th} = 96\%$. P: 10kW _{th} , $\eta_{th} = 79\%$
AN	• Alle nicht-solaren Techniken (jedoch ohne Entnahmekondensationsturbinen)	
ANE	• Alle nicht-solaren Techniken plus Einspeisung der in „Würzburg“ erzeugten elektrischen Energie ins UES (mit Entnahmekondensationsturbinen)	
AS	• Alle nicht-solaren Techniken (wie in AN) plus große solare Nahwärmeanlagen aus Szenario SG.	

Tabelle 3.2: Szenarien für „Würzburg“ (P: installierte Leistung je Modul, η = mittlerer optimierungsabhängiger Wirkungsgrad). Die angegebenen solaren Deckungsbeiträge beziehen sich nur auf den Wärmebedarf des Randbereichs. Der mittlere Wirkungsgrad der Elektrowärmepumpe entspricht deren Arbeitszahl; der der Gaswärmepumpe deren (Jahres-) Heizzahl.

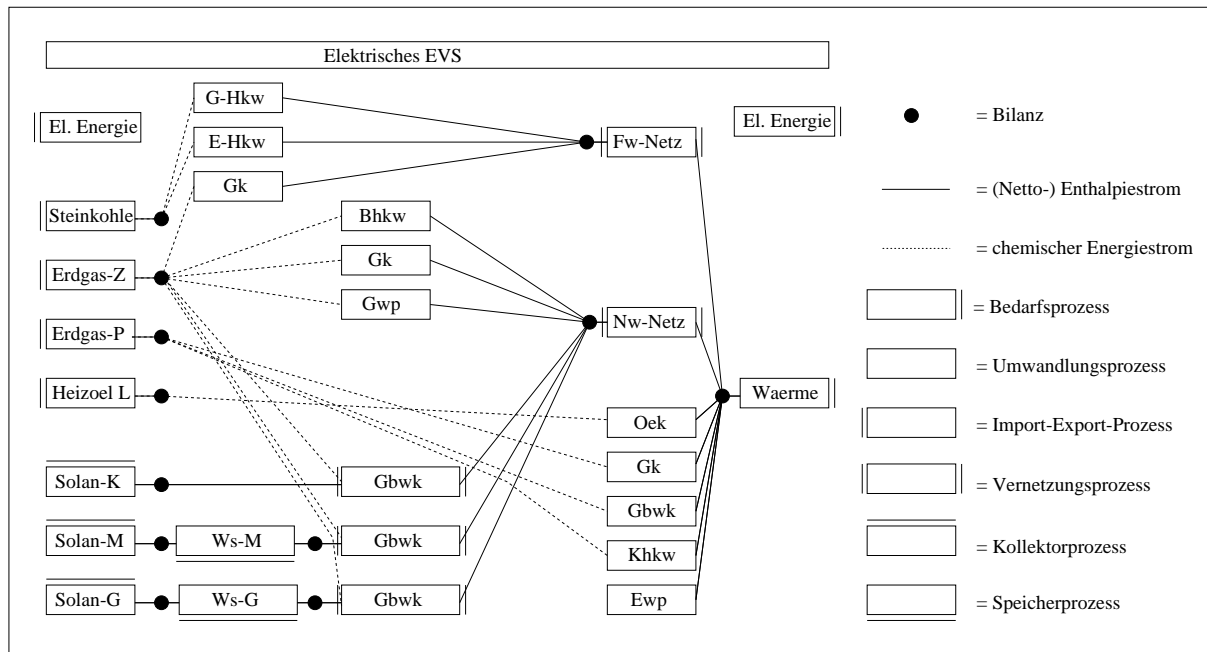


Abbildung 3.2:

Ausschnitt aus der graphentheoretischen Darstellung des „Würzburger“ EVS. Gezeigt ist das Wärmeversorgungssystem des „Wärmebedarfsprozesses Randbereich“. Das entsprechende System des Kernbereichs ist dazu weitgehend analog, abgesehen von den dort nicht zugelassenen Solaranlagen, Wärmespeichern und daran angeschlossenen Gasbrennwertkesseln. Oek = Oelkessel, Gk = Gaskessel, Gbwk = Gasbrennwertkessel, Khkw = Kleinheizkraftwerke, Bhkw = Blockheizkraftwerke, G-Hkw = Gegendruck-Heizkraftwerke, E-Hkw = Entnahmekondensations-Heizkraftwerke, Ewp = Elektrowärmepumpen, Gwp = Gaswärmepumpen, SolAn = Solaranlagen (Klein, Mittel, Groß), Ws = Wärmespeicher (Mittel, Groß; entsprechend den angeschlossenen Solaranlagen), Waerme = Raumwärmebedarf Randbereich, Fw-Netz = Fernwärmenetz, Nw-Netz = Nahwärmenetz, Erdgas-Z = Import von Erdgas für zentrale Wärmeerzeuger (s. Tab. 3.1), Erdgas-P = Import von Erdgas für private Haushalte, Steinkohle = Kohle für Heizkraftwerke, Heizöl L = leichtes Heizöl für private Haushalte. Das elektrische EVS ist nur angedeutet. Es verbindet alle Prozesse miteinander und treibt natürlich auch die Elektrowärmepumpen. Je nach Szenario ist nur ein Teil der aufgezeigten Versorgungspfade zugelassen.

Für diese Szenarien werden Primärenergieeinsatz und CO₂-Äquivalentemissionen (Zielfunktionen) minimiert, die Einflüsse von Wärmedämmmaßnahmen auf die Reduzierung des Primärenergieeinsatzes untersucht und die anfallenden Kosten, auch unter fallweiser Berücksichtigung von CO₂-/Energiesteuern, bestimmt. Die CO₂-Äquivalente erfassen dabei die Beiträge der energiebedingten Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O zum anthropogenen Treibhauseffekt (100 Jahre Integrationszeitraum). Restriktionen hinsichtlich der Verfügbarkeit der fossilen Brennstoffe werden bei den Minimierungen nicht berücksichtigt. Das ist für Planungshorizonte von 20 bis 30 Jahren derzeit noch vertretbar. Langfristig ist gemäß [BMW94] mit folgenden Reichdauern der sicher gewinnbaren Weltreserven bei gegenwärtigen Förderungsrate zu rechnen: Öl 43 Jahre, Gas 65 Jahre, Kohle 238 Jahre; bei Berücksichtigung der geschätzten, zusätzlich gewinnbaren Ressourcen dürften sich die Reichdauern von Öl und Gas in etwa verdoppeln, während die Kohle-Reichdauer um den Faktor 8 zunimmt. Lösungen, die mittelfristig auf die effiziente Nutzung fossiler Energie setzen, müssen jedoch – unter Berücksichtigung der mittleren Lebensdauer der Anlagen – so zugeschnitten sein, daß sie weiterführende Lösungen nicht behindern.

3.2.2 Szenarien für „Heidingsfeld“

Für die Energieversorgung „Heidingsfelds“ wird zusätzlich zu den in Tabelle 3.2 aufgeführten Szenarien noch das Szenario „Industrielle Abwärmenutzung“ (IAN) betrachtet. In IAN wird die Abwärme der Fa. Unkel sowie Wärme aus Gasbrennwertkesseln ($1,5 \text{ MW}_{\text{th}}$, $\eta_{\text{th}} 99\%$) zur Deckung des Raumwärmebedarfs in „Heidingsfeld“ herangezogen. Die Kombination der Techniken aus IAN mit allen Techniken wie in den „Würzburger“ Szenarien AN und AS ergibt die Szenarien ANI und ASI. In allen Szenarien erfolgt die Bereitstellung des industriellen Wärmebedarfs mit Hilfe von öl- bzw. gasbefeuerten Heizkesseln. Die damit verbundenen verallgemeinerten variablen Kosten werden mit Hilfe des vor Ort gemessenen Heizöl- und Erdgasverbrauches bestimmt.

3.3 Optimierungsergebnisse

3.3.1 „Würzburg“

Die Ergebnisse der *Energieoptimierung* werden für die einzelnen Szenarien in den Abbildungen 3.3 und 3.4 sowie der Tabelle 3.3 dargestellt. Gewonnen werden sie durch Minimierung der Zielfunktion „Nicht-regenerativer Primärenergieeinsatz“. In den Szenarien mit Wärmedämmung wird ein vorab um 50% verminderter Raumwärmebedarf angenommen. Den Kostenberechnungen⁷ liegen die derzeitigen, in Tabelle 3.1 ausgewiesenen Energiepreise zugrunde. Alle Ergebnisse werden prozentual auf das Referenzszenario OEK (keine Wärmedämmung) bezogen. Dessen Absolutwerte sind: Primärenergieeinsatz 473 MW (= 4,14 TWh/a), Kosten 210 Mio. DM/a, CO₂-Äquivalentemissionen 1,03 Mio. t/a, CO₂-Emissionen 1,01 Mio. t/a, NO_x-Emissionen 1010 t/a, SO₂-Emissionen 1180 t/a und Staub-Emissionen 84,8 t/a. Dieses Szenario entspricht nicht dem Ist-Zustand Würzburgs mit seinen Heizkraftwerken und Wärmenetzen, sondern dem eines fiktiven Standardsystems, das typisch für die Energieversorgung deutscher Städte ist.⁸

Die Ergebnisse der *Emissionsoptimierung* werden für die einzelnen Szenarien in den Abbildungen 3.5 und 3.6 dargestellt. Gewonnen werden sie durch Minimierung der Zielfunktion „Emission von CO₂-Äquivalenten“. Wärmedämmmaßnahmen, von denen abgesehen wird, haben vergleichbare Verschiebungseffekte wie im Falle der Energieoptimierung. Den Kostenberechnungen liegen in Abb. 3.5 die derzeitigen Energiepreise zugrunde, während in Abb. 3.6 eine kombinierte CO₂-/Energiesteuer von 10 US \$ pro Barrel Rohöl gemäß dem Richtlinienvorschlag der EU-Kommission [Res93] bzw. eine Verdreifachung dieser Steuer (in Anlehnung an das IEA CO₂-Steuer Szenario [IEA93]) angenommen wird.⁹ Referenzszenario ist OEK, wobei für Abb. 3.5 die oben angegebenen Absolutwerte gelten, während für Abb. 3.6 die Kosten steuerbedingt auf 245 Mio. DM/a bzw. 317 Mio. DM/a steigen.

⁷I.allg. sind die spezifischen Kosten einer Technik nicht konstant, sondern selbst eine Funktion der Größe der Technik. Größere Anlagen besitzen aufgrund der meist stattfindenden Kostendegression in der Regel kleinere spezifische Kosten, als Anlagen mit kleinerer Maximalleistung. Im Rahmen der interaktiven Minimierung der (verallgemeinerten) Kosten (s. Abschnitt 2.6.3) lassen sich auch variable spezifische Kosten berücksichtigen, worauf aber in dieser modellhaften Anwendung verzichtet wird. Werden Maßnahmen zur Wärmedämmung durchgeführt bzw. mehrere Energieversorgungstechniken (Szenarien AN, ANE, AS) gemeinsam eingesetzt, so kann dies zu einer optimalen Technikgröße führen, die kleiner ist als die Größe, auf die sich die den Kostenberechnungen zugrundeliegenden spezifischen Kosten beziehen. Die ausgewiesenen Gesamtkosten stellen somit in diesen Fällen eine untere Grenze für die tatsächlich zu erwartenden Kosten dar.

⁸Der Ist-Zustand von Würzburg war im Jahr 1993 durch folgende Werte gekennzeichnet: Primärenergieeinsatz 3,83 TWh, CO₂-Äquivalentemissionen 0,97 Mio. t. Aufgrund von Investitionen zur Emissionsminderung, die den Einsatz des größten Heizkraftwerkes im Jahr 1993 stark einschränkten, können diese Werte aber nicht als typisch für die Energieversorgungssituation in Würzburg angesehen werden.

⁹Die angegebenen Steuersätze werden im Verhältnis 1:1 auf den Heizwert und die spez. CO₂-Emissionen des Rohöls bezogen. Dadurch ergeben sich Energie- und CO₂-Hebesätze, die zur Besteuerung der anderen Energieträger gemäß ihrem Energie- und Kohlenstoffgehalt herangezogen werden [Res93], [Far93], [Wel95].

a) ohne Wärmedämmung:													
	Wärmeversorgung									Elektrizitätsversorgung			
	Oek %	Gk %	Gbwk %	Khkw %	Bhkw %	Hkw %	Ewp %	Gwp %	SolAn %	Khkw %	Bhkw %	Hkw %	Netz %
OEK	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
GBWK	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
KHKW	0	24	0	76	0	0	0	0	0	76	0	0	24
BHKW	0	43	0	0	57	0	0	0	0	0	86	0	14
HKW	0	34	0	0	0	66	0	0	0	0	0	86	14
EWP	0	74	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	100
GWP	0	65	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	100
SK	30	0	65	0	0	0	0	0	5	0	0	0	100
SM	25	0	58	0	0	0	0	0	17	0	0	0	100
SG	29	0	22	0	0	0	0	0	49	0	0	0	100
AN	0	0	21	44	29	0	2	4	0	43	43	0	14
ANE	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	47	53 *	0
AS	0	0	14	16	23	0	0	0	48	15	32	0	53

b) mit Wärmedämmung:													
	Wärmeversorgung									Elektrizitätsversorgung			
	Oek %	Gk %	Gbwk %	Khkw %	Bhkw %	Hkw %	Ewp %	Gwp %	SolAn %	Khkw %	Bhkw %	Hkw %	Netz %
OEK	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
GBWK	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
KHKW	0	2	0	97	0	0	0	0	0	51	0	0	49
BHKW	0	13	0	0	87	0	0	0	0	0	67	0	33
HKW	0	6	0	0	0	94	0	0	0	0	0	62	38
EWP	0	74	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	100
GWP	0	65	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	100
SK	25	0	68	0	0	0	0	0	7	0	0	0	100
SM	25	0	52	0	0	0	0	0	23	0	0	0	100
SG	28	0	6	0	0	0	0	0	66	0	0	0	100
AN	0	0	2	29	68	0	0	0	0	14	53	0	33
ANE	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	31	69 *	0
AS	0	0	1	3	33	0	0	0	62	1	24	0	74

Tabelle 3.3:

Anteile der Energietechniken an der energieoptimierten Wärme- und Elektrizitätsversorgung in den einzelnen Szenarien ohne (a) und mit (b) 50%iger Wärmebedarfsreduktion durch Wärmedämmung. Oek = Oelkessel, Gk = Gaskessel, Gbwk = Gasbrennwertkessel, Khkw = Kleinheizkraftwerke, Bhkw = Blockheizkraftwerke, Hkw = Heizkraftwerke, Ewp = Elektrowärmepumpen, Gwp = Gaswärmepumpen, SolAn = Solaranlagen (angegeben sind ihre Anteile an der Wärmeversorgung von Rand- und Kernbereich); Netz = Stromnetz des übergeordneten Energiesystems. Das Runden der Technikanteile bewirkt, daß die Summen der (gerundeten) Anteile geringfügig von 100% abweichen können.

(* Die Entnahmekondensationsturbinen produzieren hier ausschließlich elektrische Energie, ohne Wärme für „Würzburg“ bereitzustellen. Ihr Wirkungsgrad ist besser als der des angenommenen Kraftwerksmixes im UES.)

3.3.2 „Heidingsfeld“

In den Tabellen 3.4 und 3.5 sind die Ergebnisse der Emissionsoptimierung mit der Zielfunktion „Emission von CO₂-Äquivalenten“ angegeben. Bei den Kostenberechnungen wird aufgrund des hohen industriellen Strombedarfs ein Mischpreis für den Bezug elektrischer Energie in Höhe von 52,5 DM/GJ (bundesdeutscher Gesamtdurchschnitt) zugrundegelegt. Alle in das Nahwärmenetz einspeisenden Wärmeversorgungstechniken verwenden Erdgas als Brennstoff, dessen Preis mit dem Durchschnittspreis für industrielle Erdgasabnehmer (7,88 DM/GJ) übereinstimmt [Sch94].

Szenario	Primärenergie- reduktion	Reduktion der CO ₂ -Äquiv.	Kostensteigerung
GBWK	5,6	12	4,1
KHKW	18	25	15
BHKW	20	27	-3,0
HKW	1,4	8,2	2,0
EWP	3,2	9,2	8,9
GWP	5,6	12	0,6
SK	5,6	12	0,7
SM	8,7	14	7,6
SG	17	22	75
IAN	6,2	12	- 5,4
ANI	21	28	22
ASI	23	29	100

Tabelle 3.4: Optimierungsergebnisse für „Heidingsfeld“; Veränderungen in % gegenüber dem Referenzszenario OEK für „Heidingsfeld“.

	Raumwärmeversorgung										Elektrizitätsversorgung	
	Oek %	Gk %	Gbwk %	Khkw %	Bhkw %	Hkw %	Ewp %	Gwp %	SolAn %	Abw %	Bhkw %	Netz %
IAN	0	0	90	0	0	0	0	0	0	9	0	100
BHKW	0	24	0	0	75	0	0	0	0	0	72	28
ANI	0	0	21	0	75	0	0	2	0	2	72	28
ASI	0	0	8	0	76	0	0	0	15	1	70	30

Tabelle 3.5: Anteile der Energietechniken an der emissionsoptimierten Raumwärme- und Elektrizitätsversorgung für ausgewählte Szenarien von „Heidingsfeld“. Abw = Industrielle Abwärme; alle übrigen Technikabkürzungen wie in Tabelle 3.3. Das Runden der Technikanteile bewirkt, daß die Summen der (gerundeten) Anteile geringfügig von 100% abweichen können. Die Kleinheizkraftwerke Khkw und die Heizkraftwerke Hkw tragen in den hier betrachteten Szenarien nicht zur Elektrizitätsversorgung bei.

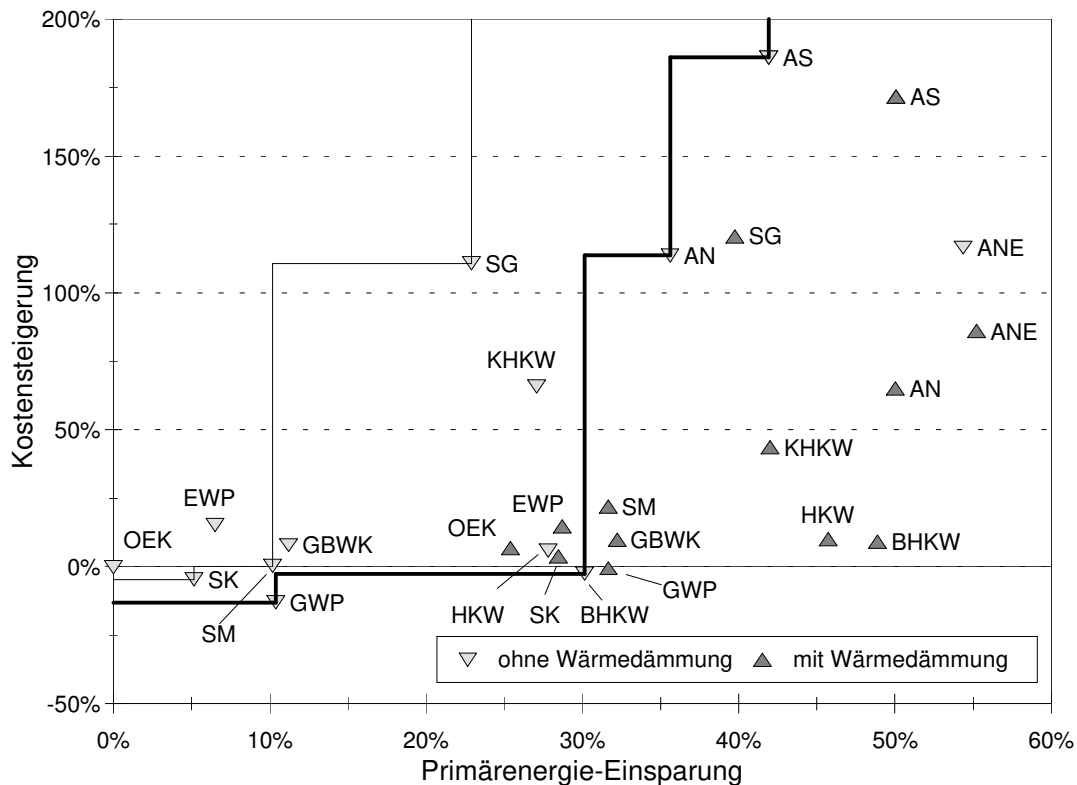


Abbildung 3.3: Reduktion des Primärenergieeinsatzes in „Würzburg“ und Kostensteigerung der Szenarien gegenüber dem Referenzszenario (OEK ohne Wärmedämmung), bezogen auf Primärenergieeinsatz und Kosten des Referenzszenarios. Die dick gezeichnete Treppenkurve gibt für den Fall ohne Wärmedämmung und unter Ausschluß des Szenarios ANE (s.u.) den (im Rahmen der betrachteten Szenarien) minimalen Kostenanstieg wieder, zu dem sich eine vorgegebene Primärenergieeinsparung realisieren läßt („Trade-Offs“). Die dünne Treppenkurve stellt die Trade-Off-Kurve der solaren Szenarien SK, SM und SG dar.

3.4 Ergebnisdiskussion

3.4.1 „Würzburg“

Die mit dem Modell *deeco* für die Modellstadt „Würzburg“ berechneten Möglichkeiten der Primärenergieeinsparung und Emissionsminderung sowie die damit verbundenen Kosten können für die einzelnen Szenarien den Abbildungen 3.3 bis 3.6 entnommen werden; Tabelle 3.3 weist exemplarisch die jeweiligen Technikanteile an der primärenergieoptimierten Energieversorgung aus. Ein Anwender, der ein Energieversorgungssystem für „Würzburg“ neu zu konzipieren hätte, kann sich daraus die Systembausteine zusammenstellen, die den ihm vorgegebenen ökonomischen und ökologischen Kriterien am ehesten gerecht werden. Im folgenden werden einige Optimierungsergebnisse für Szenarien diskutiert und interpretiert, die exemplarisch Energie-, Emissions- und Kostenveränderungen gegenüber dem Referenzszenario OEK sowie Konkurrenz- und Substitutionseffekte zeigen. Das Szenario ANE kann wegen des in ihm zugelassenen Stromexports ins übergeordnete Netz nicht mit den anderen Szenarien verglichen werden (s.u.).

Ohne Wärmedämmung läßt sich eine maximale Primärenergieeinsparung bei vorgegebenen Kosten in all den Szenarien erzielen, die nahe der dicken „Trade-Off“ Treppenkurve in Abb. 3.3

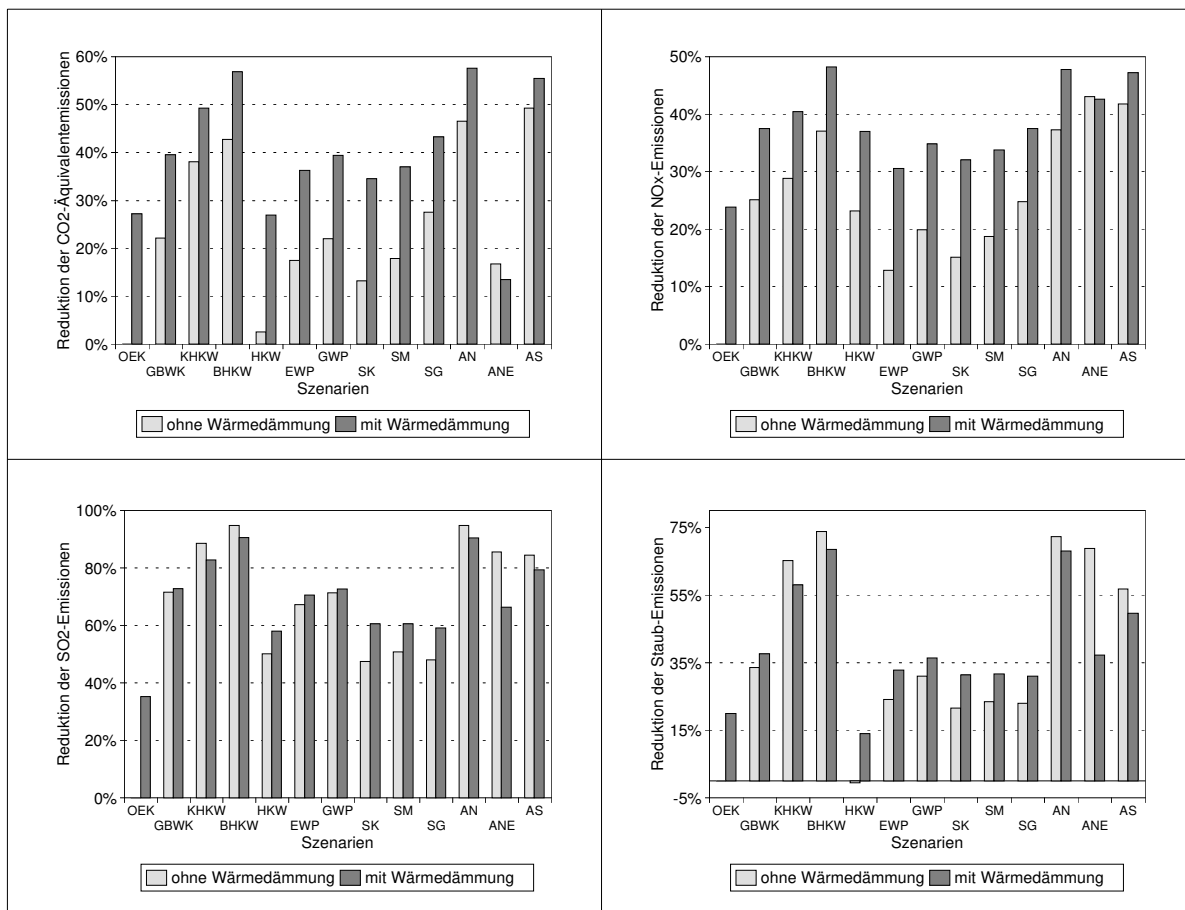


Abbildung 3.4: Reduktion der „Würzburger“ CO₂-Äquivalent-, NO_x-, SO₂- und Staubemissionen der einzelnen Szenarien gegenüber dem Referenzszenario (OEK ohne Wärmedämmung), bezogen auf die entsprechenden Emissionen des Referenzszenarios (= Relative Reduktion).

liegen.¹⁰ Wirtschaftlich am günstigsten ist das Szenario mit zentralen Gaswärmepumpen (GWP). Es verbindet eine Verringerung des Primärenergieeinsatzes um 10% mit einer Kostensenkung um 13%. Letztere beruht darauf, daß die Investitionskosten dezentraler Heizkessel eingespart werden und daß der kommunale Energieversorger Erdgas zu einem relativ günstigen Preis beziehen kann. Im Szenario BHKW¹¹ wird eine 30%ige Primärenergieeinsparung bei 2%iger Kostenreduktion erzielt, indem Gaskessel 43% des Wärmebedarfs und Blockheizkraftwerke 57% des Wärme- und 86% des Elektrizitätsbedarfs decken. Das Szenario HKW, für das nur die mit Gegendruckturbinen berechneten Optimierungsergebnisse ausgewiesen sind, ist um wenig ungünstiger. Verglichen mit den Gegendruckturbinen führen die Entnahmekondensationsturbinen zu einer 6% geringeren Primärenergieeinsparung. Wenn bei der Optimierung im Szenario AN aus allen nichtsolaren Energietechniken ausgewählt werden kann, decken Klein- und Blockheizkraftwerke 73% des Wärme- und 86% des Elektrizitätsbedarfs; Gasbrennwertkessel befriedigen mit 21% die verbleibende Wärmenachfrage fast vollständig. Dabei wird der Primärenergieeinsatz um 36% reduziert, was mit Kostensteigerungen von 110% erkauft wird. Werden im Szenario AS zusätzlich Solarkollektoren und saisonale Wärmespeicher in die Optimierung miteinbezogen, so werden

¹⁰Eine ausführliche Diskussion verschiedener Ansätze zum Aufstellen solcher „Trade-Off“ Kurven findet sich in [UN92]. Das hier angewandte Verfahren wird dort unter die „Integrated Systems Approach“-Ansätze eingereiht.

¹¹Kürzlich veröffentlichte Untersuchungen des Dänischen Gastechnikzentrums in Hørsholm deuten daraufhin, daß in Gasmotoren 2-5% des zugeführten Methans direkt emittiert wird [Nie96]. Wenn sich dies bestätigt, würden sich die Umweltvorteile der BHKWs erheblich reduzieren, da die Klimawirksamkeit des Methans um mehr als das 10-fache größer ist als diejenige von CO₂.

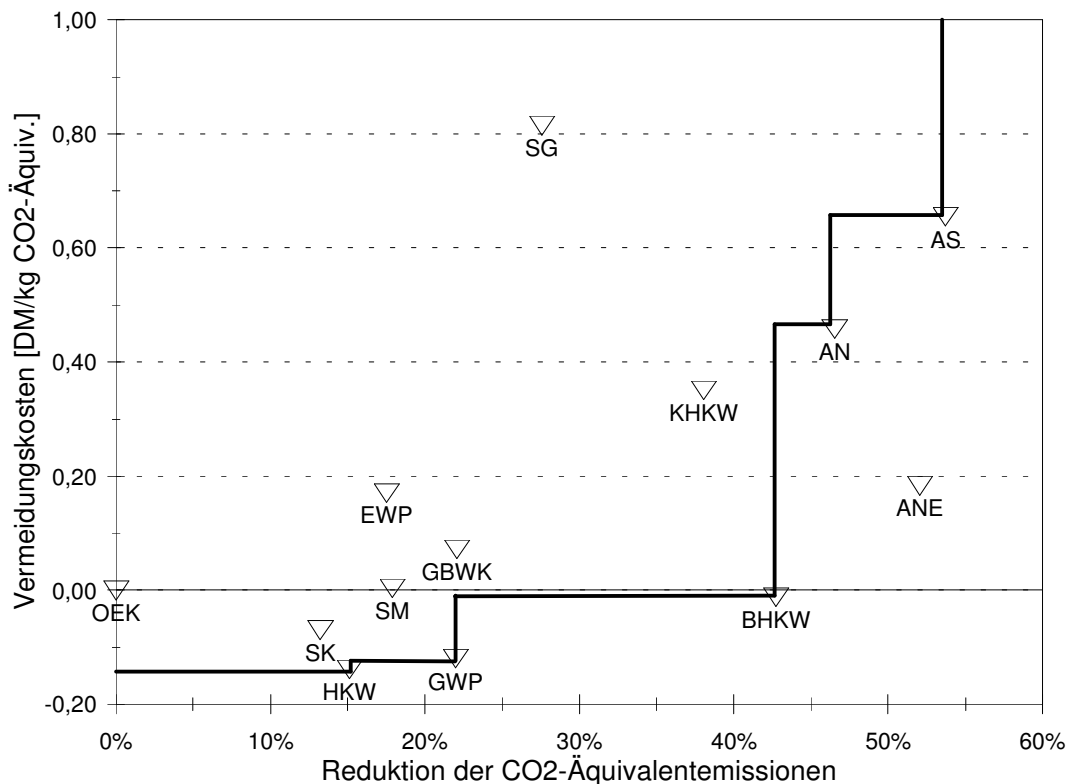


Abbildung 3.5: Relative Reduktion der Emissionen von CO₂-Äquivalenten und Vermeidungskosten in „Würzburg“. Die Vermeidungskosten eines Szenarios sind definiert als „(Kosten des Szenarios minus Kosten des Referenzszenarios) geteilt durch (Emissionen des Referenzszenarios minus Emissionen des Szenarios)“.

42% Primärenergie eingespart und die Kosten steigen um 190%. Die Wärmeversorgung erfolgt dabei zu 48% durch die Solaranlage und zu 39% durch Kraft-Wärme-Kopplung. Letztere liefert auch 47% des Stroms; die restlichen 53% deckt das UES.

Die in Abb. 3.3 dünn eingetragene Trade-Off Treppenkurve der Solarzenarien SK, SM und SG mit kleinem (7%), mittlerem (25%) und großem (71%) solaren Beitrag zur Deckung des Wärmebedarfs im Randbereich zeigt, daß die kleineren und mittleren solaren Nahwärmenetze praktisch keine Kostensteigerung verursachen. Der Grund dafür liegt – neben der Kosteneinsparung durch den Übergang von einer dezentralen zu einer zentralen Wärmeversorgung – in der relativ kleinen Fläche ihrer Kollektoren, die während des ganzen Jahres jederzeit und nahezu vollständig die von ihnen erzeugte Wärme zur Deckung des fluktuierenden Wärmebedarfs beisteuern können. Deswegen ist in ihnen die solare Ausbeute mit 59 Watt/m² bzw. 50 Watt/m² auch deutlich höher als im Szenario SG mit saisonalem Speicher. Dessen solare Ausbeute liegt – wegen der insgesamt hohen (absoluten) Speicher- und Kollektorverluste – bei lediglich 27 Watt/m². Dennoch springt die Primärenergieeinsparung im Szenario SG auf 23%, wird allerdings mit Kostensteigerungen um 110% erkaufte. Das geringe Primärenergieeinsparpotential von 10% des Gaswärmepumpenszenarios GWP ist durch die hohen Temperaturen der unterstellten konventionellen „90 °C /70 °C Raumheizung“ bedingt. Nimmt man Flächenheizungen mit maximalen Vor- und Rücklauftemperaturen von 55 °C und 45 °C an, so steigt die Energieeinsparung in GWP auf 23% an. Ähnliches gilt für das Elektrowärmepumpenszenario EWP. Wärmedämmung erhöht in praktisch allen Szenarien das Primärenergieeinsparpotential erheblich. Die Kostensteigerungen sind moderat (vgl. Abb. 3.3). Besonders hohe Einsparungen an der Wirtschaftlichkeitsgrenze erge-

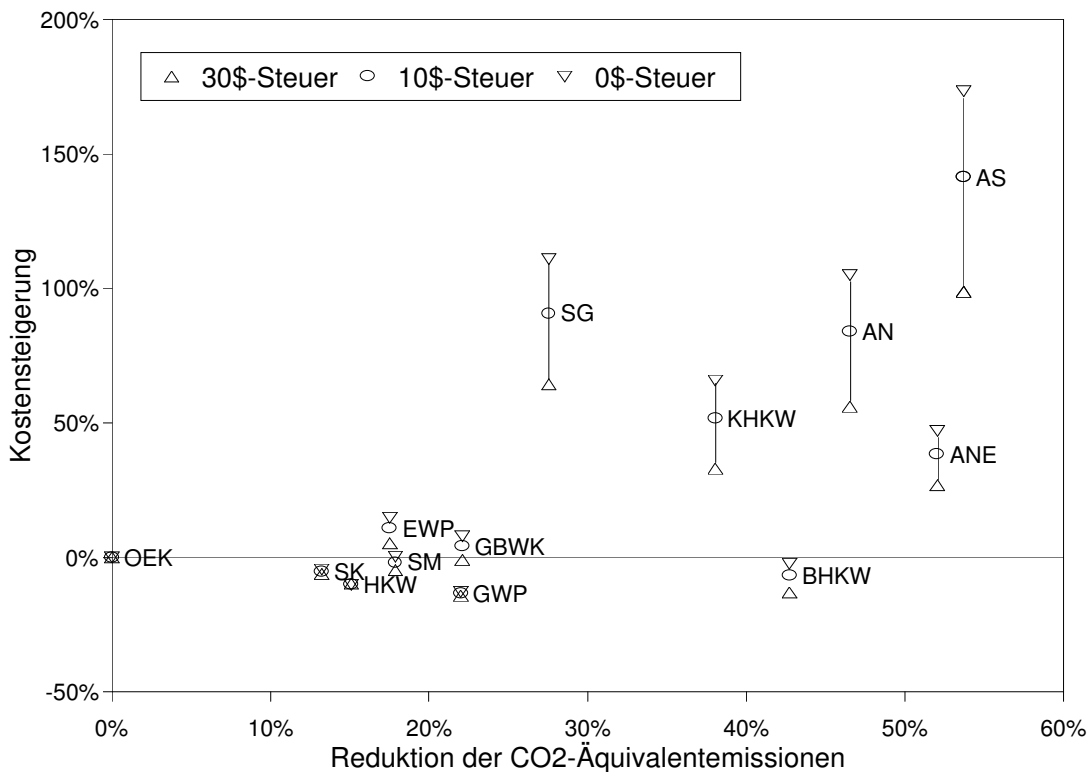


Abbildung 3.6: Reduktion der CO₂-Äquivalentemissionen und Kostensteigerung der Szenarien gegenüber dem Referenzszenario, bezogen auf die Emissionen und Kosten des Referenzszenarios, bei einer CO₂-/Energiesteuer von 0, 10 und 30 US\$ pro Barrel Rohöl. Die Kosten des Referenzszenarios enthalten die jeweiligen Steuern.

ben sich aus der Kombination von Wärmedämmung mit Techniken der Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW, HKW).

Der Vergleich der Abb. 3.3 mit Abb. 3.4 zeigt, daß Primärenergieeinsparung zu Emissionsminderung führt. Eine Ausnahme bilden lediglich die Staubemissionen aus steinkohlebefeuerten Heizkraftwerken im Szenario HKW. Quantitative Unterschiede sind meistens durch Energieträgersubstitution bedingt.¹² Das zeigt sich besonders deutlich im Vergleich der Emissionen von CO₂-Äquivalenten aus steinkohlebefeuerten Heizkraftwerken (HKW) mit denen aus gasbefeuerten Blockheizkraftwerken (BHKW) in Abb. 3.4. Wegen des hohen Kohlenstoffgehalts der Steinkohle schneidet HKW bei der CO₂-Emissionsminderung deutlich schlechter ab als bei der Primärenergieeinsparung. Das hat auch zur Folge, daß beim Übergang auf die Zielfunktion CO₂-Äquivalente (Abb. 3.5 u. 3.6) im Szenario HKW das steinkohlebefeuerte Heizkraftwerk gar nicht, sondern nur die Gasspitzenkessel eingesetzt werden, die die Emissionen von CO₂-Äquivalenten um 15% reduzieren. Im übrigen sind die in Abb. 3.5 ausgewiesenen Vermeidungskosten pro kg eingesparte CO₂-Äquivalentemissionen gleich den Verteuerungen von CO₂-Äquivalentemissionen (z.B. durch Steuern und/oder Abgaben), die erforderlich wären, um die angegebenen Szenarien wirtschaftlich¹³ werden zu lassen. Die in Abb. 3.6 für verschiedene CO₂-/Energie- Steuersätze dargestellten relativen Steigerungen der Kosten zeigen, daß einerseits der Abstand aller signifikant emissionsmindernden Szenarien zur Wirtschaftlichkeitsschwelle durch die Energiepreis-

¹² Im Falle des NO_x (Abb. 3.4) führt auch die Änderung der Verbrennungsprozesse zu Emissionsminderungen.

¹³ „Wirtschaftlich“ bedeutet in dieser Arbeit immer „kostengünstiger als das Referenzszenario OEK (ohne Wärmedämmung)“. Wirtschaftlich in diesem Sinne ist ein Szenario auch dann noch, wenn es ein – vom Referenzszenario verschiedenes – kostengünstigeres Szenario gibt.

erhöhungen deutlich verringert wird, andererseits ein Durchbruch zur Wirtschaftlichkeit nur im GWBK und SM Szenario erreicht wird. Die Szenarien SK, GWP und BHKW sind ohnehin kostengünstiger als das Referenzszenario. Für das Szenario HKW liefert die Emissionsminimierung ein Artefakt. Hier werden nur noch die Gasspitzenkessel eingesetzt, nicht aber die kohlegefeuerten Heizkraftwerke. Daraus ergeben sich zwar Vorteile bei Emissionen und Kosten, allerdings bei gleichzeitig - gegenüber der Energieoptimierung - stark reduzierter Energieeinsparung.

Konkurrenz- und Substitutionseffekte zwischen Energietechniken lassen sich aus Abb. 3.3 und Tabelle 3.3 erkennen. Zum Beispiel liegt die Primärenergieeinsparung im alle nichtsolaren Energietechniken für die Optimierung zulassenden Szenario AN nur um 6 Prozentpunkte über der des Blockheizkraftwerksszenarios BHKW. Sie ist damit erheblich geringer als die Summe der Einsparpotentiale, die sich mit den jeweiligen Techniken alleine erzielen lassen. Noch bedenkenswerter ist, daß bei vorgeschalteter Wärmedämmung im Szenario AS die Ergänzung der BHKW Techniken durch alle übrigen Techniken der rationellen Energieverwendung sowie solare Nahwärmenetze mit saisonalem Speicher die Primärenergieeinsparung praktisch nicht erhöht, sondern nur die Kosten steigen läßt: Gemäß Tabelle 3.3 b) verringert die solare Nahwärme den Anteil der in Blockheizkraftwerken erzeugten Wärme von 87% auf 33% und führt dadurch zu einer Steigerung des Strombezugs aus dem energetisch weniger effizienten UES von 33% auf 74%.

Die Wechselwirkung des kommunalen Energiesystems mit dem UES beeinflusst auch in anderer Hinsicht die Optimierungsergebnisse: Die Möglichkeit des Stromexports, die einzig im Szenario ANE gegeben ist, erlaubt es, daß trotz zeitlich schwankenden Elektrizitätsbedarfs die Blockheizkraftwerke dieses Szenarios (sowohl im Falle mit als auch im Falle ohne Wärmedämmung) den Wärmebedarf unter zeitweisem Stromexport immer zu 100% abdecken. Darüber hinaus wird Elektrizität in Entnahmekondensationskraftwerken mit besserem Wirkungsgrad als im übergeordneten Netz erzeugt und exportiert. Das führt zu hohen Energieeinspar- und Emissionsminderungspotentialen bei relativ geringen Kostensteigerungen. Wegen der in die Energieoptimierung eingehenden Gutschriften der durch den Stromexport insgesamt, d.h. im KES und UES, erzielten Energieeinsparungen können die Optimierungsergebnisse für das Szenario ANE allerdings nur in begrenztem Umfang mit den Ergebnissen der anderen Szenarien verglichen werden. Die ausgewiesenen Primärenergieeinsparpotentiale sind in hohem Maße abhängig von den gewählten Maximalleistungen der beiden Entnahmekondensationsturbinen ($57 \text{ MW}_{\text{el}}$, $80 \text{ MW}_{\text{th}}$ bzw. $64 \text{ MW}_{\text{el}}$, $90 \text{ MW}_{\text{th}}$), die sich im vorliegenden Fall am maximalen „Würzburger“ Elektrizitätsbedarf orientieren.

Sensitivitätsanalysen bezüglich der Annahmen über den Strombezugspreis im KES und die spezifischen Emissionen im UES wurden durchgeführt. Eine Absenkung des Strombezugspreises von 14 Pf/kWh auf 8 Pf/kWh – auch im Referenzszenario – bewirkt, daß bei der Energieoptimierung das Szenario BHKW statt mit einer Kostenminderung um 2% (s. Abb. 3.3) mit einer Kostensteigerung von 16% verbunden ist. Ein Strombezugspreis von 25 Pf/kWh, wie er 1993 im Schnitt für die privaten Haushalte üblich war [Sch94], führt im Szenario BHKW dagegen zu Kosteneinsparungen von 24%.

Erfolgt die Erzeugung von elektrischer Energie im übergeordneten Netz abgesehen von den indirekten Emissionen praktisch CO_2 frei, z.B. in Kernkraftwerken, Windkraft- und Photovoltaikanlagen und/oder CO_2 -entsorgten Steinkohlekraftwerken [Sch90a], so ergibt dies bei gegenüber dem Szenario OEK unveränderter Wärmeversorgung eine Reduktion der CO_2 -Äquivalentemissionen von etwa 43%. Kombiniert man damit das solarthermische Szenario SG und die Wärmedämmung der Gebäude, so ergibt sich gemäß Tabelle 3.3 und Abb. 3.4 eine Reduktion der CO_2 -Äquivalentemissionen von über 85%.

3.4.2 „Heidingsfeld“

Tabelle 3.4 zeigt für die Szenarien ohne Wärmedämmung die Möglichkeiten der Primärenergieeinsparung und Emissionsminderung sowie die damit verbundenen Kostensteigerungen, die mit dem Modell *deeco* für die Modellgemeinde „Heidingsfeld“ berechnet wurden. Tabelle 3.5 weist für ausgewählte Szenarien die Technikanteile an der emissionsoptimierten Energieversorgung aus. Bei Volllast des Unkel'schen Produktionsbetriebes stellt dieser eine Abwärmemenge von 1,11 MW zur Verfügung. Diese reduziert sich bei Berücksichtigung der Lastganglinien auf einen Mittelwert von 0,55 MW, was 16% des „Heidingsfelder“ Raumwärmebedarfs entspricht. Der Abwärmemengenberechnung liegt dabei eine Temperaturdifferenz von 68 °C zwischen der mittleren Abwassertemperatur (83 °C) und der Frischwassertemperatur (15 °C) zugrunde. Die zeitlich fluktuierende Rücklauftemperatur des angenommenen Raumheizungssystems liegt im Jahresmittel bei 41 °C. Das reduziert die nutzbare Menge der industriellen Abwärme auf etwa 10% des Raumwärmebedarfs, so daß sie nach Abzug der Transportverluste dann tatsächlich 9% des Raumwärmebedarfs befriedigen kann. So führt die Nutzung industrieller Abwärme in Kombination mit dem Einsatz von Gasbrennwertkesseln im Szenario IAN zu einer Reduktion des Primärenergiebedarfs für die Erzeugung von Wärme und Elektrizität von lediglich 6,2%. Immerhin ergeben sich dabei aber Kosteneinsparungen von über 5%. Wie in „Würzburg“ so ist auch in „Heidingsfeld“ die Kombination von Gaskesseln und Blockheizkraftwerken (Szenario BHKW in Tabelle 3.4 und 3.5) unter den Gesichtspunkten der Ressourcenschonung, Emissionsminderung und Wirtschaftlichkeit derzeit am günstigsten. Die Kombination aller Techniken (Szenarien ANI und ASI) bringen ressourcen- und umweltmäßig weitere Verbesserungen, was jedoch mit deutlichen Kostensteigerungen erkauft wird. Auch hier zeigen sich wieder deutliche Konkurrenzeffekte.

3.5 Schlußfolgerungen

Beim Auf- oder Umbau eines Energieversorgungssystems sollten vor den Investitionsentscheidungen detaillierte, an der gegebenen Energiebedarfsstruktur orientierte Optimierungsstudien durchgeführt werden, wie sie z.B. mit *deeco* möglich sind. Dies ist notwendig, weil die Potentiale der Primärenergieeinsparung und Emissionsminderung, wie auch die damit verbundenen Kostenveränderungen und die optimalen Technikkombinationen, sehr sensibel von der Struktur und den zeitlichen Fluktuationen des Wärme- und Elektrizitätsbedarfs des jeweiligen kommunalen Energiesystems abhängen. Dies bestätigt exemplarisch der Vergleich der Optimierungsergebnisse für „Würzburg“ und „Heidingsfeld“. Die Potentiale sind in „Heidingsfeld“ mit seinem hohen industriellen Prozeßwärmebedarf deutlich geringer als in „Würzburg“. Andererseits kann die industrielle Abwärme knapp 10% des „Heidingsfelder“ Raumwärmebedarfs decken.

Auch wenn die quantitativen Ergebnisse nur für „Würzburg“ und „Heidingsfeld“ gelten, sollten doch folgende qualitative Schlußfolgerungen gültig sein:

- Gasbefeuerte Blockheizkraftwerke in Verbindung mit Nahwärmenetzen sind heute kostengünstig und verbinden effiziente Energienutzung mit relativ geringen Emissionen von Treibhausgasen. Wegen der Knappheit des Erdgases stellen sie allerdings nur eine mittelfristige Lösung dar. Derartige Systeme bieten aber gute Voraussetzungen für eine spätere Umstellung auf Biogas oder Wasserstoff sowie die Ergänzung durch solarthermische Komponenten oder Brennstoffzellen.
- Im Verbund von Blockheizkraftwerken mit anderen Techniken der rationellen Energieversorgung und der Solarthermie verhindern Konkurrenzeffekte die volle Entfaltung der den einzelnen Techniken innewohnenden Einsparpotentiale.

- Wärmedämmung von Gebäuden kann die Potentiale der Energieeinsparung und Emissionsminderung bei i. allg. moderaten Kostensteigerungen deutlich erhöhen.
- Das von der Enquete-Kommission des Bundestages formulierte Ziel einer 80%igen Reduktion der Emission von CO₂-Äquivalenten läßt sich i.allg. nicht allein durch (fossil befeuerte) Techniken der rationellen Energieverwendung erreichen. Deshalb und wegen abnehmender Vorräte von Öl und Gas werden langfristig massive Investitionen in Solarthermie und CO₂-arme Elektrizitätserzeugung notwendig sein.
- Bei den derzeitigen Preisen der fossilen Energieträger sind große Solaranlagen mit saisonalem Wärmespeicher betriebswirtschaftlich unrentabel. Kombinierte CO₂-/Energiesteuern von 10 und 30 US\$ pro Barrel Rohöl bringen sie näher an die Wirtschaftlichkeitsgrenze, ohne sie diese jedoch erreichen zu lassen. Besser ist die betriebswirtschaftliche Situation für kleine und mittlere solare Nahwärmenetze.

Kapitel 4

Zusammenfassung

Rationelle Energieverwendung und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen bieten vielfältige und wohlerprobte Möglichkeiten, auf kommunaler und regionaler Ebene die Emissionen von Schadstoffen und klimawirksamen Gasen zu vermindern. Welche der entsprechenden Techniken am jeweiligen Ort die beste Lösung darstellt, hängt jedoch stark von den lokalen Gegebenheiten ab. Zudem stehen manche der Techniken in Konkurrenz zueinander, so daß sich ihre Minderungspotentiale nicht ergänzen.

Das in dieser Arbeit detailliert beschriebene Modell *deeco* dient der dynamischen Energie-, Emissions- und Kostenoptimierung lokaler bzw. regionaler Energieversorgungssysteme mit zeitlich fluktuierendem Energiebedarf. Es erlaubt die systemintegrierte, d.h. simultane Berücksichtigung folgender Energietechniken, die zu beliebig langen Energieversorgungspfaden zusammengefügt werden können: Einzelöfen, Heizkessel, Heizwerke; Kraftwerke (inkl. Schadstoffrückhaltung und -entsorgung); Wärmetauschernetzwerke zur Nutzung industrieller Abwärme, Gas- und Elektrowärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplung in Verbindung mit Fern- bzw. Nahwärmesystemen; Solarkollektoren sowie Speicherung von Solarenergie, industrieller Abwärme und Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (kurzfristig und saisonal). *deeco* ermittelt auf der Basis des zeitabhängigen Energiebedarfs der Bedarfsprozesse (Stundenmittelwerte), der zeitabhängigen Abwärmeproduktion industrieller Anlagen, der örtlichen Wetterdaten, der technischen und wirtschaftlichen Daten der Energieversorgungstechniken sowie der Kenndaten der verwendeten Brennstoffe und des übergeordneten Kraftwerkparks die optimierten Werte des (nicht-regenerativen) Primärenergieeinsatzes, der Emissionen (CO_2 , NO_x , SO_2 , etc.) sowie die Kosten und die optimalen Anteile der verschiedenen Versorgungstechniken an der Bereitstellung der nachgefragten Nutzenergie. Methodisch erfolgt dies durch lineare Optimierung (Simplexalgorithmus) im Rahmen einer übergeordneten quasidynamischen Optimierung über den Zeitraum eines (repräsentativen) Jahres. *deeco* führt keine getrennten Simulationen der verschiedenen Energieversorgungstechniken durch, sondern optimiert dynamisch ihren gemeinsamen Einsatz unter Berücksichtigung des nichtlinearen und zeitabhängigen Einflusses intensiver Größen (Außen-, Bedarfs-, Abwärme-, Speichertemperaturen, etc.) auf die Wirkungsgrade der Energieversorgungstechniken. Es erlaubt damit die Untersuchung von Konkurrenzeffekten zwischen Techniken der rationellen Energieverwendung und der Nutzung regenerativer Energiequellen. Darüber hinaus gestattet es die Bestimmung von „Trade-Offs“ zwischen Primärenergieeinsatz, Emissionen und Kosten. Es stellt damit ein flexibles Instrument zur Unterstützung energie- und umwelttechnischer Investitionsentscheidungen beim Auf- oder Umbau kommunaler Energieversorgungssysteme sowie zur Erstellung entsprechender Energiekonzepte dar.

Die Anwendung von *deeco* auf zwei verschieden große süddeutsche Modellstädte „Würzburg“ und „Heidingsfeld“ mit unterschiedlicher Struktur des Energiebedarfs zeigt, daß die Optimierungsergebnisse sensibel von der Situation „vor Ort“ abhängen. Lastganglinien des Wärme- und

Elektrizitätsbedarfs, Phasenverschiebungen zwischen ihnen sowie Konkurrenzeffekte zwischen den einzelnen Techniken der rationellen Energieverwendung und der Solarthermie beeinflussen die Potentiale der Primärenergieeinsparung und Emissionsminderung und die mit ihnen verbundenen Kostenänderungen erheblich. Gegenüber einem Referenzsystem, das Wärme und elektrische Energie ausschließlich aus Ölkesseln und dem übergeordneten Stromnetz bezieht, führt in „Würzburg“ der flächendeckende Einsatz gasbefeuerteter Blockheizkraftwerke zu einer Primärenergiereduktion von 30%. Damit verbunden sind Kosteneinsparungen von 2% und eine Minderung der CO₂-Äquivalent Emissionen in Höhe von 43%. Bei Einbeziehung aller Techniken der rationellen Energieverwendung und starker Wärmedämmung der Gebäude lassen sich Primärenergieeinsparungen und CO₂-Äquivalent Emissionsminderungen von 50% und 58% bei Kostensteigerungen von 65% erzielen. Szenarien mit kleinen und mittleren solaren Nahwärmenetzen sind kostengünstiger als das Referenzsystem. CO₂-Äquivalent Emissionsreduktionen von mehr als 85% könnten im Prinzip (bei Außerachtlassung von Kostenaspekten) durch eine CO₂-arme Elektrizitätserzeugung im übergeordneten Stromnetz in Kombination mit großen solaren Nahwärmesystemen und 50%iger Wärmebedarfsreduktion durch Wärmedämmung erreicht werden. Kombinierte CO₂-/Energiesteuern in Höhe von 10 und 30 US \$ pro (Energie- und Kohlenstoffinhalt von einem) Barrel Rohöl reichen nicht aus, um große solare Nahwärmesysteme mit saisonalen Wärmespeichern wirtschaftlich werden zu lassen. Die Primärenergie- und Emissionsminderungspotentiale sind in „Heidingsfeld“ mit seinem hohen industriellen Prozeßwärmebedarf deutlich geringer als in „Würzburg“. Deckt man über ein Nahwärmenetz etwa 10% des „Heidingsfelder“ Raumwärmebedarfs durch industrielle Abwärme und den Rest durch zentrale Gasbrennwertkessel, so führt dies zu Emissionsminderungen von mehr als 12% und Kosteneinsparungen von 5%.

Anhang A

Notation

Vorbemerkung:

1. In diesem Verzeichnis werden nur globale Variablen aufgeführt, die im gesamten Text eine einheitliche Bedeutung besitzen. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Größen, die lokal in einzelnen Abschnitten verwendet und auch dort definiert werden. Ihre Bedeutung kann sich von Abschnitt zu Abschnitt ändern.
2. Bilden Symbol und Index eine gedankliche Einheit, die den Namen der Größe wiedergeben soll, so werden Großbuchstaben als Indizes verwendet, die auch ein kurzes Wort wie z.B. „Fuel“ einleiten können. Sie treten hoch- oder tiefgestellt auf. \dot{E}_{Fuel} stellt z.B. einen chemischen Energiestrom dar, der einem Brennstoffstrom entspricht. Griechisch und klein geschriebene, nachgestellte Indizes dienen als Laufindizes oder stehen als Platzhalter für Elemente aus einer Menge, die mehrere mit Großbuchstaben beginnende Indizes umfaßt: Bei \dot{E}_α , $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$, z.B., kann es sich um einen chemischen, elektrischen, mechanischen Energie- oder Nettoenthalpiestrom handeln. Indizes, die dagegen bestimmte Elemente aus einer abstrakten Menge (z.B. Menge aller Umwandlungsprozesse) kennzeichnen, werden klein und lateinisch geschrieben sowie tiefgestellt und nur angegeben, wenn Unterscheidungsbedarf besteht. Der beim d -ten Bedarfsprozeß auftretende Nettoenthalpiestrom, der den Prozeß verläßt und Abwärme einer bestimmten Art l abtransportiert erhält z.B. die Bezeichnung $\dot{E}_{H,l,Ex,d}$ (H steht für Nettoenthalpie und Ex für „Exit“). Werden zeitlich variable Größen über einen Zeitraum gemittelt, so wird dieser Zeitraum als Index vor dem Größensymbol angegeben (s. Def. 31).
3. Vektoren werden fett gedruckt. Treten Vektoren als Komponenten von übergeordneten Vektoren auf, so stehen sie stellvertretend für ihre Komponenten. So ist z.B. \mathcal{J} ein sechskomponentiger Vektor (s.u.).
4. Der Index \dagger gibt im Zusammenhang mit Vektoren an, daß es sich bei ihnen um transponierte Zeilenvektoren, also um Spaltenvektoren handelt.

Formelzeichen (lateinisch)

\dot{C}	: Verallgemeinerte Kosten (pro Zeiteinheit) (Costs)
\dot{C}^{Fix}	: Verallgemeinerte fixe Kosten (pro Zeiteinheit)
\dot{C}^{Var}	: Verallgemeinerte variable Kosten (pro Zeiteinheit)
\dot{C}_E	: Verallgemeinerte Kosten im EVS (pro Zeiteinheit)
\dot{C}_E^{Fix}	: Verallgemeinerte fixe Kosten im EVS (pro Zeiteinheit)
\dot{C}_E^{Var}	: Verallgemeinerte variable Kosten im EVS (pro Zeiteinheit)
${}^\Theta \dot{C}_E$: Verallgemeinerte Kosten im EVS (pro Zeiteinheit);

	gemittelt über den Zeitraum Θ)
${}^{\Theta}\dot{\mathcal{C}}_{E,0}$: Verallgemeinerte Kosten im EVS (pro Zeiteinheit), Referenzsystem (gemittelt über den Zeitraum Θ)
${}^{\Theta}\dot{\mathcal{C}}_E^{Fix}$: Verallgemeinerte fixe Kosten im EVS (pro Zeiteinheit; gemittelt über den Zeitraum Θ)
${}^{\Theta}\dot{\mathcal{C}}_E^{Var}$: Verallgemeinerte variable Kosten im EVS (pro Zeiteinheit; gemittelt über den Zeitraum Θ)
\dot{E}^L	: Speicherenergieverlust (pro Zeiteinheit)
\dot{E}_0^L	: Lastunabhängiger Speicherenergieverlust (pro Zeiteinheit)
E^S	: Speicherenergieinhalt, Zustandsgröße
$E^{S,Min}$: Minimaler Speicherenergieinhalt
$E^{S,Max}$: Maximaler Speicherenergieinhalt
\dot{E}_{α}	: Energiestrom der Sorte $\alpha \in \{El, Mech, Q, H, (H, l), (H, k), Fuel, P\}$
\dot{E}_{α}^D	: Energiebedarf (pro Zeiteinheit) der Sorte $\alpha \in \{El, Mech, H\}$
\dot{E}_{α}^R	: (maximaler) Energiestrom regenerativen Ursprungs der Sorte $\alpha \in \{El, Mech, H, Fuel\}$
$\dot{E}_{\alpha,En}$: Energiestrom, in Prozeß eintretend
$\dot{E}_{\alpha,En,0}$: Auslastungsunabhängiger Energiestrom, in Prozeß eintretend
$\dot{E}_{\alpha,Ex}$: Energiestrom, aus Prozeß austretend
$\dot{E}_{\alpha,Ex,0}$: Auslastungsunabhängiger Energiestrom, aus Prozeß austretend
$\dot{E}_{\alpha,In}$: Energiestrom, Eingabegröße
$\dot{E}_{\alpha,Out}$: Energiestrom, Ausgabegröße
\dot{E}_{El}	: Elektrische Leistung
$\dot{E}_{El,1,En}$: Elektrischer Hilfsenergiebedarf (pro Zeiteinheit), Speicherprozeß
\dot{E}_{Fuel}	: Chemische Energie (pro Zeiteinheit)
\dot{E}_H	: Nettoenthalpiestrom
$\dot{E}_{H,i}$: Nettoenthalpiestrom der Sorte i
$\dot{E}_{H,k,En}$: Nettoenthalpiestrom der Sorte k , in Prozeß eintretend
$\dot{E}_{H,l,Ex}$: Nettoenthalpiestrom der Sorte l , aus Prozeß austretend
$\dot{E}_{H,l}^W$: Abwärmestrom der Sorte l
\dot{E}_{Mech}	: Mechanische Leistung
\dot{E}_P	: Nicht-regenerativer Primärenergieeinsatz (pro Zeiteinheit)
\dot{E}_P^{Fix}	: Fixer Primärenergieeinsatz (pro Zeiteinheit)
\dot{E}_P^{Var}	: Variabler Primärenergieeinsatz (pro Zeiteinheit)
$\dot{E}_{P,E}$: Primärenergieeinsatz im EVS (pro Zeiteinheit)
$\dot{E}_{P,E}^{Fix}$: Fixer Primärenergieeinsatz im EVS (pro Zeiteinheit)
$\dot{E}_{P,E}^{Var}$: Variabler Primärenergieeinsatz im EVS (pro Zeiteinheit)
${}^{\Theta}\dot{E}_{P,E}$: Primärenergieeinsatz im EVS (pro Zeiteinheit) (gemittelt über den Zeitraum Θ)
${}^{\Theta}\dot{E}_{P,E,0}$: Primärenergieeinsatz im EVS (pro Zeiteinheit), Referenzsystem (gemittelt über den Zeitraum Θ)
\dot{E}_Q	: Wärmestrom
\mathbf{f}	: (geeignet zu wählende) Vektorfunktion
G	: Platzhalter für eine beliebige Größe
${}^{\Theta}G$: Mittelwert von G , gebildet über den Optimierungszeitraum Θ
${}^{\tau}G$: Mittelwert von G , gebildet über einen Zeitraum der Länge τ
\mathbf{g}	: (geeignet zu wählende) Vektorfunktion
\dot{H}	: Enthalpiestrom
h	: Spezifische Enthalpie (bezogen auf eine Masseneinheit)

h_{En}	: Spezifische Enthalpie eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
h_{Ex}	: Spezifische Enthalpie eines austretenden Nettoenthalpiestromes
h_F	: Spezifische Enthalpie im Vorlauf eines Nettoenthalpiestromes
h_{LHV}	: Unterer Heizwert
h_N	: Spezifisches Wärmeäquivalent von Kernbrennstoffen
h_R	: Spezifische Enthalpie im Rücklauf eines Nettoenthalpiestromes
I	: Solare Einstrahlung (Insolation)
$\mathcal{J} = (\mathcal{X}_F, \mathcal{X}_R)^\dagger$: Vektor der intensiven Größen (=Attribute, s. Def. 13) eines Nettoenthalpiestromes
\mathcal{J}_{En}	: Vektor der intensiven Größen eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{J}_{En,In}$: Gesamtheit der Komponenten von \mathcal{J}_{En} , die Eingabegrößen darstellen
$\mathcal{J}_{En,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von \mathcal{J}_{En} , die Ausgabegrößen darstellen
\mathcal{J}_{Ex}	: Vektor der intensiven Größen eines austretenden Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{J}_{Ex,In}$: Gesamtheit der Komponenten von \mathcal{J}_{Ex} , die Eingabegrößen darstellen
$\mathcal{J}_{Ex,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von \mathcal{J}_{Ex} , die Ausgabegrößen darstellen
\mathcal{J}_{In}	: Vektor der intensiven Eingabegrößen eines Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{J}_{k,En}$: Vektor der intensiven Größen des eintretenden Nettoenthalpiestromes der Sorte k
$\mathcal{J}_{\{k\},En}$: Gesamtheit der Vektoren der intensiven Größen der eintretenden Nettoenthalpieströme $k \in \{k\}$
$\mathcal{J}_{k,En,In}$: Gesamtheit der Komponenten von $\mathcal{J}_{k,En}$, die Eingabegrößen darstellen
$\mathcal{J}_{k,En,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von $\mathcal{J}_{k,En}$, die Ausgabegrößen darstellen
$\mathcal{J}_{l,Ex}$: Vektor der intensiven Größen des austretenden Nettoenthalpiestromes der Sorte l
$\mathcal{J}_{\{l\},Ex}$: Gesamtheit der Vektoren der intensiven Größen der austretenden Nettoenthalpieströme $l \in \{l\}$
$\mathcal{J}_{l,Ex,In}$: Gesamtheit der Komponenten von $\mathcal{J}_{l,Ex}$, die Eingabegrößen darstellen
$\mathcal{J}_{l,Ex,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von $\mathcal{J}_{l,Ex}$, die Ausgabegrößen darstellen
\mathcal{J}_{Out}	: Vektor der intensiven Ausgabegrößen eines Nettoenthalpiestromes
\dot{M}	: Monetäre Kosten (pro Zeiteinheit)
\dot{M}^{Fix}	: Fixe monetäre Kosten (pro Zeiteinheit)
\dot{M}^{Var}	: Variable monetäre Kosten (pro Zeiteinheit)
\dot{M}_E	: Monetäre Kosten im EVS (pro Zeiteinheit)
\dot{M}_E^{Fix}	: Fixe monetäre Kosten im EVS (pro Zeiteinheit)
\dot{M}_E^{Var}	: Variable monetäre Kosten im EVS (pro Zeiteinheit)
${}^\Theta \dot{M}_E$: Monetäre Kosten im EVS (pro Zeiteinheit) (gemittelt über den Zeitraum Θ)
${}^\Theta \dot{M}_{E,0}$: Monetäre Kosten im EVS (pro Zeiteinheit), Referenzsystem (gemittelt über den Zeitraum Θ)
\dot{m}	: Massenstrom
\dot{m}_{En}	: Massenstrom, der einen eintretenden Nettoenthalpiestrom trägt
\dot{m}_{Ex}	: Massenstrom, der einen austretenden Nettoenthalpiestrom trägt
\mathcal{O}	: Vektor der Optimierungsgrößen
$\tau_\xi \mathcal{O}$: Vektor der Optimierungsgrößen (gemittelt über die Länge des Intervalls τ_ξ)
$\dot{\mathcal{P}}$: Vektor der Emissionen (pro Zeiteinheit)
$\dot{\mathcal{P}}^{Fix}$: Vektor der fixen Emissionen (pro Zeiteinheit)
$\dot{\mathcal{P}}^{Var}$: Vektor der variablen Emissionen (pro Zeiteinheit)
$\dot{\mathcal{P}}_E$: Vektor der Emissionen im EVS (pro Zeiteinheit)
$\dot{\mathcal{P}}_E^{Fix}$: Vektor der fixen Emissionen im EVS (pro Zeiteinheit)

$\dot{\mathbf{P}}_E^{Var}$: Vektor der variablen Emissionen im EVS (pro Zeiteinheit)
\dot{P}_ν	: Emissionen der Sorte ν (pro Zeiteinheit), $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$
\dot{P}_ν^{Fix}	: Fixe Emissionen der Sorte ν (pro Zeiteinheit)
\dot{P}_ν^{Var}	: Variable Emissionen der Sorte ν (pro Zeiteinheit)
$\dot{P}_{\nu,E}$: Emissionen der Sorte ν im EVS (pro Zeiteinheit), $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$
$\dot{P}_{\nu,E}^{Fix}$: Fixe Emissionen der Sorte ν im EVS (pro Zeiteinheit)
$\dot{P}_{\nu,E}^{Var}$: Variable Emissionen der Sorte ν im EVS (pro Zeiteinheit)
$\Theta \dot{P}_{\nu,E}$: Emissionen der Sorte ν im EVS (pro Zeiteinheit) (gemittelt über den Zeitraum Θ)
$\Theta \dot{P}_{\nu,E,0}$: Emissionen der Sorte ν im EVS (pro Zeiteinheit), Referenzsystem (gemittelt über den Zeitraum Θ)
p	: Druck
p_F	: Druck im Vorlauf eines Nettoenthalpiestromes
p_R	: Druck im Rücklauf eines Nettoenthalpiestromes
\dot{Q}	: Wärmestrom
\mathcal{R}	: Vektor der prozeßexternen Einflußgrößen
$\tau_\xi \mathcal{R}$: Vektor der Einflußgrößen (gemittelt über die Länge des Intervalls τ_ξ)
\mathbf{S}	: Vektor der Zustandsgrößen
T	: Temperatur
T_A	: Außentemperatur
T_F	: Temperatur im Vorlauf eines Nettoenthalpiestromes
$T_{F,En}$: Temperatur im Vorlauf eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
$T_{F,Ex}$: Temperatur im Vorlauf eines austretenden Nettoenthalpiestromes
T_Q	: Temperatur eines Wärmestromes
T_R	: Temperatur im Rücklauf eines Nettoenthalpiestromes
$T_{R,En}$: Temperatur im Rücklauf eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
$T_{R,Ex}$: Temperatur im Rücklauf eines austretenden Nettoenthalpiestromes
T_S	: Speichertemperatur
t	: Zeit
$\mathbf{U} = (T_A, I, \dots)^\dagger$: Umweltdatenvektor
u	: Spezifische innere Energie (bezogen auf eine Masseneinheit)
v	: Spezifisches Volumen (bezogen auf eine Masseneinheit)
$\mathcal{X}_F = (T_F, p_F, x_F)^\dagger$: Vektor der intensiven Größen im Vorlauf eines Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{X}_{F,En}$: Vektor der intensiven Größen im Vorlauf eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{X}_{F,Ex}$: Vektor der intensiven Größen im Vorlauf eines austretenden Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{X}_R = (T_R, p_R, x_R)^\dagger$: Vektor der intensiven Größen im Rücklauf eines Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{X}_{R,En}$: Vektor der intensiven Größen im Rücklauf eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
$\mathcal{X}_{R,Ex}$: Vektor der intensiven Größen im Rücklauf eines austretenden Nettoenthalpiestromes
\mathbf{x}	: Vektor der Eingabegrößen
\mathbf{x}_{Att}	: Vektor der Eingabegrößen, die Attribute darstellen (s. Def. 13)
\mathbf{x}_{Fl}	: Vektor der Eingabegrößen, die Flüsse darstellen
\mathbf{x}_{Inf}	: Vektor der Eingabegrößen, die prozeßexterne Einflußgrößen darstellen
x	: Wasserbeladung bzw. Dampfgehalt
x_F	: Wasserbeladung bzw. Dampfgehalt im Vorlauf eines

	Nettoenthalpiestromes
x_R	: Wasserbeladung bzw. Dampfgehalt im Rücklauf eines Nettoenthalpiestromes
\mathbf{y}	: Vektor der Ausgabegrößen
y	: Ausgabegröße
y_{Att}	: Ausgabegröße, die ein Attribut darstellt (s. Def. 13)
y_{Fl}	: Ausgabegröße, die einen Fluß darstellt
\mathbf{z}	: Vektor der Zustandsgrößen

Formelzeichen (griechisch)

$\Gamma[\mathcal{R}(t)]$: Zulässiger Zustandsbereich
$\varepsilon_{\beta}^{\alpha} := \partial \dot{E}_{\alpha,Ex} / \partial \dot{E}_{\beta,En}$: Differentieller Wirkungsgrad, $\alpha, \beta \in \{El, Mech, Q, H, (H, l), (H, k), Fuel, P\}$
Θ	: Optimierungszeitraum
	Spezifischer Kostenfaktor
κ_{α}	: (bezogen auf Energiestrom der Sorte $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$)
$\kappa_{El,En}$: (bezogen auf exportierte el. Energie)
$\kappa_{El,Ex}$: (bezogen auf importierte el. Energie)
κ_{Fuel}	: (bezogen auf chemische Energie)
$\kappa_{Fuel,Ex}$: (bezogen auf importierte chemische Energie)
$\lambda_{\beta}^{\alpha} := \partial \dot{E}_{\alpha,En} / \partial \dot{E}_{\beta,Ex}$: Differentieller spezifischer Energieaufwand, $\alpha, \beta \in \{El, Mech, Q, H, (H, l), (H, k), Fuel, P\}$
$\lambda^{El,1}$: spezifischer elektrischer Hilfsenergieaufwand, Speicherentladung
$\mu_{\beta}^{\alpha} := \partial \dot{E}_{\alpha,Ex} / \partial \dot{E}_{\beta,Ex}$: Differentieller Koppelfaktor austretender Energieströme, $\alpha, \beta \in \{El, Mech, Q, H, (H, l), (H, k), Fuel, P\}$
	Spezifischer Primärenergieeinsatz
π_{α}	: (bezogen auf Energiestrom der Sorte $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$)
$\pi_{El,En}$: (bezogen auf exportierte el. Energie)
$\pi_{El,Ex}$: (bezogen auf importierte el. Energie)
π_{Fuel}	: (bezogen auf chemische Energie)
$\pi_{Fuel,Ex}$: (bezogen auf importierte chemische Energie)
	Vektor der spezifischen Emissionsfaktoren
\mathcal{R}_{α}	: (bezogen auf Energiestrom der Sorte $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$)
$\mathcal{R}_{El,En}$: (bezogen auf exportierte el. Energie)
$\mathcal{R}_{El,Ex}$: (bezogen auf importierte el. Energie)
\mathcal{R}_{Fuel}	: (bezogen auf chemische Energie)
$\mathcal{R}_{Fuel,Ex}$: (bezogen auf importierte chemische Energie)
	Spezifischer Emissionsfaktor des Stoffes $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$
$\varpi_{\nu,\alpha}$: (bezogen auf Energiestrom der Sorte $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$)
$\varpi_{\nu,El,En}$: (bezogen auf exportierte el. Energie)
$\varpi_{\nu,El,Ex}$: (bezogen auf importierte el. Energie)
$\varpi_{\nu,Fuel}$: (bezogen auf chemische Energie)
$\varpi_{\nu,Fuel,Ex}$: (bezogen auf importierte chemische Energie)
ρ_M	: Gewichtungsfaktor der monetären Kosten

ρ_P	: Gewichtungsfaktor des Primärenergieeinsatzes
ρ_ν	: Gewichtungsfaktor der Emissionen der Sorte $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$
	Differentieller Energieverlust
ϱ_{En}	: (bezogen auf die Energieaufnahme)
ϱ_{Ex}	: (bezogen auf die Energieabgabe)
$\sigma_\beta^\alpha := \partial \dot{E}_{\alpha, En} / \partial \dot{E}_{\beta, En}$: Differentieller Koppelfaktor eintretender Energieströme, $\alpha, \beta \in \{El, Mech, Q, H, (H, l), (H, k), Fuel, P\}$
$\sigma^{El, 1}$: spezifischer elektrischer Hilfsenergieaufwand, Speicherbeladung
τ	: Länge eines Optimierungszeitintervalls
τ_ξ	: ξ -tes Optimierungszeitintervall
Φ^{Var}	: Zeitlich lokale Zielfunktion (variable verallgemeinerte Kosten)
$\Theta \Phi$: Zeitlich globale Zielfunktion (verallgemeinerte Gesamtkosten)
$\Theta \Phi^{Var}$: Zeitlich globale Zielfunktion (variable verallgemeinerte Kosten)
$\tau_\xi \Phi^{Var}$: Zielfunktion (variable verallgemeinerte Kosten) (gemittelt über die Länge des Intervalls τ_ξ)
ϕ	: Modifizierte Zielfunktion
$\Omega[\mathcal{S}(t), \mathcal{R}(t)]$: Zulässiger Steuerbereich

Hochgestellte Indizes

D	: Bedarf (Demand)
Fix	: Fix
L	: Verlust (Loss)
Max	: Maximalwert
Min	: Minimalwert
R	: regenerativ erzeugt
S	: Speicher
Var	: Variabel
W	: Abwärme (Waste Heat)

Tiefgestellte Indizes

A	: Außentemperatur
Att	: Attribut (s. Def. 13)
α	: Energiestromsorte $\alpha \in \{El, Mech, Q, H, (H, l), (H, k), Fuel, P\}$
a	: Prozeß
β	: Energiestromsorte $\beta \in \{El, Mech, Q, H, (H, l), (H, k), Fuel, P\}$
b	: Bilanzpunkt
c	: Umwandlungsprozeß
d	: Bedarfs(teil)prozeß
E	: auf das gesamte EVS bezogen
El	: Elektrische Energie
el	: elektrisch
En	: Eingang (Entrance; bezogen auf den Energiefluß)
Ex	: Ausgang (Exit; bezogen auf den Energiefluß)
Exp	: Export

F	: Vorlauf (Flow)
Fl	: Fluß
$Fuel$: Chemische Energie
H	: Enthalpie
Imp	: Import
In	: Eingabe (Input; bezogen auf den Datenfluß)
Inf	: Prozeßexterne Einflußgröße (Influence)
k	: (Eintretender Energiestrom der) Sorte k
LHV	: Unterer Heizwert (Lower Heating Value)
l	: (Austretender Energiestrom der) Sorte l
M	: Monetär
Max	: Maximalwert
$Mech$: Mechanische Energie
Min	: Minimalwert
N	: Nukleare Energie
ν	: Emissionssorte $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$
n	: Vernetzungsprozeß
Out	: Ausgabe (Output; bezogen auf den Datenfluß)
o	: Kollektorprozeß
P	: Nicht-regenerative Primärenergie
p	: Import-Export-Prozeß
Q	: Wärme
R	: Rücklauf
s	: Speicherprozeß
T	: Prozeßinterner Grenzwert (Threshold)
th	: thermisch
ξ	: Laufindex der Optimierungszeitintervalle
Ξ	: Gesamtzahl der Optimierungszeitintervalle
0	: Auslastungsunabhängige Größe bzw. Größe, die auf das Referenzsystem bezogen ist

Mengendefinitionen

$\{\alpha\}_{En,a}$: Menge der energetischen Eingänge von a (s. Def. 30)
$\{\alpha\}_{Ex,a}$: Menge der energetischen Ausgänge von a (s. Def. 30)
$\{a\}$: Menge aller Prozesse
$\{b\}$: Menge aller Bilanzpunkte
$\{c\}$: Menge aller Umwandlungsprozesse (<u>c</u> onversion)
$\{d\}$: Menge aller Bedarfs(teil)prozesse (<u>d</u> emand)
$\{j\}$: Menge aller Knoten, $\{j\} = \{a\} \cup \{b\}$
$\{n\}$: Menge aller Vernetzungsprozesse (<u>n</u> etwork)
$\{o\}$: Menge aller Kollektorprozesse (<u>c</u> ollector)
$\{p\}$: Menge aller Import-Export-Prozesse (<u>i</u> mport- <u>e</u> xport)
$p(j)$: Menge der (unmittelbaren) Vorgänger (<u>p</u> redecessor) des Knoten j
$P(b)$: Menge der Vorgängerausgänge von b (s. Def. 30)
$\{s\}$: Menge aller Speicherprozesse (<u>s</u> torage)
$s(j)$: Menge der (unmittelbaren) Nachfolger (<u>s</u> uccessor) des Knoten j
$S(b)$: Menge der Nachfolgereingänge von b (s. Def. 30)

Systemanalytische Modellierung der Energie-, Emissions- und Kostenoptimierung von räumlich und zeitlich disaggregierten Energieversorgungssystemen				
Modell des Energieversorgungssystems				Zielfunktionen
Räumlich und zeitlich disaggregiertes Energieversorgungssystem		Übergeordnetes Energiever- sorgungssystem	Umwelt	<ul style="list-style-type: none"> • zeitlich lokal • zeitlich global
Prozesse („Blackbox“)	Verknüpfung der Prozesse			
<ul style="list-style-type: none"> • Bedarf • Umwandlung • Speicher • Vernetzung • Import-Export • Kollektor 	<ul style="list-style-type: none"> • Rein-elektrisches Energieversorgungs- system • Nicht-elektrisches Energieversorgungs- system 			

Abbildung A.1: Übersicht über die Modellstruktur des dynamischen Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungsmodells *deeco*.

Anhang B

Überblick über Energieoptimierungsmodelle (Stand der Forschung)

B.1 Optimierung nationaler Energiesysteme

Bei den überwiegend zur Optimierung nationaler Energiesysteme eingesetzten Modellen (MARKAL [Fis83, Fis81], MARNES [Wal88], EFOM [Voo84], MESSAGE [Mes84], etc.)¹ handelt es sich um räumlich und zeitlich hochaggregierte, intertemporale Energieoptimierungsmodelle. Ihre Aufgabe ist es, ausgehend vom prognostizierten Verlauf des Endenergiebedarfs (bzw. der Nachfrage nach Energiedienstleistungen) eines i.allg. relativ großen (z.B. nationalen) Energieversorgungssystems, einen Entwicklungspfad aufzuzeigen, der in einem Zeitraum, der mehrere Jahrzehnte umfassen kann, zu optimalen Werten der betrachteten Zielfunktionen führt. Als Zielfunktionen dienen in diesen linearen Optimierungsmodellen i.allg. die diskontierten Kosten bzw. die Einsatzmengen bestimmter Energieträger. Ein möglicher Entwicklungspfad wird charakterisiert durch die Angabe der Anteile der verschiedenen Energieumwandlungstechniken an der Versorgung innerhalb eines Jahres und die jährlichen Zubauraten für neue Energieversorgungstechniken. Teilweise ist es möglich, Obergrenzen für die jährlichen Zubauraten bzw. für bestimmte Emissionen vorzugeben. Die Abbildung von jährlichen, wöchentlichen und täglichen Bedarfsschwankungen erfolgt in diesen Modellen i.allg. nur sehr grob. Meist wird das Jahr in wenige Abschnitte (z.B. Sommer und Winter) sowie der Tag in Grund- und Spitzenlastbereiche eingeteilt. Die Vernachlässigung von Bedarfsschwankungen ist gerechtfertigt, wenn die zugelassenen Energieversorgungstechniken jederzeit verfügbar und ihr Einsatz abgesehen von ihrer Kapazität nicht beschränkt ist, wie dies z.B. für Kraftwerke und Heizkessel der Fall ist. Dies gilt aber nicht für viele Techniken der rationellen Energieverwendung und der Nutzung regenerativer Energiequellen. Sollen Konkurrenzeffekte zwischen diesen Techniken untersucht werden, so ist die Berücksichtigung der Bedarfsschwankungen in hoher zeitlicher Auflösung notwendig. Gemäß [Hen94] sind die Modelle MARKAL, EFOM und MESSAGE nicht für die detaillierte Planung kommunaler Energieversorgungssysteme geeignet, was jedoch den Einsatz dieser Modelle im kommunalen Bereich, vor allem zur Untersuchung langfristiger Entwicklungen, nicht vollständig ausschließt [Hen94, IEA95]. Dasselbe gilt für MARNES [Wal88]. Als Reaktion auf den Beschluß der Bundesregierung die CO₂-Emissionen bis 2005 (bezogen auf 1987) um 25% zu reduzieren, wurde das sog. IKARUS-Projekt ins Leben gerufen, das dazu dienen soll, (na-

¹MARKAL=**Market Allocation Model**, MARNES=**Market Allocation including Novel Energy Systems**, EFOM=**Energy Flow Optimization Model**, MESSAGE=**Model for Energy Supply Systems Analysis and Their General Environmental Impact**.

tionale) Strategien zur Reduktion der Treibhausgase zu entwerfen und nach Kostenkriterien zu optimieren [Ste93, Ger94]. Das IKARUS-Instrumentarium besteht im wesentlichen aus einer Datenbank, einem technikorientierten gesamtenenergiwirtschaftlichen Energiemodell in linearer Programmierung sowie Teilmodellen zur Untersuchung bereichsspezifischer Fragestellungen. Die Eingangsdaten des Optimierungsmodells sind Daten hochaggregierter Mischtechniken; die Ergebnisse haben dementsprechend einen hohen Aggregationsgrad. Die Optimierung erfolgt hinsichtlich Kosten unter Emissionsvorgaben. Die Anteile der Energietechniken an der Bedarfsdeckung und der Energieträgermix bilden die variablen Größen des Optimierungsproblems. Das Modell arbeitet quasi-statisch mit den Stützjahren 1989, 2005 und 2020. Wegen der relativ groben Abbildung des Energiesystems im Optimierungsmodell existieren für einzelne Bereiche (Strom/Fernwärme, Raumwärme, Industrie, Verkehr, Querschnittstechnologien zur Energieumwandlung) detailliertere Teilmodelle in hoher Daten- und Zeitauflösung, die in der Lage sind, auch Nichtlinearitäten zu berücksichtigen. Die Teilmodelle arbeiten im Simulationsmodus; ihre Ergebnisse können als Eingangsdaten für das Optimierungsmodell verwendet werden [Ger94]. Die zumindest derzeit fehlende Gesamtvernetzung dieser Teilmodelle erschwert sowohl die Untersuchung von Konkurrenzeffekten als auch die Verwendung des IKARUS-Instrumentariums zur Optimierung kommunaler und regionaler Energiesysteme.

B.2 Optimierung regionaler und kommunaler Energiesysteme

Im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft Solar des Landes Nordrhein-Westfalen wird derzeit am Lehrstuhl für Nukleare und Neue Energiesysteme der Ruhr-Universität Bochum das wissenschaftsbasierte Expertensystem HERAKLES entwickelt, das Handlungsempfehlungen für den Einsatz regenerativer Energieträger und rationeller Energieanwendungen auf kommunaler Ebene geben soll [Ger95, Ger96]. Aufbauend auf meteorologischen Daten sowie auf amtlichen Daten der statistischen Landesämter informiert HERAKLES dazu gemeindescharf über die Potentiale regenerativer Energieträger sowie über Energiebedarfsstrukturen verschiedener Wirtschaftssektoren. Darüber hinaus ermöglicht HERAKLES unter Verwendung eines heuristischen Lösungsverfahrens (d.h. ohne Anwendung herkömmlicher Optimierungsverfahren) die Bestimmung von (weitgehend) optimalen Strategien zur Integration regenerativer Energieträger sowie rationeller Energieanwendungen in kommunale Energieversorgungssysteme. Zur Bewertung dieser Strategien können neben den Kriterien der Wirtschaftlichkeit und Emissionsminderung auch Flächen- und Ressourcenverbräuche sowie Akzeptanzgesichtspunkte herangezogen werden. HERAKLES erlaubt die Untersuchung von Konkurrenzeffekten zwischen verschiedenen Techniken zur Nutzung regenerativer Energiequellen, die durch Flächen- oder Ressourcenrestriktionen bedingt sind, s.a. [Moh95]. Lange bevor diese Restriktionen wirksam werden, treten aber bereits Konkurrenzeffekte zwischen Techniken der rationellen Energieverwendung und der Nutzung regenerativer Energiequellen in Erscheinung, die durch die zeitliche Verfügbarkeit dieser Energiequellen bzw. durch den Einfluß der Maßnahmen zur rationellen Energieverwendung auf die zeitliche Struktur des (verbleibenden) Energiebedarfs verursacht werden. Diese Art von Konkurrenzeffekten lassen sich aufgrund des herangezogenen heuristischen Lösungsverfahrens nicht mit dem beim Einsatz von *deeco* erreichbaren Genauigkeitsgrad analysieren. Insgesamt gesehen erlaubt *deeco* im Vergleich zu HERAKLES eine detailliertere Abbildung des konkret zu untersuchenden Energiesystems und deshalb genauere Aussagen über die vor Ort realisierbaren Emissionsminderungs- bzw. Primärenergieeinsparpotentiale und die dazu erforderlichen Technikkombinationen.

Bei der räumlich und zeitlich hochaufgelösten stochastischen Optimierung regionaler Energiesysteme mit Hilfe des Energie-, Kosten- und CO₂-Optimierungsmodells ECCO [Gro91, Gro92, Bru93, Bru94, Kue95] werden neben konventionellen Techniken der Energieversorgung Wärmetauschernetzwerke zur Nutzung industrieller Abwärme sowie der Einsatz von Kraft-Wärme-

Kopplungs- und Wärmepumpenanlagen (zur Entnahme von Wärme aus dem Erdreich sowie zur Aufwertung von Abwärmeströmen) berücksichtigt. Die durch diese Techniken erzielbaren Primärenergie- und Emissionsminderungspotentiale sind abhängig von den Bedarfsschwankungen innerhalb eines Jahres, denen in ECCO mit den Methoden der stochastischen Optimierung Rechnung getragen wird. Abwärme aus Industrieprozessen kann - abgesehen von der Möglichkeit der Wärmespeicherung - nur genutzt werden, wenn sie zeitgleich mit dem Wärmebedarf des Bedarfsprozesses auftritt, den sie versorgen soll. Kraft-Wärme-Kopplung kann nur dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn gleichzeitig Bedarf an Wärme und elektrischer Energie besteht. Zur hohen zeitlichen Auflösung (es werden Einstundenmittelwerte betrachtet) tritt eine Disaggregation der Bedarfsprozesse hinzu: Im Modell ECCO wird (im Prinzip) jeder Bedarfsprozeß getrennt betrachtet. Der damit verbundene Anstieg der Datenmenge und der Rechenzeit verlangt es, sich auf lokale bzw. regionale Energieversorgungssysteme zu beschränken. ECCO ist vom Aggregationsgrad her vergleichbar mit *deeco*, ermöglicht aber nicht die Bildung beliebiger langer Energieprozeßketten. Auch der Einfluß zeitlich fluktuierender intensiver Größen auf die Wirkungsgrade der Energietechniken läßt sich nicht berücksichtigen. ECCO erlaubt weder den Einsatz von Energiespeichern noch von Techniken der thermischen Nutzung der Solarenergie. Zur Untersuchung von Konkurrenzeffekten zwischen Techniken der rationellen Energieverwendung und der thermischen Nutzung der Solarenergie ist es deshalb nicht geeignet.

Ein weiteres regionales Energieoptimierungsmodell wurde von H. Fendt [Fen79] vorgeschlagen und für die Stadtregion von München erprobt. Dieses Modell legt neben der Betrachtung des Endenergieverbrauchs und der Endenergieversorgung besonderes Gewicht auf die Untersuchung lokaler Immissionsverhältnisse. Bedarfsschwankungen werden jedoch nur stark vereinfacht abgebildet.

D. Henning [Hen94] beschreibt ein regionales Energieoptimierungsmodell, das neben konventionellen Techniken auch die Berücksichtigung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Energiespeichern und Windenergieanlagen erlaubt. Die Wichtigkeit, die saisonalen, wöchentlichen und täglichen Zeitabhängigkeiten der Systemkomponenten zu beachten, wird von Henning betont. Alle Bedarfsdaten werden auf typische Bedarfssituationen aufgeteilt, die durch die Angabe einer langen (z.B. Monate November-März) und einer kurzen Zeitperiode (z.B. Werktag-Spitzenbedarfsstunde) charakterisiert werden. Die dadurch erreichte Aggregation ermöglicht eine gemeinsame Optimierung der variablen und fixen Kosten, die eine Alternative zur sog. interaktiven Kostenoptimierung der Modelle ECCO und *deeco* darstellt, bei der die variablen Kosten exakt optimiert und die Gesamtkosten durch interaktives Eingreifen in den Satz der zugelassenen Techniken minimiert werden können. Diese Aggregation führt jedoch zu einem Verlust der zeitlichen Abfolge der typischen Bedarfssituationen, so daß die Modellierung der Energiespeicher naturgemäß nur vereinfacht erfolgen kann. Insbesondere ist mit Hilfe dieses Modells, das auf der sog. MODEST² Methode [Bac88] beruht, die Untersuchung der thermischen Nutzung der Solarenergie nicht möglich.

B.3 Simulation und Optimierung energietechnischer Anlagen; Kraftwerkseinsatzoptimierung

Bei den meisten Optimierungsmodellen für Energieversorgungssysteme, die eine Vielzahl alternativer Versorgungstechniken zulassen, wird die Abhängigkeit der Wirkungsgrade der im Modell zugelassenen Versorgungstechniken von zeitlich fluktuierenden intensiven Größen (z.B. Außentemperatur, Temperaturen in Wärmespeichern, etc.) nicht explizit berücksichtigt, was daran liegen mag, daß diese Abhängigkeiten i.allg. nichtlinear sind. Bei der Simulation und Optimierung

²Method for **O**ptimisation of **D**ynamic **E**nergy **S**ystems with **T**ime **D**ependent **C**omponents and **B**oundary **C**onditions.

von Einzelanlagen, sei es in der Projektierungsphase oder in Form von Einsatzoptimierungsmodellen, ist die Berücksichtigung der intensiven Größen dagegen üblich. Beispiele dafür sind das Solaranlagen Simulationsmodell TRNSYS [UOW76] und Optimierungsmodelle aus dem Bereich der Thermoökonomie³ [Tsa94]. Die bei Optimierungsverfahren auftretenden Schwierigkeiten durch Nichtlinearitäten sind, solange die Zahl der Optimierungsvariablen klein ist, beherrschbar. Dubois verwendet z.B. in seinem Modell zur „Optimalen Tageseinsatzplanung von Kraft-Wärme-Kopplungssystemen unter Berücksichtigung von Kurzzeitwärmespeichern“ [Dub86] die Methode der gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung zur stückweisen Linearisierung von nichtlinearen Kennlinien. Er führt zwar keine (abgesehen von einer Parametervariation) automatisierte Optimierung der in seinem Modell auftretenden intensiven Größen (z.B. Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz, Speicherbetriebstemperatur) durch, betont aber die Notwendigkeit, den Einfluß der intensiven Größen auf die Wirkungsgrade der Produktion von Wärme und elektrischer Energie zu berücksichtigen.

J.A. Miedema [Mie81] beschreibt verschiedene Modelle zur Berechnung der Energieeinsparung durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen). Das Programm CYCLE dient zur statischen Berechnung von thermodynamischen Kreisprozessen, um damit den Brennstoffeinsatz in KWK-Anlagen bei variablen Lastzuständen hinsichtlich der Abgabe von Wärme und elektrischer Energie sowie veränderlichen äußeren Randbedingungen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Darüber hinaus erlaubt dieses Programm die Optimierung einzelner KWK-Anlagen. Die Modelle SAVE, VREK und OPINE gestatten die Berechnung des Energieeinsatzes in Energiesystemen mit unterschiedlichen Energieversorgungstechniken (jedoch ohne Energiespeicher) und zeitlich fluktuierendem Bedarf an Wärme und elektrischer Energie sowie variablen Außen- und Wärmebedarfstemperaturen. Die einzelnen Energieversorgungstechniken werden dabei durch last- und temperaturabhängige Kennlinien beschrieben, die sich mit CYCLE berechnen lassen. SAVE dient zur Untersuchung (großer) Fernwärmesysteme, VREK analysiert (kleine) Nahwärmesysteme. Das Modell SAVE nimmt an, daß die mit der nachgefragten Wärme simultan produzierte elektrische Energie die Stromproduktion in konventionellen Kraftwerken ersetzt und keinerlei Restriktionen hinsichtlich der Abgabe von elektrischer Energie ins öffentliche Netz vorhanden sind. Somit ist die Verwendung einer Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs zur Beschreibung der Energienachfrage ausreichend. VREK berücksichtigt darüber hinaus die jährlichen und täglichen Fluktuationen des Bedarfs an Wärme und elektrischer Energie. OPINE kombiniert die KWK-Anlagen des Fernwärmesystems mit konventionellen Kraftwerken und ermöglicht damit die Untersuchung des Einflusses der Kraft-Wärme-Kopplung auf die lastabhängige Stromproduktion dieser Kraftwerke. Die Optimierung erfolgt in SAVE und VREK durch einfachen Vergleich endlich vieler, vorgegebener Betriebszustände; OPINE verwendet zur Bestimmung der optimalen Lastverteilung Methoden der quadratischen und dynamischen Programmierung. Während das Modell CYCLE ein sehr allgemeines und flexibles Modell zur last- und temperaturabhängigen Analyse unterschiedlicher energietechnischer Anlagen darstellt, ist SAVE auf Systeme mit maximal 2 KWK-Anlagen und VREK auf solche mit kleinen KWK-Anlagen, Wärmepumpen und Heißwasserboiler beschränkt. OPINE läßt sich auf Systeme mit Gasturbinen, Gegendruck- und Entnahmekondensations- sowie Gas- und Dampfturbinen anwenden. Der Einsatz von Techniken der thermischen Nutzung der Solarenergie wird in diesen Modellen - ebenso wie im Modell PROFAKO [Han92] - nicht betrachtet.

J. Entress [Ent96] beschreibt ein Modell zur Optimierung von Nahwärmesystemen, die Wärme aus Solar- und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen bereitstellen. Die Untersuchung der Systeme

³Unter Thermoökonomie wird die Verknüpfung von Thermodynamik und Ökonomie, insbesondere in Form der gleichzeitigen Optimierung thermodynamischer und ökonomischer Größen (z.B. Minimierung der Exergieverluste und der Investitionskosten von Wärmetauschernetzwerken), verstanden. Eine wesentliche Forderung der Thermoökonomie besteht darin, Energieträger (z.B. Dämpfe) entsprechend ihrem Exergiegehalt und nicht nach der in ihnen enthaltenen Energiemenge zu bewerten [Ken84].

erfolgt durch mehrmalige Simulation der Einzelkomponenten mit TRNSYS [UOW76] unter Einbeziehung intensiver Größen. Eine nachfolgende Analyse der Simulationsergebnisse erlaubt im Rahmen einer ökonomischen Optimierung die Identifizierung von Systemkonfigurationen, die bei vorgegebenen CO₂-Einsparungen zu minimalen Kosten führen. Der Anwendungsbereich des Modells ist weitgehend auf die hier angesprochene Systemkonfiguration beschränkt.

Anhang C

Bestimmung von Nettoenthalpie- und Abwärmeströmen

Nettoenthalpieströme lassen sich im für die Energieversorgung relevanten Zustandsbereich wie folgt charakterisieren:

- Angabe des verwendeten Wärmetransportmittels und seiner Zusammensetzung an der Systemgrenze des betrachteten Prozesses. Als Wärmetransportmittel sind in *deeco* bisher nur Wasser (flüssig), Wasserdampf, Luft oder ein Verbrennungsgas der folgenden Brennstoffe zugelassen: Fettkohle, Flammkohle, Braunkohle, Benzin, Gasöl, Erdgas L und Erdgas H. Der Grund für die Auswahl dieser Brennstoffe liegt in der Kenntnis der thermodynamischen Stoffdaten ihrer Verbrennungsgase¹ [Bae89], S.427ff. Wird Wasserdampf verwendet, so ist die Angabe des Dampfgehalts x (definiert als Verhältnis der Masse des gesättigten Dampfes (gasförmiges H_2O) zur Masse des nassen Dampfes (gasförmiges H_2O und siedendes H_2O [Bae89], S.171) an der Stelle, an der der Massenstrom in den Prozeß ein- bzw. aus diesem austritt, erforderlich. Bei feuchter Luft und bei Verbrennungsgasen, die Wasserdampf aufnehmen, ist die Angabe der Wasserbeladung x ([Bae89], S.215) an den entsprechenden Stellen notwendig. Die Wasserbeladung wird definiert als Verhältnis der Masse des Wassers zur Masse der trockenen Luft bzw. zur Masse des Verbrennungsgases (Zusammensetzung gemäß [Bae89], S.299). Bei der Masse des Wassers handelt es sich um die Gesamtmasse, die sowohl den gasförmigen als auch den flüssigen Wasseranteil (z.B. in Form von Nebel) berücksichtigt. Da es sich bei den betrachteten Wärmetransportmitteln entweder um Wasser (bzw. Wasserdampf) oder um Luft bzw. ein Verbrennungsgas handelt, kann bei der Angabe des Dampfgehaltes und der Wasserbeladung das in der Literatur übliche gleichlautende Symbol x verwendet werden. Je nachdem, ob es sich beim Wärmetransportmittel um Wasser oder Luft (bzw. Verbrennungsgas) handelt, nimmt x die entsprechende Bedeutung an. Bei den hier zugelassenen Wärmetransportmitteln ist es möglich, spezifische Enthalpien einzuführen, die sich auf eine Masseneinheit Wasser (falls Wasser oder Wasserdampf als Wärmetransportmittel verwendet werden) oder eine Masseneinheit trockene Luft bzw. auf eine Masseneinheit Verbrennungsgas (mit einer Zusammensetzung gemäß [Bae89], S.299) beziehen².
- Angabe des Massenstromes \dot{m} (ohne Berücksichtigung der Masse einer eventuellen Wasserbeladung der feuchten Luft bzw. der Verbrennungsgase).

¹Bei der Verwendung der hier zugelassenen Verbrennungsgase ist darauf zu achten, daß die Zusammensetzung der dazugehörigen Brennstoffe mit der in [Bae89], S.299 angegebenen übereinstimmt. In Ausnahmefällen ist es auch möglich, noch weitere Wärmetransportmittel zu berücksichtigen, falls ihre thermodynamischen Stoffdaten vorliegen.

²Bei feuchter Luft kennzeichnet man solche Enthalpien mit dem Symbol h_{1+x} .

- Angabe der intensiven Größen, die zur Berechnung der spezifischen Enthalpien $h_F := h(T_F, p_F, x_F)$ im Vorlauf (Flow) und $h_R := h(T_R, p_R, x_R)$ im Rücklauf (Return) notwendig sind:
Temperaturen T_F und T_R in [K], Drücke p_F und p_R in [Pa], sowie evtl. x_F und x_R .
- Angabe der Quantität \dot{E}_H .

$$\dot{E}_H = \dot{m}(h_F - h_R). \quad (\text{C.1})$$

Die intensiven Größen, die einem Nettoenthalpiestrom zugeordnet sind, d.h. seine Attribute (s. Def. 13), lassen sich somit wie folgt angeben:

Vektor der intensiven Größen im Vorlauf eines Nettoenthalpiestromes:

$$\boldsymbol{\mathcal{X}}_F := (T_F, p_F, x_F)^\dagger, \quad (\text{C.2})$$

Vektor der intensiven Größen im Rücklauf eines Nettoenthalpiestromes:

$$\boldsymbol{\mathcal{X}}_R := (T_R, p_R, x_R)^\dagger, \quad (\text{C.3})$$

Vektor der intensiven Größen (Attribute) eines Nettoenthalpiestromes:

$$\boldsymbol{\mathcal{J}} := (\boldsymbol{\mathcal{X}}_F, \boldsymbol{\mathcal{X}}_R)^\dagger. \quad (\text{C.4})$$

Nettoenthalpieströme, die die Grenze eines zu einem Prozeß gehörenden Systems überschreiten, können dem System Energie zuführen, wenn der Nettoenthalpiestrom in das System eintritt³ oder Energie abführen, wenn er austritt. Sie können somit sowohl zum „Heizen“ als auch zur Abfuhr von Wärme verwendet werden, die entweder bewußt erzeugt wird (z.B. in Heizkesseln) oder als Nebenprodukt (Abwärme) anfällt. Da die Rückgewinnung und Nutzung von Abwärme eine wesentliche Rolle bei der Optimierung von Energiesystemen spielen kann (s. z.B. [Gro91]), soll hier auf den in der Literatur nicht eindeutig definierten Begriff *Abwärme* näher eingegangen werden.

Begriffsabgrenzung:

„Abwärme ist die Differenz zwischen Wärme und Nutzwärme, die sich aufteilt in Abgas-, Abdampf-, Abwasser- und Abluftwärme sowie sonstige aus dem Wärmeanwendungsprozeß anfallende Wärme (z.B. Strahlungs- und Wandverluste)“ [Bat92]. Unklar an dieser Definition ist, was unter „Wärme“ verstanden wird. Wird der Begriff „Wärme“ als Synonym für den Heizwert der Brennstoffe verwendet, so läßt sich die (so definierte) Abwärme i.allg. leicht aus Energiebilanzen berechnen. Ebersbach weist aber daraufhin, daß nicht die gesamte anfallende Abwärme interessiert, sondern nur die „gefaßte“, d.h. die an Wärmetransportmittelströme gebundene Abwärme; „... die diffus abgegebene Wärme [muß] bei der Potentialermittlung eliminiert werden“ [Ebe86], S.23. Da die diffus abgegebene Wärme schlecht zu berechnen ist, kommt man i.allg. nicht umhin, Abwärmeströme direkt zu messen. Abwärme ist nur nutzbar, wenn sie an Wärmetransportmittelströme gebunden werden kann, d.h. es ist notwendig, vor Ort die wesentlichen Abwärmequellen der Prozesse zu identifizieren und Möglichkeiten (z.B. Wärmeaustauscher) zu schaffen, die einen Abtransport der Abwärme mit Hilfe von Wärmetransportmittelströmen erlauben. Notwendige Technologien zur Wärmeabgabe an das Wärmetransportmittel sollen dabei (im Rahmen des prozeßtechnisch Möglichen) so gewählt werden, daß der Exergiegehalt des nutzbaren Abwärmestromes maximal wird. Da die „Art des Mediums, seine Stoffeigenschaften sowie seine thermodynamischen Zustandsgrößen (...) wesentliche Kriterien für die Nutzbarkeit, aber auch für die Transportwürdigkeit“ sind ([Ebe86], S.24), wird die nutzbare Abwärme durch die vollständige Angabe aller Größen, die einen Nettoenthalpiestrom (s.o.) kennzeichnen, charakterisiert.

³Es sei daran erinnert, daß Nettoenthalpieströme stets positiv gewählt werden.

Anhang D

Beschreibung weiterer energietechnischer Prozesse

Im Abschnitt 2.3 wird die konkrete Modellierung energietechnischer Prozesse anhand von ausgewählten Beispielprozessen detailliert diskutiert. Für die dort nicht angesprochenen, aber in der Modellanwendung (s. Kapitel 3) untersuchten Energietechniken sollen im folgenden die wesentlichen Gesichtspunkte erläutert werden, die bei der Modellierung dieser Prozesse im Rahmen des Modells *deeco* von Bedeutung sind. Die dazugehörigen Input-Output-Relationen sind im Quellcode des Programms *deeco* sowie in [Bru96] dokumentiert.

Ziel dieser Ausführungen ist es nicht, einen vollständigen Überblick über die Modellierung dieser Techniken zu geben, sondern aufzuzeigen, wie im konkreten Fall die vielfach angesprochene Abhängigkeit der Wirkungsgrade bzw. der Einsatzgrenzen der Techniken von den auftretenden Attributen¹ zustandekommt. Die Modellierung der im Kap. 3 betrachteten Kollektor-, Speicher- und Import-Export-Prozesse ist in den Abschnitten 2.3.3, 2.3.4 und 2.3.5 detailliert beschrieben. Auf eine weitergehende Diskussion dieser Prozesse kann deshalb im folgenden verzichtet werden. Die Wiedergabe der bei der Modellanwendung in Kap. 3 zugrundegelegten Wetterdaten bildet den Abschluß dieses Anhangs.

D.1 Bedarfsprozesse

Bei den in Kap. 3 zugrundegelegten Bedarfsprozessen handelt es sich entweder um Raumwärmebedarfsprozesse oder um Bedarfsprozesse, die industrielle Prozeßwärme bzw. elektrische Energie nachfragen. Die Stundenmittelwerte der nachgefragten Energiemengen (pro Zeiteinheit) werden in allen Fällen aus digitalisierten Datenfiles eingelesen (s.a. Abb. 3.1). Die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen der Raumwärmebedarfsprozesse werden gemäß Gl. 2.26 u. 2.28 dynamisch bestimmt. Die dem industriellen Prozeßwärmebedarf bzw. dem industriellen Abwärmeangebot zugeordneten Vor- und Rücklauftemperaturen sind innerhalb der Zeiträume, in denen der Wärmebedarf bzw. das Abwärmeangebot auftritt, konstant.

D.2 Umwandlungsprozesse

Neben den bereits in Abschnitt 2.3.2 detailliert dargestellten Gegendruckturbinen werden in Kap. 3 (konventionelle) Öl- bzw. Gaskessel, Gasbrennwertkessel, Außenluft-Elektro- bzw. Gas-

¹Wie bereits erläutert, handelt es sich bei diesen Attributen um die intensiven Größen, die den beteiligten Nettoenthalpieströmen zugeordnet sind (z.B. Vor- und Rücklauftemperaturen).

wärmepumpen, Klein- und Blockheizkraftwerke sowie Entnahmekondensationsturbinen betrachtet, deren Modellierung im folgenden beschrieben werden soll:

D.2.1 Konventionelle Öl- bzw. Gaskessel (inkl. Gasspitzenkessel)

Die Umwandlung von chemischer Energie in Wärme in konventionellen Öl- bzw. Gaskesseln² ist mit Wärmeerzeugungsverlusten verbunden, die sich in sog. Verbrennungsverluste und Restverluste aufteilen lassen. Die Verbrennungsverluste umfassen dabei den Verlust der in den Abgasen enthaltenen Wärme (Abgasverlust) sowie den Verlust durch unverbrannte Gase oder Feststoffe. Die Restverluste setzen sich aus der Wärmeabgabe des Kessels an den ihn umgebenden Raum (sog. Strahlungsverlust) und dem sog. inneren Auskühlverlust zusammen. Bei letzterem handelt es sich um die Wärmeabgabe an die in Stillstandszeiten durch den Kessel (infolge von Kaminzug und Brennerundichtigkeit) strömende Luft. Der Verlust durch unverbrannte Gase oder Feststoffe ist im Vergleich zu den anderen Verlustarten vernachlässigbar [End87], S. 174. Gemäß 1. BImSchV³ vom 15.7.88 werden die Abgasverluste wie folgt ermittelt (s. z.B. [Sch95], S.649):

$$\dot{E}_{H,WG} = \dot{E}_{Fuel,En} \cdot \frac{1}{100} \cdot (T_{WG} - T_{Env}) \cdot \left(\frac{A_1}{c_{CO_2}} + B \right). \quad (D.1)$$

Dabei ist $\dot{E}_{H,WG}$ der Abgasverlust, $\dot{E}_{Fuel,En}$ die zugeführte chemische Energie (pro Zeiteinheit), T_{WG} die Abgastemperatur, T_{Env} die Temperatur der Kesselumgebung (bzw. Temperatur der angesaugten Luft) und c_{CO_2} der Kohlendioxidgehalt der Abgase in Vol.-%. Die empirischen Beiwerte A_1 und B sind brennstoffabhängig und in der 1.BImSchV vom 15.7.88 wiedergegeben. Gemäß Gl. D.1, die eine genauere Berechnung des Abgasverlustes erlaubt, als die bekannte Siegert'sche Formel (s. z.B. [Hol83]), nimmt der Abgasverlust mit steigendem CO₂-Gehalt (d.h. sinkendem Luftüberschuß) des Abgases ab. Jeder technisch nicht notwendige Luftüberschuß bedeutet eine zusätzliche Erwärmung von Ballast (z.B. des Stickstoffanteils der Luft), reduziert die Temperatur der Flamme und damit die Wärmeabgabe an das Wärmetransportmittel. Wenn der Brenner über eine Ein/Aus-Steuerung bzw. eine funktionsfähige Steuerung der Luftzufuhr verfügt, so ist der CO₂-Gehalt des Abgases konstant [Loo89], d.h. lastunabhängig. Bei gegebener Brennstoffzufuhr, gegebener Luftansaugtemperatur und konstanten Parametern A_1 und B ist der Abgasverlust des Kessels dann allein abhängig von der Abgastemperatur. Da das Abgas die in ihm enthaltene Wärme an die als Wärmeaustauscherflächen fungierenden inneren Kesselwände abgibt, liegt die Temperatur des Abgases beim Verlassen des Kessels um so niedriger, je niedriger die Temperatur dieser Wände bzw. die Mitteltemperatur des sie kühlenden Wärmetransportmittels (=Kesselwassertemperatur) ist. Zeitlich variierende Vor- und Rücklauftemperaturen des Nettoenthalpiestromes, der den Kessel verläßt, gehen somit mit Veränderungen der Kesselwassertemperatur einher und bewirken nach dem bisher Gesagten variable und temperaturabhängige Kesselwirkungsgrade. Verstärkt wird diese Temperaturabhängigkeit zusätzlich durch die Strahlungsverluste, die von der Wärmeabgabe der (kessel-) wasserführenden äußeren Oberflächen des Kessels dominiert werden und ebenso wie der innere Auskühlverlust von der mittleren Kesselwassertemperatur beeinflusst werden.

D.2.2 Gasbrennwertkessel

Sinkt die Abgastemperatur eines Gaskessels unter den Taupunkt, der bei Erdgas bei rund 58°C ([Sch95], S.622) liegt, so beginnt der in den Abgasen enthaltene Wasserdampf zu kondensieren.

²Darunter werden im folgenden Kessel ohne Brennwertnutzung verstanden.

³Bundes-Immissionsschutz-Verordnung.

Bei herkömmlichen Gaskesseln führt dies aufgrund des durch Verunreinigungen leicht saueren Kondensates zu Korrosionsproblemen, die es zu vermeiden gilt. Bei den im Vergleich zu konventionellen Kesseln materialtechnisch hochwertigeren und gegen Kondensatanfall unempfindlichen Brennwertkesseln ist dieser Effekt jedoch erwünscht, da mit der Wasserdampfkondensation auch Kondensationswärme frei wird, die vom Wärmetransportmittel aufgenommen werden kann. Theoretisch beträgt der dadurch erzielbare Energiegewinn 11% ([Sch95], S.622), so daß sich unter diesen Umständen (auf den unteren Heizwert bezogene) Wirkungsgrade von über 100% realisieren lassen.⁴ Der tatsächlich realisierbare Energiegewinn hängt entscheidend davon ab, wie weit das Abgas unter den Taupunkt abgekühlt wird. Je tiefer die Abgastemperatur liegt, desto größer ist bei vorgegebener Brennstoffzufuhr der Kondensatanfall und damit die durch Kondensation gewinnbare Wärme [Sch93]. Da die Abgastemperatur immer einige Grad über der Rücklauftemperatur des Wärmetransportmittels liegt, das zur Kühlung der Abgase (meist im Gegenstromprinzip) verwendet wird, ist somit auch bei Brennwertkesseln der Wirkungsgrad eine Funktion der Rücklauftemperatur. Während oberhalb des Taupunktes Gl. D.1 anwendbar bleibt, verliert sie darunter ihre Gültigkeit. Quantitative Aussagen für diesen Bereich insbesondere zum Wirkungsgradverlauf in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur finden sich bei [Boc92, Laz86, Ros86, End87, Vog96]. Beachtenswert ist, daß bei den heute üblichen Heizungssystemen mit gleitender Vor- und Rücklauftemperatur sowie einem Maximalwert der Vorlauftemperatur von 90 °C und maximaler Rücklauftemperatur von 70 °C Brennwertkessel somit nicht immer in der Lage sind, die Kondensationsenthalpie des in den Abgasen vorhandenen Wasserdampfes zu nutzen. Die Brennwertnutzung gelingt nur in Zeiten mit Rücklauftemperaturen unterhalb von etwa 55 °C. Diese Zeiten sind bei Raumheizungssystemen mit niedrigem Wärmebedarf bzw. relativ hohen Außentemperaturen verbunden. Werden somit Brennwertkessel als Backup-Techniken für Anlagen verwendet, die bevorzugt bei relativ hohen Außentemperaturen eingesetzt werden (z.B. thermische Solarkollektoren, Außenluft-Wärmepumpen), so wird die Einsatzzeit der Brennwertkessel in Bereiche verschoben, in denen ihre energetische Überlegenheit (z.B. im Vergleich zu modernen Niedertemperaturgaskesseln) teilweise bzw. fast vollständig verlorengehen kann.

D.2.3 Außenluft- und Erdreich-Elektrowärmepumpen

Die Modellierung von Außenluft- bzw. Erdreich-Elektrowärmepumpen erfolgt in ähnlicher Art und Weise wie die der Elektrowärmepumpen zur Wärmerückgewinnung (s. Abschnitt 2.3.6). Die zur Verdampfung des Kältemittels erforderliche Wärme wird jedoch jetzt nicht einem Abwärmestrom, sondern der Außenluft bzw. dem Erdreich entzogen. Für den Wärmeübergang im Verdampfer ist somit nicht mehr die Rücklauftemperatur des Abwärmestroms, sondern die Außenluft- bzw. Erdreichtemperatur von entscheidender Bedeutung. Bei tiefen Außentemperaturen tritt bei Außenluft-Wärmepumpen eine Vereisung des Außenluft-Kältemittel-Wärmeaustauschers (des sog. Anergiesammlers [Fri92]) auf, die den Wärmeübergang behindert und durch regelmäßiges Entfrosten durch kurzzeitiges Aufheizen des Wärmeaustauschers beseitigt werden kann. Der dafür erforderliche Energieeinsatz kann gemäß [Mie81] in guter Näherung durch einen einfachen Strafterm berücksichtigt werden, der bei Außentemperaturen unterhalb von 4 °C zu einer Verminderung des Wirkungsgrades der Wärmepumpe um 25% führt. Auf die Vorgabe einer bestimmten Außentemperatur, bei der die Wärmepumpe abgeschaltet werden muß, wird bei der Modellierung bewußt verzichtet. Das Optimierungsverfahren des Modells *deeco* ermittelt selbständig, zu welchen Zeitpunkten ein Einsatz der Wärmepumpe unter Beachtung der gewählten Zielfunktion (z.B. Primärenergieeinsatz, CO₂-Emissionen, etc.) sinnvoll ist. Es berücksichtigt dabei neben der Güte alternativ zugelassener Energieversorgungsoptionen (ebenfalls im Hinblick auf die gewählte

⁴Wirkungsgrade werden derzeit in Deutschland üblicherweise auf den unteren Heizwert bezogen, der einen möglichen Energiegewinn durch Wasserdampfkondensation im Gegensatz zum Brennwert nicht berücksichtigt.

Zielfunktion) auch vorgegebene Maximal- und Minimalwerte der Temperaturen im Verdampfer und Kondensator, die die Einsatzgrenzen des verwendeten Kältemittels widerspiegeln. Die hier beschriebene, stets optimale Einsatzweise bewirkt i.allg. höhere Arbeitszahlen, als sie üblicherweise bei vorhandenen, suboptimal gesteuerten Wärmepumpensystemen gemessen werden. Dies ist bei der Interpretation der in der Tabelle 3.2 angegebenen mittleren Wirkungsgrade ebenso zu berücksichtigen wie die Tatsache, daß diese höheren Arbeitszahlen aufgrund der strengerer Einsatzkriterien natürlich auch mit einer geringeren Betriebszeit der Wärmepumpe verbunden sind. Die hier dargestellte Art der Modellierung bietet den großen Vorteil, daß die Betriebsweise der Wärmepumpe stets an das Verhalten der jeweils zur Verfügung stehenden Energieversorgungsalternativen angepaßt ist. Eine starre Vorgabe der Betriebsweise (z.B. bivalent mit vorgegebener fester Abschalttemperatur) könnte dies nicht leisten.

D.2.4 Außenluft- und Erdreich-Gaswärmepumpen

Bei Gaswärmepumpen erfolgt die Bereitstellung der für den Verdichtungs Vorgang (vgl. dazu die Diskussion des Prinzips der Kaltdampf-Kompressionswärmepumpe in Abschnitt 2.3.6) erforderlichen mechanischen Energie durch einen gasbefeuerten Verbrennungsmotor. Die eigentliche Kompressionswärmepumpe (bestehend aus Verdichter, Verdampfer, Kondensator und Expansionsorgan) unterscheidet sich vom Grundprinzip her nicht vom entsprechenden Teil einer Elektrowärmepumpe. Beide Teile lassen sich deshalb weitgehend identisch modellieren. Während aber bei Elektrowärmepumpen die vom Elektromotor abgegebene Wellenleistung gut mit der von diesem aufgenommenen Klemmenleistung übereinstimmt⁵, weicht bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Wärmepumpen die Wellenleistung deutlich von der pro Zeiteinheit eingesetzten chemischen Energie ab, was in Anlehnung an [Ric82] mit Hilfe eines konstanten Motorwirkungsgrades beschrieben wird. Ein Teil der bei der Umwandlung von chemischer in mechanische Energie anfallenden Abwärme läßt sich (z.B. durch Motor- und Abgaskühlung) rückgewinnen. Er dient zum weiteren Aufheizen des Wärmetransportmittels, nachdem dieses bereits durch Wärmeaufnahme im Kondensator vorgeheizt wurde. Der Anteil der so rückgewinnbaren Wärme am Brennstoffeinsatz kann, ebenfalls in Anlehnung an [Ric82], in guter Näherung als konstant angenommen werden.

D.2.5 Block- und Kleinheizkraftwerke

Unter Block- und Kleinheizkraftwerken werden Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen verstanden, bei denen die Erzeugung elektrischer Energie auf der Basis von Verbrennungsmotoren erfolgt. Kleinheizkraftwerke dienen dabei zur dezentralen Wärmeversorgung einzelner Gebäude; Blockheizkraftwerke versorgen i.allg. mehrere Gebäude unter Heranziehung eines Nahwärmenetzes. Beide Techniken basieren auf dem gleichen Grundprinzip und werden deshalb in *deeco* identisch modelliert. Im Gegensatz zu Gegendruck- und Entnahmekondensations-Heizkraftwerken vermindert die Wärmenutzung (im wesentlichen realisiert durch Motor- und Abgaskühlung) den Wirkungsgrad der Erzeugung elektrischer Energie nur unbedeutend [Kor83]. Das Teillastverhalten der Anlagen ist sehr gut; die Produktion von elektrischer Energie und Wärme erfolgt in einem festen Verhältnis, d.h. mit fester Stromkennziffer. Die Modellierung der Block- und Kleinheizkraftwerke orientiert sich an der üblichen Bauweise, bei der die Wärmenutzung zugleich der erforderlichen Motorkühlung dient. Von den Motorherstellern werden in diesem Fall für das Kühlwasser gewisse Mindest- bzw. Höchsttemperaturen vorgegeben, die direkt als Schranken für den zulässigen Bereich der Rücklauftemperaturen des (zur Kühlung herangezogenen) Wärmetransportmittels

⁵Der geringe Unterschied kann leicht durch eine Modifikation des Zahlenwertes von η_G (s. Gl. 2.89) berücksichtigt werden.

angesehen werden können [Ley82]. Außerhalb dieses Bereichs führt der eingebaute Kühlwassertemperaturwächter zu einer Motorabschaltung; im zulässigen Temperaturbereich kann die Anlage in guter Näherung durch konstante, d.h. temperatur- und lastunabhängige Wirkungsgrade für die Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie sowie durch eine konstante Stromkennziffer beschrieben werden.

D.2.6 Entnahmekondensations-Heizkraftwerke

Im Gegensatz zur weitgehend starren Koppelproduktion von Wärme und elektrischer Energie bei Block-, Klein- und Gegendruck-Heizkraftwerken erlauben es Entnahmekondensations-Heizkraftwerke, beide Energieformen in gewissen Grenzen unabhängig voneinander zu erzeugen. Technologisch realisiert wird dies z.B. durch eine i.allg. unvollständige Dampfantnahme im Mittelteil einer (ansonsten weitgehend konventionellen) Dampfturbine zur Erzeugung elektrischer Energie, d.h. an einer Stelle, an der der Dampf noch nicht vollständig entspannt ist. Diese Stelle teilt die Turbine in einen sog. Hoch- (vor der Entnahmestelle) und einen Niederdruckteil (nach der Entnahmestelle) auf. Der entnommene Dampf dient zur Wärmeversorgung; der nicht entnommene Dampf wird nach Durchströmen des Niederdruckteils (z.B. durch Flußwasserkühlung oder in einem Kühlturm) kondensiert. Im wesentlichen entspricht der Hochdruckteil der Turbine einer Gegendruckturbine (s. Beispiel in Abschnitt 2.3.2) mit dem Unterschied, daß nur ein Teil des aus der Turbine austretenden Massenstroms zur Wärmeabgabe herangezogen wird. Der Niederdruckteil gleicht einer Turbine in einem konventionellen thermischen Kraftwerk. Die Modellierung der Entnahmekondensations-Heizkraftwerke erfordert die Angabe des Brennstoffeinsatzes $\dot{E}_{Fuel,En}$ in Abhängigkeit von der erzeugten Wärme $\dot{E}_{H,Ex}$ und elektrischen Energie $\dot{E}_{El,Ex}$ sowie die Wiedergabe der Grenzen, die einer beliebigen Variation von $\dot{E}_{H,Ex}$ und $\dot{E}_{El,Ex}$ gesetzt sind. Die entsprechenden thermodynamischen, strenggenommen nichtlinearen Zusammenhänge sind prinzipiell bekannt [Mie81, Dub86, Bub93] und lassen sich mit Hilfe sog. Kennlinienfelder graphisch darstellen (s. z.B. [Pil84]). Theoretische Überlegungen [Ale88] sowie Erfahrungen mit Computerprogrammen zur Simulation des transienten Verhaltens von Entnahmekondensations-Heizkraftwerken [Kro74, Thi85] zeigen auf, daß der Brennstoffeinsatz unter Berücksichtigung eines auslastungsunabhängigen Leerlaufbrennstoffeinsatzes in ausreichend guter Näherung als linearisierte Funktion der erzeugten Wärme und elektrischen Energie angesehen werden kann. Auch die Einsatzgrenzen (z.B. bedingt durch den sog. Gegendruckbetrieb oder durch die sog. maximale Schluckfähigkeit des Niederdruckteils) lassen sich mit Hilfe linearisierter Beziehungen zwischen $\dot{E}_{Fuel,En}$, $\dot{E}_{H,Ex}$ und $\dot{E}_{El,Ex}$ darstellen. Die formale Ähnlichkeit des Hochdruckteils der Turbine mit einer Gegendruckturbine läßt gemäß Abschnitt 2.3.2 eine Abhängigkeit des Wirkungsgrades des Heizkraftwerkes von der Vor- und Rücklauftemperatur des Wärmetransportmittels erwarten, die sich bei genauerer Betrachtung auch auf die Einsatzgrenzen überträgt [Mie81, Dub86, Bub93]. In *deeco* erfolgt die Modellierung der dadurch bedingten Temperaturabhängigkeiten der in den linearisierten Beziehungen auftretenden Koeffizienten in Anlehnung an [Dub86] in Form einer Taylorentwicklung um die Auslegungstemperaturen bis zur 1.Ordnung. Quantitative Werte dazu findet man in [Bub93].

D.3 Vernetzungsprozesse

D.3.1 Nettoenthalpietransport durch Fern- bzw. Nahwärmeleitungen

Der Nettoenthalpietransport durch Fern- bzw. Nahwärmeleitungen ist mit Verlusten verbunden, die im Modell *deeco* nicht durch pauschale mittlere Wirkungsgrade, sondern in Abhängigkeit von der i.allg. zeitlich variablen Differenz zwischen der Temperatur der Umgebung der Rohrleitung und der Vorlauf- bzw. Rücklauftemperatur des Wärmetransportmittels modelliert werden.

D.3.2 Nettoenthalpieanpassung durch Nachheizen bzw. Beimischen

In manchen Fällen kann ein energietechnischer Prozeß, den von ihm bereitgestellten Nettoenthalpiestrom nicht unverändert an einen wärmenachfragenden Prozeß abgeben, weil die Attribute des bereitgestellten Nettoenthalpiestromes, d.h. die ihm zugeordneten intensiven Größen, nicht mit denen des nachgefragten übereinstimmen. In diesen Fällen ist eine sog. Nettoenthalpieanpassung erforderlich, d.h. das Zwischenschalten eines weiteren Prozesses, der durch geeignete Vorkehrungen einen Angleich der intensiven Größen bewirkt. So ist z.B. in der diskutierten Modellanwendung (Kap. 3) bei der Wärmeentnahme aus solarthermisch beladenen Wärmespeichern immer dann ein Nachheizen des entnommenen Wärmetransportmittels erforderlich, wenn die Temperatur des Wärmespeichers die nachgefragte Vorlauftemperatur unterschreitet. *deeco* berücksichtigt auch in diesem Fall den Einfluß der Temperaturen der beteiligten Wärmetransportmittelströme auf die Wirkungsgrade der Prozesse (konventionelle Öl- bzw. Gaskessel, Gasbrennwertkessel, Elektro- bzw. Gaswärmepumpen), die zum Nachheizen herangezogen werden. So sinkt zum Beispiel gemäß den Überlegungen aus Abschnitt D.2.2 der Wirkungsgrad eines dazu verwendeten Gasbrennwertkessels mit steigender Temperatur des Wärmespeichers. Übersteigt dagegen die Temperatur im Wärmespeicher die nachgefragte Vorlauftemperatur, so kann der Wärmetransportmittelstrom durch Beimischen von Wärmetransportmittel aus dem Rücklauf des nachfragenden Prozesses abgekühlt werden. In anderen Fällen kann ein Anheben der Rücklauftemperatur (z.B. durch Beimischen von warmen Wärmetransportmittel aus dem Vorlauf) bzw. ein Absenken der Rücklauftemperatur⁶ (z.B. durch Verwendung einer Kühleinrichtung) erforderlich sein. Letzteres tritt z.B. dann auf, wenn es sich bei dem abgegebenen Nettoenthalpiestrom um einen Abwärmestrom handelt, der prozeßtechnisch abgeführt werden muß. Die Sicherstellung der geforderten Kühleigenschaften verlangt dabei i.allg. die Einhaltung einer bestimmten Rücklauftemperatur, was unter Umständen den Einsatz einer zusätzlichen Kühleinrichtung erfordert, die Abwärme an die Umgebung abgibt (sog. Waste Heat Dumping [Wit88], s.a. [Bru92], S. 52 u. [Hel94]). Daß aufgrund der Temperaturverhältnisse unter diesen Umständen auch in solchen Fällen nur ein Teil der primär zur Verfügung stehenden Abwärme genutzt werden kann, bei denen diese Abwärme mengenmäßig kleiner ist als die nachgefragte Nettoenthalpie, unterstreicht nochmals die Notwendigkeit, zeitlich variable intensive Größen, wie z.B. Bedarfs- und Abwärmemperaturen, mit in die Modellierung energietechnischer Prozesse einzubeziehen.

⁶Wird wie in der Anwendung des Modells auf Heidingsfeld die Quantität einer zur Verfügung stehenden Abwärme auf der Basis einer bestimmten Bezugstemperatur berechnet, so muß aus Konsistenzgründen die vom abwärmeliefernden Prozeß geforderte Rücklauftemperatur mit dieser Bezugstemperatur gleichgesetzt werden.

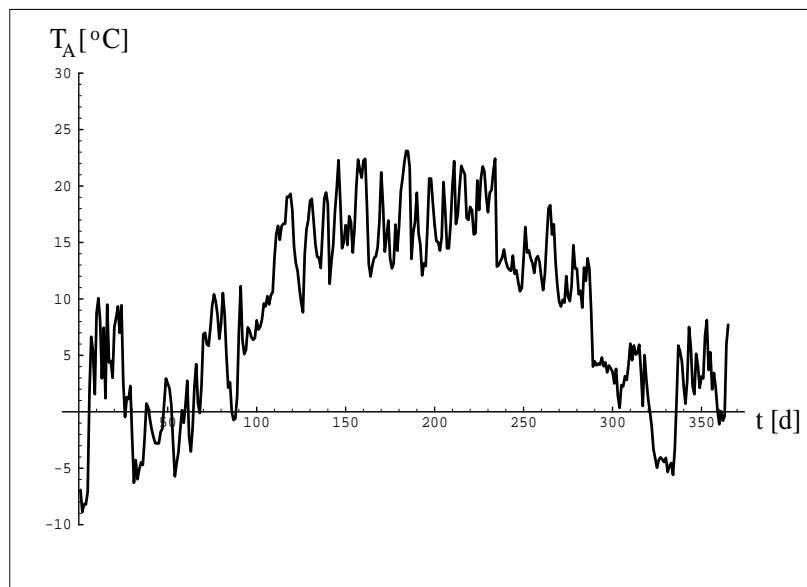
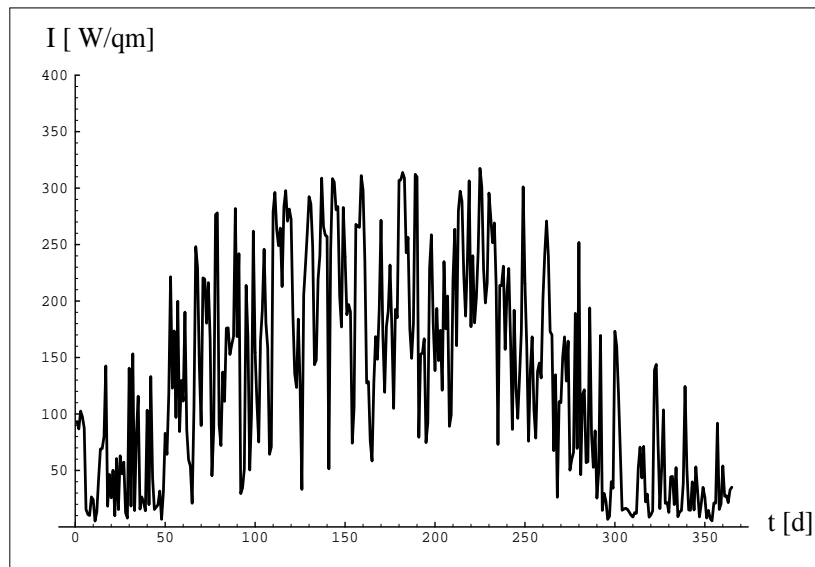


Abbildung D.1: Verlauf der solaren Einstrahlung I und der Außentemperatur T_A in „Würzburg“ und „Heidingsfeld“ (Tagesmittelwerte), $t = 0$ ist der 1. Januar 1993 [Hue95].

Anhang E

Dynamische Optimierung

E.1 Dynamische Beschreibung von Energieversorgungssystemen

Das Auftreten von Differentialgleichungen für die zeitlichen Ableitungen der prozeßinternen Zustandsgrößen¹ verlangt die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des EVS. Dazu stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

(Dynamische) Simulation und dynamische Optimierung

1. (Dynamische) Simulation:

„*Systemsimulation* ist die Nachahmung von Abläufen wirklicher oder gedachter Systeme mit Hilfe von physikalischen oder formalen Modellen“ (Begriffsdefinition nach Niemeyer, [Gal87], [Wal88]). Die Simulation ist ihrem Wesen nach deskriptiv, d.h. sie beschreibt das Verhalten eines Systems und antwortet somit auf die Frage „Was geschieht, wenn ...?“. Werden Simulationen für verschiedene Parametersätze durchgeführt, so kann die Simulation auch zur Identifizierung optimaler Systemkonfigurationen verwendet werden. Diese Methode beschränkt sich jedoch i.allg. auf einige wenige Parameter, die meist atemporalen Charakter besitzen, d.h. während des Simulationslaufes konstant sind.

2. Dynamische Optimierung:

Im Gegensatz zur Simulation beschäftigt sich die *dynamische Optimierung* mit der Frage „Wie komme ich dem angestrebten Ziel am nächsten?“. Sie ist damit ihrem Wesen nach normativ und liefert Informationen über die optimale Einflußnahme auf ein System, mit dem Ziel ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen.

3. Optimierende Simulation:

Die *optimierende Simulation* [Sch80] stellt eine Kombination von Simulation und Optimierung dar, die auf zwei Arten erfolgen kann:

- (a) Überlagerte Optimierung: Die Optimierung ist der Simulation überlagert, d.h. die Ergebnisse der Optimierung dienen als optimierte Parameter für die Simulation. Die Ergebnisse der Simulation können zur Verfeinerung des Optimierungsmodells herangezogen werden.

¹Die bei der Modellierung der Bedarfs- und Kollektorprozesse auftretenden Zustandsgrößen sind unabhängig von der Optimierung. Es handelt sich bei ihnen um den Energiebedarf und die maximal nutzbare Abwärme der Bedarfsprozesse sowie um die maximal mögliche Energieabgabe der Kollektorprozesse. Im Rahmen der Diskussion der dynamischen Optimierung sollen deshalb unter Zustandsgrößen allein die optimierungsabhängigen Speicherenergieinhalte verstanden werden (Zustandsgrößen im engeren Sinne).

Beispiel:

Mit Hilfe eines groben, auf Jahresmittelwerten basierenden Optimierungsmodells wird ein (auf dieser Modellierungsstufe) optimaler Kraftwerkspark ermittelt. Die nachfolgende Simulation des Energieversorgungssystems erlaubt die Untersuchung des zeitlichen Verhaltens dieses Kraftwerksparks, was zu einer Modifikation des Optimierungsmodells führen kann.

- (b) Simulation mit zeitlich-lokaler Optimierung (unter Berücksichtigung der Systemvergangenheit) [Bru92] (= *Quasidynamische Optimierung* [Gro93]). Die Simulation ist der Optimierung überlagert. Für jeden Zeitpunkt werden die noch unbestimmten Variablen des Simulationsmodells unter Berücksichtigung des jeweils herrschenden Systemzustandes durch Minimieren (bzw. Maximieren) einer zeitlich lokal definierten Zielfunktion berechnet. Diese Optimierung beeinflusst zukünftige Systemzustände. Sie bezieht diese Auswirkungen auf die Zukunft jedoch nicht in die zeitlich-lokal stattfindende Berechnung der optimalen Systemvariablen mit ein.

E.2 Dynamische Energie-, Emissions- und Kostenoptimierung

Im folgenden soll gezeigt werden, wie die Methode der Dynamischen Programmierung zur Optimierung kommunaler und regionaler Energieversorgungssysteme herangezogen werden kann.² Dazu wird die in Abschnitt 2.6.1.2 begonnene Diskussion der zeitlich-globalen Optimierung fortgeführt sowie auf die darin wiedergegebenen Definitionen aufgebaut. Die dort besprochene Methode der Quasidynamischen Optimierung führt zu einer zeitlichen Diskretisierung des ursprünglich (zeit-)kontinuierlichen Optimierungsproblems. Für die Anwendung der im folgenden zu besprechenden Methode der Dynamischen Programmierung ist dies ebenfalls hilfreich. Es ist aber jetzt angezeigt, sich auf die Verwendung von Ξ Zeitintervallen $\tau_\xi = [t_{\xi-1}, t_\xi[:= [(\xi-1)\Delta t, \xi\Delta t[$, $\xi = 1, \dots, \Xi$, mit gleicher Länge $\Delta t = \frac{\Theta}{\Xi}$ zu beschränken. Die Wahl der Anzahl der Intervalle Ξ muß vor Beginn des Verfahrens festgelegt werden und ist nach Abschluß des Verfahrens auf ihre Güte hin durch geeignete Sensitivitätsanalysen zu überprüfen.

Definition:

$$\tau_\xi \mathcal{O} := \frac{1}{t_\xi - t_{\xi-1}} \int_{t_{\xi-1}}^{t_\xi} \mathcal{O}(t) dt, \quad (\text{E.1})$$

$$\tau_\xi \mathcal{R} := \frac{1}{t_\xi - t_{\xi-1}} \int_{t_{\xi-1}}^{t_\xi} \mathcal{R}(t) dt, \quad (\text{E.2})$$

$$\tau_\xi \Phi^{Var} := \frac{1}{t_\xi - t_{\xi-1}} \int_{t_{\xi-1}}^{t_\xi} \Phi^{Var} [\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t)] dt. \quad (\text{E.3})$$

Es ist üblich (vgl. z.B. [Neu77]), die Optimierungsvariablen $\mathcal{O}(t)$ sowie die prozeßexternen Einflußgrößen $\mathcal{R}(t)$ innerhalb der Zeitintervalle konstant anzunehmen, also die Funktionen $\mathcal{O}(t)$ und $\mathcal{R}(t)$ durch Treppenfunktionen zu approximieren:³

$$\forall t \in [t_{\xi-1}, t_\xi[\quad \mathcal{O}(t) = \mathcal{O}(t_{\xi-1}) \quad (\text{E.4})$$

²Das bei vielen nationalen Energieoptimierungsmodellen verwendete Verfahren der Linearen Programmierung kann aufgrund der vorhandenen Nichtlinearitäten im Modell *deeco* nicht zur dynamischen Optimierung des Energiesystems verwendet werden, s.a. Anmerkungen auf Seite 122. Das hier beschriebene Verfahren der Dynamischen Programmierung kann dann alternativ zum Verfahren der Quasidynamischen Optimierung eingesetzt werden, wenn die Anzahl der Energiespeicher des zu untersuchenden Systems klein ist (s.S. 123). Es ist als Teil des formalen Modells *deeco* zu betrachten; seine Einbindung in das (gleichnamige) Computermodell *deeco* ist vorbereitet.

³Auf die Verwendung des \approx -Zeichens wird hier und im folgenden verzichtet (s.a. Fußnote zu Gl. 2.111).

$$\Rightarrow^{\tau_\xi} \mathcal{O} = \mathcal{O}(t_{\xi-1}) \quad \text{und} \quad (\text{E.5})$$

$$\forall t \in [t_{\xi-1}, t_\xi[\quad \mathcal{R}(t) = \mathcal{R}(t_{\xi-1}) \quad (\text{E.6})$$

$$\Rightarrow^{\tau_\xi} \mathcal{R} = \mathcal{R}(t_{\xi-1}). \quad (\text{E.7})$$

Darüber hinaus kann für kleine Δt ähnlich wie in Gl. 2.111 angenommen werden, daß der Vektor der Zustandsgrößen $\mathcal{S}(t)$ im Intervall τ_ξ (näherungsweise) konstant ist⁴ und erst am Intervallende von $\mathcal{S}(t_{\xi-1})$ auf $\mathcal{S}(t_\xi)$ springt. Dann ergibt die Integration von Gl. 2.106:

$$\mathcal{S}(t_\xi) = \mathcal{S}(\xi \Delta t) = \mathcal{S}(t_{\xi-1}) + \mathbf{F}[\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{O}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})] \cdot \Delta t \quad (\text{E.8})$$

$$=: \tilde{\mathbf{F}}[\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{O}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})]. \quad (\text{E.9})$$

Unter diesen Voraussetzungen gilt:

$$\tau_\xi \Phi^{Var} = \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{O}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})]. \quad (\text{E.10})$$

Die durch diese Vereinfachungen erreichte zeit-diskrete Approximation des zeit-kontinuierlichen Optimierungsproblems (Gl. 2.107, 2.108, 2.109 und 2.110) lautet:

Minimiere

$$\Theta \Phi^{Var}[[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t), \Theta]] = \frac{1}{\Xi} \sum_{\xi=1}^{\Xi} \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{O}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})] \quad (\text{E.11})$$

unter Beachtung von

$$\mathcal{S}(t_\xi) = \tilde{\mathbf{F}}[\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{O}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})], \quad \text{für } \xi = 1, \dots, \Xi, \quad (\text{E.12})$$

$$\mathcal{O}(t_{\xi-1}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})], \quad \text{für } \xi = 1, \dots, \Xi, \quad (\text{E.13})$$

$$\mathcal{S}(t_\xi) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_\xi)], \quad \text{für } \xi = 1, \dots, \Xi, \quad (\text{E.14})$$

$$\mathcal{S}(t_0) = \mathcal{S}_I, \quad (\text{E.15})$$

$$\mathcal{S}(t_\Xi) = \mathcal{S}_I, \quad (\text{E.16})$$

mit geeignet gewähltem Anfangswert \mathcal{S}_I .

Dabei sind die $\mathcal{O}(t_{\xi-1})$, $\xi = 1, \dots, \Xi$, so zu bestimmen, daß $\Theta \Phi^{Var}[[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t), \Theta]]$ minimal wird. Zur Vereinfachung der Schreibweise wird im folgenden gesetzt:

$$\phi := \Xi \cdot \Theta \Phi^{Var}[[\mathcal{S}(t), \mathcal{O}(t), \mathcal{R}(t), \Theta]] \quad (\text{E.17})$$

und ϕ als Zielfunktion bezeichnet. Gl. E.15 und E.16 zeigen an, daß auch hier die Übereinstimmung von Anfangs- und Endzustand gefordert wird.

⁴Diese im Vergleich zu elaborierteren Methoden der numerischen Integration (z.B. Runge-Kutta-Verfahren) relativ einfache Modellierung, die auch den Betrachtungen von Bieß ([Bie80], S.93) zugrundeliegt, kann bei den hier angenommenen Genauigkeitsansprüchen akzeptiert werden. Auch andere Autoren (z.B. [Neu77], S.129) weisen daraufhin, daß aufgrund des großen Rechenaufwandes zumindest im Rahmen der Rückwärtsrekursion (s. Anh. E.2.1) für diesen Zweck ein relativ grobes Näherungsverfahren verwendet werden sollte. Die hier verwendete Näherung ist darüber hinaus wesentliche Bedingung dafür, daß das zeitlich-lokale Optimierungsproblem linear bleibt, was die Verwendung des leistungsstarken Simplexalgorithmus (s. Anh. E.2.2) ermöglicht.

Das durch die Gln. E.11–E.16 definierte Minimierungsproblem stellt ein mehrstufiges⁵ Entscheidungsproblem dar. Im folgenden soll gezeigt werden, wie das Verfahren der Dynamischen Programmierung zur Lösung dieses Entscheidungsproblems herangezogen werden kann. Die Methode der Dynamischen Programmierung stellt ein Verfahren der Dynamischen Optimierung dar, das von Bellman (s. z.B. [Bel62]) entwickelt wurde und z.B. in [Sch74] ausführlich beschrieben wird. Mathematische und numerische Details findet man in [Neu77] und [Bau69].

E.2.1 Dynamische Programmierung nach Bellman

Definitionen:

Die Gleichungen E.11–E.16 u. E.17 bilden ein Ξ -stufiges dynamisches Optimierungsproblem, das im folgenden mit \mathcal{D} bezeichnet wird. E.17 gibt die Zielfunktion, E.12 die dynamische Nebenbedingung und E.13 - E.16 die sog. *statischen* (oder im Sinne dieser Arbeit die *zeitlich-lokalen*) Nebenbedingungen wieder. Eine Folge von Optimierungsgrößenvektoren $[\mathcal{O}(t_0), \dots, \mathcal{O}(t_{\Xi-1})]$ wird als *Steuerung* des Systems (oder als *Politik*) bezeichnet. Die dadurch unter Berücksichtigung des Ausgangszustandes $\mathcal{S}(t_0) = \mathcal{S}_I$ und der dynamischen Nebenbedingung (E.12) definierte Folge $Z := [\mathcal{S}(t_0), \dots, \mathcal{S}(t_{\Xi})]$ heißt *zugehörige Zustandsfolge*. Genügt die Steuerung den Nebenbedingungen Gl. E.13, E.14, E.15 und E.16, so wird sie, ebenso wie die zugehörige Zustandsfolge, als *zulässig* bezeichnet. Eine zulässige Steuerung heißt *optimal*, wenn diese dazu führt, daß die Zielfunktion E.17 ihr Minimum annimmt. Es ist in diesem Fall üblich, die zugehörigen Optimierungs- und Zustandsgrößenvektoren sowie den sich ergebenden Wert der Zielfunktion mit einem Stern (*) zu kennzeichnen:

$$\phi^* = \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = 0, 1, \dots, \Xi-1}} \phi \quad (\text{E.18})$$

$$= \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = 0, 1, \dots, \Xi-1}} \left\{ \sum_{\xi=1}^{\Xi} \Phi^{Var} [\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{O}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})] \right\} \quad (\text{E.19})$$

$$= \sum_{\xi=1}^{\Xi} \Phi^{Var} [\mathcal{S}^*(t_{\xi-1}), \mathcal{O}^*(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})]. \quad (\text{E.20})$$

Die Methode der Dynamischen Programmierung besteht darin, das dynamische Optimierungsproblem in Teilprobleme zu zerlegen, die sukzessive gelöst werden können. Dazu ist es nützlich,⁶ $(\Xi - \xi)$ stufige Teilprobleme des Optimierungsproblems \mathcal{D} zu betrachten, die zu einem Zeitpunkt $t = t_{\xi}$ beginnen, von einem Zustand $\mathcal{S}(t_{\xi})$ ausgehen und im folgenden mit $\mathcal{D}_{\xi}[\mathcal{S}(t_{\xi})]$ bezeichnet werden. Sie werden definiert durch den (neuen) Anfangszustand $\mathcal{S}(t_{\xi})$, die Gln. E.12, E.13, E.14, E.16 und die modifizierte Zielfunktion

$$\phi_{\xi}[\mathcal{S}(t_{\xi})] := \sum_{\xi'=\xi+1}^{\Xi} \Phi^{Var} [\mathcal{S}(t_{\xi'-1}), \mathcal{O}(t_{\xi'-1}), \mathcal{R}(t_{\xi'-1})]. \quad (\text{E.21})$$

Die zu den Optimierungsgrößenvektoren $\mathcal{O}(t_{\xi}), \dots, \mathcal{O}(t_{\Xi-1})$ gehörige Zustandsfolge wird mit $Z_{\xi}[\mathcal{S}(t_{\xi})]$ bezeichnet. Optimale Lösungen der Optimierungsprobleme $\mathcal{D}_{\xi}[\mathcal{S}(t_{\xi})]$ werden ebenfalls mit einem Stern (*) gekennzeichnet:

⁵Jedes Zeitintervall umfaßt dabei eine Stufe.

⁶Die folgende Darstellung orientiert sich weitgehend an [Pap91], S.362ff. Eine mathematisch strengere Darstellung, die z.B. auch auf Existenzfragen eingeht, findet man in [Neu77], S.33ff.

$$\begin{aligned}
\phi_{\xi}^*[\mathcal{S}(t_{\xi})] &= \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = \xi, \dots, \Xi-1}} \phi_{\xi}[\mathcal{S}(t_{\xi})] \\
&= \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = \xi, \dots, \Xi-1}} \sum_{\xi' = \xi+1}^{\Xi} \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi'-1}), \mathcal{O}(t_{\xi'-1}), \mathcal{R}(t_{\xi'-1})].
\end{aligned} \tag{E.22}$$

Daraus ergibt sich durch Zerlegen der Summe:

$$\begin{aligned}
\phi_{\xi}^*[\mathcal{S}(t_{\xi})] &= \\
&= \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = \xi, \dots, \Xi-1}} \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{O}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})] + \sum_{\xi' = \xi+2}^{\Xi} \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi'-1}), \mathcal{O}(t_{\xi'-1}), \mathcal{R}(t_{\xi'-1})] \right\} \\
&= \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = \xi, \dots, \Xi-1}} \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{O}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})] + \phi_{\xi+1}[\mathcal{S}(t_{\xi+1})] \right\} \\
&= \min_{\mathcal{O}(t_{\xi}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})]} \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = \xi+1, \dots, \Xi-1}} \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{O}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})] + \phi_{\xi+1}[\mathcal{S}(t_{\xi+1})] \right\}.
\end{aligned} \tag{E.23}$$

Da der 1. Summand in der geschweiften Klammer von den Optimierungsvariablen $\mathcal{O}(t_{\xi'})$, $\xi' = \xi + 1, \dots, \Xi - 1$, unbeeinflusst bleibt, gilt:

$$\begin{aligned}
\phi_{\xi}^*[\mathcal{S}(t_{\xi})] &= \\
&= \min_{\mathcal{O}(t_{\xi}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})]} \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{O}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})] + \min_{\substack{\mathcal{O}(t_{\xi'}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi'}), \mathcal{R}(t_{\xi'})] \\ \xi' = \xi+1, \dots, \Xi-1}} \phi_{\xi+1}[\mathcal{S}(t_{\xi+1})] \right\} \\
&= \min_{\mathcal{O}(t_{\xi}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})]} \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{O}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})] + \phi_{\xi+1}^*[\mathcal{S}(t_{\xi+1})] \right\}.
\end{aligned} \tag{E.24}$$

Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung der dynamischen Nebenbedingung:

$$\phi_{\xi}^*[\mathcal{S}(t_{\xi})] = \min_{\mathcal{O}(t_{\xi}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})]} \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{O}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})] + \phi_{\xi+1}^*[\tilde{\mathcal{F}}[\mathcal{S}(t_{\xi}), \mathcal{O}(t_{\xi}), \mathcal{R}(t_{\xi})]] \right\}. \tag{E.25}$$

Die rechte Seite dieser Gleichung, die als Bellman'sche Rekursionsformel bzw. als Bellman'sche Funktionalgleichung bezeichnet wird, hängt bei gegebenem $\mathcal{S}(t_{\xi})$ und $\mathcal{R}(t_{\xi})$ sowie bei bekanntem $\phi_{\xi+1}^*[\mathcal{S}(t_{\xi+1})]$ (als Funktion von $\mathcal{S}(t_{\xi+1})$) nur von $\mathcal{O}(t_{\xi})$, nicht aber explizit von $\mathcal{O}(t_{\xi'})$, $\xi' = \xi + 1, \dots, \Xi - 1$, ab. Somit erfolgt die Minimierung in dieser Rekursionsformel nur über die Optimierungsgröße $\mathcal{O}(t_{\xi})$ des Zeitpunktes t_{ξ} (unter Berücksichtigung der statischen und dynamischen Nebenbedingungen).

Die Rekursionsformel E.25 ermöglicht die Bestimmung von $\phi_{\xi}^*[\mathcal{S}(t_{\xi})]$ (für alle zulässigen $\mathcal{S}(t_{\xi})$) bei bekanntem funktionalem Zusammenhang $\phi_{\xi+1}^*[\mathcal{S}(t_{\xi+1})]$. Dies legt folgende sukzessive Vorgehensweise zur Lösung des gesamten Optimierungsproblems \mathcal{D} nahe:

Bestimme ausgehend vom **Endzustand** für alle zulässigen $\mathcal{S}(t_{\Xi-1})$ die jeweils optimalen Werte der modifizierten Zielfunktion (Gl. E.21 mit $\xi = \Xi - 1$) $\phi_{\Xi-1}^*[\mathcal{S}(t_{\Xi-1})]$. Daraus kann dann unter Verwendung der Rekursionsformel die Funktion $\phi_{\Xi-2}^*[\mathcal{S}(t_{\Xi-2})]$ und daraus wiederum

$\phi_{\Xi-3}^*[\mathcal{S}(t_{\Xi-3})]$ ermittelt werden, usw., bis schließlich $\phi_0^*[\mathcal{S}(t_0)] = \phi^*$ und somit die Lösung des Gesamtproblems gefunden ist.

Im folgenden soll diese stufengebundene sukzessive Vorgehensweise - das eigentliche Verfahren der Dynamischen Programmierung - näher erläutert werden:

Stufe $\Xi - 1$: Für alle $\mathcal{S}(t_{\Xi-1}) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_{\Xi-1})]$ sollen die zugehörigen $\mathcal{O}(t_{\Xi-1})$ bestimmt werden, die⁷

$$\phi_{\Xi-1}[\mathcal{S}(t_{\Xi-1})] = \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\Xi-1}), \mathcal{O}(t_{\Xi-1}), \mathcal{R}(t_{\Xi-1})] \quad (\text{E.26})$$

unter Beachtung von

$$\mathcal{S}(t_{\Xi}) = \tilde{F}[\mathcal{S}(t_{\Xi-1}), \mathcal{O}(t_{\Xi-1}), \mathcal{R}(t_{\Xi-1})], \quad (\text{E.27})$$

$$\mathcal{O}(t_{\Xi-1}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\Xi-1}), \mathcal{R}(t_{\Xi-1})], \quad (\text{E.28})$$

$$\mathcal{S}(t_{\Xi}) = \mathcal{S}_I \quad (\text{E.29})$$

minimieren. Das Ergebnis dieser einstufigen Minimierung für alle (diskreten Werte von) $\mathcal{S}(t_{\Xi-1}) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_{\Xi-1})]$ sei mit $\mathcal{O}^*(t_{\Xi-1}) = \mathbf{G}_{\Xi-1}[\mathcal{S}(t_{\Xi-1}), \mathcal{R}(t_{\Xi-1})]$ bezeichnet; die entsprechenden Werte von $\phi_{\Xi-1}[\mathcal{S}(t_{\Xi-1})]$ definitionsgemäß mit $\phi_{\Xi-1}^*[\mathcal{S}(t_{\Xi-1})]$.⁸

Stufe $\Xi - 2$: Für alle $\mathcal{S}(t_{\Xi-2}) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_{\Xi-2})]$ sollen die zugehörigen $\mathcal{O}(t_{\Xi-2})$ bestimmt werden, die⁹

$$\tilde{\phi}_{\Xi-2}[\mathcal{S}(t_{\Xi-2})] := \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_{\Xi-2}), \mathcal{O}(t_{\Xi-2}), \mathcal{R}(t_{\Xi-2})] + \phi_{\Xi-1}^*[\mathcal{S}(t_{\Xi-1})] \right\} \quad (\text{E.30})$$

unter Beachtung von

$$\mathcal{S}(t_{\Xi-1}) = \tilde{F}[\mathcal{S}(t_{\Xi-2}), \mathcal{O}(t_{\Xi-2}), \mathcal{R}(t_{\Xi-2})], \quad (\text{E.31})$$

$$\mathcal{O}(t_{\Xi-2}) \in \Omega[\mathcal{S}(t_{\Xi-2}), \mathcal{R}(t_{\Xi-2})], \quad (\text{E.32})$$

$$\mathcal{S}(t_{\Xi-1}) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_{\Xi-1})] \quad (\text{E.33})$$

minimieren. Dabei kann jetzt die Kenntnis von $\phi_{\Xi-1}^*[\mathcal{S}(t_{\Xi-1})]$ als Funktion von $\mathcal{S}(t_{\Xi-1})$ als bekannt vorausgesetzt werden. Das Ergebnis dieser einstufigen Minimierung sei mittels $\mathcal{O}^*(t_{\Xi-2}) = \mathbf{G}_{\Xi-2}[\mathcal{S}(t_{\Xi-2}), \mathcal{R}(t_{\Xi-2})]$ und $\phi_{\Xi-2}^*[\mathcal{S}(t_{\Xi-2})]$ angegeben.

In der hier angedeuteten Art und Weise fährt man sukzessive fort bis zur

Stufe 0: Für $\mathcal{S}(t_0) = \mathcal{S}_I$ soll das zugehörige $\mathcal{O}(t_0)$ bestimmt werden, das

$$\tilde{\phi}_0[\mathcal{S}(t_0)] := \left\{ \Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_0), \mathcal{O}(t_0), \mathcal{R}(t_0)] + \phi_1^*[\mathcal{S}(t_1)] \right\} \quad (\text{E.34})$$

unter Beachtung von

$$\mathcal{S}(t_1) = \tilde{F}[\mathcal{S}(t_0), \mathcal{O}(t_0), \mathcal{R}(t_0)], \quad (\text{E.35})$$

⁷Bei der numerischen Umsetzung des Verfahrens greift man dazu auf eine endliche Anzahl von diskreten Werten des Zustandsgrößenvektors zurück, die sich durch eine geeignete Diskretisierung des zulässigen Zustandsbereiches ergeben.

⁸Wie die hier angesprochene einstufige Optimierung konkret erfolgen kann, wird weiter unten genau beschrieben.

⁹s. Gl. E.24.

$$\mathcal{O}(t_0) \in \Omega[\mathcal{S}(t_0), \mathcal{R}(t_0)], \quad (\text{E.36})$$

$$\mathcal{S}(t_1) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_1)] \quad (\text{E.37})$$

minimiert.

Das Ergebnis dieser letzten einstufigen Minimierung sei durch $\mathcal{O}^*(t_0) = \mathbf{G}_0[\mathcal{S}(t_0), \mathcal{R}(t_0)]$ und $\phi_0^*[\mathcal{S}(t_0)]$ ausgedrückt.

Auf den einzelnen Stufen kann es Werte $\mathcal{S}(t_\xi) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_\xi)]$ geben, für die das einstufige Optimierungsproblem nicht lösbar ist, d.h. diese Zustände können in diesem Fall nicht in den vorgegebenen Endzustand überführt werden. Am Ende der beschriebenen Ξ -stufigen Prozedur (der sog. Rückwärtsrekursion) erhält man die optimale Zustandsfolge, indem man von $\mathcal{S}(t_0) = \mathcal{S}_I$ ausgehend bei bekannter Folge $\mathcal{R}(t_0), \dots, \mathcal{R}(t_{\Xi-1})$ auf jeder Stufe $\xi = 0, \dots, \Xi - 1$ mit Hilfe der Vektoren $\mathbf{G}_\xi[\mathcal{S}^*(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)]$ die optimalen Werte $\mathcal{O}^*(t_\xi)$ bestimmt und damit unter Verwendung von $\mathcal{S}^*(t_{\xi+1}) = \tilde{\mathbf{F}}[\mathcal{S}^*(t_\xi), \mathcal{O}^*(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)]$ den optimalen Ausgangszustand der nächsten Stufe berechnet (sog. Vorwärtsrechnung). Nach Durchlaufen aller Stufen ist damit das gesamte Optimierungsproblem gelöst.

Das Verfahren der Dynamischen Programmierung liefert aber nicht nur die optimale Steuerung, die den Anfangszustand $\mathcal{S}(t_0) = \mathcal{S}_I$ in den Endzustand $\mathcal{S}(t_\Xi)$ überführt, sondern sogar ein sog. Regelgesetz, das durch

$$\mathcal{O}^*(t_\xi) = \mathbf{G}_\xi[\mathcal{S}(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)], \quad \xi = 0, \dots, \Xi - 1 \quad (\text{E.38})$$

gegeben ist und genügend Information enthält, um für jeden beliebigen Zustand $\mathcal{S}(t_\xi) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_\xi)]$ berechnen zu können, wie dieser optimal in den Endzustand überführt werden kann (sofern er überführbar ist).

Einstufige Optimierung:

Im allg. wird bei der numerischen Anwendung des Verfahrens der Dynamischen Programmierung der Zustandsbereich diskretisiert [Pap91], S.366. Die einstufige Minimierung in den einzelnen Stufen läßt sich dann am Beispiel der Stufe ξ wie folgt beschreiben:

Zur Berechnung von $\phi_\xi^*[\mathcal{S}(t_\xi)]$ bei vorgegebenem $\mathcal{S}(t_\xi)$ werden zunächst für alle diskreten Werte¹⁰ $\mathcal{S}_i(t_{\xi+1})$ der Zustandsgröße $\mathcal{S}(t_{\xi+1}) \in \Gamma[\mathcal{R}(t_{\xi+1})]$ die zugehörigen $\mathcal{O}_i(t_\xi)$ bestimmt, die

$$\Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_\xi), \mathcal{O}_i(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)] \quad (\text{E.39})$$

unter Beachtung von

$$\mathcal{S}_i(t_{\xi+1}) = \tilde{\mathbf{F}}[\mathcal{S}(t_\xi), \mathcal{O}_i(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)], \quad (\text{E.40})$$

$$\mathcal{O}_i(t_\xi) \in \Omega[\mathcal{S}(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)], \quad (\text{E.41})$$

minimieren. Diese Optimierung, die im Rahmen dieser Arbeit als *zeitlich-lokale Optimierung* bezeichnet wird (s. Kap. 2.6.1.1), kann mit unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden. I.allg. erfolgt sie durch Diskretisierung der Optimierungsvariablen und Vergleich aller dadurch erhaltenen (dann ebenfalls diskreten) Werte für $\Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_\xi), \mathcal{O}(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)]$. Im Modell *deeco* kann sie aufgrund der Linearität des Problems durch Anwendung des Simplexalgorithmus erfolgen (s. Anh. E.2.2).

In Anlehnung an Gl. E.24 ergibt sich nach erfolgter zeitlich-lokaler Optimierung $\tilde{\phi}_\xi[\mathcal{S}(t_\xi)]$ durch Addition von $\Phi^{Var}[\mathcal{S}(t_\xi), \mathcal{O}_i(t_\xi), \mathcal{R}(t_\xi)]$ und $\phi_{\xi+1}^*[\mathcal{S}_i(t_{\xi+1})]$. Durch Vergleich der Ergebnisse, die sich so mit den unterschiedlichen diskreten Werten für $\mathcal{S}_i(t_{\xi+1})$ ergeben (die Werte

¹⁰Die diskreten Werte des Zustandsgrößenvektors $\mathcal{S}(t_{\xi+1})$ lassen sich auch im mehrdimensionalen Fall durch einen (geeignet zu definierenden) Index i unterscheiden.

$\phi_{\xi+1}^*[\mathcal{S}_i(t_{\xi+1})]$ sind aufgrund der sukzessiven Vorgehensweise der Dynamischen Programmierung bereits auf der Stufe $\xi + 1$ berechnet worden), kann das minimale $\phi_{\xi}^*[\mathcal{S}(t_{\xi})]$ ermittelt werden. Dieses Verfahren ist für alle diskreten Werte von $\mathcal{S}(t_{\xi})$ und (sukzessive) für alle $\xi = \Xi - 1, \dots, 0$ zu wiederholen.

Anmerkung:

Gl. E.24 stellt einen Spezialfall des sog. *Bellman'schen Optimalitätsprinzips* dar, das in anschaulicher Art und Weise den Kerngedanken wiedergibt, auf dem das Verfahren der Dynamischen Programmierung basiert. Dieses von Bellman formulierte Prinzip besagt [Sch74], S.57, [Neu77], S.33:

Eine optimale Steuerung $[\mathcal{O}^*(t_0), \dots, \mathcal{O}^*(t_{\Xi-1})]$ eines Ξ -stufigen (dynamischen) Optimierungsproblems (\mathcal{D}) besitzt die Eigenschaft, daß ab jedem dadurch erreichten Zustand $\mathcal{S}^*(t_{\xi})$ die Folge der Optimierungsgrößenvektoren $[\mathcal{O}^*(t_{\xi}), \dots, \mathcal{O}^*(t_{\Xi-1})]$ eine optimale Steuerung des $(\Xi - \xi)$ -stufigen Optimierungsproblems $\mathcal{D}_{\xi}[\mathcal{S}(t_{\xi})]$ bilden.

Die Optimierungsgrößenvektoren $\mathcal{O}^*(t_{\xi}), \dots, \mathcal{O}^*(t_{\Xi-1})$ hängen nur vom Zustandsgrößenvektor $\mathcal{S}^*(t_{\xi})$, nicht dagegen explizit von den vorangegangenen Optimierungsgrößenvektoren $\mathcal{O}^*(t_0), \dots, \mathcal{O}^*(t_{\xi-1})$ ab.

Schlagwortartig kann man somit sagen:

„Reststeuerungen“ einer optimalen Steuerung sind wieder optimal.

Das Optimalitätsprinzip läßt sich leicht durch folgende Betrachtung veranschaulichen: Wäre die „Reststeuerung“ ab dem Zustand $\mathcal{S}^*(t_{\xi})$ (der der optimalen Zustandsfolge angehört) nicht optimal, so gäbe es eine andere Steuerung ab $\mathcal{S}^*(t_{\xi})$, die einen kleineren Wert der modifizierten Zielfunktion (Gl. E.21) liefern würde. Diese andere Steuerung würde dann aber zusammen mit der bis zum Zeitpunkt t_{ξ} optimalen Steuerung $[\mathcal{O}^*(t_0), \dots, \mathcal{O}^*(t_{\xi-1})]$ zu einem kleineren Wert der Zielfunktion des gesamten Optimierungsproblems \mathcal{D} führen, was im Widerspruch zur Optimalität der ursprünglich gewählten Gesamtsteuerung stünde.

Damit ist das Grundprinzip der Dynamischen Programmierung beschrieben. Die bei der Anwendung des Verfahrens auf die Problemstellung des Modells *deeco* notwendigen spezifischen Anpassungen sollen im folgenden diskutiert werden.

E.2.2 Modellspezifische Anpassungen

Die im Rahmen des Verfahrens der Dynamischen Programmierung in den Intervallen $[t_{\xi-1}, t_{\xi}[$, $\xi = 1, \dots, \Xi$, durchzuführende zeitlich-lokale Optimierung kann im Modell *deeco* mit der in Kap. 2.6.1.1 beschriebenen Methode erfolgen, wenn neben der Berücksichtigung der dort angegebenen Nebenbedingungen zugleich sichergestellt ist, daß bei vorgegebenem Wert für $\mathcal{S}(t_{\xi-1})$ am Ende des Zeitintervalls ein ebenfalls vorgegebener Wert $\mathcal{S}(t_{\xi})$ angenommen werden kann. Somit ist im Vergleich zur zeitlich-lokalen Optimierung in Kap. 2.6.1.1 die Zustandstransformationsgleichung E.8 als zusätzliche Nebenbedingung zu berücksichtigen:

$$\mathbf{F}[\mathcal{S}(t_{\xi-1}), \mathcal{O}(t_{\xi-1}), \mathcal{R}(t_{\xi-1})] = \frac{\mathcal{S}(t_{\xi}) - \mathcal{S}(t_{\xi-1})}{\Delta t}. \quad (\text{E.42})$$

Im Modell *deeco* ist diese gemäß Gl. 2.62 und 2.67 linear bezüglich der auftretenden Optimierungsvariablen, so daß auch im Rahmen der Dynamischen Programmierung zur zeitlich-lokalen Optimierung der Simplexalgorithmus verwendet werden kann.

Gemäß Gl. E.14 dürfen die Zustandsgrößen am Ende des betrachteten Optimierungszeitintervalls $[t_{\xi-1}, t_{\xi}[$ nicht beliebige Werte, sondern nur solche annehmen, die innerhalb des Zustandsbereichs $\Gamma[\mathcal{R}(t_{\xi})]$ liegen (sog. zulässige Zustandsgrößen). Aufgrund vorgegebener Restriktionen in Form von prozeßinternen Grenzwerten bezüglich der Optimierungsvariablen ist der zulässige

Steuerbereich $\Omega[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi-1})]$ i.allg. ebenfalls beschränkt, was dazu führt, daß ausgehend von einem gegebenen Zustand $\mathbf{S}(t_{\xi-1})$ innerhalb eines Zeitintervalls nicht immer alle zulässigen Zustände $\mathbf{S}(t_{\xi}) \in \Gamma[\mathbf{R}(t_{\xi})]$ erreichbar sind. Dies ist physikalisch einsichtig, da die Menge der Optimierungsvariablen auch die Energieströme beinhaltet, die zum Be- oder Entladen der Energiespeicher dienen und (da diese beschränkt sind)¹¹ die Zustandsgrößen nur begrenzt verändern können (s. Gl. 2.106). Die Teilmenge $\tilde{\Gamma}[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi})] \subseteq \Gamma[\mathbf{R}(t_{\xi})]$ der vom Zustand $\mathbf{S}(t_{\xi-1})$ aus im Zeitintervall τ_{ξ} erreichbaren Zustände muß bei der zeitlich-lokalen Optimierung als Nebenbedingung berücksichtigt werden, d.h. bei gegebenem $\mathbf{S}(t_{\xi-1})$ müssen nicht alle diskretisierten Werte (s. Anh. E.2.1) von $\mathbf{S}(t_{\xi})$ sondern nur die $\mathbf{S}(t_{\xi}) \in \tilde{\Gamma}[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi})]$ untersucht werden. Dies führt zu einer Reduktion des Rechenaufwandes und rechtfertigt im Nachhinein die Näherung in Gl. E.8, da erst bei beschränktem $\Omega[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi-1})]$ sichergestellt werden kann, daß bei kleiner Wahl von Δt auch die möglichen Zustandsänderungen klein bleiben. Zur Bestimmung der Grenzen von $\tilde{\Gamma}[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi})]$ kann im Modell *deeco* folgendes Verfahren verwendet werden: Gesucht sind ausgehend von $\mathbf{S}(t_{\xi-1})$ (für alle diskreten Werte dieses Zustandsgrößenvektors, s. Anh. E.2.1) die größten bzw. kleinsten (von $\mathbf{S}(t_{\xi-1})$ aus) erreichbaren Werte der Komponenten von $\mathbf{S}(t_{\xi})$. Dies stellt somit in jedem Optimierungsintervall ein Optimierungsproblem dar:

Maximiere bzw. minimiere (nacheinander) alle Komponenten $S_i(t_{\xi})$ von $\mathbf{S}(t_{\xi})$ unter Beachtung der Nebenbedingungen:

$$S_i(t_{\xi}) = \{\mathbf{S}(t_{\xi})\}_i = \left\{ \tilde{\mathbf{F}}[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{O}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi-1})] \right\}_i, \quad (\text{E.43})$$

$$\mathbf{O}(t_{\xi-1}) \in \Omega[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi-1})], \quad (\text{E.44})$$

$$\mathbf{S}(t_{\xi}) \in \Gamma[\mathbf{R}(t_{\xi})], \quad (\text{E.45})$$

$$\mathbf{S}(t_{\xi}) = \mathbf{S}_I, \quad \text{falls} \quad \xi = \Xi. \quad (\text{E.46})$$

Wegen der Linearität der Nebenbedingungen kann auch dazu der Simplexalgorithmus verwendet werden.

Die Gesamtheit der Ergebnisse dieser Optimierungsrechnungen für die einzelnen Komponenten von $\mathbf{S}(t_{\xi})$ liefert die entsprechenden Grenzen des Bereiches $\tilde{\Gamma}[\mathbf{S}(t_{\xi-1}), \mathbf{R}(t_{\xi})]$.

Damit sind alle problemspezifischen Aufgaben gelöst, die sich im Rahmen der Anwendung der Dynamischen Programmierung auf das hier vorliegende dynamische Optimierungsproblem ergeben.

Anmerkungen:

1. Die Anwendung des Simplexalgorithmus ist im Modell *deeco* auf den Bereich der zeitlich-lokalen Optimierung (Minimierung von $\Phi^{Var}[\mathbf{S}(t_{\xi}), \mathbf{O}_i(t_{\xi}), \mathbf{R}(t_{\xi})]$, Gl. E.39-E.41) beschränkt und kann nicht auf die Minimierung von $\phi_{\xi}[\mathbf{S}(t_{\xi})]$ (Gl. E.21) ausgedehnt werden, da $\phi_{\xi+1}^*[\mathbf{S}(t_{\xi+1})]$ (s. Gl. E.24) aufgrund des i.allg. nicht-linearen Einflusses der intensiven Größen auf die Zielfunktion¹² und die Nebenbedingungen eine nicht-lineare Funktion von $\mathbf{S}(t_{\xi+1})$ darstellt und damit aufgrund der dynamischen Nebenbedingung Gl. E.12 ebenfalls nicht-linear bezüglich der Optimierungsvariablen ist. Das gesamte Optimierungsproblem (Minimierung von $\phi_0[\mathbf{S}(t_0)]$) stellt somit ebenfalls ein nicht-lineares dynamisches Optimierungsproblem dar, so daß die Anwendung des Simplexalgorithmus auf das Gesamtproblem nicht möglich ist. Somit kann das Verfahren der Linearen Programmierung, das in vielen (linearen) Energiemodellen auch im Rahmen von dynamischen Optimierungsproblemen

¹¹In realisierten (Energieversorgungs-) Systemen treten naturgemäß keine unendlich großen Energieströme auf. Bei der mathematischen Modellierung ist das Auftreten unendlich großer Energieströme aber explizit durch Vorgabe realistischer Obergrenzen zu verhindern, um die numerische Stabilität des Algorithmus zu gewährleisten.

¹²Dabei ist insbesondere zu beachten, daß der Speicherenergieinhalt gemäß Gl. 2.69 in die Berechnung von intensiven Ausgabegrößen eingeht.

Verwendung findet, im Modell *deeco* nicht eingesetzt werden. Darüber hinaus ist die Anzahl der Optimierungsvariablen des Gesamtproblems enorm,¹³ was ebenfalls die Verwendung des Simplexalgorithmus erschwert.

2. Es ist nützlich in Abwandlung des oben beschriebenen Verfahrens bei der Rückwärtsrekursion nicht das vollständige Regelgesetz abzuspeichern, sondern nur die optimale Zustandsfolge. Im Verlauf der Vorwärtsrechnung muß dann aber auf jeder Stufe unter Berücksichtigung des optimalen Anfangs- und Endzustandes dieser Stufe eine weitere zeitlich-lokale Optimierung durchgeführt werden, um die optimalen Optimierungsgrößenvektoren zu rekonstruieren. Dies verlängert zwar die Rechenzeit, verringert aber den Rechenspeicherplatzbedarf, vor allem wenn der Optimierungsgrößenvektor viele Komponenten besitzt, enorm. Details zu dieser Vorgehensweise findet man in [Kun94], S.35.
3. Einzelheiten zur Umsetzung der Dynamischen Programmierung auf dem Computer, zum Konvergenzverhalten und zur Numerik werden in [Neu77] u. [Bau69] diskutiert.

Das Verfahren der Dynamischen Programmierung besitzt eine Reihe von Eigenschaften (s. z.B. [Lar78], S.139ff.), die sich vorteilhaft auf seine Anwendbarkeit im Rahmen einer dynamischen Optimierung regionaler Energiesysteme auswirken. So stellt z.B. die Vielzahl von Nebenbedingungen für die Optimierungs- und Zustandsgrößen kein Hindernis für seine Anwendung dar. Restriktionen, die den Raum der zulässigen Zustände einschränken, wirken sich sogar günstig auf den Rechenaufwand aus. Die Methode berechnet (im Rahmen der Genauigkeit der diskreten Approximation) ein absolutes Minimum, d.h. es besteht keine Gefahr, sich in ein lokales Minimum zu verlaufen. Das Verfahren liefert nicht nur eine optimale Steuerung des EVS, die für den verwendeten Anfangszustand (der durch den Vektor $\mathbf{S}(t = 0)$ charakterisiert wird) gültig ist, sondern ein sog. Regelgesetz, d.h. auch wenn das System gestört wird, kann vom neuen (gestörten) Zustand aus angegeben werden, wie das System in der verbleibenden Zeit optimal zu steuern ist (d.h. welche Werte die Optimierungsvariablen annehmen sollen). Dieser Fülle von Vorteilen gegenüber anderen Verfahren der dynamischen Optimierung (z.B. dem Minimumprinzip von Pontryagin¹⁴) steht jedoch ein gravierender Nachteil gegenüber. Obwohl es prinzipiell für beliebig viele Zustandsvariablen geeignet ist, scheitert seine Anwendung in der Praxis aufgrund der erforderlichen Rechenzeit und des Rechenspeicherplatzbedarfs, die beide exponentiell mit der Zahl der Zustandsvariablen anwachsen, häufig schon bei Problemen mit mehr als 3 bis 4 Komponenten des Zustandsgrößenvektors \mathbf{S} [Bie80], S.97. Eine Bewertung dieses Sachverhaltes muß die dem Modell *deeco* zugrundeliegenden Näherungen berücksichtigen, insbesondere die Tatsache, daß auf eine exakt mathematische, gemeinsame Optimierung der verallgemeinerten variablen und fixen Kosten verzichtet und statt dessen ein interaktives Verfahren verwendet wird (s. Kap. 2.6). Angesichts dieser Tatsache bietet sich folgendes Vorgehen an, das als interaktive dynamische Optimierung bezeichnet werden soll und als Erweiterung des in Abschnitt 2.6.3 beschriebenen Verfahrens angesehen werden kann.

E.2.3 Interaktive dynamische Optimierung

Die interaktive Reduzierung der verallgemeinerten Gesamtkosten beginnt (zunächst wie in Abschnitt 2.6.3) mit einer Quasidynamischen Optimierung des EVS (Abschnitt 2.6.1.2) unter Einbeziehung aller zugelassenen Energieversorgungsprozesse. Dies erlaubt die Identifizierung von energietechnischen Prozessen, die nur wenig zur Versorgung der Bedarfsprozesse beitragen und die deshalb aus der Liste der zugelassenen Prozesse gestrichen werden. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis die Zunahme der verallgemeinerten variablen Kosten die Abnahme der

¹³Im Modell *deeco* wird aufgrund der vorgegebenen Datenbasis i.allg. $\Delta t \leq 1\text{h}$ gewählt, d.h. Ξ liegt in der Größenordnung von 8760 (Anzahl der Stunden eines Jahres).

¹⁴Restriktionen für Zustandsgrößen führen bei diesem Verfahren zu ernsthaften numerischen Problemen [Bie80], S.97.

verallgemeinerten fixen Kosten überschreitet.¹⁵ Ein bezüglich der monetären Kosten akzeptables EVS ergibt sich i.allg. dann, wenn nur mehr wenige Speicherprozesse übriggeblieben sind. Diesen entsprechen aber auch wenige Zustandsgrößen, so daß dann für das verbleibende EVS eine dynamische Optimierung mit Hilfe des Verfahrens der Dynamischen Programmierung möglich wird. Die quasidynamische Optimierung übernimmt somit die Rolle einer Groboptimierung, bei der es weniger auf den absoluten Wert der Zielfunktion und der genauen dynamischen Steuerung als auf den Vergleich der zur Verfügung stehenden Energieversorgungsprozesse ankommt. Das Ergebnis der interaktiven Reduktion der verallgemeinerten Gesamtkosten liefert ein EVS, das vor allem dann, wenn auch die monetären Kosten genügend berücksichtigt werden, Chancen auf Realisierung besitzt. Dies rechtfertigt den großen Aufwand, der mit dem Einsatz des Verfahrens der Dynamischen Programmierung verbunden ist, um für dieses System im Sinne einer Feinoptimierung auch eine optimale Steuerung zu berechnen.

¹⁵Da es sich bei diesen Kosten strenggenommen um Vektoren handelt, ist darunter genaugenommen ein Vergleich der in Anlehnung an Gl. 2.99 gebildeten Linearkombinationen der Komponenten der Vektoren der verallgemeinerten variablen und fixen Kosten zu verstehen.

Literaturverzeichnis

- [Ale88] G. Alefeld, *Zur Bewertung von Heizkraftwerken*, Brennstoff-Wärme-Kraft **40**, 231-236 (1988).
- [And93] C.D. Andriesse, *The Practical Concept of Exergy*, in: E.W.A. Lingeman (Ed.), *Using Energy in an Intelligent Way*, Proceedings of the 111th WE-Heraeus Seminar, European Physical Society, Genf, p. 85-88 (1993).
- [AT&T92] AT&T and UNIX System Laboratories (USL), Inc. (Eds.), *USL C++ Standard Components, Release 3.0, Programmer's Guide*, zu Bestellen beim Herausgeber (1992).
- [Bac88] L. Backlund, *Optimisation of Dynamic Energy Systems with Time Dependent Components and Boundary Conditions*, Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations No. 181, Linköping Institute of Technology, Sweden (1988).
- [Bae89] H.D. Baehr, *Thermodynamik*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1989).
- [Bat92] J. Bathe, U. Fahl, *Einheitliche Anwendung energetischer Terminologie*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen **42**, 368 (1992).
- [Bau65] W.J. Baumol, *Economic Theory and Operation Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1965).
- [Bau69] H. Bauer, K. Neumann, *Berechnung optimaler Steuerungen*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1969).
- [Bec79] W.A. Beckman, S.A. Klein, J.A. Duffie, *Solarheizungen*, aus dem amerik. übersetzt von G. Bräunlich, Udo Pfriemer, München (1979).
- [Bec84] G. Beckmann, P.V. Gilli, *Thermal Energy Storage*, Springer, Wien, New York (1984).
- [Bel62] R.E. Bellman, S.E. Dreyfus, *Applied Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey (1962).
- [Bie80] G. Bieß, H. Erfurth, G. Zeidler, *Optimale Prozesse und Systeme*, Harri Deutsch, Thun, Frankfurt a.M. (1980).
- [Bli59] R.W. Bliss, *The Derivation of Several 'Plate Efficiency Factors' Useful in the Design of Flate-Plate Solar Collectors*, Solar Energy **3**, 55 (1959).
- [Blo92] K. Blok, W.C. Turkenburg, C.A. Hendriks, Meyer Steinberg (Eds.), *Proceedings of the First International Conference on Carbon Dioxide Removal, Amsterdam, 1992*, Pergamon Press, Oxford, New York, Seoul, Tokyo (1992).
- [BMF77] BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie), *Gesamtstudie über die Möglichkeiten der Fernwärmeversorgung aus Heizkraftwerken in der BRD*, Kurzfassung, Bonn (1977).

- [BMW94] BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft), *Energiedaten '94*, Bonn (1994).
- [Boc92] H. Bockwyt, *Gasbrennwerttechnik - umweltfreundliche Alternative für Haushalte*, gas, Heft 2/92, 20-26 (1992).
- [Boh82] Th. Bohn, W. Bitterlich, *Grundlagen der Energie- und Kraftwerkstechnik*, Technischer Verlag Resch, Gräfelting, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1982).
- [Boh84] Th. Bohn (Hrsg.), *Gasturbinenkraftwerke, Kombikraftwerke, Heizkraftwerke und Industriekraftwerke*, Technischer Verlag Resch, Gräfelting, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1984).
- [Boh85] Th. Bohn (Hrsg.), *Konzeption und Aufbau von Dampfkraftwerken*, Technischer Verlag Resch, Gräfelting, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1985).
- [Bor91] Borland GmbH (Hrsg.), *Quattro Pro 3.0, Benutzerhandbuch*, München (1991).
- [Bos87] H. Bossel, *Systemdynamik, Grundwissen, Methode und Basic-Programme zur Simulation dynamischer Systeme*, Vieweg, Braunschweig (1987).
- [Bos92] H. Bossel, *Modellbildung und Simulation*, Vieweg, Braunschweig (1992).
- [Bre80] W.-R. Bretzke, *Der Problembezug von Entscheidungsmodellen*, Mohr, Tübingen (1980).
- [Bro85] I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew, *Taschenbuch der Mathematik*, Harri Deutsch, Frankfurt/Main (1985).
- [Bru92] Th. Bruckner, *Solarthermie und rationelle Energieverwendung*, Diplomarbeit, Univ. Würzburg, unveröffentlicht (1992).
- [Bru93] Th. Bruckner, R. Kümmel, H.-M. Groscurth, *Energy-, Cost- and CO₂-Optimization in Industrial Systems*, in: E.W.A. Lingeman (Ed.): *Proceedings of the 111. WE-HERAEUS SEMINAR in cooperation with the European Physical Society Action Committee on Physics and Society: Using Energy in an Intelligent Way*, Geneva, 49-70 (1993).
- [Bru94] Th. Bruckner, A. Blavdzevitch, H.-M. Groscurth, R. Kümmel, *Rational Use of Energy in the Ukraine: A Pilot Study for Desna*, *Energy* **19**, 489-497 (1994).
- [Bru96] Th. Bruckner, *deeco – Benutzer- und Programmierhandbuch*, interne Dokumentation, Institut für Theoretische Physik, Universität Würzburg, unveröffentlicht (1996).
- [Bru97] Th. Bruckner, H.-M. Groscurth, R. Kümmel, *Konkurrenz und Synergie moderner Energieversorgungstechniken in kommunalen Energiesystemen*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (im Druck).
- [Bub93] D. Bublit, *Modellierung von Entnahme-Kondensationsanlagen zur rechnergestützten Betriebsoptimierung von Fernwärme-Verbundsystemen*, Dissertation, Universität Dortmund, Verlag Shaker, Aachen (1993).
- [Buc83] A. Buch, *Fernwärme*, Resch-Verlag, Gräfelting (1983).
- [Buk83] F. Bukau, *Wärmepumpen-Technik*, Oldenbourg, München, Wien (1983).
- [Cub77] H.-L. von Cube, F. Steimle, *Wärmepumpen, Grundlagen und Praxis*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1977).

- [Cub83] H.-L. von Cube, *Wärmepumpen für Raumheizsysteme*, in H.-L. von Cube (Hrsg.), *Handbuch der Energietechniken, Band 2*, C.F. Müller, Karlsruhe (1983).
- [Dan63] G. Dantzig, *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, Princeton (1963).
- [Dic86] A. Dickopp, *Energiedatenerfassung als Grundlage für das Energiesparen*, in: *Jahrbuch der Wärmerückgewinnung 1985/86*, Vulkan Verlag, Essen (1986).
- [Din82] W. Dinkelbach, *Entscheidungsmodelle*, de Gruyter, Berlin, New York (1982).
- [DIN88] Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), *Wärmeschutz, DIN-Taschenbuch*, Beuth, Berlin, Bauverlag, Wiesbaden (1988).
- [Dor58] R. Dorfman, P.A. Samuelson, R.M. Solow, *Linear Programming and Economic Analysis*, McGraw-Hill, New York (1958).
- [DPG95] Deutsche Physikalische Gesellschaft, *Energiememorandum 1995 der DPG: Zukünftige klimaverträgliche Energienutzung und politischer Handlungsbedarf zur Markteinführung neuer emissionsmindernder Techniken*, Physikalische Blätter **51**, 388-391 (1995).
- [Dub86] R. Dubois, *Optimale Tageseinsatzplanung von Kraft-Wärme-Kopplungssystemen unter Berücksichtigung von Kurzzeitwärmespeichern*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1986).
- [Due85] P. Düwall, M. Lange-Hüsken, G. Zybelle, *Lastganglinien der Haushalte*, RWEinformiert 215, Sonderdruck aus: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 84, Heft 25 (1985).
- [Duf76] J.A. Duffie, S.A. Klein, *Sonnenenergie, Thermische Prozesse*, aus dem amerik. übersetzt von G. Bräunlich, Udo Pfriemer, München (1976).
- [Duf80] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, New York (1980).
- [Ebe86] K.F. Ebersbach, *Bestimmung der betrieblichen Wärmepotentiale für die Mehrfachnutzung*, in: H.H. Ingwersen (Hrsg.), *Mehrfachnutzung industrieller Prozeßwärme*, Technischer Verlag Resch, Gräfelfing, München (1986).
- [Eck95] H. Eck, Th. Bruckner, Datenerhebung in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Würzburg (1995).
- [Els73] N. Elsner, *Grundlagen der Technischen Thermodynamik*, Bertelsmann Universitätsverlag, Berlin (1973).
- [E&M96] Energie & Management, Zeitung für den Energiemarkt vom 1.4.1996, S. 1-2 (1996).
- [End87] K. Endrullat, P. Epinatjeff, D. Petzold, H. Protz, *Wärmetechnik*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1987).
- [Enq90] Deutscher Bundestag (Hrsg.), *Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre, Dritter Bericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages*, Heger, Bonn (1990).
- [Enq94] Deutscher Bundestag (Hrsg.), *Mehr Zukunft für die Erde, Schlußbericht der Enquete-Kommission des 12. Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“*, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft, Bonn (1994).
- [Ent96] J. Entress, *Solar District Heating in Combination with Decentral Cogeneration Systems*, EuroSun '96 Proceedings, Freiburg (1996).

- [Epp79] K. Epple, *Theorie und Praxis der Systemanalyse, Eine empirische Studie zur Überprüfung der Relevanz und Praktikabilität des Systemansatzes*, Dissertation, Univ. Konstanz, Minerva Publikation, München (1979).
- [Fal76] G. Falk, W. Ruppel, *Energie und Entropie*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1976).
- [Far93] P. Faross, *Die geplante CO₂-/Energiesteuer in der Europäischen Gemeinschaft*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* **43**, 295-298 (1993).
- [Fen79] H. Fendt, *Regionale Energieplanung*, V. Florentz, München (1979).
- [FfZ96] Forum für Zukunftsenergien, *Hat Kraft-Wärme-Kopplung Zukunft?*, Veranstaltungsbesprechung in: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* **46**, 109-111 (1996).
- [Fis81] L.G. Fishbone, H. Abilock, *MARKAL, A Linear-Programming Model for Energy Systems Analysis: Technical Description of the BNL Version*, *Int. J. of Energy Research* **5**, 353-375 (1981).
- [Fis83] L.G. Fishbone, G. Giesen, G. Goldstein, H.A. Hymen et al, *User's Guide for MARKAL*, Brookhaven National Laboratory, BNL-51701, Upton, New York (1983).
- [Fou81] L.R. Foulds, *Optimization Techniques*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1981).
- [Fou92] L.R. Foulds, *Graph Theory Applications*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1992).
- [Fri84] J. Fricke, W.L. Borst, *Energie*, Oldenbourg, München, Wien (1984).
- [Fri89] J. Fricke, U. Schüßler, R. Kümmel, *CO₂-Entsorgung*, *Physik in unserer Zeit* **20**, 168 (1989).
- [Fri92] J. Fricke, U. Heinemann, E. Hümmer, *Nutzung von Umweltenergie in wärmepumpenbetriebenen Warmwasser- und Heizungssystemen*, InformationsZentrum Wärmepumpe + Klimatechnik (IZW) im Fachinformationszentrum Karlsruhe, IZW Bericht 1/92 (1992).
- [Gag80] R.A. Gaggioli (Ed.), *Thermodynamics: Second Law Analysis*, Am. Chem. Society, ACS Symposium Series 122, Washington D.C. (1980).
- [Gag83] R.A. Gaggioli (Ed.), *Efficiency and Costing: Second Law Analysis of Processes*, Am. Chem. Society, ACS Symposium Series 235, Washington D.C. (1983).
- [Gal87] T. Gal (Hrsg.), *Grundlagen des Operations Research 2*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1987).
- [Geo87] A.M. Geoffrion, *An Introduction to Structured Modeling*, *Management Science* **33**, No.5, 547-588 (1987).
- [Geo88] A.M. Geoffrion, *The Formal Aspects of Structured Modeling*, *Operations Research* **37**, No.1, 30-51 (1988).
- [Ger94] H.J. Gerster, G. Stein, *Das IKARUS-Instrumentarium*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* **8**, 499-500 (1994).

- [Ger95] D. Gerhardt, A. Ziolek, M. Mohr, H. Unger, *Abbildung und Bewertung kommunaler Energieversorgungsmöglichkeiten mit Hilfe eines wissensbasierten Systems*, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Berlin 1995, S. 1997 (1995).
- [Ger96] D. Gerhardt, A. Ziolek, M. Mohr, H. Unger, *Handlungsempfehlungen zum Einsatz erneuerbarer Energieträger in der kommunalen Energieversorgung mit Hilfe eines wissensbasierten Systems*, Tagungsband der Veranstaltung *Energie und Umwelt '96*, 13./14.3.96, Technische Universität Bergakademie Freiberg (1996).
- [Goo87] W. van Gool, *The Value of Energy Carriers*, *Energy* **12**, 509 (1987).
- [Goo89] W. van Gool, A.J. Hoogendoorn, R. Kümmel, H.-M. Groscurth, *Exergy Analysis and Optimization of Energy Systems*, in: W.D. Jackson (Ed.), *Proceedings of the 24th Inter-society Energy Conversion Engineering Conference (IECEC '89)*, Institut of Electrical and Electronics Engineers, New York, pp. 1923-1928 (1989).
- [Goo90] W. van Gool, A.J. Hoogendoorn, *Basic Aspects of Exergy Analysis and Exergy Optimization*, Paper presented at the Florence World Energy Research Symposium, Florence (1990).
- [Goo92] W. van Gool, *Exergy Analysis of Industrial Processes*, *Energy* **17**, 791-803 (1992).
- [Gor78] G. Gordon, *System Simulation*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1978).
- [Gra88] R.-D. Grass, W. Stützel, *Volkswirtschaftslehre*, Vahlen, München (1988).
- [Gro87] H.-M. Groscurth, *Thermodynamische Grenzen der Energieoptimierung*, Diplomarbeit, Univ. Würzburg (1987).
- [Gro89a] H.-M. Groscurth, R. Kümmel, W. van Gool, *Thermodynamic Limits to Energy Optimization*, *Energy* **14**, 241 (1989).
- [Gro89b] H.-M. Groscurth, R. Kümmel, *The Cost of Energy Optimization: A Thermoeconomic Analysis of National Energy Systems*, *Energy* **14**, 685 (1989).
- [Gro90] H.-M. Groscurth, R. Kümmel, *Thermoeconomics and CO₂ Emissions*, *Energy* **15**, 73 (1990).
- [Gro91] H.-M. Groscurth, *Rationelle Energieverwendung durch Wärmerückgewinnung*, Physica-Verlag, Heidelberg (1991).
- [Gro92] H.-M. Groscurth, Th. Bruckner, R. Kümmel, *Integrated Energy Management with ECCO*, Proc. of the Conference: *Next Generation Technologies for Efficient Energy End Uses and Fuel Switching*, Dortmund, April 7-9, 1992, 847-860 (1992).
- [Gro93] H.-M. Groscurth, Th. Bruckner, R. Kümmel, *Energy, Cost and Carbon Dioxide Optimization of Disaggregated, Regional Energy Supply Systems* (Invited Paper), *Energy* **18**, 1187-1205 (1993).
- [Gro95] H.-M. Groscurth, Th. Bruckner, R. Kümmel, *Modeling of Energy-Services Supply Systems*, *Energy* **20**, 941 (1995).
- [Gro96] H.-M. Groscurth, Th. Bruckner, *Technical and Economic Competition of Advanced Energy Technologies*, in: E.W.A. Lingeman (Ed.), *Economy-Energy-Entropy*, Proc. of the Europhysics Study Conference, European Physical Society, Geneva, May 10-13, 1996, 137-149 (1996).

- [Han76] F. Hanssmann, *Energiemodelle kritisch gesehen*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen **26**, 291 (1976).
- [Han92] M. Hanselmann, R. Friedrich, R. Hönes, D. Schaal, *Tageseinsatzoptimierung mit dem Programmsystem PROFAKO*, Elektrizitätswirtschaft **42**, Nr. 9, 515-522 (1992).
- [Har65] F. Harary, R.Z. Norman, D. Cartwright, *Structural Models: An Introduction to the Theory of Directed Graphs*, Wiley, New York, London, Sydney (1965).
- [Hel94] T. Hellwig, E. Thöne, *Omnium: Ein Verfahren zur Optimierung der Abwärmenutzung*, Brennstoff-Wärme-Kraft **46**, 393-397 (1994).
- [Hen94] D. Henning, *Energy Systems Optimisation Applied to Local Swedish Utilities*, Linköping Studies in Science and Technology, Thesis No. 434, Division of Energy Systems, Department of Mechanical Engineering, Linköping Institute of Technology, Linköping (1994).
- [Hes90] Hessisches Ministerium für Wirtschaft und Technik (Hrsg.), *Energiesparpotentiale im Gebäudebestand*, Studie erstellt vom Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt (1990).
- [Hes95] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (Hrsg.), *Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 2.1*, Wiesbaden (1995).
- [Hol83] K.F. Holler, *Heizungstechnik*, in: H.-L. von Cube, *Handbuch der Energiespartechniken*, Band 2, C.F. Müller, Karlsruhe, S. 6-32 (1983).
- [Hom77] G. Homonnay, *Fernheizungen*, Müller-Verlag, Karlsruhe (1977).
- [Hoo89] S.V. Hoover, R.F. Perry, *Simulation – A Problem-Solving Approach*, Addison-Wesley, New York, Amsterdam, Bonn (1989).
- [Hot42] H.C. Hottel, B.B. Woertz, *Performance of Flate-Plate Solar Heat Collectors*, Trans. ASME **64**, 91 (1942).
- [Hot55] H.C. Hottel, A. Whillier, *Evaluation of Flate-Plate Collector Performance*, Trans. of the Conference on the Use of Solar Energy, Vol. 2, Thermal Processes, 74, University of Arizona (1955).
- [Hue95] E. Hümmer, Th. Bruckner, *Datenerhebung in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Würzburg* (1995).
- [IEA93] Internationale Energie Agentur, *Weltenergieausblick*, IEA, Paris (1993).
- [IEA95] International Energy Agency ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme), *Global thinking and local energy planning*, etsap-news, No. 6 (December), p.1-3 (1995).
- [Int71] M.D. Intrilligator, *Mathematical Optimization and Economic Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1971).
- [Jel89] R.J. Jelitto, *Theoretische Physik 6: Thermodynamik und Statistik*, Aula-Verlag, Wiesbaden (1989).
- [Jor73] G. Jordan-Engeln, F. Reutter, *Numerische Mathematik für Ingenieure*, Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich (1973).

- [Ken84] W.F. Kenney, *Energy Conservation in the Process Industry*, Academic Press, Orlando, New York (1984).
- [Kir76] H. Kirn, A. Hadenfeldt, *Wärmepumpen*, C.F. Müller, Karlsruhe (1976).
- [Kir83] H. Kirn, *Grundlagen der Wärmepumpen-Technik*, C.F. Müller, Karlsruhe (1983).
- [Kle91] W. Klenke, *Der Exergiebegriff und die Grenzen seiner Anwendung*, Brennstoff-Wärme-Kraft **43**, 276-282 (1991).
- [Kno85] H.W. Knobloch, H. Kwakernaak, *Lineare Kontrolltheorie*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1985).
- [Kof88] C. Kofod, M. Lange-Hüsken, J.G. Paradinas, L. Voldhaug, *Untersuchungen von Haushaltslastkurven in europäischen Ländern*, RWEinformiert 236 (1988).
- [Koo51] T.C. Koopmans, *Activity Analysis of Production Allocation*, Wiley, New York (1951).
- [Kor83] J. Korek, *Kraft-Wärme-Kopplung, Blockheizkraftwerke*, in: H.L. von Cube (Hrsg.), *Handbuch der Energiespartechiken, Band 2*, C.F. Müller, Karlsruhe, S. 353-406 (1983).
- [Kre87] F. Kreith, M.S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, Harper & Row, New York (1987).
- [Kre93] R. Kretschmer, *Wärmespeicher in der industriellen Energiewirtschaft*, Vortrag gehalten auf der VDI-Tagung *Fortschrittliche Energiewandlung und -Anwendung*, Bochum (1993).
- [Kro74] A. Kroms, *Zur Auslegung der Heizkraftaggregate*, ÖZE **27**, 74-83 (1974).
- [Kue91] R. Kümmel, U. Schüßler, *Heat equivalents of noxious substances: a pollution indicator for environmental accounting*, Ecological Economics **3**, 139-156 (1991).
- [Kue92] R. Kühner, *Prozeßanalytische Energiemodelle*, IER Stuttgart, unveröffentlicht (1992), s.a. R. Kühner, *Ein erweiterter prozeßtechnischer Modellbildungsansatz für die energiewirtschaftliche Planung*, in: U. Derigs et. al (Hrsg.), *Operations Research Proceedings 1996 : selected papers of the Symposium on Operations Research*, Braunschweig, September 4-6, 1996, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1996).
- [Kue94] R. Kümmel, Th. Bruckner, *Energie, Entropie - Ökonomie, Ökologie*, in: Ch. Pfister (Hrsg.), *Das 1950er Syndrom*, Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 129-148 (1994).
- [Kue95] R. Kümmel, H.-M. Groscurth, Th. Bruckner, *Energy, Cost, and Emission Optimization*, presented at the "Forum Fyziku" of the Czech Physical Society, Prague, April 20, 1995, *Československý časopis pro fyziku* **45**, 190-200 (1995).
- [Kug90] K. Kugeler, P.-W. Phlippen, *Energietechnik*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1990).
- [Kun94] A. Kunkel, *Dynamische Optimierung eines Energieversorgungssystems mit Wärmespeicher*, Diplomarbeit, Univ. Würzburg, unveröffentlicht (1994).
- [Kun96] A. Kunkel, H. Schwab, Th. Bruckner, R. Kümmel, *Kraft-Wärme-Kopplung und innovative Energiespeicherkonzepte*, Brennstoff-Wärme-Kraft **48**, 54-60 (1996).
- [Lar78] R.E. Larson, J.L. Casti, *Principles of Dynamic Programming, Part I*, Marcel Dekker Inc., New York, Basel (1978).

- [Lar82] R.E. Larson, J.L. Casti, *Principles of Dynamic Programming, Part II*, Marcel Dekker Inc., New York, Basel (1982).
- [Laz86] R.M. Lazzarin, L. Schibuola, *Performance Analysis of Heating Plants Equipped with Condensing Boilers*, J. Heat Recovery Systems **6**, Vol. 4, 269-276 (1986).
- [Ley82] K. Leyendeckers, *Regelung und Steuerung der Gasversorgung der Motoren und der Strom-Wärmeabgabe*, in: Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), *Blockheizkraftwerke, Planung und Betriebserfahrungen*, Int. Fachtagung, 11./12.3.1982, Heidelberg, Vulkan-Verlag, Essen, S. 33-37 (1982).
- [Loo89] P. Loose, *Atmosphärische Gaskessel im Teillastbetrieb*, Heizung-Lüftung/Klima-Haustechnik (HLH) **40**, Nr.3, 123-128 (1989).
- [Mar88] G. Marquardt, H. Hübner, T. Nadler, Ch. Seifert, A. Trogisch, *Wärmerückgewinnung aus Fortluft*, VEB Verlag Technik, Berlin (1988).
- [Mes84] S. Messner, *User's Guide for the Matrix Generator of MESSAGE II- Part1: Model Description and Implementation Guide*, International Institute for Applied Systems Analysis, WP 84-71, Laxenburg, Österreich (1984).
- [Mey86] M. Meyer, *Operations Research, Systemforschung*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (1986).
- [Mie81] J.A. Miedema, *Cycle; a General Computer Code for Thermodynamic Cycle Computations*, *Studies of Cogeneration in District Heating Systems*, Dissertation, Technische Hochschule Delft (1981).
- [Mis85] H.J. Miser, E.S. Quade (Hrsg.), *Handbook of Systems Analysis, Vol. I*, North Holland, New York, Amsterdam (1985).
- [Moh95] M. Mohr, M. Skiba, D. Gerhardt, A. Ziolk, H. Unger, *Kostenminimierter Energiemix regenerativer Energieträger*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen **45**, 290-294 (1995).
- [Naj72] H. Najork, *Probleme des praktischen Einsatzes von Wärmepumpen*, Luft- und Kältetechnik **3**, 115-119 (1972).
- [Nas87] P.-M. Nast, K.R. Schreitmüller, *Thermische Nutzung der Sonnenenergie. Einzelbericht zum Energiegutachten Baden-Württemberg*, DLR, Stuttgart (1987).
- [Neu77] K. Neumann, *Operations Research Verfahren, Band II, Dynamische Optimierung, Lagerhaltung, Simulation, Warteschlangen*, Carl Hauser Verlag, München, Wien (1977).
- [Nie96] M. Nielsen, *UHC/metan-emission fra gasmotorbaserede kraftvarme-installationer*, Dansk Gasteknisk Center a/s, Hørsholm, Danmark (1996).
- [Ode94] C. Oder, H.-D. Haasis, O. Rentz, A. Galinis, V. Miskinis and J. Vilemas, *Cost-Efficient Emissions Reduction Strategies for Lithuania*, Energy **19**, 149-163 (1994).
- [Pap91] M. Papageorgiou, *Optimierung*, Oldenbourg Verlag, München, Wien (1991).
- [Pil84] W. Piller, M. Rudolph, *Kraft-Wärme-Kopplung: Zur Theorie und Praxis der Kostenrechnung*, VWEW-Verlag, Frankfurt (1984).
- [Pra92] St. Prata, *C++, Einführung in die objektorientierte Programmierung*, te-wi Verlag, München (1992).

- [Pre92] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge (1992).
- [Pro92] PROGNOSE, *Energiereport 2010*, PROGNOSE AG, Stuttgart (1992).
- [Rei85] F. Reif, *Statistische Physik und Theorie der Wärme*, de Gruyter, Berlin, New York (1985).
- [Res93] W. Ressing, *Die CO₂-/Energiesteuer – Chance oder Risiko für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft?*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* **43**, 299-306 (1993).
- [Reu90] A. Reuter, A. Voss, *Tools for Energy Planning in Developing Countries*, *Energy* **15**, 705-714 (1990).
- [Ric82] F. Richarts, K. Michler, *Wärmepumpenanlagen für die Raumheizung*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1982).
- [Ric92] D.M. Richter, *Zum Leistungsbedarf energiewandelnder Anlagen*, *Brennstoff-Wärme-Kraft* **44**, 1/2, 43-46 (1992).
- [Ros86] L. Rosa, R. Tosato, *Seasonal Efficiency Simulation and Energy Quality of Gas Boilers*, Proc. of the 21st IECES Conf., New York, pp. 1-6 (1986).
- [Ros92] M.A. Rosen, *Evaluation of Energy Utilization Efficiency in Canada Using Energy and Exergy Analysis*, *Energy* **17**, 339-350 (1992).
- [Sau83] E. Sauer, R. Zeise, *Energietransport, -speicherung und -verteilung*, Resch-Verlag, Gräfelfing (1983).
- [Sau84] E. Sauer, *Abwärmetechnik*, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1984).
- [Sch74] Ch. Schneeweiß, *Dynamisches Programmieren*, Physica-Verlag, Würzburg (1974).
- [Sch80] H.P. Schwefel, *Optimierende Simulation – Ein Instrumentarium für die Langfristplanung*, in: A. Voß, K. Schmitz (Hrsg.), *Energiemodelle für die BRD*, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1980).
- [Sch89] H. Schaefer, *Messen in der Energieanwendung*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1989).
- [Sch90] H. Schaefer, *Technische Kriterien und Grenzen rationeller Energienutzung*, in: *Wärmenutzungsverordnung*, VDI Bericht 857, S. 11-29, VDI Verlag, Düsseldorf (1990).
- [Sch90a] U. Schüssler, R. Kümmel, *Schadstoff-Wärme-Äquivalente als Umweltbelastungsindikatoren*, *ENERGIE* **42**, 40-49 (1990).
- [Sch91] H.J. Schneider, *Lexikon der Informatik und Datenverarbeitung*, Oldenbourg, München, Wien (1991).
- [Sch91a] H. Schwarz, *Nichtlineare Regelungssysteme*, Oldenbourg, München, Wien (1991).
- [Sch93] Ch. Schmid, *Heizungs- und Lüftungstechnik*, Verlag der Fachvereine, Zürich, Teubner, Stuttgart (1993).
- [Sch94] H.-W. Schiffer, *Deutscher Energiemarkt '93*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* **44**, 132-151 (1994).

- [Sch94a] H. Schwab, *Dynamische Optimierung von regionalen Energieversorgungssystemen unter Einbeziehung von (supraleitenden) Energiespeichern*, Diplomarbeit, Univ. Würzburg, unveröffentlicht (1994).
- [Sch95] E.-R. Schramek, *Recknagel-Sprenger-Schramek, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, Oldenbourg, München, Wien (1995).
- [Seb81] H.-J. Sebastian, N. Sieber, *Diskrete Dynamische Optimierung*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig (1981).
- [Sei76] K. Seiffert, *Wärmeschutz in der Energie- und Verfahrenstechnik*, Resch-Verlag, Gräfelfing (1976).
- [Sim90] K.-H. Simon, L. Rausch, U. Fritsche, *GEMIS - Ein effizientes Computerinstrument zur Analyse von Umweltfolgen von Energiesystemen*, in: W. Dillmann, A. Jaeschke (Ed.), *Informatik für den Umweltschutz*, Springer, Berlin, S. 723-732 (1990).
- [Soe79] B. Sørensen, *Renewable Energy*, Academic Press, London, New York (1979).
- [Spa92] M.R. Spakovsky, V. Curti, M. Batato, *The Performance Optimization of a Cogeneration/Heat Pump Facility*, Proceedings of 1992 Int. Symp. on Efficiency, Costs, Optimization and Simulation of Energy Systems, ECOS 92, ASME, Zaragoza, Spain, 1, 365-374 (1992).
- [Spo90] B. Sporckmann, *Elektrofahrzeuge als Luftschadstoffbremse?*, RWEinformiert 248, Sonderdruck aus „Energiewirtschaftliche Tagesfragen 40, Heft 6, 1990“ (1990).
- [Ste93] G. Stein, H.-F. Wagner, *Das IKARUS-Projekt*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 4, 219-222 (1993).
- [Sto90] J. Stoer, R. Bulirsch, *Numerische Mathematik 2*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1990).
- [Tau84] A. Tautz et al., *Fernwärmeschiene Niederrhein*, BMFT Forschungsbericht T84-167, Univ. Dortmund (1984).
- [Thi85] H. Thieme, E. Windorfer, *EDV-Programm zur Planung der Strombeschaffung und Fernwärmeerzeugung*, Brennstoff-Wärme-Kraft 37, 471-475 (1985).
- [Tro79] H. Tröschler, *Systemtechnische Methoden zur Untersuchung der Möglichkeiten zentraler und dezentraler Stromerzeugung unter besonderer Berücksichtigung der Energiespeicherung und der Kraft-Wärme-Kopplung*, Dissertation, Univ. Essen (1979).
- [Tsa94] G. Tsatsaronis (Ed.), *Invited Papers on Exergoeconomics*, Energy 19, 279-381 (1994).
- [UEC] UECONSULT GmbH (Hrsg.), *Integrierte Gebäudesimulation mit TAS*, Frechen.
- [Unb90] R. Unbehauen, *Systemtheorie*, Oldenbourg, München, Wien (1990).
- [UN92] United Nations Environment Programme (UNEP)(Ed.), *UNEP Greenhouse Gas Abatement Costing Studies, Phase One Report*, UNEP Collaborating Centre on Energy and Environment, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark (1992).
- [UOW76] University of Wisconsin, Engineering Experimental Station (Hrsg.), *TRNSYS - A Transient Simulation Program*, Report Nr.38 (1976).
- [Val94] A. Valero, *Application of the Exergetic Cost Theory to the CGAM Problem*, Energy 19, 365-381 (1994).

- [Vog96] H.-H. Vogel, *Feuerungstechnischer Wirkungsgrad und Abgasverlust von Gasbrennwertkesseln*, Brennstoff-Wärme-Kraft **48**, 70-78 (1996).
- [Voo84] E. van der Voort, E. Donni, C. Thonet et al, *Energy Supply Modelling Package EFOM 12-C, Mark I CARBAY*, Louvain-la-Neuve, Belgien (1984).
- [Wal87] H. Walther, G. Nägler, *Graphen- Algorithmen-Programme*, Springer, Wien, New York (1987).
- [Wal88] M. Walbeck, H.-J. Wagner, D. Martinsen, V. Bundschuh, *Energie und Umwelt als Optimierungsaufgabe: Das MARNES-Modell*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, (1988).
- [WEC92] World Energy Council, *Energy Dictionary*, Jouve SI, Paris, (1992).
- [Wel95] H. Welsch, F. Hoster, *General-Equilibrium Analysis of European Carbon/Energy Taxation*, Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften **115**, 275-303 (1995).
- [Win 91] D. Winje, D. Witt, *Energiewirtschaft*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1991).
- [Wit88] L.C. Witte, P.S. Schmidt, D.R. Brown, *Industrial Energy Management and Utilization*, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, New York, London (1988).
- [Wup95] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, *Zukunftsfähiges Deutschland*, Kurzfassung, Studie im Auftrag des Bundes für Umwelt und Naturschutz Deutschland und des Bischöflichen Hilfswerkes MISEREOR, Bonn (1995).
- [WVV94] Würzburger Versorgungs- und Verkehrs-GmbH, *Geschäftsbericht 1993*, Würzburg (1994).
- [Zim87] H.-J. Zimmermann, *Operations Research, Methoden und Modelle*, Vieweg, Braunschweig (1987).

NACHWORT

Ich freue mich, an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. Reiner Kümmel Danke sagen zu können. Danke zum einen für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung der Arbeit an dieser Dissertation, die er mit ständiger Diskussionsbereitschaft begleitet hat. Zum anderen aber auch für die vielen interessanten Gespräche im Umkreis von „Energie und Entropie – Ökonomie und Ökologie“. Durch sie lernte ich verstehen, welchen Beitrag die Theoretische Physik zum tieferen Verständnis der Ursachen von Wirtschaftswachstum und Umweltproblemen zu leisten vermag. Die dabei gewonnenen Einsichten bilden das Fundament auf dem diese Arbeit ruht.

Herrn Dr. H.-M. Groscurth möchte ich herzlich danken für das große Interesse am Fortgang der Arbeit und für die konstruktive und freundschaftliche Kritik, die viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe von Prof. Reiner Kümmel, mit denen ich in den letzten Jahren zusammenarbeiten durfte, möchte ich Danke sagen. Die schönen Jahren, die ich gemeinsam mit meinen Zimmergenossen Karlheinz Lier, Stephan Hofmann und Dietmar Lindenberger erleben durfte, werden mir unvergeßlich bleiben.

Für viele Anregungen und für zahlreiche Gelegenheiten zur Diskussion möchte ich Herrn Dipl. Phys. Alexander Kunkel, Herrn Dipl. Phys. Hubert Schwab sowie Herrn Dipl.-Ing. Rolf Kühner (IER, Stuttgart) herzlich danken.

Die Modellanwendung wäre ohne die Bereitstellung von Daten durch die Stadtwerke Würzburg, das Stadtplanungsamt Würzburg und die Firmenleitung der Firma Unkel nicht möglich gewesen. Für die Mitarbeit bei der Datenerhebung bin ich Herrn Dipl. Phys. Ernst Hümmer, Herrn Dr. Hagen Eck, Herrn Dipl. Phys. Achim Weißbeck und Herrn Dipl.-Ing. Klaus Lang (Fa. Unkel) zu Dank verpflichtet.

Ohne die finanzielle Absicherung der Anfangsphase des Promotionsprojektes durch die Graduiertenförderung des Cusanuswerks sowie ohne die finanzielle Unterstützung der Arbeit durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Beiden Institutionen möchte ich hiermit herzlich danken.

Last not least möchte ich meiner Frau Sabine nicht nur für die Durchsicht des Manuskriptes, sondern vor allem für die viele Geduld, mit der sie insbesondere das letzte Jahr meines Promotionsprojektes begleitet hat, ein liebevolles Danke sagen.

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

gemäß §6 Abs. 1 Ziff. 3 und 7
der Promotionsordnung der
Fakultät für Physik und Astronomie der Universität
Würzburg

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, daß ich die Dissertation selbständig und ohne die Hilfe eines Promotionsberaters angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Die Dissertation wurde bisher weder vollständig noch teilweise einer anderen Hochschule mit dem Ziel, einen akademischen Grad zu erwerben, vorgelegt.

Am 23. Juni 1992 wurde mir von der Universität Würzburg der akademische Grad „Diplom-Physiker (Univ.)“ verliehen. Weitere akademische Grade habe ich weder erworben noch versucht zu erwerben.

Würzburg, den 17.12.1996

(Thomas Bruckner)