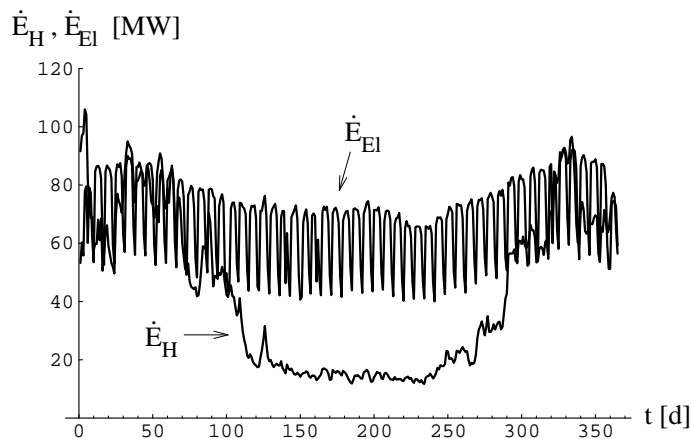
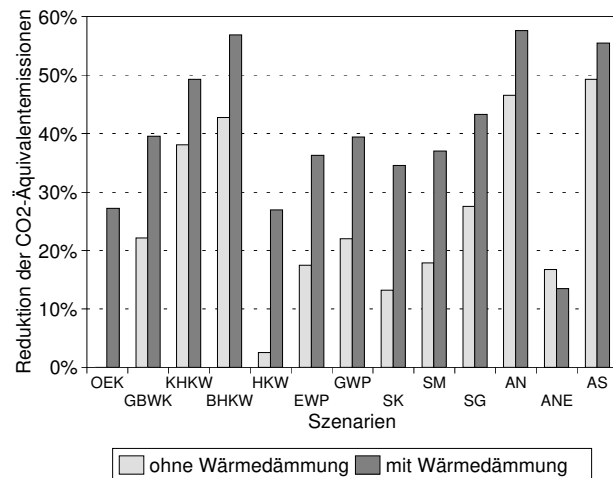

Benutzerhandbuch deeco



Version 1.0



**Dynamische Energie-, Emissions- und Kosten-
optimierung regionaler Energiesysteme**

Thomas Bruckner

Alle Rechte an *deeco* sowie an der das Computerprogramm begleitenden Dokumentation liegen beim Autor. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Autors verändert, reproduziert, elektronisch verarbeitet oder verbreitet werden. Ausgenommen davon ist lediglich die Verwendung zur Unterrichtsgestaltung.

Kontakt:

Dr. Thomas Bruckner
Institut für Energietechnik
Technische Universität Berlin
Marchstraße 18
D-10587 Berlin

E-Mail: bruckner@iet.tu-berlin.de

© 2001 Thomas Bruckner, Berlin

Vorwort

Verfahren der rationellen Energieverwendung sowie der Nutzung erneuerbarer Energiequellen bieten vielfältige und wohlerprobte Möglichkeiten, Ressourcen zu schonen und die Emission von Schadstoffen und klimawirksamen Gasen zu vermindern. Die sinnvolle Integration regenerativer Energiequellen in moderne Energieversorgungssysteme stellt jedoch für den planenden Ingenieur, vor allem aufgrund der Witterungsabhängigkeit des Angebotes regenerativer Energiequellen, eine Herausforderung dar, der nicht mit der Anwendung konventioneller auf Jahresdauerlinien basierender Planungsverfahren entsprochen werden kann. Notwendig ist statt dessen der Einsatz innovativer computergestützter Verfahren, die in der Lage sind, die zeitlichen Fluktuationen des Strom- und Wärmebedarfs, der Verfügbarkeit nutzbarer Abwärme sowie des Angebotes regenerativer Energiequellen angemessen zu berücksichtigen.

Das vom Autor am Institut für Theoretische Physik der Universität Würzburg in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr. R. Kümmel und Herrn Dr. H.-M. Groscurth erstellte Computermodell *deeco* (dynamic energy, emission, and cost optimization) erfüllt die hier genannten Anforderungen. *deeco* dient zur dynamischen Energie-, Emissions- und Kostenoptimierung lokaler bzw. regionaler Energieversorgungssysteme und 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); Wärmeübertragernetzwerke 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 Kraftwerk-parks 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 eine rekursiv-dynamische 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 lokaler, kommunaler und regionaler Energieversorgungssysteme sowie zur Erstellung entsprechender Energiekonzepte dar.

Das vorliegende Handbuch soll die wissenschaftliche Beschreibung in [Bru96] ergänzen und dem Nutzer Hilfestellung bei der Anwendung des Modells geben. Nach einem kurzen inhaltlichen Überblick über die Eigenschaften des Modells (s. Kap. 1) sowie einem knapp gehaltenem Tutorial (s. Kap. 2) wird in Kap. 3 und 4 dargestellt, mit welchen Parameterwerten das Programm gestartet werden kann, in welchem Format die Dateneingabe zu erfolgen hat und welche Struktur die Ausgabedatenfiles besitzen. In Teil II des Handbuches erfolgt dann eine inhaltliche Diskussion der erforderlichen Eingabedaten, die auf einer umfassenden Beschreibung der in *deeco* enthaltenen Prozeßmodulbibliothek (Kap. 5) basiert. Kapitel 7 ist der Berechnung spezifischer Kostendaten gewidmet. Teil III gibt an, welche Größen das Modell als Ausgabedaten liefert und wie diese zu interpretieren sind. Im Anhang (Kap. A) ist eine detaillierte Beschreibung des Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungsmodells *deeco* wiedergegeben, die den Überblick in Kap. 1 ergänzt und darüber hinaus dem interessierten Anwender einen Einblick in die Funktionsweise des Modells erlaubt. Eine Notationsliste, in der alle Größen aufgeführt sind, die an mehr als einer Stelle in der Dokumentation vorkommen findet sich in Anhang B. Das Handbuch schließt mit einem Blick auf die Entstehungs- und Portierungsgeschichte von *deeco*.

Ein umfassendes Verständnis der in [Bru96] sowie im Anhang (Kap. A) wiedergegebenen wissenschaftlichen Grundlagen ist nicht Voraussetzung dafür, das Computerprogramm *deeco* - nach einer erfolgten Schulung - sinnvoll einsetzen zu können. Unverzichtbar sind jedoch energietechnische Kenntnisse, die ausreichend dafür sein müssen, das in der Programmmodulbibliothek beschriebene Verhalten derjenigen Module zu verstehen, die der Anwender untersuchen möchte. Das Handbuch wendet sich aus diesem Grund in erster Linie an die Mitarbeiter energiewissenschaftlicher Forschungseinrichtungen, energietechnischer Ingenieurbüros sowie an die der Energieagenturen und der Planungsabteilungen der Energieversorger.

Das Computermodell *deeco* wurde in der Programmiersprache C++ unter UNIX implementiert. Die graphentheoretische Abbildung der zu untersuchenden Energieversorgungssysteme in Form flexibler Netzwerke erlaubt die Anpassung des Modells an die vor Ort vorhandene Energieversorgungsstruktur ohne das dazu weitere Programmierarbeiten erforderlich wären. Die Kenntnis von C++ ist - im Gegensatz zu Grundkenntnissen in der Nutzung des Betriebssystems UNIX - deshalb nicht Voraussetzung für die Anwendung des Modells.

Im Rahmen des von der Bayerischen Forschungsförderung geförderten Projektes ISOTEG gelang es in Zusammenarbeit mit Herrn Robbie Morrison¹ (University of Otago, Dunedin, New Zealand) das gesamte, mehr als 18.000 Programmzeilen umfassende Programmpaket *deeco*, das ursprünglich auf einer Hewlett-Packard RISC 700 Series Workstation unter dem UNIX-Betriebssystem HP-UX 8.07 entwickelt wurde, auf ein aktuelles UNIX-Betriebssystem (SCO UnixWare 2.1.2 SDK) umzustellen. Dieses Unix-Betriebssystem kann ebenso wie sein Nachfolger UnixWare 7 (z.B. auch parallel zu einem Windows Betriebssystem) auf einem marktüblichen PC installiert werden und erlaubt damit die Nutzung des Programmes auf Rechnern, die (im Gegensatz zu Workstations) bei potentiellen Anwendern im allgemeinen verfügbar sind. Die von *deeco* erzeugten Ergebnisdateien besitzen - ebenso wie die zur Steuerung des Programmablaufes erforderlichen Eingabedatenfiles - Datenbankformat, wodurch eine einfache Anbindung an vor Ort verfügbare Tabellenkalkulations- und Datenbankprogramme gewährleistet ist.

Ein besonderer Schwerpunkt des vorliegenden Handbuches liegt auf der Beschreibung der in *deeco* integrierten Module zur Abbildung energietechnischer Umwandlungsprozesse. Dies ist erforderlich, da *deeco* im Gegensatz zu vielen anderen Energieoptimierungsmodellen die Prozesse nicht grob vereinfachend durch statische Kenngrößen (z.B. durchschnittliche Wir-

¹Gegenwärtige Adresse: Institut für Energietechnik, Technische Universität Berlin.

kungsgrade) beschreibt, sondern die Abhängigkeit des Brennstoffeinsatzes von intensiven Größen (z.B. Abwärme-, Bedarfs- und Wärmespeichertemperaturen) in funktionaler Form berücksichtigt. Erst dadurch wird es möglich, innovative integrierte Energiesystemvarianten zu untersuchen, in denen energetische Prozesse (z.B. durch die Kombination von Techniken zur rationellen Energieverwendung mit solchen zur Nutzung regenerativer Energiequellen) in teilweise unkonventioneller Art und Weise miteinander verknüpft sind. Durch technische Synergie- und Konkurrenzeffekte kommt es dabei, wie mit *deeco* gezeigt werden konnte, zu einer gegenseitigen Beeinflussung der verschiedenen über das Energieversorgungsnetzwerk miteinander verknüpften Prozesse, die die Verwendung von in anderen Systemzusammenhängen empirisch ermittelter Wirkungsgrade vereitelt. Die funktionale Form der oben angesprochenen Zusammenhänge wird von *deeco* in Form generischer Module vorgegeben. Die in diese Zusammenhänge eingehenden Parameter können jedoch vom Anwender unter Heranziehung der nun vorhandenen Dokumentation situationsgerecht angepasst werden.

Durch die Verwendung der objektorientierten Programmiersprache C++ sowie dem Einsatz graphentheoretischer Konzepte gelang es, ein Optimierungsprogramm zu erstellen, das auch in Zukunft ohne Modifikation am Programmkern leicht durch eine Ergänzung der Modulbibliothek erweitert werden kann. Die im vorliegenden Handbuch wiedergegebene Beschreibung der Modulbibliothek kann aus diesem Grund nur eine Momentaufnahme darstellen. Sobald sich neu implementierte Module, wie z.B. die kürzlich erstellten Module für Photovoltaik- und Windenergieanlagen, im praktischen Einsatz bewährt haben, werden diese in die ständig aktualisierte Online-Version dieses Handbuches integriert.

Aufgrund seiner hervorragenden Diplomarbeit zu den informationstechnischen Aspekten des Modells *deeco*, deren Kenntnis bereits im Zusammenhang mit der Portierung von *deeco* sehr hilfreich war, wurde Herrn Robbie Morrison von der neuseeländischen Foundation for Research, Science & Technology ein „Bright Future Top-Achiever Doctoral Scholarship“ gewährt. Im Rahmen dieser Förderung wird derzeit eine XML-basierte Oberfläche für *deeco* geschaffen, die von jedem Rechner aus über das Internet eine Nutzung der auf einem leistungsfähigen Server in Berlin installierten PC-Version von *deeco* ermöglicht. Dadurch entfällt für den Anwender die Notwendigkeit, das Betriebssystem SCO UnixWare selbst zu erwerben, was die Benutzerfreundlichkeit von *deeco* weiter erhöhen wird.

Abschließend möchte ich allen herzlich danken, die durch vielfältige Unterstützung oder aktive Mitarbeit an der Entstehung, Portierung und Weiterentwicklung von *deeco* beteiligt waren:

Prof. Dr. R. Kümmel	Institut für Theoretische Physik, Universität Würzburg
Dr. H.-M. Groscurth	Hamburgische Electricitäts-Werke (HEW), Hamburg
Dr. D. Lindenberger	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln, Köln
MSc R. Morrison	University of Otago, Dunedin, New Zealand
Dipl.-Ing. J. Bruhn	Institut für Energietechnik der TU Berlin
Dipl. Phys. H. Schwab	Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung, Würzburg

Mein besonderer Dank gilt darüber hinaus der Deutschen Forschungsgemeinschaft, den Stadtwerken Würzburg und der Bayerischen Forschungstiftung für die finanzielle Unterstützung der Entwicklung und exemplarischen Anwendung des Modells *deeco*. Durch die Finanzierung der Portierung auf eine PC-Plattform und der Erstellung des vorliegenden Handbuches hat die Bayerische Forschungstiftung gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zum Technologietransfer geleistet, so daß das Programm nun auch außerhalb des akademischen Bereiches Früchte tragend zur Unterstützung energietechnischer Investitions- und Betriebsführungsentscheidungen im liberalisierten Markt vor dem Hintergrund der Herausforderung der Nachhaltigkeit und des Klimaschutzes eingesetzt werden kann.

Inhaltsverzeichnis

I	Überblick über das Modell und seine Anwendung	1
1	Modellüberblick	3
2	Tutorial	9
3	Allgemeines	17
3.1	Installation	17
3.2	Kommandozeilenargumente	18
3.3	Log-File	18
3.4	Fehlerbehandlung	18
4	Programmablaufsteuerungs- und Ergebnisdateien	19
4.1	Szenarien-Dateien	19
4.1.1	Szenarien-Definition: <i>projectPath/projectName.sd</i>	19
4.1.2	Szenarien-Eingabedaten: <i>projectPath/scenId.siv</i>	20
4.1.3	Szenarien-Zeitreihen-Eingabedaten: <i>scenInTsFileName.sit</i>	21
4.1.4	Szenarien-Ausgabedaten: <i>resPath/scenId.sov</i>	22
4.1.5	Szenarien-Zeitreihen-Ausgabedaten: <i>resPath/scenId.sot</i>	23
4.2	Prozeß-Dateien	23
4.2.1	Prozeß-Definition: <i>projectPath/projectName.pd</i>	23
4.2.2	Prozeß-Eingabedaten: <i>projectPath/projectName.piv</i>	23
4.2.3	Prozeß-Zeitreihen-Eingabedaten: <i>procInTsFileName.pit</i>	24
4.2.4	Prozeß-Ausgabedaten: <i>resPath/scenId.pov</i>	24
4.2.5	Prozeß-Zeitreihen-Ausgabedaten: <i>resPath/scenId.pot</i>	24
4.3	Bilanzpunkt-Dateien	25
4.3.1	Bilanzpunkt-Definition: <i>projectPath/projectName.bd</i>	25
4.4	Energiestrom-Dateien	25
4.4.1	Energiestrom-Definition: <i>projectPath/projectName.cd</i>	25

4.5	(Prozeß-) Aggregat-Dateien	26
4.5.1	(Prozeß-) Aggregat-Definition: <i>projectPath/projectName.ad</i>	26
4.5.2	Prozeß-Aggregat-Eingabedaten: <i>projectPath/projectName.aiv</i>	26
4.5.3	Prozeß-Aggregat-Ausgabedaten: <i>resPath/scenId.aov</i>	26
4.6	Zusammenfassung der Input-Output-Dateien	27
4.7	Weitere Hinweise zur Dateneingabe	27
4.7.1	Zeitunabhängige Parameter	27
4.7.2	Zielgewichtung	27
 II Eingabedaten		29
 5 Prozeßmodul-Bibliothek		31
5.1	Bedarfsprozesse	33
5.1.1	Bedarfsprozesse mit zeitunabhängigen Bedarfswerten	37
5.1.2	Bedarfsprozesse mit zeitabhängigen Bedarfswerten	40
5.1.3	Raumwärmebedarfsprozesse	43
5.2	Umwandlungsprozesse	47
5.2.1	Kessel mit konstantem Wirkungsgrad	49
5.2.2	Konventionelle Gas- oder Ölkessel	52
5.2.3	Gas- bzw. Ölbrennwertkessel	56
5.2.4	Elektrowärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)	60
5.2.5	Gaswärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)	65
5.2.6	Gegendruck-Heizkraftwerk	73
5.2.7	Entnahmekondensations-Heizkraftwerk	79
5.2.8	Gasturbinen-Heizkraftwerk	88
5.2.9	Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit konstantem Wirkungsgrad	90
5.2.10	Blockheizkraftwerke (BHKW)	92
5.3	Vernetzungsprozesse	95
5.3.1	Enthalpieanpassung durch Beimischen und Waste-Heat-Dumping	99
5.3.2	Enthalpieanpassung durch Beimischen, Waste-Heat-Dumping und Nachheizen	103
5.3.3	Wärmeübertrager mit konstanter Temperaturspreizung	108
5.3.4	Wärmetransport (Wärmestrom)	111
5.3.5	Nettoenthalpietransport durch Wärmetransportmittel	113
5.3.6	Elektrowärmepumpen (z.B. zur Abwärme- oder Solarenergienutzung)	117
5.3.7	Gaswärmepumpe (z.B. zur Abwärme- oder Solarenergienutzung)	120

5.4	Übergabeprozesse (= Import-Export-Prozesse)	125
5.4.1	Übergabeprozesse (zeitunabhängig)	128
5.4.2	Übergabeprozesse (zeitabhängig)	130
5.5	Kollektorprozesse	132
5.5.1	Thermische Nutzung der Solarenergie	133
5.6	Speicherprozesse	137
5.6.1	Gut durchmischter, temperatur-ungeschichteter Wärmespeicher	139
5.6.2	Supraleitender magnetischer Energiespeicher (SMES)	144
6	Erweiterung von <i>deeco</i> um Wärmedämmtechniken	149
6.1	Überblick	149
6.2	Modellansatz	150
6.3	Modelle der einzelnen Dämmtechniken	151
6.3.1	Konventionelle Wärmedämmung	151
6.3.2	Transparente Wärmedämmung (TWD)	151
6.3.3	Transparente Schaltbare Wärmedämmung (SWD)	151
6.3.4	Fenster austausch	152
6.4	Programmaufruf, benötigte Daten und Parameter	152
6.4.1	Programmaufruf	152
6.4.2	Eingabedaten	152
6.5	Ausgabedateien	155
6.5.1	Verbleibender Energiebedarf (.pit-file)	155
6.5.2	Energieeinsparungen durch Dämmmaßnahmen (.bil-file)	156
7	Hinweise zur Berechnung der Kosten	157
7.1	Bestimmung spezifischer Kostendaten	157
7.2	Eingabe spezifischer Kostendaten	158
III	Ausgabedaten	161
8	Interpretation der Ausgabedateien	163
9	Weitere Hinweise zur Bedeutung der Ausgabedaten	167
9.1	Allgemeine Hinweise zur Mittelwertberechnung	167
9.2	Konkrete Berechnung der Mittelwerte über den Optimierungszeitraum	170

IV	Anhänge	171
A	Modellbeschreibung und Definitionen	173
A.1	Physikalisch-technische, ökonomische und ökologische Aspekte	173
A.2	Informations- und modelltechnische Aspekte	182
A.3	Energetische Verknüpfungsstruktur energietechnischer Prozesse	187
A.4	Informationstechnische Verknüpfungsstruktur energietechnischer Prozesse . .	192
A.5	Optimierung des Energieversorgungssystems	197
A.5.1	Optimierung der verallgemeinerten variablen Kosten	198
A.5.2	Optimierung der verallgemeinerten fixen Kosten	204
A.5.3	Optimierung der verallgemeinerten Kosten	205
B	Notation	207
C	Zur Entstehungsgeschichte und Portierung des Programmes <i>deeco</i>	215
	Literaturverzeichnis	217

Teil I

Überblick über das Modell und seine Anwendung

Modellüberblick

Techniken der rationellen Energieverwendung (z.B. Blockheizkraftwerke) und solche zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen bieten auf kommunaler und regionaler Ebene vielfältige Möglichkeiten, die Emissionen von Schadstoffen und klimawirksamen Gasen sowie den Verbrauch von fossilen Primärenergieträgern zu vermindern. Welche Kombination der entsprechenden Techniken am jeweiligen Ort jeweils die beste Lösung darstellt, hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab. Zudem können zwischen den einzelnen Techniken Konkurrenzefekte auftreten, so daß sich ihre Minderungspotentiale nicht additiv ergänzen.

Das Programm *deeco* (**d**ynamic **e**nergy, **e**mission and **c**ost **o**ptimization model) dient der dynamischen Energie-, Emissions- und Kostenoptimierung lokaler bzw. regionaler Energieversorgungssysteme mit zeitlich schwankendem Energiebedarf [Bru96], [Bru97], [Bru97a],[Gro95] und [Lin00]. Es erlaubt insbesondere, folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Primärenergieeinsparpotentiale lassen sich durch die optimale Kombination von konventionellen Techniken mit solchen der rationellen Energieverwendung sowie der Nutzung erneuerbarer Energiequellen im Bereich der regionalen bzw. kommunalen Energieversorgung realisieren?
- Welche Emissionsminderungspotentiale sind damit verbunden?
- Welche Kosten entstehen mit dem Einsatz dieser Techniken?

deeco erlaubt die systemintegrierte, d.h. gleichzeitige Berücksichtigung folgender Energietechniken, die zu beliebig langen Energieversorgungspfaden zusammengefügt werden können:

- Einzelöfen, Heizkessel, Heizwerke und Kondensationskraftwerke
- Wärmeübertragernetzwerke zur Nutzung industrieller Abwärme
- das Erdreich bzw. die Außenluft nutzende Gas-, Elektro- und Absorptionswärmepumpen
- Kleinheizkraftwerke, Blockheizkraftwerke in Verbindung mit Nahwärmenetzen sowie fernwärmenetzbedienende Gegendruck- bzw. Entnahme-Kondensations-Heizkraftwerke
- Solarthermische Kollektoranlagen
- Speicher für Solarenergie, industrielle Abwärme, Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (kurzfristig und saisonal) und elektrische Energie.

Eine Stärke von *deeco* ist es, das Zusammenwirken von Techniken der rationellen Energieverwendung mit der Nutzung regenerativer Energiequellen, insbesondere der Solarenergie, detailliert untersuchen zu können. Dazu ist es notwendig, den nichtlinearen Einfluß zeitlich variabler intensiver Größen (Außen-, Bedarfs-, Abwärme-, Speichertemperaturen, etc.) auf die Wirkungsgrade der beteiligten Energieversorgungstechniken zu berücksichtigen. Besonders bei Wärmepumpen hängt die Leistungszahl z.B. sehr sensibel von der zu überbrückenden Temperaturdifferenz ab. 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 genaue Art dieser Abhängigkeiten variiert von Technik zu Technik und ist in Programmmodulen beschrieben, die zusammen eine Prozeßmodulbibliothek bilden, auf die bei der Benutzung des Programms zurückgegriffen wird. Durch Erstellen weiterer solcher Programmmodule (z.B. Windkraftanlagen) läßt sich *deeco* sehr einfach erweitern.

deeco arbeitet auf der Basis des zeitabhängigen Energiebedarfs (Stundenmittelwerte), der zeitabhängigen Abwärmeproduktion industrieller Anlagen, der örtlichen Wetterdaten (z.B. solare Strahlung, Windgeschwindigkeit, Temperatur), der technischen und wirtschaftlichen Daten der Energieversorgungstechniken (z.B. Wirkungsgrade) sowie der Kenndaten der verwendeten Brennstoffe und des übergeordneten Kraftwerkparks. Es berechnet 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.

Die Optimierung verändert nicht die technologischen Parameter der einzelnen Energieversorgungstechniken, vielmehr wird bei vorgegebener Systemzusammenstellung der gemeinsame Einsatz, d.h. die stündlich veränderliche Kombination aus verschiedenen Techniken optimiert. Zum Verständnis von *deeco* ist es nützlich zu betrachten, auf welche Art und Weise energietechnische Prozesse abgebildet werden: Die energietechnischen Prozesse existieren zunächst nur als „Black Box“ in die bzw. aus der Massen- und Energieströme sowie Datenflüsse ein- bzw. austreten (s.Abb. 1). Alle Energieströme werden mit \dot{E} bezeichnet, der Index El steht für elektrisch, $Mech$ für mechanisch, Q für Wärme und $Fuel$ für chemisch bzw. nuklear. En steht für Eintreten, Ex für Austreten. Die Enthalpieströme $\dot{E}_{H,En}$ und $\dot{E}_{H,Ex}$ berechnen sich aus den Massenströmen, den spezifischen Enthalpien und den intensiven Größen (Temperaturen, Drücke, etc.), die im Vektor \vec{X} enthalten sind. \vec{C}^{Fix} steht für die fixen Kosten (z.B. Investitionskosten); im Vektor \vec{C}^{Var} stehen die verallgemeinerten variablen Kosten (z.B. Energiekosten). Der Vektor \vec{U} enthält Umweltdaten, wie Außentemperatur, solare Strahlung und Windgeschwindigkeit.

Folgende energietechnische Prozesse sind in *deeco* definiert (siehe auch Abbildung 1.2) :

1. Bedarfsprozesse
2. Umwandlungsprozesse
3. Kollektorprozesse
4. Speicherprozesse
5. Import-Export-Prozesse
6. Vernetzungsprozesse

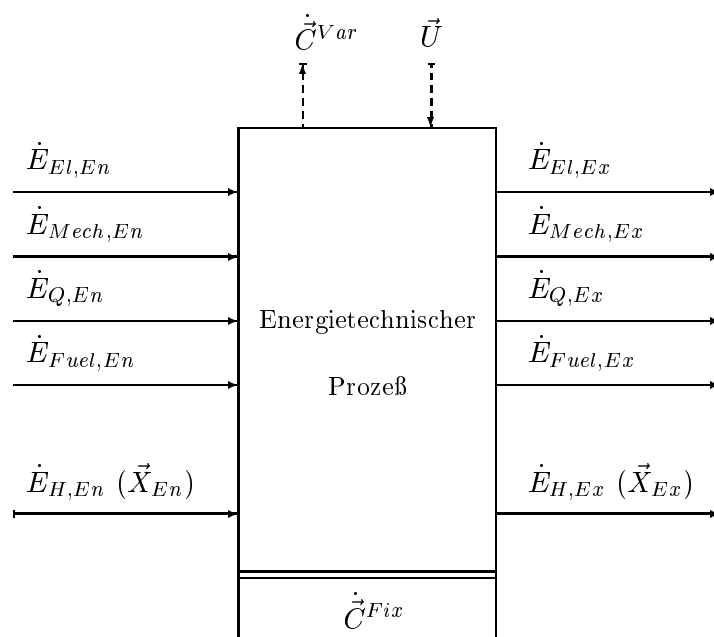


Abbildung 1.1: Flußorientierte Beschreibung energietechnischer Prozesse. Die Energieströme werden mittels durchgezogener, die Datenflüsse mit unterbrochenen Linien beschrieben. Die auftretenden Symbole werden im Text erläutert.

1. Bedarfsprozesse

Bedarfsprozesse bilden das letzte Glied in der Kette der Energieumwandlung, die von der Gewinnung der Primärenergie bis zur Bereitstellung der Energiedienstleistung reicht. Ein Bedarfsprozeß befindet sich deshalb in unmittelbarer Nähe zur Schnittstelle zwischen Verbraucher und Energieversorgungssystem. Der Bedarfsprozeß stellt das Bindeglied zwischen einer nicht meßbaren Energiedienstleistung (z.B. angenehme Raumtemperatur) und meßbaren Energiebedarfsgrößen (z.B. Wärmemenge pro Zeiteinheit, Vor- und Rücklauftemperatur usw.) dar. Die gewonnenen Daten definieren den *Energiebedarf*. Die Deckung dieses 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.

2. Umwandlungsprozesse

Umwandlungsprozesse dienen der Erzeugung von Wärme (im Sinne von Nettoenthalpie) $\dot{E}_{H,Ex}$, elektrischer Energie $\dot{E}_{El,Ex}$ oder mechanischer Energie $\dot{E}_{Mech,Ex}$ aus chemischer Energie $\dot{E}_{Fuel,En}$, die in Brennstoffen enthalten ist. (Darunter wird gegebenenfalls auch die in Kernbrennstoffen enthaltene nukleare Energie verstanden). Sie umfassen z.B. Kraftwerke, Heizkraftwerke, Dieselmotoren oder Heizkessel. Die Umwandlung der chemischen Energie $\dot{E}_{Fuel,En}$ der Brennstoffe in andere Energieformen verursacht außer variablen Kosten oftmals auch Abwärmeströme, die von anderen Prozessen genutzt werden können. Viele Umwandlungsprozesse benötigen zur Erfüllung ihrer Aufgaben darüber hinaus elektrische (Hilfs-) Energie $\dot{E}_{El,En}$ (z.B. für Steuerzwecke).

3. Kollektorprozesse

Kollektorprozesse nehmen Energieströme aus regenerativen Energiequellen (Sonne, Wind, etc.) auf, wandeln sie um und geben diese dann als elektrische Energie (z.B. bei Photovoltaikanlagen), mechanische Energie (z.B. bei der Nutzung der Windener-

gie), chemische Energie (z.B. Biomassenutzung) oder als Nettoenthalpiestrom (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 jedoch bereits vollständig im Umweltdatenvektor \vec{U} enthalten, so daß auf eine explizite Bestimmung der aufgenommenen Energie verzichtet werden kann. (Eine abschließende Bewertung des Energieversorgungssystems orientiert sich ausschließlich am nicht-regenerativen Energieeinsatz.)

4. 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. Wärmespeicher können Wärme verschiedener Herkunft aufnehmen und an verschiedene energietechnische Prozesse wieder abgeben.

5. Import-Export-Prozesse

Import-Export-Prozesse beschreiben die energetische Anknüpfung des zu optimierenden Systems an das übergeordnete Energieversorgungssystem. 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 Energieversorgungssystems (z.B. den mittleren Wirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung im übergeordneten Kraftwerkspark).

6. Vernetzungsprozesse

Vernetzungsprozesse dienen der Verbindung von 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 eine Vielzahl von Optimierungsmöglichkeiten aufweisen. Beispiele für Vernetzungsprozesse sind Wärmeübertrager sowie der (verlustbehaftete) Wärme- (genauer: Enthalpie-) transport, das Nachheizen von Enthalpieströmen oder deren Kühlung durch Wärmepumpeneinsatz. 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 aufgenommen werden, z.B. bei gasmotorisch, elektrisch oder mechanisch angetriebenen Wärmepumpen. Vernetzungsprozesse können aber auch elektrische oder mechanische Energie abgeben, beispielsweise durch Elektrizitätserzeugung aus industrieller Abwärme. Die Elektrolyse von Wasser ist ein Beispiel für einen Vernetzungsprozeß, bei dem chemische Energie den Prozeß verläßt.

Die folgende Abbildung zeigt ein exemplarisch in [Bru96] untersuchtes Energieversorgungssystem, wobei nur Brennstoff- und Wärmeströme explizit dargestellt sind.

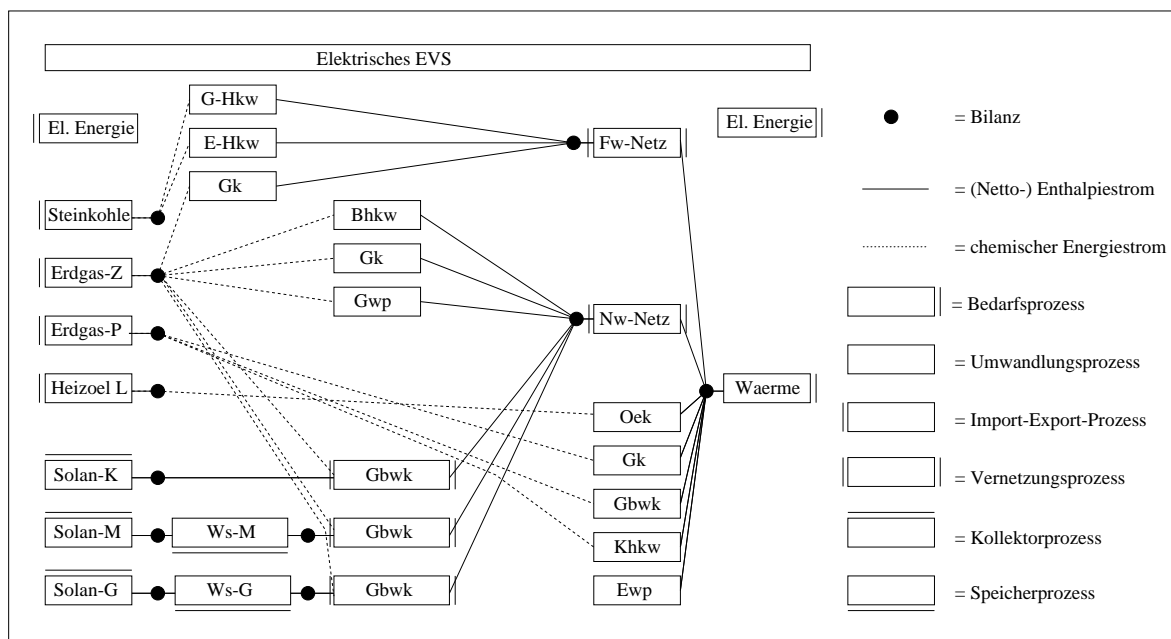


Abbildung 1.2: Ausschnitt aus einem zu optimierenden Energieversorgungssystem.

Oek = Ölkessel, 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, Fw-Netz = Fernwärmenetz, Nw-Netz = Nahwärmenetz, Erdgas-Z = Import von Erdgas für zentrale Wärmeerzeuger, Erdgas-P = Import von Erdgas für private Haushalte, Steinkohle = Kohle für Heizkraftwerke, Heizöl L = leichtes Heizöl für private Haushalte. Das elektrische Energieversorgungssystem ist nur angedeutet. Es verbindet alle Prozesse miteinander und treibt die Elektrowärmepumpen an.

Methodisch gesehen erfolgt die Optimierung des Energieversorgungssystems durch eine rekursiv-dynamische Vorgehensweise, bei der unter Berücksichtigung des jeweils aktuellen Systemzustandes in jeder der 8760 Stunden eines repräsentativen Jahres eine Optimierung des gesamten Energieversorgungssystems durchgeführt wird.

Das Programm *deeco*, das die Implementierung des gleichnamigen Modells darstellt, 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 sowie der erlaubten energetischen Verknüpfungen.
3. Einlesen der prozeßspezifischen Parameter (z.B. spezifische Emissionsfaktoren).
4. Aufbau des Graphen, der das EVS beschreibt.
5. Einlesen der zeitabhängigen prozeßexternen Einflußgrößen (z.B. Wetterdaten, vorgegebene Bedarfswerte).
6. Bestimmung der noch nicht bekannten Attribute (intensive Größen).

7. Berechnung der Koeffizienten der zeitlich lokalen Zielfunktion und der zeitlich lokalen Nebenbedingungen (abhängig von Attributen, prozeßexternen Einflußgrößen und prozeß-internen Zustandsgrößen).
8. Zeitlich lokale Optimierung.
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.
10. Manuelle 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.

Tutorial

Im folgenden soll anhand eines einfachen Beispiels die prinzipielle Vorgehensweise bei der Anwendung des Programms *deeco* erläutert werden. Das Beispiel veranschaulicht die Begriffe und Konzepte, die in Kap. 3 in allgemeingültiger Weise beschrieben sind. Es bezieht sich auf das in Abb. 2 dargestellte Energieversorgungssystem, das dazu dient, den Raumwärmebedarf (gekennzeichnet durch das Kürzel RWB) und den Elektrizitätsbedarf (EB) einer Siedlung zu decken. Im Rahmen einer Studie soll untersucht werden, inwieweit der Einsatz eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) zu einer geringeren Emission von Treibhausgasen (ausgedrückt in äquivalenten CO₂-Emissionen „CO₂AE“) führt, als das zu vergleichende System, bei dem die Wärmeversorgung mit Hilfe eines Gasbrennwertkessels (GBWK) erfolgt. Zur Vereinfachung der Diskussion soll dieser Brennwertkessel auch als Spitzenkessel eingesetzt werden können, wenn die Wärmeerzeugung des BHKW nicht zur Bedarfsdeckung ausreicht. Eine über die Erzeugung des BHKW hinausgehende Nachfrage nach elektrischer Energie kann durch Bezug aus dem öffentlichen Netz gedeckt werden.

Im folgenden wird davon ausgegangen, daß das Programm *deeco* in binärer, d.h. bereits kompilierter Form auf einem PC zur Verfügung steht (s. Abschnitt 3.1), der mit dem UNIX-Betriebssystem SCO UnixWare 2.1.2. bzw. UnixWare 7 ausgestattet ist. Gegebenenfalls nach einem Wechsel in das Directory, in dem sich das ausführbare Programm *deeco* befindet, wird dieses durch Eingabe seines Namens

`deeco`

(ergänzt durch optionale Parameterwerte, s.u.) in ein gerade aktives Fenster gestartet (s. Abschnitt 3.2).

Der weitere Programmablauf wird danach durch verschiedene Textdateien gesteuert (s. Abschnitt 4), die Informationen zu den zu untersuchenden Szenarien, zulässigen Prozessen und zeitabhängigen Einflußgrößen enthalten. Dabei handelt es sich um ASCII-Textdateien, die vom Anwender vor dem Aufruf des Programmes mit Hilfe eines Editors zu erstellen sind, der in der Lage ist, Textdateien auszugeben. Dazu können neben den einfachen Texteditoren auch Tabellenkalkulations- und Datenbankprogramme (wie z.B. Microsoft Excel oder Access) verwendet werden, vorausgesetzt, daß diese einen Datenexport in einem mit Hilfe von Trennzeichen (Kommata) formatierten Textformat erlauben. Alle Dateien (s. Abschnitt 4.6) besitzen vordefinierte Endungen (z.B. `.piv` für „process input values“ = Prozeßparameterwerte). Der vor dem Punkt stehende Dateiname (Projekt- oder Szenarienbezeichnung) ist vom Anwender festzulegen. Der Projektname sowie das Directory, in dem die Dateien des Standardszenarios zu finden sind, werden beim Aufruf des Programms als Kommandozeilenparameter übergeben.

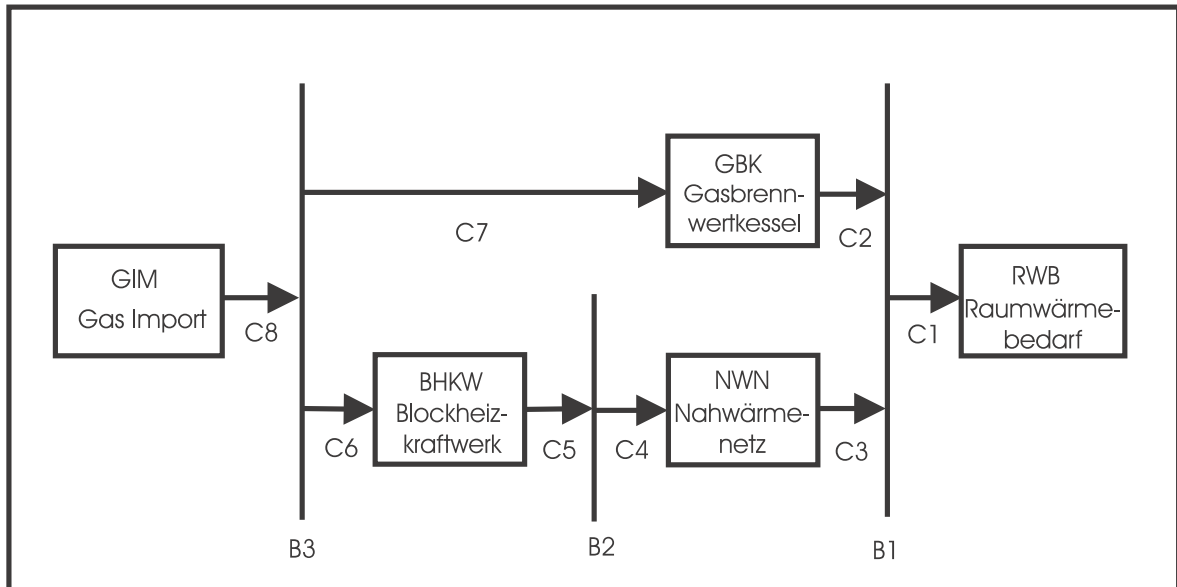


Abbildung 2.1: Exemplarisches Energieversorgungssystem zur Deckung des Wärme- und Elektrizitätsbedarfes einer Siedlung. Dargestellt ist der Gasbezugsprozeß GIM, die Energieumwandlung im Gasbrennwertkessel GBK und im Blockheizkraftwerk BHKW, das Nahwärmenetz NWN und der Raumwärmebedarfsprozeß RWB. Neben den Energieprozessen sind die Bilanzpunkte (B1 bis B3) in Form von Verteilungsschienen dargestellt. Die auftretenden Energieströme werden durch die Bezeichnung C1 bis C8 unterschieden. (Das elektrische Energieversorgungssystem, das als Pool modelliert wird, in den alle Stromerzeuger einspeisen und aus dem alle Stromabnehmer elektrische Energie entnehmen, ist – ebenso wie der nur elektrische Energie nachfragende Bedarfsprozeß EB – nicht dargestellt.)

Wird in Anspielung an den exemplarischen Charakter des obigen Beispiels der Projektname „Model“ und (relativ zum Directory, in dem sich das ausführbare Programm befindet) das Directory „testfile“ gewählt, so wird *deeco* in diesem Fall durch den Aufruf

```
deeco -dtestfile -nModel
```

gestartet (s. Abschnitt 3.2).

Im folgenden soll die Struktur einiger Programmablaufsteuerungsdateien unter Bezug auf das obige Beispiel exemplarisch erläutert werden. Welche Dateien insgesamt zu erstellen sind, ist in Abschnitt 4.6 umfassend beschrieben.

Datei Model.sd:

```
% Scenario definition
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           , standard scenario
Model      , 1
```

Die mit einem Prozentzeichen beginnenden Zeilen kennzeichnen Kommentare. Model.sd enthält die Liste aller zugelassenen Szenarien, die untersucht werden sollen. Im gewählten Beispiel soll nur das Standardszenario, dessen Name mit dem Projektnamen übereinstimmt, näher betrachtet werden. Durch Verlängern der Liste können ergänzend weitere Szenarien definiert werden, die beispielsweise nur einen eingeschränkten Satz von Energieversorgungsmöglichkeiten zulassen. Diese Szenarien überschreiben selektiv die Default-Werte des Standardszenarios (s. Abschnitt 4.1.1). Ersetzt man 1 durch 0, so lassen sich die entsprechenden Szenarien jederzeit leicht wieder ausschließen, ohne daß die von diesen Szenarien verwendeten Daten modifiziert werden müssen.

Jedes Szenario bezieht sich auf einen zum Szenario gehörenden Satz zur näheren Untersuchung zugelassener energietechnischer Prozesse, die sowohl die Energienachfrage als auch die Energieversorgung umfassen.

Welche Prozesse dies sind, wird in einer Datei mit der Endung .pd (für „process definition“) angegeben (s.a. Abschnitt 4.2.1):

Datei Model.pd:

```
% Processes of the model city
% Demand processes
EB    , DFlucEl      , 1    , total electrical energy demand
RWB   , DRoom       , 1    , heat demand
% Network processes
NWN   , NHTrans     , 1    , medium distance heating grid
% Import-export processes
EIM   , PConstElImp , 1    , import of electrical energy
GIM   , PConstFuelImp, 1    , import of natural gas
% Decentral conversion processes
GBK   , CBoiCond    , 1    , condensing-value gas boiler
% Central conversion processes
BHKW  , CCogConst   , 1    , medium size cogeneration unit
```

Neben den auch hier wieder zugelassenen Kommentaren, die Überschriften ermöglichen, erkennt man in diesem Textfile die Kürzel (RWB, NWN, GIM, GBK und BHKW) der in Abb. 2 gezeigten Prozesse wieder. Diesen vom Anwender definierten Kürzeln folgt ein *deeco*-spezifisches Kennwort, das angibt, zu welcher Modulkategorie (s. Abschnitt 5) der entsprechende Prozeß gehört. So soll es sich z.B. beim Prozeß BHKW um eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage handeln, die durch zeitlich unveränderliche Wirkungsgrade für die Erzeugung elektrischer und thermischer Energie charakterisiert werden kann (Modultyp „CCog-Const“). Die nachfolgende Eins gibt an, daß alle aufgeführten Prozesse zugelassen sind. Durch Nullsetzen können einzelne Prozesse in einfacher Art und Weise selektiv aus der Untersuchung ausgeschlossen werden. Nach dem letzten Komma folgt jeweils ein Kommentar.

Nachdem angegeben wurde, welche Prozesse betrachtet werden sollen, muß dem Programm mitgeteilt werden, in welcher Art und Weise diese Prozesse miteinander verknüpft sind. Wie in Abb. 2 angedeutet, kann dies durch die Angabe der im Energieversorgungssystem auftretenden Energieverteilungsschienen (B1-B3), die mathematisch als Bilanzpunkte anzusehen sind, sowie der Verbindungen, die die Prozesse und die Bilanzpunkte miteinander verknüpfen, geschehen:

Datei Model.bd:

```
% Balance points of the model city
B1  , H          , 4  , 1
B2  , H          , 4  , 1
B3  , Fuel       , 0  , 1
```

Die Angabe „H“ bzw. „Fuel“ zeigt an, welche Energieform (Enthalpie im Sinne von Wärme bzw. chemische Energie) über die Bilanzpunkte (Verteilungsschienen) hinweg verteilt wird. In der dritten Spalte¹ wird angegeben, welchem Datenflußtyp (Anhang A, S. 185) die entsprechenden Energieströme zuzuordnen sind. Im vorliegenden Fall gibt der Bedarfsprozeß in bezug auf den thermischen Energiestrom sowohl die (nachgefragte) Vor- als auch die Rücklauftemperatur vor. Der damit verbundene Informationsfluß fließt somit in beiden Fällen entgegengesetzt zur Richtung des aufgenommenen Energiestromes. Die vierte Spalte erlaubt wieder eine selektive Auswahl der zugelassene Bilanzpunkte. Weitere Details hierzu finden sich in Abschnitt 4.3.1.

Datei Model.cd:

```
% Energy connections of the model city
C1  , RWB        , 0  , B1  , H          , 4  , -1
C2  , GBK        , 0  , B1  , H          , 4  ,  1
C3  , NWN        , 0  , B1  , H          , 4  ,  1
C4  , NWN        , 0  , B2  , H          , 4  , -1
C5  , BHKW       , 0  , B2  , H          , 4  ,  1
C6  , BHKW       , 0  , B3  , Fuel       , 0  , -1
C7  , GBK        , 0  , B3  , Fuel       , 0  , -1
C8  , GIM        , 0  , B3  , Fuel       , 0  ,  1
```

Diese Datei (s.a. Abschnitt 4.4.1) gibt die Verknüpfungsstruktur des betrachteten Energiesystems wieder. In jeder Zeile wird dabei eine der – im vorliegenden Fall mit C1 bis C8 bezeichneten – Verknüpfungen zwischen jeweils einem Prozeß (2. Spalte) und einem Bilanzpunkt (4. Spalte) beschrieben. Da in einen bzw. aus einem Prozeß u.U. mehrere Energieströme ein- bzw. austreten können, ist es notwendig anzugeben, mit welchem Prozeßein- bzw. austrittspunkt die Verknüpfung hergestellt wird. Diese Angabe erfolgt in der 3. Spalte; eine Null wird immer dann verwendet, wenn nur ein Energiestrom der entsprechenden Sorte auftritt (Default-Fall). Die Angaben in der 5. und 6. Spalte stimmen mit denen der 2. und 3. Spalte in der Datei Modell.bd überein und gewährleisten dadurch eine korrekte Verbindung zwischen Prozessen und Bilanzpunkten. In der letzten Spalte wird angegeben, ob die entsprechende Verknüpfung zugelassen (Wert ungleich Null) ist und in welche Richtung der zugeordnete Energiestrom fließt (1 bedeutet vom Prozeß zum Bilanzpunkt; -1 steht für die entgegengesetzte Fließrichtung).

¹In Rahmen des Tutorials wird zur Angabe der Position eines Wertes oder eines Schlüsselwortes auf Spalten bezug genommen. Dies darf nicht dazu verleiten, anzunehmen, daß den Spalten eine feste Breite zugeordnet ist. Als Trennzeichen dient jeweils das von Leerzeichen umrahmte Komma, so daß die Spaltenbreite von Zeile zu Zeile variieren kann.

Die dem Programm bisher mitgeteilten, rein strukturellen Informationen müssen durch die Angabe von (zeitunabhängigen) Parameterwerten (z.B. technologische Kenngrößen) und den zeitabhängigen Einflußgrößen (z.B. nachgefragte elektrische Energie), die sich auf den zu untersuchenden Zeitraum beziehen, ergänzt werden, wobei zwischen prozeßabhängigen und prozeßunabhängigen Werten zu unterscheiden ist:

Datei Model.siv:

```

TS , testfile/Model.sit      , weather data
TP , testfile/Model.pit     , demand data
PR , results                 , result directory
I  , 3600 , 8760             , 8760 x 1h
E  , 0                       , without detailed transient results
A  , 1                       , all results
G  , CO2AE , 1               , CO2 equivalent optimization
D  , 0                       , no dynamic optimization

```

Die Dateien mit der Endung .siv beinhalten dabei alle Parameter (s. Abschnitt 4.1.2), die sich auf das zu untersuchende Szenario als Ganzes beziehen. Dazu gehören z.B. die vom Anwender gewählten Namen („testfile/Model.sit“² und „testfile/Model.pit“) der Dateien, in denen die szenarienabhängigen Wetter- und Bedarfsdaten gesucht werden sollen. Die erzeugten Ergebnisfiles sollen im Directory „results“ abgelegt werden. Die mit „I“ gekennzeichnete Zeile weist die Länge und Anzahl der zu untersuchenden (Optimierungszeit-) Intervalle aus. Als Zielfunktion wurde „CO2AE“ (=Minimierung der äquivalenten CO₂-Emissionen) gewählt, eine dynamische Optimierung über das ganze Jahr ist nicht vorgesehen und alle Ergebnisse, die berechnet werden, sollen auch abgespeichert werden.

Datei Model.piv:

```

%-----
% Central conversion processes
%-----
BHKW , Flag           ,      4      , without emergency cooling
BHKW , eta_El         ,      0.33 , [1]   [ASU94], p.22, G 620 V8
BHKW , eta_H          ,      0.57 , [1]   [ASU94], p.22, G 620 V8
BHKW , TF_Min        ,    273.15 , [K]
BHKW , TR_Min        ,    273.15 , [K]
BHKW , TF_Max        ,    363.15 , [K]   [ASU94], p.22, G 620 V8
BHKW , TR_Max        ,    351.15 , [K]   [ASU94], p.22, G 620 V8
BHKW , sVarSO2       ,    0.4e-12 , [kg/J] [Hes95] catalyst
BHKW , sVarNOX       ,    63.0e-12 , [kg/J] [Hes95]
BHKW , sVarStaub     ,    1.6e-12 , [kg/J] [Hes95]
BHKW , sVarCO2       ,   55150e-12 , [kg/J] [Hes95]
BHKW , sVarCO2AE     ,  55633.7e-12 , [kg/J] [Hes95]
BHKW , sFixM         ,   9.77010e-9 , [DM/sW]
BHKW , sVarM         ,   7.78472e-9 , [DM/sW] [Hes95]

```

²Man beachte, daß bei UNIX-Applikationen Pfadangaben durch „/“ und nicht - wie auf der DOS- oder Windows-Ebene gewohnt - durch „\“ untergliedert werden.

Im Gegensatz zur vorangegangenen Datei finden sich in dieser Datei alle prozeßspezifischen Werte (3. Spalte) wieder. Um welchen Prozeß es sich dabei jeweils handelt wird in der 1. Spalte durch Angabe des entsprechenden Kürzels (hier BHKW) kenntlich gemacht. Dies ist notwendig, da auch die Parameterwerte der anderen Prozesse im gleichen File abgelegt werden. Die im gezeigten Ausschnitt angegebenen Werte beziehen sich z.B. auf den elektrischen und thermischen Wirkungsgrad (Schlüsselwort: eta_El bzw. eta_H) des BHKWs, auf verschiedene, das Prozeßverhalten beeinflussende Minimal- und Maximaltemperaturen sowie auf Emissionsfaktoren und Kostenangaben. Die 2. Spalte weist jeweils ein Schlüsselwort (s. Kapitel 5) aus, das dazu dient, die entsprechenden Parameter zu unterscheiden. Das Programm *deeco* legt durch die Auswahl eines Modultyps (z.B. CCoGConst für den Prozeß BHKW) zunächst das prinzipielle Verhalten des betrachteten Prozesses fest. Dieses ist charakterisiert durch die *Form* der sein Verhalten beschreibenden Gleichungen und Ungleichungen. Durch die nun zusätzlich vorgenommene Angabe der numerischen Werte aller an diesen (Un-)Gleichungen beteiligten Parameter erfolgt eine weitere Konkretisierung des Prozeßverhaltens. Dadurch wird der Anwender in die Lage versetzt, im zu untersuchenden Energiesystem bereits vorhandene Energietechniken durch eine geeignete Wahl der erforderlichen Parameterwerte möglichst genau abzubilden.

Neben den zeitunabhängigen Parameterwerten wird das Verhalten des Energiesystems auch durch zeitlich variable Größen beeinflusst, die – z.B. im Hinblick auf ein zu untersuchendes repräsentatives Jahr – in Form von Zeitreihen wiederzugeben sind:

Datei Model.sit:

```
1 , T , 264.45 , ambient temperature [K]
1 , I , 0      , solar radiation 45 degree south [W/qm]
1 , h , 0      , hour of day [1]
2 , T , 264.15
2 , I , 0
2 , h , 1
3 , T , 263.85
3 , I , 0
3 , h , 2
4 , T , 263.65
4 , I , 0
4 , h , 3
5 , T , 263.35
```

Dateien mit der Endung *.sit* enthalten die Zeitreihen aller Einflußgrößen, die prozeßunabhängig sind. Dazu gehören z.B. die Wetterdaten. Die erste Zahl in diesen Dateien steht jeweils für die Intervallnummer. Diese Zahl wird für alle Größen, die sich auf das gleiche Optimierungszeitintervall beziehen, wiederholt.³ Es folgt die Bezeichnung der Variablen (s. Abschnitt 4.1.3 und Kapitel 5), der ihr jeweils zugewiesene Wert und (optional) ein erläuternder Text.

³Dieses zunächst vielleicht redundant erscheinende Vorgehen ermöglicht eine einfache Anbindung an relationale Datenbanken.

Datei Model.pit:

1	,	EB	,	DotEEL_0	,	5.58986e+07	,	Electrical energy demand [W]
1	,	RWB	,	DotQRH	,	8.37966e+07	,	Heat demand [W]
2	,	EB	,	DotEEL_0	,	5.24602e+07		
2	,	RWB	,	DotQRH	,	8.37966e+07		
3	,	EB	,	DotEEL_0	,	4.9513e+07		
3	,	RWB	,	DotQRH	,	8.58742e+07		
4	,	EB	,	DotEEL_0	,	4.60746e+07		
4	,	RWB	,	DotQRH	,	8.65667e+07		
5	,	EB	,	DotEEL_0	,	4.41098e+07		
5	,	RWB	,	DotQRH	,	8.93369e+07		

Neben den zeitabhängigen Größen, die „von außen her“ Einfluß auf die Prozesse nehmen, kann das Verhalten des Energiesystems auch durch variable Größen beeinflusst werden, die von den Prozessen selbst generiert werden. Dazu zählt z.B. die Energienachfrage von Bedarfsprozessen. In der 1. Spalte ist wieder das Zeitintervall angegeben. In der 2. Spalte steht die Bezeichnung des Prozesses und in der dritten ein Kennwort, das analog zum Vorgehen bei der Festlegung der Parameterwerte die prozeßabhängige Größe (s. Kap. 5) charakterisiert. „DotEEL_0“ bezeichnet z.B. die nachgefragte elektrische Energie (vgl. S. 42). Die vierte Spalte weist den dazugehörigen Wert aus und in der letzten Spalte darf wie immer ein erläuternder Text stehen.

Trotz der Vielzahl der dem Programm *deeco* mit Hilfe der beschriebenen Dateien übergebenen Informationen wird das Verhalten des gesamten Energieversorgungssystems dadurch noch nicht determiniert. Da abgesehen von den Quellen (z.B. Abwärmeangebot) und den Senken (Energienachfrage) die im System fließenden Energieströme bisher noch nicht festgelegt wurden, bleibt ein Spielraum, der die Berechnung eines - im Hinblick auf ein vom Anwender zu wählendes Gütekriterium (z.B. Minimierung der variablen Kosten, des Primärenergieeinsatzes oder der Treibhausgasemissionen) - optimierten Systemverhaltens gestattet. Die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen werden von *deeco* in verschiedenen Dateien abgelegt. Beispielhaft sollen im folgenden nur die Dateien besprochen werden, deren Werte zeitunabhängig sind. Informationen zu zeitabhängigen Ergebnissen finden sich in Abschnitt 4.1.5 und 4.2.5.

Datei Model.sov:

Goal	,	0.575518	,	0.0289722	,	0.530199	,	0.619581
VarCO2AE	,	0.575518	,	0.0289722	,	0.530199	,	0.619581
VarCO2	,	0.542115	,	0.0273114	,	0.499396	,	0.583681
VarStaub	,	1.28908e-05	,	7.34941e-07	,	1.17046e-05	,	1.43639e-05
VarNOX	,	0.000506052	,	2.4697e-05	,	0.000464513	,	0.000550577
VarSO2	,	2.23699e-05	,	1.12698e-06	,	2.06071e-05	,	2.4085e-05
VarE	,	1.00664e+07	,	507141	,	9.2732e+06	,	1.08383e+07
VarM	,	0.177987	,	0.008455	,	0.164242	,	0.191361

Diese Datei enthält alle Ergebnisse, die prozeßunabhängig sind. Es handelt sich dabei z.B. um den (über den Optimierungszeitraum gemittelten) Wert der Zielfunktion (Goal), die variablen Kosten der Energieversorgung VarM, den variablen Primärenergieeinsatz VarE und die Höhe aller variablen Emissionen. Die Bedeutung weiterer, im hier gezeigten Ausschnitt nicht wiedergegebener Größen wird in Teil III dieses Handbuches (Kap. 8 und 9) ausführlich erläutert. In der 1. Spalte ist jeweils das die Ausgabegröße kennzeichnende Kennwort angegeben. In der zweiten, dritten, vierten und fünften Spalte folgen jeweils der Mittelwert, die Standardabweichung, der Minimal- und der Maximalwert.

Datei Model.pov:

BHKW , DotE[En][Fuel][0]	, 3.6228e+06	, 394356	, 2.99613e+06	, 4.34848e+06
BHKW , DotE[Ex][El][0]	, 1.19552e+06	, 130138	, 988722	, 1.435e+06
BHKW , DotE[Ex][H][0]	, 2.065e+06	, 224783	, 1.70779e+06	, 2.47863e+06
BHKW , RelDotE[Ex][El][0]	, 1	, ?	, ?	, ?
BHKW , RelDotE[Ex][H][0]	, 1	, ?	, ?	, ?
BHKW , RelDotE[En][Fuel][0]	, 0.38868	, ?	, ?	, ?

In dieser Datei sind alle prozeßabhängigen Ergebnisse enthalten. Der gezeigte Ausschnitt macht Angaben (Mittelwert, Standardabweichung, Minimal- und Maximalwert) zur Höhe des chemischen Energiestromes (DotE[En][Fuel][0]), der vom BHKW aufgenommen wurde sowie zur abgegebenen elektrischen bzw. thermischen Energie (DotE[Ex][El][0] bzw. DotE[Ex][H][0]). Die Bedeutung aller anderen Größen wird ebenfalls in Teil III dieses Handbuches (Kap. 8 und 9) erläutert. Das Auftreten von nicht numerischen Zeichen, wie z.B. „?“, deutet an, daß die entsprechenden Werte nicht berechnet wurden.

Das Format der Ausgabedateien, die als ASCII-Textdateien ebenfalls von jedem Texteditor gelesen werden können, orientiert sich an der Theorie der relationalen Datenbanken. Dies erlaubt einen einfachen Import in alle Tabellenkalkulations- und Datenbankprogramme (z.B. Microsoft Excel und Microsoft Access), die in der Lage sind, durch Trennzeichen (Kommata) strukturierte Textdateien einzulesen. Nach erfolgtem Import können die Ergebnisse dann (z.B. durch Vergleich mit den Werten eines Referenzsystems) weiter analysiert und graphisch dargestellt werden.

Allgemeines

3.1 Installation

Das Programm *deeco* wurde auf einer Hewlett-Packard RISC 700 Series Workstation unter dem UNIX-Betriebssystem HP-UX 8.07 entwickelt. Finanziell unterstützt durch die Bayerische Forschungsstiftung konnte das Programm auf das UNIX-Betriebssystem SCO UnixWare 2.1.2 portiert werden, das auf marktüblichen PC (ausgestattet z.B. mit einem Intel Pentium Prozessor) installiert werden kann. Die Betriebssystemfamilie UnixWare, die von Caldera vertrieben wird, gehört zu den weltweit am meisten verkauften „UNIX-on-Intel Platforms“. UnixWare wird vor allem dann eingesetzt, wenn es darum geht, die Verlässlichkeit der UNIX-Betriebssystemarchitektur mit der Verfügbarkeit von Intel-Prozessor basierten Rechnern zu verknüpfen. Für die Verwendung von UnixWare als Grundlage für den Einsatz von *deeco* sprach neben seiner weiten Verbreitung vor allem seine sehr gute Kompatibilität zum Betriebssystem HP-UX, was den Portierungsaufwand des 18.000 Zeilen umfassenden Programms in erträglichen Grenzen hielt.

Das vorliegende Handbuch beschreibt den Einsatz des Modells *deeco* auf einem PC, der bereits mit dem Betriebssystem SCO UnixWare 2.1.2 (oder seinem Nachfolger SCO UnixWare 7) ausgestattet ist. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, daß potentielle Anwender mit diesem Betriebssystem vertraut sind. Durch die zusätzliche Installation des unter UnixWare lauffähigen Programms Merge gelingt es, ein Windows-Betriebssystem zu emulieren. Dies erlaubt den gleichzeitigen Einsatz von *deeco* und Windows basierten Applikationen. Da die von *deeco* erzeugten Ergebnisdateien - ebenso wie die zur Steuerung des Programmablaufes erforderlichen Eingabedatenfiles - Datenbankformat besitzen (s. Abschnitt 4), wird damit eine einfache Anbindung an Windows basierte Tabellenkalkulations- und Datenbankprogramme (z.B. Microsoft Excel und Access) gewährleistet.

Die Installation des Programms *deeco* erfordert ausschließlich die Kopie der ausführbaren Datei `deeco` sowie der Datei `deeco.msg`, die die Liste der potentiellen Fehlermeldungen umfaßt, von der Programm-CD¹ in ein unter dem Betriebssystem UnixWare eingerichtetes Directory. Die bereits compilierte Datei `deeco` kann danach wie im folgenden beschrieben sofort ausgeführt werden.

¹Auskünfte zu den Bezugs- und Nutzungsbedingungen sind vom Autor (s. Adreßinformation auf der Umschlaginnenseite) erhältlich.

3.2 Kommandozeilenargumente

Das Programm *deeco* wird durch folgende Eingabe auf Kommandoebene gestartet:

```
deeco -s -t -dprojectPath -nprojectName
```

Die Argumente `-s` `-t` `-d` `-n` sind optional und folgendermaßen definiert:

- `-s` : „Silent Mode“ ; d.h. keine Bildschirmausgabe
- `-t` : „Test Mode“ ; detaillierte Informationen zum Programmablauf
- `-l` : „Log Mode“ ; erzeugt ein „Log-File“ mit Informationen zum Programmablauf
- `-d` : Projekt-Pfad (*projectPath*, vollständiger Directory Name);
die Angabe des Namens erfolgt direkt hinter „-d“ (ohne Leerzeichen)
- `-n` : Projekt-Name;
die Angabe des Namens erfolgt direkt hinter „-n“ (ohne Leerzeichen)

3.3 Log-File

Informationen zum Programmablauf werden auf dem Bildschirm (Abschalten dieser Option mit „-s“) und bei Angabe des Kommandozeilenarguments „-l“ in ein File mit Namen „deeco.log“ ausgegeben.

3.4 Fehlerbehandlung

Zum Programm *deeco* gehört ein weiteres File mit Namen „deeco.msg“ das Fehlermeldungen (Nummern kleiner als 500), Warnmeldungen (Nummern zwischen 500 und 1000) und Informationen (Nummern größer als 1000) enthält, die das Programm bei Bedarf anzeigt.

Programmablaufsteuerungs- und Ergebnisdateien

Die Dateneingabe und -ausgabe erfolgt in *deeco* mit Hilfe folgender ASCII-Textdateien, die anhand ihrer Endung unterschieden werden. Dateien zur Dateneingabe müssen (sofern sie szenarienunabhängig sind und auch wenn sie leer sind) existieren. Mit einem „%“ - Zeichen beginnende Zeilen stellen Kommentarzeilen dar. Sie werden beim Einlesen von Daten vollständig ignoriert. Treten in Ausgabefiles „?“ (oder andere nicht numerische Zeichen wie z.B. NaN) auf, so bedeutet dies, das die entsprechenden Werte nicht berechnet wurden bzw. nicht sinnvoll sind. Sie deuten nicht auf ein fehlerhaftes Verhalten des Algorithmus hin.

4.1 Szenarien-Dateien

4.1.1 Szenarien-Definition: *projectPath/projectName.sd*

Alle Szenarien, die während eines Programmlaufes bearbeitet werden sollen, werden in der Datei *projectName.sd* (sd = scenario definition) mit folgendem Zeilenformat definiert:¹

<i>scenId</i> , <i>scenSelected</i> , <i>com</i>
--

Dabei steht *scenId* für die Szenarienkurzbezeichnung (benutzerdefiniert), *scenSelected* ist $\neq 0$, falls das Szenario bearbeitet werden soll (sonst 0). Am Ende jeder Zeile darf ein Kommentar *com* angegeben werden.

Die Angabe aller Kommata ist verpflichtend; sie müssen von den anderen Einträgen durch mindestens ein Leerzeichen getrennt sein. Soweit im folgenden bei der Angabe von Zeilenformaten Kommata auftreten, ist diese Bedingung stets zu beachten!

¹Man beachte, daß bei UNIX-Applikationen Pfadangaben durch „/“ und nicht - wie auf der DOS- oder Windows-Ebene gewohnt - durch „\ “ untergliedert werden.

4.1.2 Szenarien–Eingabedaten: *projectPath/scenId.siv*

Jedes Szenario wird durch ein Szenarien-Eingabedatenfile² *scenId.siv* (siv = scenario input value) näher beschrieben, das sich im Directory *projectPath* befindet:

```

PR , resPath , com
PS , scenPath , com
TS , scenInTsFileName , com
TP , procInTsFileName , com
S , scanParaProcName , scanParaName , scanParaBegin , ...
    ... , scanParaEnd , scanParaStep , com
D , dynFlag , com
E , tsOutFlag , com
A , allResFlag , com
I , intLength , intNumber , com
G , generalCostComp1 , goalWeight[generalCostComp1] , com
G , generalCostComp2 , goalWeight[generalCostComp2] , com
G , generalCostComp3 , goalWeight[generalCostComp3] , com
G , ... ...

```

In diesem File wird angegeben (programminterne Vorgabewerte stehen in eckigen Klammern): *resPath* = Directory, in dem die szenarienspezifischen Ergebnisfiles abgelegt werden [*projectPath*].

scenPath = Directory, in dem sich die szenarienspezifischen Kontrollfiles befinden (diese überschreiben³ die Default-Kontrollfiles im Directory *projectPath*) [*projectPath*].

Die Umweltdatenzeitreihen sind im File *scenInTsFileName* [*projectPath/projectName.sit*] abgelegt.

Die prozeßspezifischen Datenzeitreihen befinden sich in *procInTsFileName* [*projectPath/projectName.pit*].

Pro Szenario kann ein Parameterwert mit der Bezeichnung *scanParaName* des Prozesses *scanParaProcName* innerhalb des Bereiches *scanParaBegin* [0] bis *scanParaEnd* [0] in Schritten von *scanParaStep* [1] durchgeföhren („gescannt“) werden.⁴

Soll eine dynamische Optimierung⁵ durchgeföhrt werden, so ist *dynFlag* = 1 zu setzen. Bei quasidynamischer Optimierung ist *dynFlag* = 0 zu verwenden [Vorgabe: 0].

Um ein ausführliches Ergebnisfile, das die verallgemeinerten Kosten zeitaufgelöst darstellt, zu erhalten, wählt man *tsOutFlag* = 1 [0]. Um eine Speicherplatzüberbeanspruchung zu vermeiden, schließt ein Durchscannen von Parameterwerten die Erzeugung von ausführlichen Ergebnisfiles aus.

allResFlag = 1 [0] bedeutet, daß neben den Mittelwerten der Optimierungsvariablen (Energieströme) auch andere Ergebnisdaten (Mittelwerte der Schlupfvariablen, der Schattenpreise,

²Die Begriffe Eingabe und Ausgabe beziehen sich hier ausschließlich auf das Einlesen von Daten bzw. die Ausgabe von Daten durch das Programm. Sie dürfen nicht mit den gleichlautenden Begriffen der Modellbeschreibung von *deeco* verwechselt werden!

³Dabei bedeutet „überschreiben“ hier und im folgenden, daß die in den szenarienspezifischen Kontrollfiles angegebenen Zeilen gelesen und somit szenariunenabhängige Daten, die bereits eingelesen worden sind, modifiziert werden. Es bedeutet nicht, daß die gesamten szenariunenabhängigen Files überschrieben werden!

⁴Eingabeparameter werden von *deeco* i. allg. auf Plausibilität geprüft. Diese Prüfung entfällt beim Durchscannen.

⁵Die gegenwärtige Version von *deeco* erlaubt noch keine dynamische Optimierung, d.h. es ist stets *dynFlag* = 0 zu setzen.

der Koeffizienten der Nebenbedingungen bzw. der Zielfunktion, der Inhomogenitäten der Nebenbedingungen und der verallgemeinerten Kosten sowie der Zustandsgrößen) angezeigt werden sollen.

intLength gibt die Zeitintervalllänge in s [3600s] und *intNumber* die Zahl der Zeitintervalle [8760] an.⁶

Die Faktoren (Gewichtung x Normierung), mit denen die einzelnen generalisierten Kosten in die Zielfunktion eingehen, stellen die Werte eines Vektors *goalWeight* dar, dessen Komponenten⁷ durch Angabe von *generalCostComp* unterschieden werden [Vorgabe: *goalWeight*[E]= 1; Primärenergieoptimierung].

Am Ende jeder Zeile ist ein Kommentar *com* erlaubt.

Beispiel: BSP.siv

PR , /deeco/projectname/BSP	
PS , /deeco/projectname/BSP	
TS , /deeco/projectname/BSP/BSP.sit	
TP , /deeco/projectname/BSP/BSP.pit	
S , solar , A_c , 0 , 100 , 1	A_c = Kollektorfläche in qm
D , 0	quasi-dynamische Optimierung
E , 0	keine ausführliche Datenausgabe
I , 3600 , 8760 ,	Zeitintervallinformationen
G , M , 1 ,	monetäre Kosten
G , SO2 , 0.25 ,	SO2-Emissionen
G , NOX , 0.25 ,	NOX-Emissionen
G , CO2 , 0.25 ,	CO2-Emissionen
G , E , 0.25 ,	Primärenergieeinsatz

Die Vorgabewerte werden übernommen, indem entsprechende Zeilen (inklusive der Kennbuchstaben PR,PS,TS, ...) hier nicht angegeben werden.

4.1.3 Szenarien-Zeitreihen-Eingabedaten: *scenInTsFileName.sit*

In diesem File sind alle Umweltdatenzeitreihen und die Zeitreihen der Anlagenauslastungsfaktoren abgelegt (sit = scenario input time series).

Allgemeines Zeilenformat:

<i>intCount</i> , <i>inputId</i> , <i>inputVal</i> , <i>com</i>

Dabei ist *intCount* die Zeitintervallnummer, die in nicht abfallender Reihenfolge angegeben werden muß. *inputId* ist die Abkürzung der Eingabedatenbezeichnung und *inputVal* stellt den entsprechenden Eingabewert dar.

⁶Als Startzeitpunkt sollte immer Montag, 0 Uhr gewählt werden.

⁷Die Einheit der Zielfunktionskomponente Primärenergie ist [J/s], die der Emissionen [kg/s] und die der monetären Kosten [DM/s]. Bei linearer Zielgewichtung ist es deshalb notwendig, den Faktoren die entsprechenden Einheiten zuzuordnen (Normierung)!

Bisher definierte Bezeichnungen:

Kurzbezeichnung	Bedeutung
T	Außentemperatur in [K]
I	Solare Einstrahlung (auf 45 Grad geneigte und nach Süden ausgerichtete Fläche) in [W/qm]
W	Windgeschwindigkeit in [m/s]
G1	Auslastungsfaktor Nr. 1 in [1]
Gi	Auslastungsfaktor Nr. i in [1]
h	Tageszeit, $h \in [0, 24]$ Beispiel: $h = 2$ ist der Zeitraum von $t = 2^{\circ}$ bis $t = 3^{\circ}$
d	Wochentag, $d \in [0, 6]$ Beispiel: $d = 0$ ist Montag.
s	Jahreszeit, $s \in [0, 3]$ Beispiel: $s = 0$ ist Sommer, $s = 3$ ist Frühling.

Bei der Schaffung neuer Programmmodule können weitere hinzukommen, die dann in der jeweiligen Prozeßmodulbeschreibung erläutert werden.

Beispiel: BSP.sit

1	,	T	,	273.15
1	,	I	,	300
1	,	W	,	3
1	,	G1	,	0.75
1	,	G2	,	0.44
2	,	T	,	293.15
2	,	I	,	320
2	,	W	,	3.7
2	,	G1	,	0.9
2	,	G2	,	0.5
...	,	...	,	...

4.1.4 Szenarien–Ausgabedaten: *resPath/scenId.sov*

Dieses File enthält im wesentlichen die über den Optimierungszeitraum gebildeten Mittelwerte der generalisierten Kosten sowie der Umweltdaten und Anlagenauslastungsfaktoren (sov = scenario output value).

Allgemeines Zeilenformat:

$(scanParaVal,) outputId, Mean, Dev, Min, Max$

mit *outputId* = Kurzbezeichnung der angegebenen Kostenart, der Komponente des Umweltdatenvektors bzw. die Bezeichnung des Anlagenauslastungsfaktors; *Mean* = Stichproben-Mittelwert; *Dev* = Stichproben-Varianz; *Min* = Minimum und *Max* = Maximum. Wird aufgrund entsprechender Angaben in der Datei *projectPath/scenId.siv* der Parameterwert *scanParaName* des Prozesses *scanParaProcName* durchgescannt, so wird dieser Parameterwert *scanParaVal* am Anfang jeder Zeile angegeben.

4.1.5 Szenarien-Zeitreihen-Ausgabedaten: *resPath/scenId.sot*

Sofern im Szenario-Eingabedatenfile eine ausführliche Ergebnisausgabe gewünscht wird (Zeile: „E, 1“), werden in diesem File für alle Zeitintervalle die generalisierten Kosten wiedergegeben (sot = scenario output time series).

Allgemeines Zeilenformat:

<i>intCount</i> , <i>outputId</i> , <i>outputVal</i> , <i>com</i>

outputId ist die Abkürzung der Ausgabedatenbezeichnung (= Kurzbezeichnung der generalisierten Kosten) und *outputVal* stellt den entsprechenden Ausgabewert dar.

Beispiel: BSP.sot

1	,	M	,	1		monetäre Kosten
1	,	SO2	,	2		
1	,	NOX	,	3		
1	,	CO2	,	4		
1	,	E	,	5		Primärenergie
2	,	M	,	1.5		monetäre Kosten
2	,	SO2	,	2.5		
2	,	NOX	,	3.5		
2	,	CO2	,	4.6		
2	,	E	,	5.6		Primärenergie
...	,	...	,	...		

4.2 Prozeß-Dateien

4.2.1 Prozeß-Definition: *projectPath/projectName.pd*

Alle Prozesse, die während eines Programmlaufes betrachtet werden können, werden in der Datei *projectName.pd* (pd = process definition) mit folgendem Zeilenformat definiert:

<i>procId</i> , <i>procType</i> , <i>select</i> , <i>com</i>
--

Dabei steht *procId* für die Prozeßkurzbezeichnung (benutzerdefiniert), *procType* für die Prozeßtypkurzbezeichnung (vordefiniert gemäß Prozeßmodulbibliothek, s. Kap. 5), *select* ist $\neq 0$, falls der Prozeß zugelassen ist (sonst 0). Am Ende jeder Zeile darf ein Kommentar *com* angegeben sein. Das szenariunabhängige Prozeß-Definitionsfile *projectPath/projectName.pd* kann durch ein szenarienspezifisches File *scenPath/scenId.pd* gleichen Formats überschrieben werden.

4.2.2 Prozeß-Eingabedaten: *projectPath/projectName.piv*

Die Parameterstandardwerte jedes (zugelassenen) Prozesses sind in der Datei *projectPath/projectName.piv* (piv = process input value) wiedergegeben. Jede Zeile dieser Datei besitzt folgendes Format:

<i>procId</i> , <i>inputId</i> , <i>inputValue</i> , <i>com</i>

Dabei steht *procId* für die Prozeßkurzbezeichnung (benutzerdefiniert), *inputId* für die Kurzbezeichnung des betrachteten Prozeßparameters und *inputValue* für den Wert des Parameters. Die Bezeichnungen *inputId* sind prozeßtypspezifisch vordefiniert. Welche Parameterwerte jeweils anzugeben sind, wird in Teil II, Kap. 5 ausführlich beschrieben.

Das szenarienunabhängige Prozeß-Eingabedatenfile *projectPath/projectName.piv* kann durch ein szenarienspezifisches File *scenPath/scenId.piv* gleichen Formats modifiziert werden. Die Werte in diesem File überschreiben die entsprechenden Standardwerte in *projectPath/projectName.piv*. Sie sind nur anzugeben, wenn die Standardwerte geändert werden sollen.

4.2.3 Prozeß–Zeitreihen–Eingabedaten: *procInTsFileName.pit*

In diesem File sind die prozeßspezifischen Datenzeitreihen (z.B. Energiebedarfsdaten) abgelegt (*pit* = process input time series). Es besitzt Datenbankformat; alle Zeileneinträge werden durch Kommata getrennt. Auf eine nicht-abfallende Reihenfolge der Zeitintervallnummern ist zu achten.

Allgemeines Zeilenformat:

<i>intCount</i> , <i>procId</i> , <i>inputId</i> , <i>inputVal</i> , <i>com</i>

inputId ist hier analog zu 4.2.2 gemäß den Ausführungen in der Prozeßmodulbibliothek (Teil II, Kap. 5) zu verstehen.

4.2.4 Prozeß–Ausgabedaten: *resPath/scenId.pov*

Dieses File („*pov*“ steht für process output value) enthält die über den Optimierungszeitraum gebildeten Mittelwerte der Optimierungsvariablen (Energieströme), der prozeßinternen Zustandsgrößen sowie der Koeffizienten und Inhomogenitäten der Nebenbedingungen und der Koeffizienten der Zielfunktion.

Allgemeines Zeilenformat:

(<i>scanParaVal</i> ,) <i>procId</i> , <i>outputId</i> , <i>Mean</i> , <i>Dev</i> , <i>Min</i> , <i>Max</i>

outputId = Kurzbezeichnung der auszugebenden Größe (definiert in Teil III), *Mean* = Stichproben-Mittelwert, *Dev* = Stichproben-Varianz, *Min* = Minimum und *Max* = Maximum. Wird aufgrund entsprechender Angaben in der Datei *projectPath/scenId.siv* der Parameterwert *scanParaName* des Prozesses *scanParaProcName* durchgescannt, so wird dieser Parameterwert *scanParaVal* am Anfang jeder Zeile angegeben.

4.2.5 Prozeß–Zeitreihen–Ausgabedaten: *resPath/scenId.pot*

Sofern im Szenario-Eingabedatenfile eine ausführliche Ergebnisausgabe gewünscht wird (Zeile: „E , 1“), werden in diesem File für alle Zeitintervalle die prozeßinternen Zustandsgrößen (z.B. die Speichertemperaturen) wiedergegeben (*pot* = process output time series):

<i>intCount</i> , <i>procId</i> , <i>outputId</i> , <i>outputVal</i> , <i>com</i>

outputId ist die Abkürzung der Ausgabedatenbezeichnung (= Kurzbezeichnung der Zustandsvariable gemäß Kap. 5) und *outputVal* stellt den entsprechenden Ausgabewert dar.

4.3 Bilanzpunkt-Dateien

4.3.1 Bilanzpunkt-Definition: *projectPath/projectName.bd*

Alle (Energie-)Bilanzpunkte, die während eines Programmlaufes betrachtet werden können, werden in der Datei *projectName.bd* (bd = balance definition) mit folgendem Zeilenformat definiert:

<i>balanId</i> , <i>energyFlowType</i> , <i>linkType</i> , <i>select</i> , <i>com</i>

Dabei steht *balanId* für die Bilanzpunkt-kurzbezeichnung (benutzerdefiniert), *energyFlowType* für die Kurzbezeichnung der Art (El, Mech, H,...) und *linkType* für die Kurzbezeichnung der Typen (0, 1, 2, 3, oder 4 gemäß *deeco* Typeneinteilung⁸, s. S. 185) der Energieströme, die am Bilanzpunkt bilanziert werden (vordefiniert); *select* ist $\neq 0$, falls der Bilanzpunkt zugelassen ist (sonst 0).

Das szenarienunabhängige Bilanzpunkt-Definitionsfile *projectPath/projectName.bd* kann durch ein szenarienspezifisches File *scenPath/scenId.bd* gleichen Formats überschrieben werden.

4.4 Energiestrom-Dateien

4.4.1 Energiestrom-Definition: *projectPath/projectName.cd*

Alle Energieströme, die Prozesse und Bilanzpunkte miteinander verbinden und die während eines Programmlaufes betrachtet werden können, werden in der Datei *projectName.cd* (cd = connection definition) mit folgendem Zeilenformat definiert:

<i>connectId</i> , <i>procId</i> , <i>energyFlowNumber</i> , <i>balanId</i> , <i>energyFlowType</i> , <i>linkType</i> , <i>direct</i> , <i>com</i>
--

Dabei steht *connectId* für die Kurzbezeichnung des betrachteten Energiestroms (benutzerdefiniert), der den Prozeß *procId* am energetischen Ausgang mit der Nummer *energyFlowNumber* verläßt (bzw. am Eingang mit dieser Nummer in diesen eintritt) und mit dem Bilanzpunkt *balanId* verbindet. *energyFlowType* steht für die Kurzbezeichnung der Art und *linkType* für den Typ (gemäß Typeneinteilung) des Energiestroms (vordefiniert) und *direct* ist 1, falls der Energiestrom vom Prozeß zum Bilanzpunkt fließt, -1 im umgekehrten Fall sowie 0, falls die Verknüpfung nicht erlaubt sein soll. Das szenarienunabhängige Energiestrom-Definitionsfile *projectPath/projectName.cd* kann durch ein szenarienspezifisches File *scenPath/scenId.cd* gleichen Formats überschrieben werden.

⁸Energieströmen, die keine Attribute besitzen, wird der Wert 0 zugeordnet. Dies ist in der gegenwärtigen Version von *deeco* für die elektrischen, mechanischen und chemischen Energieströme der Fall.

4.5 (Prozeß-) Aggregat-Dateien

4.5.1 (Prozeß-) Aggregat-Definition: *projectPath/projectName.ad*

Alle Prozeßaggregate werden in der Datei *projectName.ad* (ad = aggregate definition) mit folgendem Zeilenformat definiert:

```
aggId , select , com
```

Dabei steht *aggId* für die (Prozeß-) Aggregatkurzbezeichnung (benutzerdefiniert), *select* ist $\neq 0$, falls das (Prozeß-) Aggregat zugelassen ist (0 sonst). Möchte man darüber hinaus eine Maximalleistung für das Aggregat angeben, so ist *select* = 1 zu wählen. Das szenarienunabhängige (Prozeß-) Aggregat-Definitionsfile *projectPath/projectName.ad* kann durch ein szenarienspezifisches File *scenPath/scenId.ad* gleichen Formats überschrieben werden.

4.5.2 Prozeß-Aggregat-Eingabedaten: *projectPath/projectName.aiv*

Die Parameterstandardwerte jedes (zugelassenen) (Prozeß-) Aggregates sind in der Datei *projectPath/projectName.aiv* (aiv = aggregate input value) wiedergegeben. Jede Zeile dieser Datei besitzt folgendes Format:

```
aggId , procId , inputValue, com
```

Dabei steht *procId* für die Prozeßkurzbezeichnung eines Prozesses, der am Aggregat beteiligt ist, *aggId* für die Kurzbezeichnung des betrachteten (Prozeß-) Aggregates und *inputValue* für den Wert des Parameters (=Maximalleistung des Prozeßaggregates). Diese Maximalleistung beschränkt die Energieströme der am Aggregat beteiligten Prozesse, die zur Bestimmung der fixen Kosten des Prozesses herangezogen werden; sie ist für alle Prozesse eines Aggregates identisch (aber dennoch jeweils anzugeben). Die Zeile ist auch anzugeben, wenn keine Maximalleistung vorgegeben werden soll, um die Verknüpfung von Aggregat und Prozeß zu gewährleisten. Als „Maximalleistung“ ist in diesem Falle -1 zu verwenden!

Das szenarienunabhängige Aggregat-Eingabedatenfile *projectPath/projectName.aiv* kann durch ein szenarienspezifisches File *scenPath/scenId.aiv* gleichen Formats modifiziert werden. Die Werte in diesem File überschreiben die entsprechenden Standardwerte in *projectPath/projectName.aiv*. Sie sind nur anzugeben, wenn die Standardwerte geändert werden sollen.

4.5.3 Prozeß-Aggregat-Ausgabedaten: *resPath/scenId.aov*

Dieses File enthält die über den Optimierungszeitraum gebildeten Mittelwerte der Aggregatleistung (aov = aggregate output value).

Allgemeines Zeilenformat:

```
(scanParaVal ,) aggId , Mean , Dev , Min, Max
```

mit *aggId* = Kurzbezeichnung des Aggregates, *Mean* = Stichproben-Mittelwert, *Dev* =

Stichproben-Varianz, *Min* = Minimum und *Max* = Maximum. Wird aufgrund entsprechender Angaben in der Datei *projectPath/scenId.siv* der Parameterwert *scanParaName* des Prozesses *scanParaProcName* durchgescannt, so wird dieser Parameterwert *scanParaVal* am Anfang jeder Zeile angegeben.

4.6 Zusammenfassung der Input-Output-Dateien

Im folgenden werden die Endungen der verschiedenen Datenfiles übersichtlich zusammengestellt. Mit Ausnahme von *.siv* - Files besitzen alle Files ASCII-delimited Datenbankformat.

Objekte	Definitionen	Kenngroßen-Input	Zeitreihen-Input	Kenngroßen-Output	Zeitreihen-Output
Szenarien	.sd	.siv	.sit	.sov	.sot
Prozesse	.pd	.piv	.pit	.pov	.pot
Bilanzen	.bd	-	-	-	-
Energieströme	.cd	-	-	-	-
Aggregate	.ad	.aiv	-	.aov	-

Hinweis: *deeco* kann erst dann (fehlerfrei) gestartet werden, wenn ein vollständiger Satz szenarienunspezifischer Kontrollfiles existiert, d.h. die *.sd*, *.pd*, *.bd*, *.cd*, *.ad*, *.siv*, *.piv*, *.aiv*, *.sit* und *.pit* Files müssen vorhanden sein (unabhängig davon, ob sie Werte enthalten oder nicht). Die Kurzbezeichnungen in den *.sd*, *.pd*, *.bd* und *.cd* Files sollten nicht mehr als 5 Buchstaben enthalten.

4.7 Weitere Hinweise zur Dateneingabe

4.7.1 Zeitunabhängige Parameter

Zeitabhängige Attribute (z.B. Temperaturen), die einem Energiestrom zugeordnet sind, werden von Prozeß zu Prozeß weitergegeben. Für zeitunabhängige Parameter eines Energiestroms (z.B. Wärmekapazitäten eines Enthalpiestromes) erfolgt diese Weitergabe nicht. Die auftretenden Parameter stellen Prozeßparameter der Prozesse dar, die durch den Energiestrom verbunden sind, wobei für jeden Prozeß ein eigener Parameter (z.B. Wärmekapazität) angegeben wird. Der Benutzer muß selbst auf die Konsistenz dieser Angaben achten!

4.7.2 Zielgewichtung

Bei Verwendung einer Zielfunktion, die neben dem Primärenergieeinsatz weitere Zielfunktionskomponenten enthält, ist zu beachten, daß

1. nicht überprüft wird, ob für alle Module tatsächlich die entsprechenden spezifischen Kosten oder Emissionsfaktoren angegeben sind.
2. nicht überprüft wird, ob für jedes Modul Informationen über die fixen (verallgemeinerten) Kosten vorhanden sind.

Somit besteht die Gefahr, daß bei unvorsichtiger Vorgehensweise gewisse Kostenanteile verloren gehen.

Teil II

Eingabedaten

Prozeßmodul-Bibliothek

Im folgenden werden - getrennt nach Prozeßtyp - die verschiedenen, in der Modulbibliothek von *deeco* zur Verfügung stehenden Prozeßmodule beschrieben. Die Darstellung beginnt zunächst 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. 5.1-5.10) 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* (Abk. „En“) bezeichnet. Entsprechend steht der Begriff *energetische Exit-Seite* (Abk. „Ex“) 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 wird erst durch Angabe des zugeordneten Nettoenthalpiestromtyps (s. S. 185) näher bestimmt. Welche Richtung des Datenflusses der Energieströme der Modellierung der Prozeßtypen zugrundeliegt, läßt sich modulabhängig an der gewählten Form der Input-Output-Relationen sowie der Zustandstransformationsgleichungen erkennen.

Alle in der Prozeßmodulbibliothek von *deeco* enthaltenen Module lassen sich jeweils einem der diskutierten Prozeßtypen zuordnen. Während die Typen alle denkbaren Energieströme berücksichtigen, werden bei der konkreten Modellierung eines Moduls i. allg. nur einige wenige Energieströme angesprochen. Die Prozeßtypen stellen in diesem Sinne somit die energetische „Hülle“ aller zugeordneten Prozeßmodule dar.

Die einzelnen Module werden gemäß der Philosophie der objektorientierten Programmierung als Objekte modelliert, die durch ihr Verhalten (den sog. „Methoden“) sowie durch die dieses Verhalten beeinflussenden Daten charakterisiert werden. Die Methoden umfassen dabei insbesondere die Input-Output-Relationen für Energieströme und Attribute, die Zustandstransformationsgleichungen sowie die in Form von Funktionen abgebildeten prozeßinternen Grenzwerte. Das qualitative Verhalten des Moduls (die funktionale Form der Methoden) kann vom Benutzer nicht verändert werden. Die Daten, die zur konkreten Bestimmung des Verhaltens herangezogen werden, können jedoch vom Benutzer im Eingabedaten-File vorgegeben werden. In diesem Sinne stellen die Module somit selbst nochmals abstrakte „Hüllen“ dar, welche erst durch den Nutzer vollständig spezifiziert werden.

Da es für die Festlegung der Netzwerkstruktur nur auf die Charakterisierung (Art und Typ) der Energieströme ankommt, die in einen Prozeß ein- oder aus ihm austreten, werden in

jedem Abschnitt zunächst durch Energieflußbilder genau diese Informationen wiedergegeben (vgl. z.B. S. 36), wodurch die Erstellung der .pd-, .bd- und .cd-Files erheblich erleichtert wird. Erst im Anschluß daran erfolgt dann jeweils eine Diskussionsdiskussion der einzelnen Module, die sich an folgender Gliederung orientiert.

1. **Angabe der verwendeten Methoden:** *deeco* legt Wert auf die Berücksichtigung des Einflusses intensiver Größen auf die Wirkungsgrade und Einsatzgrenzen der zu untersuchenden Energietechniken. Da dies eine innovative Eigenschaft von *deeco* darstellt, fehlen in der Literatur allgemein gebräuchliche Bezeichnungen für die Parameterwerte, die zur Charakterisierung dieser Abhängigkeiten herangezogen werden. Aus diesem Grunde wird in diesem Handbuch ein vollständiger Überblick über alle funktionalen Beziehungen (Methoden) gegeben, die zur Charakterisierung der Module erforderlich sind. Dies ermöglicht es dem Nutzer, sich bei Bedarf die konkrete Bedeutung von Parameterwerten aus dem Kontext dieser Beziehungen abzuleiten. (In vielen Fällen handelt es sich z.B. um Koeffizienten im Rahmen einer Taylorentwicklung, deren Bedeutung sofort aus der mathematischen Struktur der Gleichungen ersichtlich wird.)

Bei der Angabe der Methoden wird zwischen Nebenbedingungen (gekennzeichnet durch NB&Nummer), die bei der eigentlichen Optimierung in den verschiedenen Optimierungszeitintervallen zu berücksichtigen sind, und Funktionen, die einen Zielfunktionsbeitrag (ZF) spezifizieren, unterschieden. Funktionale Beziehungen, die Input-Output-Relationen für Attribute darstellen, werden durch die Abkürzung IO-A gekennzeichnet. Im allgemeinen werden die hier diskutierten funktionalen Beziehungen jedoch nicht einfach aufgelistet, sondern in einen theoretischen Kontext gestellt, der ihre Herleitung aus der Originalliteratur skizziert. Um den Wiedererkennungseffekt zu erhöhen, wurde dazu, wo immer möglich, die im jeweiligen Fachgebiet übliche Notation verwendet. Die Anbindung dieser Notation an die in *deeco* verwendete Notation findet der Anwender in der sich anschließenden Notationsliste.

2. **Angabe der verwendeten Notation:** Die wiedergegebene Notationsliste erlaubt dem bereits geübten Anwender unter Berücksichtigung der Formatvorgaben aus Kap. 4 sofort die Erstellung des *projectPath/projectName.piv* - Eingabedatenfiles. Angegeben wird dazu das allgemein übliche mathematische Symbol, die im jeweiligen File zu verwendende Abkürzung des Namens (*inputId*) sowie die Bedeutung des Parameters (inkl. Angabe der zu verwendenden Einheit). Aufgrund der Fülle der notwendigen Parameter und Variablen, besitzen die verwendeten Bezeichnungen i. allg. nur lokale Gültigkeit, d.h. sie verlieren ihre Bedeutung, sobald sie in anderen Modulen abweichend definiert werden. Fehlt die Angabe der Bedeutung, so handelt es sich um global gültige Variablenamen, die in der Notationsliste im Anhang B erläutert werden.
3. **Angabe von beispielhaften Eingabedaten:** Um die Anwenderfreundlichkeit weiter zu erhöhen, werden am Ende der jeweiligen Modulbeschreibung in der Regel exemplarische Parameterwerte angegeben, die bereits durchgeführten Anwendungen von *deeco* zu Grunde lagen. Diese Werte dienen als Orientierungshilfe; sie sind nicht als „Default“-Werte zu verstehen.

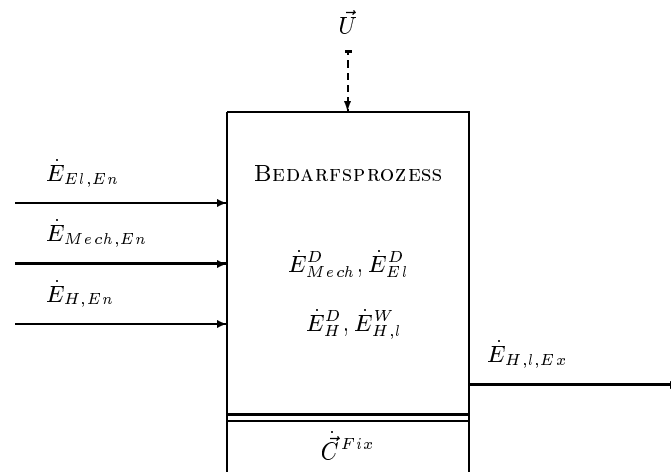


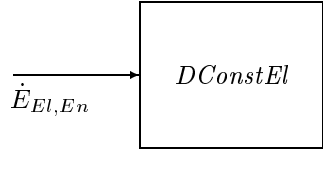
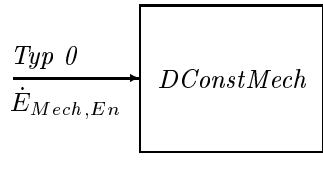
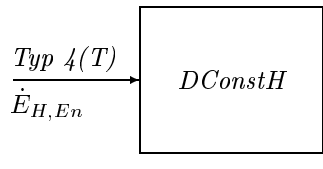
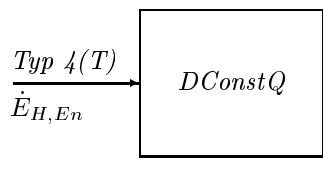
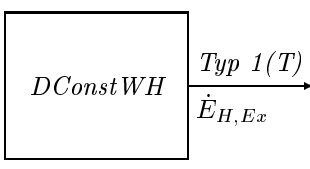
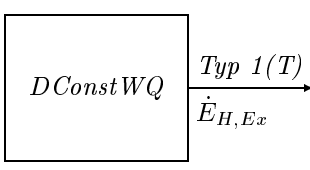
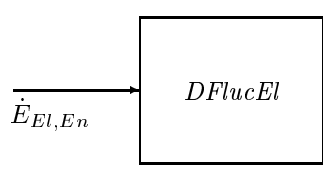
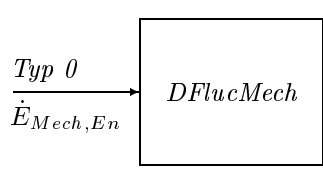
Abbildung 5.1: Bedarfsprozeß. Datenflüsse werden, wie auch bei den folgenden Prozeßschaubildern, durch unterbrochene Pfeile und Energieströme mit Hilfe durchgezogener Pfeile dargestellt.

5.1 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. Wärmemenge 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. 5.1 wiedergegeben.

Es folgt eine Übersicht über alle derzeit in *deeco* zur Verfügung stehenden Bedarfsprozeß-Module. Dabei wird jedes Modul kurz charakterisiert und angegeben, mit Hilfe welcher Kurzbezeichnung (*procType*) dieses Modul im Rahmen von *deeco* (z.B. im .pd-File) angesprochen werden kann. Die sich anschließende Tabelle stellt alle bei den verschiedenen Modulen auftretenden Energieströme dar und erleichtert damit die schnelle Zusammenstellung von Energieversorgungsnetzwerken (d.h. die Erstellung der .pd-, .bd- und .cd-Files), bei der es noch nicht auf die innere Struktur der Module, sondern nur auf die Art und die Typzugehörigkeit der beteiligten Energieströme ankommt.

Verfügbare Bedarfsprozeß-Module	<i>procType</i>
Zeitunabhängiger Bedarf an elektrischer Energie	DConstEl
Zeitunabhängiger Bedarf an mechanischer Energie	DConstMech
Zeitunabhängiger Bedarf an Enthalpie	DConstH
Zeitunabhängiger Bedarf an Wärme	DConstQ
Zeitunabhängige Abwärmeproduktion (Enthalpie)	DConstWH
Zeitunabhängige Abwärmeproduktion	DConstWQ
Zeitabhängiger Bedarf an elektrischer Energie	DFlucEl
Zeitabhängiger Bedarf an mechanischer Energie	DFlucMech
Zeitabhängiger Bedarf an Enthalpie	DFlucH
Zeitabhängiger Bedarf an Wärme	DFlucQ
Zeitabhängige Abwärmeproduktion (Enthalpie)	DFlucWH
Zeitabhängige Abwärmeproduktion	DFlucWQ
Zeitabhängiger Raumwärmebedarf	DRoom

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
DConstEl	Elektrischer Energiebedarf, zeitunabhängig	$\xrightarrow{\dot{E}_{El,En}}$ 	37
DConstMech	Mechanischer Energiebedarf, zeitunabhängig	$\xrightarrow[\dot{E}_{Mech,En}]{Typ\ 0}$ 	37
DConstH	Nettoenthalpiebedarf, zeitunabhängig	$\xrightarrow[\dot{E}_{H,En}]{Typ\ 4(T)}$ 	37
DConstQ	Wärmebedarf, zeitunabhängig	$\xrightarrow[\dot{E}_{H,En}]{Typ\ 4(T)}$ 	37
DConstWH	Abwärmeproduktion (Nettoenthalpiestrom), zeitunabhängig		37
DConstWQ	Abwärmeproduktion (Wärmestrom) zeitunabhängig		38
DFlucEl	Elektrischer Energiebedarf, zeitabhängig (aus File)	$\xrightarrow{\dot{E}_{El,En}}$ 	40
DFlucMech	Mechanischer Energiebedarf, zeitabhängig (aus File)	$\xrightarrow[\dot{E}_{Mech,En}]{Typ\ 0}$ 	40

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
DFlucH	Nettoenthalpiebedarf, zeitabhängig (aus File)	$\begin{array}{c} \text{Typ } 4(T) \\ \hline \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{DFlucH}$	40
DFlucQ	Wärmebedarf, zeitabhängig (aus File)	$\begin{array}{c} \text{Typ } 4(T) \\ \hline \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{DFlucQ}$	40
DFlucWH	Abwärmeproduktion (Nettoenthalpiestrom), zeitabhängig (aus File)	$\boxed{DFlucWH} \begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \hline \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	40
DFlucWQ	Abwärmeproduktion (Wärmestrom), zeitabhängig (aus File)	$\boxed{DFlucWQ} \begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \hline \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	41
DRoom	Raumwärmebedarf, zeitabhängig (aus File)	$\begin{array}{c} \text{Typ } 4(T) \\ \hline \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{DFlucMech}$	43

5.1.1 Bedarfsprozesse mit zeitunabhängigen Bedarfswerten

Theorie:

Bedarfsprozesse des Typs $DConst\alpha$ mit $\alpha \in \{El, H, Q, Mech, WH, WQ\}$ beschreiben den zeitunabhängigen Bedarf an $\dot{E}_{El}, \dot{E}_H, \dot{E}_Q, \dot{E}_{Mech}$ bzw. die Produktion von Abwärme \dot{E}_H^W (bzw. \dot{E}_Q^W). Die mit 0 gekennzeichneten Werte sind im .piv-File anzugeben.

$DConstEl$	NB 1	$\dot{E}_{El,En} = \dot{E}_{El,En,0}$	Elektrischer Energiebedarf
$DConstMech$	NB 1	$\dot{E}_{Mech,En} = \dot{E}_{Mech,En,0}$	Mechanischer Energiebedarf
$DConstH$	NB 1	$\dot{E}_{H,En} = \dot{E}_{H,En,0}$	Nettoenthalpiebedarf
	IO-A	$T_{F,En} = T_{F,En,0}$ $T_{R,En} = T_{R,En,0}$	
$DConstQ$	NB 1	$\dot{E}_{H,En} = \dot{E}_{Q,En,0}$	Wärmebedarf
	IO-A	$T_{F,En} = T_{F,En,0}$ $T_{R,En} = \text{unbest.}$	programmtechnisch: $T_{R,En} = 0$
$DConstWH$	NB 1	$\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0}^W$	<i>Flag</i> = 1: „≤“-Zeichen <i>Flag</i> = 0: „=“-Zeichen (Speichereinsatz)
	IO-A	$T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$ $T_{R,Ex} = T_{R,Ex,0}$	Abwärmeproduktion (Nettoenthalpie) (bei vorgegebener Rücklauftemperatur)

DConstWQ

NB 1

$\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{Q,Ex,0}^W$
--

Flag = 1: „≤“-Zeichen

Flag = 0: „=“-Zeichen

(Speichereinsatz)

IO-A

$T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$

$T_{R,Ex} = \text{unbest.}$

Abwärmeproduktion (Wärmestrom)

(programmtechnisch: $T_{R,Ex} = 0$)

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{El,En}$		
$\dot{E}_{Mech,En}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
Attribute:		
$T_{F,En}$		
$T_{R,En}$		
$T_{F,Ex}$		
$T_{R,Ex}$		
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{El,En,0}$	DotEEl_0	zeitunabhängiger Bedarf an el. Energie [W]
$\dot{E}_{Mech,En,0}$	DotEMech_0	zeitunabhängiger Bedarf an mech. Energie [W]
$\dot{E}_{H,En,0}$	DotEH_0	zeitunabhängiger Nettoenthalpiebedarf [W]
$T_{F,En,0}$	TF_0	zeitunabhängige Vorlauftemperatur [K]
$T_{R,En,0}$	TR_0	zeitunabhängige Rücklauftemperatur [K]
$\dot{E}_{Q,En,0}$	DotEQ_0	zeitunabhängiger Wärmebedarf [W]
$\dot{E}_{H,Ex,0}^W$	DotEWH_0	zeitunabhängige Abwärmeproduktion [W]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0	zeitunabhängige Vorlauftemperatur der Abwärme [K]
$T_{R,Ex,0}$	TR_0	zeitunabhängige Rücklauftemperatur der Abwärme [K]
$\dot{E}_{Q,Ex,0}^W$	DotEWQ_0	zeitunabhängige Abwärmeproduktion als Wärmestrom [W]
<i>Flag</i>	Flag	0 bedeutet Anschluß an Speicher, 1 sonst (s. o.) (nur für DConstWH, DConstWQ)

5.1.2 Bedarfsprozesse mit zeitabhängigen Bedarfswerten

Theorie:

Bedarfsprozesse des Typs DFluc α mit $\alpha \in \{El, H, Q, Mech, WH, WQ\}$ beschreiben den zeitabhängigen Bedarf an $\dot{E}_{El}, \dot{E}_H, \dot{E}_Q, \dot{E}_{Mech}$ bzw. die Produktion von Abwärme \dot{E}_H^W (bzw. \dot{E}_Q^W). Die zeitabhängigen Bedarfswerte werden dabei alle aus dem .pit-File eingelesen (s.u.).

DFlucEl	NB 1	$\dot{E}_{El,En} = N \cdot \dot{E}_{El,En,0}$	Elektrischer Energiebedarf
DFlucMech	NB 1	$\dot{E}_{Mech,En} = N \cdot \dot{E}_{Mech,En,0}$	Mechanischer Energiebedarf
DFlucH	NB 1	$\dot{E}_{H,En} = N \cdot \dot{E}_{H,En,0}$	Nettoenthalpiebedarf
	IO-A	$T_{F,En} = T_{F,En,0}$ $T_{R,En} = T_{R,En,0}$	
DFlucQ	NB 1	$\dot{E}_{H,En} = N \cdot \dot{E}_{Q,En,0}$	Wärmebedarf
	IO-A	$T_{F,En} = T_{F,En,0}$ $T_{R,En} = \text{unbest.}$	programmtechnisch: $T_{R,En} = 0$
DFlucWH	NB 1	$\dot{E}_{H,Ex} \leq N \cdot \dot{E}_{H,Ex,0}^W$	<i>Flag</i> = 1: „≤“-Zeichen <i>Flag</i> = 0: „=“-Zeichen (Speichereinsatz)
	IO-A	$T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$ $T_{R,Ex} = T_{R,Ex,0}$	Abwärmeproduktion (Nettoenthalpie) (bei vorgegebener Rücklauftemperatur)

DFlucWQ

NB 1

$\dot{E}_{H,Ex} \leq N \cdot \dot{E}_{Q,Ex,0}^W$
--

Flag = 1 : „≤“-Zeichen*Flag* = 0: „=“-Zeichen
(Speichereinsatz)

IO-A

$T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$

Abwärmeproduktion (Wärmestrom)
(programmtechnisch: $T_{R,Ex} = 0$)

$T_{R,Ex} = \text{unbest.}$

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{El,En}$		
$\dot{E}_{Mech,En}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
Attribute:		
$T_{F,En}$		
$T_{R,En}$		
$T_{F,Ex}$		
$T_{R,Ex}$		
Zeitabh. Parameter:	für .pit-File	
$\dot{E}_{El,En,0}$	DotEE1_0	zeitabhängiger Bedarf an el. Energie [W]
$\dot{E}_{Mech,En,0}$	DotEMech_0	zeitabhängiger Bedarf an mech. Energie [W]
$\dot{E}_{H,En,0}$	DotEH_0	zeitabhängiger Nettoenthalpiebedarf [W]
$T_{F,En,0}$	TF_0	zeitabhängige Vorlauftemperatur [K]
$T_{R,En,0}$	TR_0	zeitabhängige Rücklauftemperatur [K]
$\dot{E}_{Q,En,0}$	DotEQ_0	zeitabhängiger Wärmebedarf [W]
$\dot{E}_{H,Ex,0}^W$	DotEWH_0	zeitabhängige Abwärmeproduktion [W]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0	zeitabhängige Vorlauftemperatur der Abwärme [K]
$T_{R,Ex,0}$	TR_0	zeitabhängige Rücklauftemperatur der Abwärme [K]
$\dot{E}_{Q,Ex,0}^W$	DotEWQ_0	zeitabhängige Abwärmeproduktion als Wärmestrom [W]
Parameter:		
<i>Flag</i>	Flag	0 bedeutet Anschluß an Speicher, 1 sonst (nur für DFlucWH, DFlucWQ)
<i>N</i>	Count	Anzahl identischer Bedarfsprozesse [1]

5.1.3 Raumwärmebedarfsprozesse

DRoom

Theorie:

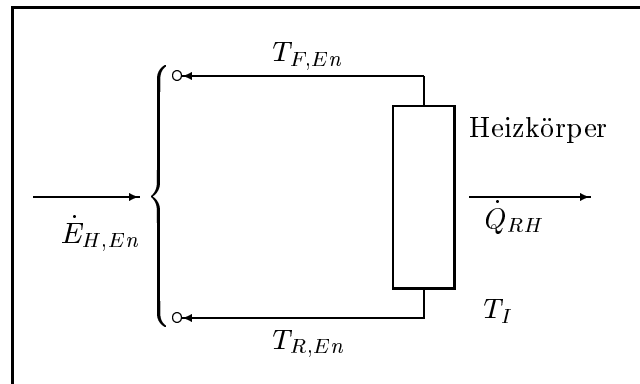


Abbildung 5.2: Physikalische Energiestromrichtung ($\dot{E}_{H,En}$ und \dot{Q}_{RH}) und Datenflußrichtung der Attribute ($T_{F,En}$ und $T_{R,En}$).

Aufgrund witterungsabhängiger Wärmeverluste erfordert die Aufrechterhaltung einer vorgegebenen Raumtemperatur T_I die Zufuhr einer variablen Wärmemenge \dot{Q}_{RH} , die im Rahmen des hier zu beschreibenden Modules als bekannt, d.h. als Zeitreihe vorliegend, vorausgesetzt wird. Als Quelle für diese Zeitreihe kommen bei einer retrospektiven Analyse Meßdaten in Frage. Im Planungsstadium bzw. bei fehlenden Meßdaten besteht die Möglichkeit, diese Zeitreihe durch den Einsatz von Raumwärmebedarfssimulationsprogrammen synthetisch zu generieren. Dabei ist darauf zu achten, daß die dazu verwendeten Wetterdaten mit denen übereinstimmen, die auch der nachfolgenden Analyse mit *deeco* zugrundegelegt werden. Die zur Raumheizung erforderliche Energie wird bei Warmwasser-Zentralheizungssystemen durch ein Wärmetransportmittel (Massenstrom \dot{m}) in Form eines Nettoenthalpiestromes $\dot{E}_{H,En}$ (mit der Vorlauftemperatur $T_{F,En}$) geliefert. Nach Abgabe der Wärme durch die sog. Heizflächen verläßt das Wärmetransportmittel den Bedarfsprozeß mit der Rücklauftemperatur $T_{R,En}$. Das System des Bedarfsprozesses besteht dabei 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 Wärmekapazität c des Wärmetransportmittels wie folgt:

$$\dot{E}_{H,En} = \dot{m}c(T_{F,En} - T_{R,En}). \quad (5.1)$$

Zur Wärmeübertragung zwischen Heizfläche und Raumluft ist eine endliche Temperaturdifferenz erforderlich. Da die Größe der Heizfläche vorgegeben ist, muß die mittlere Temperaturdifferenz erhöht werden, wenn der benötigte Wärmestrom in den Raum hinein, der bei vernachlässigbaren Verlusten mit \dot{E}_H quantitativ übereinstimmt, ansteigt. Die Wärmeleistung einer Heizfläche wird durch die Heizflächengröße, die Vorlauf- und Rücklauftemperatur, die Raumtemperatur und den Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmt. „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 Wärmestromes von der Temperaturdifferenz. Bei hohen Heizflächentemperaturen tritt ein erhöhter Wärmeübergang 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 Exponenten¹ n für die Umrechnung der Wärmeleistung von Heizkörpern beschrieben“ [Ric82], S. 23.

Berücksichtigt man darüber hinaus eine durch den Heizflächenfaktor f_{RH} charakterisierte Überdimensionierung der Heizkörper, so ergibt sich folgender Zusammenhang ([Ric82], [Ree79], [Rec95], DIN 4701 Teil 3):

$$\dot{Q}_{RH} = \dot{Q}_{RH,Max} \cdot \left(\frac{\Delta T_M}{\Delta T_{M,Max}} \right)^n \cdot \frac{1}{f_{RH}}. \quad (5.2)$$

Dabei ist $\dot{Q}_{RH,Max}$ die Heizkörper-Wärmeleistung im Auslegungszustand, d.h. bei maximaler Wärmeabgabe, ΔT_M die mittlere (=logarithmische) Temperaturdifferenz zwischen Heizfläche und Innenraum. $\Delta T_{M,Max}$ ist die entsprechende Temperaturdifferenz im Auslegungszustand. Es gilt:

$$\Delta T_M := \frac{(T_{F,En} - T_I) - (T_{R,En} - T_I)}{\ln \frac{T_{F,En} - T_I}{T_{R,En} - T_I}}. \quad (5.3)$$

$\Delta T_{M,Max}$ ist analog definiert, wobei $T_{F,En}$ durch $T_{F,En,0}$ und $T_{R,En}$ durch $T_{R,En,0}$ zu ersetzen ist. Unter $T_{F,En,0}$ ($T_{R,En,0}$) ist die Vorlauf (Rücklauf-)temperatur im Auslegungszustand zu verstehen.

Bei Vorgabe des variablen Wärmebedarfs \dot{Q}_{RH} sowie der zeitunabhängigen Parameter $\dot{Q}_{RH,Max}$, $T_{F,En,0}$, $T_{R,En,0}$ und f_{RH} ergeben sich $T_{F,En}$ und $T_{R,En}$ unter Heranziehung von

$$\frac{\dot{Q}_{RH} \cdot f_{RH}}{\dot{Q}_{RH,Max}} = \frac{T_{F,En} - T_{R,En}}{T_{F,En,0} - T_{R,En,0}} \quad (5.4)$$

([Ric82], S.24) bei konstant angenommener Wärmekapazität und zeitunabhängigem Massenstrom wie folgt:

$$\text{IO-A} \quad \boxed{\begin{aligned} T_{F,En} &= \frac{1}{1-B} \left\{ (1-B)T_I - B(T_{F,En,0} - T_{R,En,0}) \frac{\dot{Q}_{RH} f_{RH}}{\dot{Q}_{RH,Max}} \right\} \\ T_{R,En} &= T_{F,En} - \frac{\dot{Q}_{RH} f_{RH}}{\dot{Q}_{RH,Max}} (T_{F,En,0} - T_{R,En,0}) \end{aligned}}$$

mit

$$B := \exp \left\{ \ln \frac{T_{F,En,0} - T_I}{T_{R,En,0} - T_I} \cdot \left(\frac{\dot{Q}_{RH} f_{RH}}{\dot{Q}_{RH,Max}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right\}. \quad (5.5)$$

NB1

$$\boxed{\dot{E}_{H,En} = \dot{Q}_{RH} \cdot N}$$

Eine zulässige Nachtabsenkung der Innentemperatur wird modelliert durch $T_I = T_{ID}$, falls $h \in [h_D, h_N - 1]$ bzw. $T_I = T_{IN}$, falls $h \in [h_N, h_D - 1]$.

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

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,En}$		
Attribute:		
$T_{F,En}$ $T_{R,En}$		
Zeitabh. Einflußgrößen:	für .sit-File	
h	h	Stunde des Tages
Zeitabh. Parameter:	für .pit-File	
\dot{Q}_{RH}	DotQRH	(gemessener) Raumwärmebedarf [W]
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{Q}_{RH,Max}$	DotQRHMax	maximaler Raumwärmebedarf (gemessen) [W] (Auslegungspunkt)
f_{RH}	f_RH	Heizflächenfaktor = $\frac{\text{theoretisch notw. Heizfläche}}{\text{tatsächliche Heizfläche}}$ [1]
T_{ID} bzw. T_{IN}	T_ID, T_IN	Innentemperatur Tag bzw. Nacht [K]
$T_{F,En,0}$, $T_{R,En,0}$	TF_0, TR_0	Vor- bzw. Rücklauf temp. im Auslegungspunkt [K]
n	n	Heizflächenexponent [1]
h_D	h_D	Ende der Nachtabenkung [h]
h_N	h_N	Beginn der Nachtabenkung [h]
N	Count	Anzahl identischer Bedarfsprozesse [1]
Hilfsgrößen:		
ΔT_M		logarithmische Temperaturdifferenz
$\Delta T_{M,Max}$		logarithmische Temperaturdiff. im Auslegungspunkt
B		Def. s. Text S. 44
T_I		Innentemperatur

Beispielparameter

$\dot{Q}_{RH,Max}$	bedarfsabhängig	(aus dem .pit-File zu entnehmen)
f_{RH}	= 1,	keine Überdimensionierung
T_{ID}	= 293 K,	[20°C]
T_{IN}	= 289 K,	[16°C]
h_D	= 7°°	
h_N	= 22°°	
$T_{F,En,0}$	= 363 K,	[90°C] konv. Heizsystem
$T_{R,En,0}$	= 343 K,	[70°C] konv. Heizsystem
$T_{F,En,0}$	= 328 K,	[55°C] Niedertemperaturheizung
$T_{R,En,0}$	= 318 K,	[45°C] Niedertemperaturheizung
n	= 1.33	Glieder-, Plattenheizkörper, Konvektoren
n	= 1.25	Flächenheizung, [Ric82], S. 24

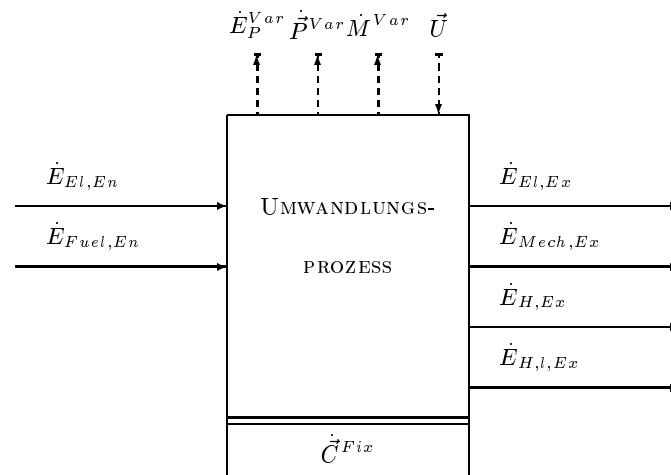


Abbildung 5.3: Umwandlungsprozeß.

5.2 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 Energie $\dot{E}_{Fuel,En}$, 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{P}^{Var} . Darüber hinaus können verschiedene, nutzbare Abwärmeströme entstehen. $\{l\}$ bezeichnet die Menge der Nettoenthalpieströme $\dot{E}_{H,l,Ex}$, $l \in \{l\}$, die dazu eingesetzt werden, die Abwärme rückzugewinnen. Viele Umwandlungsprozesse benötigen zur Erfüllung ihrer Aufgaben elektrische (Hilfs-)Energie $\dot{E}_{El,En}$. Alle Energieströme, die an einem Umwandlungsprozeß beteiligt sein können, sind in Abb. 5.3 wiedergegeben.

Verfügbare Umwandlungsprozeß-Module	<i>procType</i>
Kessel mit konstantem Wirkungsgrad	CBoiConst
Konventioneller Gas- oder Ölkessel	CBoiConv
Gas- bzw. Ölbrennwertkessel	CBoiCond
Gaswärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)	CGHP
Elektrowärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)	CEHP
Gegendruck-Heizkraftwerk	CBPT
Entnahmekondensations-Heizkraftwerk (inkl. Gasturbine)	CECT
Kraft-Wärme-Kopplungsanlage mit konstantem Wirkungsgrad (inkl. BHKW)	CCogConst

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
CBoiConst	Kessel, konstanter Wirkungsgrad		49
CBoiConv	Konventioneller Gas- oder Ölkessel, variabler Wirkungsgrad		52
CBoiCond	Brennwertkessel		56
CGHP	Gaswärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)		65
CEHP	Elektrowärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)		60
CBPT	Gegendruck-Heizkraftwerk		73
CECT	Entnahme-Kondensations-Heizkraftwerk (inkl. Gasturbinen)		79
CCogConst	Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage mit konst. Wirkungsgrad (inkl. BHKW)		90

5.2.1 Kessel mit konstantem Wirkungsgrad

CBoiConst

Theorie:

Kessel besitzen im allgemeinen keinen konstanten Wirkungsgrad. Für Vergleichszwecke (z.B. zum Vergleich mit anderen Energiemodellen) ist es aber dennoch interessant solche Kessel zu betrachten.

Der konstante Wirkungsgrad wird dazu im allgemeinen gleich dem mittleren Wirkungsgrad (=Nutzungsgrad) gesetzt.

- | | | |
|------|---|---|
| NB 1 | $\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N$ | optional |
| NB 2 | $\dot{E}_{Fuel,En} = \eta^{-1} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$ | |
| NB 3 | $\dot{E}_{El,En} = \lambda_H^{El} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$ | Zusatzenergiebedarf |
| NB 4 | $\dot{E}_{H,Ex} = 0$ | falls $T_{F,Ex} \leq T_{R,Ex}$ |
| ZF | $\dot{P}^{Var} = \vec{\omega}_{Fuel} \cdot \dot{E}_{Fuel,En}$ | Emissionen am Ort der Verbrennung (optional) |
| IO-A | $T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$ | (nur notwendig falls Flag = 2 bzw. Flag =1) z.B., falls der Kessel zur Beladung von Wärmespeichern herangezogen wird. |
| IO-A | $T_{R,Ex} = T_{R,Ex,0}$ | (nur notwendig falls Flag = 1) |

Wird $T_{R,Ex,0} = 0$ gesetzt, so dient CBoiConst zur Erzeugung von Wärmeströmen (im Gegensatz zu Enthalpieströmen). Dies stellt die Kompatibilität zum Vorgängermodell *ecco* [Gro92] sicher.

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{Fuel,En}$ $\dot{E}_{El,En}$ $\dot{E}_{H,Ex}$		Zusatzenergiebedarf (elektrisch) [W]
Attribute:		
$T_{F,Ex}, T_{R,Ex}$		
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$ η λ_H^{El} $\vec{\omega}_{Fuel}$ $\omega_{\nu, Fuel}$ z.B. $\omega_{CO_2, Fuel}$ <i>Flag</i> $T_{F,Ex,0}, T_{R,Ex,0}$ <i>N</i>	DotEH_0 eta lambdaELH sVarCO2 (optional) Flag	Obergrenze für Wärmeabgabe (Maximalleistung) [W] Wärmeerzeugungs- bzw. Nutzungsgrad [1] spez. Bedarf an elektrischer Energie (Zusatzenergie) bezogen auf eine Einheit abgegebener Wärme [1] Vektor der spezifischen Emissionsfaktoren Komponente der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} \cdot W^{-1}$] spezifischer CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s} \cdot W^{-1}$] =4 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ } 4(T)$; =2 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ } 2(T)$; =1 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ } 1(T)$; vorg. Vorlauftemperatur (falls Flag = 2 oder 1) bzw. Rücklauftemperatur (falls Flag = 1) [K] Zahl der identischen Kessel
Verallg. Kosten:		
\vec{P}^{Var}		Vektor der Emissionen [$\frac{kg}{s}$]

Beispielparameter

$$\left. \begin{array}{l} \text{Gas} \quad : \quad \eta = 0,82 \\ \text{Öl} \quad : \quad \eta = 0,81 \\ \text{Kohle} \quad : \quad \eta = 0,74 \\ \dot{E}_{H,Ex,0} = 5 \cdot 10^4 \text{ W} \end{array} \right\} \text{ [End87], Leistung } < 50 \text{ kW, Baujahr nach 1979}$$
$$\lambda_H^{El} = 0,022 \quad \text{ [Mun80]}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Gas} \quad : \quad \omega_{CO_2} = 5,5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \text{W}^{-1} \left(= \frac{\text{kg}}{\text{J}} \right) \\ \text{Öl (leicht)} \quad : \quad \omega_{CO_2} = 7,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \text{W}^{-1} \\ \text{Steinkohle} \quad : \quad \omega_{CO_2} = 9,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \text{W}^{-1} \end{array} \right\} \text{ [Hes95]}$$

5.2.2 Konventionelle Gas- oder Ölkessel

CBoiConv

Theorie:

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. BImSchVO³ vom 15.7.88 werden die Abgasverluste wie folgt ermittelt (s. z.B. [Sch95], S.649):

$$\dot{E}_{H,Ex}^W = \dot{E}_{Fuel,En} \cdot (T_W - T_{Env}) \cdot \left(\frac{A_1}{100 \cdot X_{CO_2}} + B \right) \cdot \frac{1}{100} \quad (5.6)$$

Dabei ist $\dot{E}_{H,Ex}^W$ der Abgasverlust, $\dot{E}_{Fuel,En}$ die zugeführte chemische Energie (pro Zeiteinheit), T_W die Abgastemperatur, T_{Env} die Temperatur der Kesselumgebung (bzw. Temperatur der angesaugten Luft) und X_{CO_2} der Kohlendioxidgehalt der Abgase in Vol.-% (dimensionslos angegeben als Bruchteil der 1). Die empirischen Beiwerte A_1 und B sind brennstoffabhängig und in der 1.BImSchVO vom 15.7.88 wiedergegeben.

Gemäß Gl. 5.6, 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 Wärmeübertragerflächen 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 Rücklufttemperaturen 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 und ebenso wie der innere Auskühlverlust von der mittleren Kesselwassertemperatur beeinflusst werden.

²Darunter werden im folgenden Kessel ohne Brennwertnutzung verstanden.

³Bundes-Immissionsschutz-Verordnung.

Das hier skizzierte Verhalten der Kessel wird im Rahmen von *deeco* wie folgt modelliert:

$$\text{NB 1} \quad \boxed{\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N} \quad (\text{optional})$$

- Der lastabhängige Abgasverlust berechnet sich gemäß 1. BImSchVO vom 15.7.88 gemäß Gl. 5.6.
- Der lastunabhängige Abstrahl- und Auskühlverlust wird wie folgt angenähert:

$$\dot{Q}_{Rad} = \frac{T_B - T_{Env}}{T_{B,0} - T_{Env}} \cdot \dot{Q}_{Rad,0} \cdot N \quad (5.7)$$

Es wird davon ausgegangen, daß dieser Verlust sofort durch Verbrennung ausgeglichen wird (und nicht erst im nächsten Brennerlaufzeitintervall).

Aus der Energiebilanz

$$\dot{E}_{Fuel,Ex} = \dot{E}_{H,Ex} + \dot{Q}_{Rad} + \dot{E}_{H,Ex}^W \quad (5.8)$$

ergibt sich dann sofort:

NB 2

$$\dot{E}_{Fuel,En} = \underbrace{\frac{1}{\left[1 - \left(\frac{T_W - T_{Env}}{100}\right) \left(\frac{A_1}{100 \cdot X_{CO_2}} + B\right)\right]} \cdot \dot{E}_{H,Ex} + \frac{\frac{T_B - T_{Env}}{T_{B,0} - T_{Env}} \cdot \dot{Q}_{Rad,0} \cdot N}{\left[1 - \left(\frac{T_W - T_{Env}}{100}\right) \left(\frac{A_1}{100 \cdot X_{CO_2}} + B\right)\right]}}_{\text{Unabhängig von } \dot{E}_{H,Ex}}$$

mit $T_B \approx \frac{T_{F,Ex} + T_{R,Ex}}{2}$ (Mitteltemperatur des Kesselwassers bei kleiner Spreizung) und $T_W = T_{W,0} + (T_B - T_{B,0})$ (Änderung der Kesseltemp. \approx Änderung der Abgastemperatur).

$$\text{NB 3} \quad \boxed{\dot{E}_{El,En} = \lambda_H^{El} \cdot \dot{E}_{H,Ex}} \quad \text{Zusatzenergiebedarf}$$

$$\text{ZF} \quad \boxed{\dot{\vec{P}}^{Var} = \vec{\omega}_{Fuel} \cdot \dot{E}_{Fuel,En}} \quad \text{Emissionen am Ort der Verbrennung}$$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}} \quad (\text{falls Flag} = 2, \text{ z.B. Speicherbeladung})$$

$$\text{NB 4} \quad \boxed{\dot{E}_{H,Ex} = 0} \quad \text{falls } T_{F,Ex} \leq T_{R,Ex}$$

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{Fuel,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}$		Vorlauftemperatur des Heizwassers
$T_{R,Ex}$		Rücklauftemperatur des Heizwassers
Parameter:	für .pit-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe [W]
Flag	Flag	= 4 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=}$ Typ 4(T); = 2 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=}$ Typ 2(T);
T_{Env}	T_Env	Kesselumgebungstemperatur [K]
A_1, B	A_1, B	Bewerte gem. 1. BImSchVO vom 15.7.88 [K^{-1}]
X_{CO_2}	X_CO2	CO ₂ - Gehalt des Abgases in Volumen-% [1]
N	Count	Zahl identischer Kessel
$T_{W,0}$	T_W	Abgastemperatur bei Nennleistung [K]
$T_{B,0}$	T_B	Kesseltemperatur bei Nennleistung [K]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0	vorg. Vorlauftemperatur (falls Flag = 2)[K]
$\dot{Q}_{Rad,0}$	DotQ_Rad	Abstrahlverlust bei Nennleistung [W]
λ_H^{El}	lambdaEl_H	spezifischer Elektroenergiebedarf (bezogen auf Wärmeabgabe) [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}, \omega_{\nu, Fuel}$		Vektor bzw. Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2, Fuel}$	sVarCO2 (optional)	
Hilfsgrößen:		
\dot{Q}_{Rad}		Abstrahlverlust [W]
T_B		Kesselwassertemperatur [K]
T_W		Abgastemperatur [K]

Beispielparameter

(für 12 kW Nennleistung)

Gaskessel (Erdgas):

Ölkessel:

$$T_{Env} = 293K (= 20^\circ C)$$

$$T_{Env} = 293K$$

$$A_1 = 0,37K^{-1}$$

$$A_1 = 0,5K^{-1} \quad [\text{Sch95}]$$

$$B = 0,009K^{-1}$$

$$B = 0,007K^{-1} \quad [\text{Sch95}]$$

$$X_{CO_2} = 7,4\% = 0,074$$

$$X_{CO_2} = 8,5\% = 0,085 \quad [\text{Kir83}]$$

$$T_{W,0} = 573K (= 300^\circ C)$$

$$T_{W,0} = 573K \quad [\text{Kir83}]$$

$$T_{B,0} = 353K (= 80^\circ C)$$

$$T_{B,0} = 353K$$

$$\dot{Q}_{Rad,0} = 0,5 \cdot 10^3 W$$

$$\dot{Q}_{Rad,0} = 0,5 \cdot 10^3 W \quad [\text{End87}]$$

$$\dot{E}_{H,Ex,0} = 2 \cdot 10^3 W$$

$$\dot{E}_{H,Ex,0} = 2 \cdot 10^3 W$$

Anwendungshinweise

1. Die mittleren Nutzungsgrade der Kessel können (und sollen stets) aus den Ergebnissen im „.pov-File“ berechnet werden. Dabei sind die absoluten Energieströme zu verwenden, da die Nebenbedingungskoeffizienten den Grundbedarf nicht enthalten.
2. Bei der Anwendung der Kessel ist aufgrund des optimierungsunabhängigen Grundbedarfs eine Überdimensionierung zu vermeiden!
3. Bei Veränderung der Maximalleistung muß auch DotQ_Rad angepaßt werden.
4. Bei sehr kleinen Bedarfstemperaturen liegt auch die mittlere Kesseltemperatur sehr niedrig, so daß es vorkommen kann, daß diese unterhalb der vorgegebenen Kesselumgebungstemperatur liegt. Dies führt zur Fehlermeldung: „Numerical Recipies runtime error; Bad input tableau“ und läßt sich durch die Wahl kleinerer Kesselumgebungstemperaturen vermeiden (z. B. 15°C).

Literatur

[Hol83], [BMW183], [End87], [Sch93], [Sch95], [Kri83], [Mun80].

5.2.3 Gas- bzw. Ölbrennwertkessel

CBoiCond

Theorie:

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. Bei herkömmlichen Gaskesseln führt dies aufgrund des durch Verunreinigungen leicht sauren 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. Der Zusammenhang zwischen Rücklauftemperatur und Wirkungsgrad kann empirisch bestimmt und numerisch durch Anfitzen an die so erhaltenen Meßergebnisse dargestellt werden.

[Laz86] empfiehlt dazu, zwei Bereiche zu unterscheiden, nämlich Rücklauftemperaturen, die noch nicht zu einer (Teil-)Kondensation führen und solche, bei denen dies der Fall ist.

- Für den Bereich ohne Teilkondensation ist es sinnvoll wie in [Laz86] einen linearen Wirkungsgradverlauf anzunehmen (analog zur Siegert-Formel bei konventionellen Heizkesseln).
- Für den Bereich mit Teilkondensation wird von [Ros86] ein Polynomansatz bis zum quadratischen Term vorgeschlagen.

Daraus ergibt sich für die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Rücklauftemperatur folgendes einfaches Modell:

$$\eta(T_{R,Ex}) = \begin{cases} A_1 - B_1(T_{R,Ex} - T_0) - C_1(T_{R,Ex} - T_0)^2 & \text{für } T_{R,Ex} < T_{Cond} \\ A_2 - B_2(T_{R,Ex} - T_0) & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.9)$$

Die Bestimmung von A_1 , B_1 , A_2 , B_2 , C_1 erfolgt durch Kurvenanpassung an dafür geeignete Meßergebnisse.

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

NB 1	$\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N$	(optional)
NB 2	$\dot{E}_{Fuel,En} = \eta(T_{R,Ex})^{-1} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$	
NB 3	$\dot{E}_{El,En} = \lambda_H^{El} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$	Zusatzenergiebedarf
NB 4	$\dot{E}_{H,Ex} = 0$	falls $(T_{F,Ex} \leq T_{R,Ex}) \vee (T_{R,Ex} \leq T_{R,Ex,Min}) \vee (T_{R,Ex} \geq T_{R,Ex,Max})$
ZF	$\vec{P}^{Var} = \vec{\omega}_{Fuel} \cdot \dot{E}_{Fuel,En}$	Emissionen am Ort der Verbrennung
IO-A	$T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$	(falls Flag = 2)

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{Fuel,En}$ $\dot{E}_{El,En}$ $\dot{E}_{H,Ex}$		Zusatzenergiebedarf [W]
Attribute:		
$T_{F,Ex}$ $T_{R,Ex}$		
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe [W]
T_0	T_0	Bezugstemperatur [K]
T_{Cond}	T_Cond	Kondensations-Rücklaufstemperatur [K]
A_1, A_2	A_1, A_2	Fit-Parameter in Gl. 5.9 [1]
B_1, B_2	B_1, B_2	Fit-Parameter in Gl. 5.9 [$\frac{1}{K}$]
C_1	C_1	Fit-Parameter in Gl. 5.9 [$\frac{1}{K^2}$]
N	Count	Zahl identischer Kessel
$Flag$	Flag	= 4 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4(T)}$; = 2 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2(T)}$;
$T_{F,Ex,0}$	TF_0 (optional)	vorgegeb. Vorlaufstemperatur (falls Flag = 2) [K]
$T_{R,Max}, T_{R,Min}$	TR_Max, TR_Min	maximale bzw. minimale Rücklaufstemperatur [K]
λ_H^{El}	lambdaELH	spez. Bedarf an el. Energie (bez. auf $\dot{E}_{H,Ex}$) [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}, \omega_{\nu, Fuel}$		Vektor bzw. Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2, Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
Verallg. Kosten:		
\vec{P}^{Var}		Vektor der Emissionen [$\frac{kg}{s}$]
Hilfsgrößen:		
$\eta(T_{R,Ex})$		Wirkungsgrad des Kessels [1]

Beispielparameter

Durch Kurvenanpassung:

$$A_1 = \begin{cases} 1,0921194 & [\text{Boc92}] \\ 1,0937344 & [\text{Laz86}] \end{cases}$$

$$B_1 = \begin{cases} 0,00030329 \frac{1}{K} & [\text{Boc92}] \\ 0,00048369 \frac{1}{K} & [\text{Laz86}] \end{cases}$$

$$C_1 = \begin{cases} 0,000035584 \frac{1}{K^2} & [\text{Boc92}] \\ 0,000032166 \frac{1}{K^2} & [\text{Laz86}] \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} 0,9818 & [\text{Boc92}] \\ 0,9846 & [\text{Laz86}] \end{cases}$$

$$B_2 = \begin{cases} 0,0005000 \frac{1}{K} & [\text{Boc92}] \\ 0,0005079 \frac{1}{K} & [\text{Laz86}] \end{cases}$$

$$T_0 = 273,15 \text{ K}$$

$$T_{Cond} = \begin{cases} 331,6623 \text{ K} & [\text{Boc92}] \\ 331,6913 \text{ K} & [\text{Laz86}] \end{cases}$$

$$\lambda_H^{El} = 0,022 \quad [\text{Mun80}]$$

Literatur

[Boc92], [Laz86].

5.2.4 Elektrowärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)

CEHP

Theorie:

Bei den am weitesten verbreiteten Wärmepumpen⁵ 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 Verdichtungs Vorgang 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 $[T_{Con}]$ das für die Übertragung der im Kondensator freiwerdenden Kondensationsenthalpie $[= \dot{E}_{H,Ex}]$ 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 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,⁶ die ausreichen, alle anderen Variablen eindeutig zu bestimmen. Bezüglich der Abhängigkeit des Wirkungsgrades ε_{HP} 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 wird:

$$\varepsilon_{HP} = \eta_G \cdot \frac{T_{con}}{T_{con} - T_{vap}}. \quad (5.10)$$

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.

Bei tiefen Außentemperaturen tritt bei Außenluft-Wärmepumpen eine Vereisung des Außenluft-Kältemittel-Wärmeübertragers (des sog. Anergiesammlers [Fri92]) auf, die den Wärmeübergang behindert und durch regelmäßiges Entfrostern durch kurzzeitiges Aufheizen des Wärmeübertragers beseitigt werden kann. Der dafür erforderliche Energieeinsatz kann gemäß [Mie81] in guter Näherung durch einen einfachen Strafterm f_{Ice} 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. Primärenergie-

⁵ Ausführliche Darstellungen findet man in [Cub77] u. [Kir76].

⁶ Diese Auswahl ist wie auch bei vielen anderen Prozessen nicht eindeutig und orientiert sich an der Aufgabenstellung.

einsatz, CO₂-Emissionen, etc.) sinnvoll ist. Es berücksichtigt dabei neben der Güte alternativ zugelassener Energieversorgungsoptionen (ebenfalls im Hinblick auf die gewählte 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 von durch *deeco* berechneten mittleren Wirkungsgraden ebenso zu berücksichtigen wie die Tatsache, daß diese höheren Arbeitszahlen aufgrund der strengeren 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.

Mit $T_{con} \approx T_{F,con} + \Delta T_{con}$ und $T_{vap} = T_{HS} - \Delta T_{vap}$ ([Mie81], S.339) gilt:

$$\varepsilon_{HP} = \eta_G \cdot \frac{T_{F,con} + \Delta T_{con}}{T_{F,con} + \Delta T_{con} - T_{HS} + \Delta T_{vap}} \cdot f_{Ice}$$

Strafterm für Entfrosthung: $f_{Ice} = 1$ falls $T_A > 277 \text{ K} = T_{Ice}$ ($= 4^\circ \text{C}$)
(des Anergiesammlers)

$$f_{Ice} = 0,75 \quad \text{sonst } (=f_{Ice,0}) \quad ([\text{Mie81}], \text{ S. 3.38})$$

In Übereinstimmung mit Miedema [Mie81] wird im folgenden angenommen, daß sowohl η_G als auch ΔT_{con} und ΔT_{vap} lastunabhängig sind (z.B. durch taktenden Betrieb der Wärmepumpe).

Bestimmung der Wärmequellentemperatur T_{HS} :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Außenluftwärmepumpe: } T_{HS} = T_A \\ \text{Gewässerwärmepumpe: } T_{HS} = 210,36 + 0,25 T_A \\ \text{Erdreichwärmepumpe: } T_{HS} = 210,36 + 0,25 T_A \end{array} \right\} [\text{Ric82}], \text{ S. 29}$$

Naheliegender Ansatz: $T_{HS} = d \cdot T_A + c$ mit konstantem c und d (vgl. [Kor83]).

Das hier skizzierte Verhalten der Wärmepumpe wird in *deeco* wie folgt modelliert:

$$\text{NB 1} \quad \boxed{\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N}$$

$$\text{NB 2} \quad \boxed{\dot{E}_{El,En} = \left\{ \eta_G \cdot f_{Ice} \frac{T_{F,con} + \Delta T_{con}}{T_{F,con} + \Delta T_{con} - T_{HS} + \Delta T_{vap}} \right\}^{-1} \dot{E}_{H,Ex}}$$

$$\text{NB 3} \quad \boxed{\dot{E}_{H,Ex} = 0} \text{ falls (alternativ oder simultan):}$$

- 1.) $(T_{con,Min} \leq T_{con} \leq T_{con,Max}) \vee (T_{vap,Min} \leq T_{vap} \leq T_{vap,Max})$
nicht erfüllt ist (Einsatzgrenzen des Kältemittels).
- 2.) $T_{con} < T_{vap}$
- 3.) $T_{F,Ex} \leq T_{R,Ex}$
- 4.) $\varepsilon_{HP} < 1$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}} \text{ (nur falls Flag = 2)}$$

$$T_{F,con} = \begin{cases} T_{F,Ex} & \text{falls Flag = 4} \\ T_{F,Ex,0} & \text{falls Flag = 2 (z.B. Speicherbeladung)} \end{cases}$$

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}$		Vorlauftemperatur des Heizmediums [K]
$T_{R,Ex}$		Rücklauftemperatur des Heizmediums [K]
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe [W]
<i>Flag</i>	Flag	= 4 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ } 4(\text{T})$; = 2 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ } 2(\text{T})$;
η_G	eta_G	Gütefaktor (im Vergleich zur idealen Wärmepumpe) [1]
$f_{Ice,0}$	f_Ice0	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Entfrostung des Anergiesammlers [1]
T_{Ice}	T_Ice	Schwellentemperatur für Entfrostung [K]
ΔT_{con}	deltaT_Con	Temperaturdifferenz im Kondensator [K] (Grädigkeit des Kondensators)
ΔT_{vap}	deltaT_Vap	Grädigkeit des Verdampfers
N	Count	Zahl identischer Wärmepumpen [1]
$T_{con,Max}$	T_ConMax	Maximal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{con,Min}$	T_ConMin	Minimal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{vap,Max}$	T_VapMax	Maximal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{vap,Min}$	T_VapMin	Minimal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0 (optional)	Vorgegebene Vorlauftemperatur [K] (nur falls Flag = 2)
c	c	} Fitparameter zur Bestimmung der } Wärmequellentemperatur T_{HS} [K] bzw. [1]
d	d	

Einflußgrößen:		
T_A		Außentemperatur [K]
Hilfsgrößen:		
ε_{HP}		Wirkungsgrad der (eigentlichen) Wärmepumpe [1]
T_{con}		Kondensatortemperatur [K]
T_{vap}		Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,con}$		Vorlauftemperatur im Abnehmerteil des Kondensators [K]
T_{HS}		Temperatur der Wärmequelle [K]
f_{Ice}		Strafterm zur Reduktion des Wärmepumpenwirkungsgrades durch Entfrostung [1]

Beispielparameter

s.S. 70

Literatur

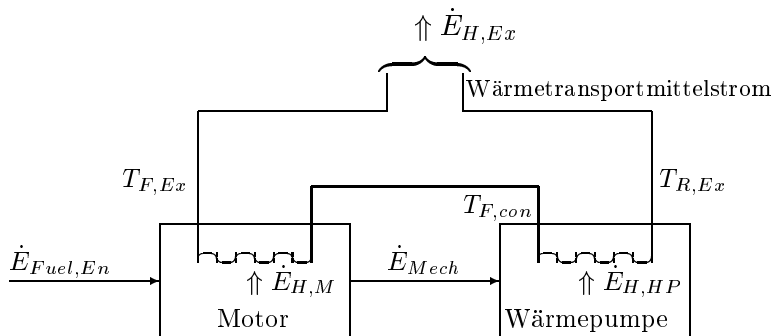
[Mie81], [Ric82], [Lun89].

5.2.5 Gaswärmepumpe (Außenluft, Erdreich, Gewässer)

CGHP

Theorie:

(s. a. Elektrowärmepumpe)



Bei Gaswärmepumpen erfolgt die Bereitstellung der für den Verdichtungsprozess (vgl. dazu die Diskussion des Prinzips der Kaltdampf-Kompressionswärmepumpe in Abschnitt 5.2.4) 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 übereinstimmt⁷, 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.

Für den Wirkungsgrad der (eigentlichen) Wärmepumpe gilt [Mie81], S. 3.37ff:

$$\varepsilon_{HP} = \eta_G \cdot f_{Ice} \cdot \frac{T_{F,con} + \Delta T_{con}}{T_{F,con} + \Delta T_{con} - T_{HS} + \Delta T_{Vap}}$$

⁷Der geringe Unterschied kann leicht durch eine Modifikation des Zahlenwertes von η_G (s. Gl. 5.10) berücksichtigt werden.

Bei Gaswärmepumpen ist $\varepsilon_{HP} := \frac{\dot{E}_{H,HP}}{\dot{E}_{Mech}}$ (\dot{E}_{Mech} = Leistung der Antriebswelle, $\dot{E}_{H,HP}$ = Kondensatorleistung.)

Weitere Definitionen: $\eta_{Mech} := \frac{\dot{E}_{Mech}}{\dot{E}_{Fuel,En}}$
 $a := \frac{\dot{E}_{H,M}}{\dot{E}_{Fuel,En}}$ ($\dot{E}_{H,M}$ = Rückgewinnbare Abwärme durch Motor und Abgaskühlung.)

a ist somit der Anteil der nutzbaren Abwärme am Brennstoffeinsatz im Motor. a und η_{Mech} werden wie in [Ric82], S. 35 ff als last- und temperaturunabhängig angenommen.

Die Heizzahl der Motorwärmepumpe berechnet sich wie folgt:

$$\varphi = \frac{\dot{E}_{H,Ex}}{\dot{E}_{Fuel,En}} = \frac{\dot{E}_{H,M} + \dot{E}_{H,HP}}{\dot{E}_{Fuel,En}}$$

Somit gilt $\varphi = a + \varepsilon_{HP} \cdot \eta_{Mech}$.

Weiter gilt:

$$\dot{E}_{H,Ex} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{F,Ex} - T_{R,Ex}) \quad (5.11)$$

$$\dot{E}_{H,HP} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{F,con} - T_{R,Ex}) \quad (5.12)$$

$$\dot{E}_{H,M} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{F,Ex} - T_{F,con}) \quad (5.13)$$

Einsetzen von Gl. 5.12 in 5.13 ergibt:

$$\frac{a}{T_{F,Ex} - T_{F,con}} = \frac{\varepsilon_{HP} \cdot \eta_{Mech}}{T_{F,con} - T_{R,Ex}}$$

Einsetzen von ε_{HP} liefert dann eine quadratische Gleichung zur Bestimmung von $T_{F,con}$ in Abhängigkeit von $T_{F,Ex}$ und $T_{R,Ex}$:

Somit ist ε_{HP} und damit auch φ eine Funktion von $T_{F,Ex}$, $T_{R,Ex}$ und T_{HS} :

$$\varphi = a + \varepsilon_{HP}(T_{HS}, T_{F,Ex}, T_{R,Ex}) \cdot \eta_{Mech}$$

Die Bestimmung von T_{HS} erfolgt analog zur Diskussion in Abschnitt 5.2.4.

NB 1 $\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N$

NB 2 $\dot{E}_{Fuel,En} = \{a + \varepsilon_{HP}(T_A, T_{F,Ex}, T_{R,Ex}) \cdot \eta_{Mech}\}^{-1} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$

NB 3 $\dot{E}_{H,Ex} = 0$ falls (alternativ oder simultan)

1.) $(T_{con,Min} \leq T_{con} \leq T_{con,Max}) \vee (T_{vap,Min} \leq T_{vap} \leq T_{vap,Max})$
nicht erfüllt sind.

2.) $T_{con} < T_{vap}$

3.) $T_{F,Ex} \leq T_{R,Ex}$

4.) $\varepsilon_{HP} < 1$

NB 4 $\dot{E}_{El,En} = \lambda_H^{El} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$ Zusatzenergiebedarf (Solepumpe, Regelung)

ZF $\dot{\vec{P}}^{Var} = \vec{\omega}_{Fuel} \cdot \dot{E}_{Fuel,En}$ Emissionen am Ort der Wärmepumpe

IO-A $T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$ (nur notwendig falls Flag = 2;
z.B. Speicherbeladung).

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
$\dot{E}_{Fuel,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}$		Vorlauftemperatur des Heizmediums [K]
$T_{R,Ex}$		Rücklauftemperatur des Heizmediums [K]
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe [W]
<i>Flag</i>	Flag	= 4 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ } 4(T)$; = 2 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ } 2(T)$;
η_G	eta_G	Gütefaktor (im Vergleich zur idealen Wärmepumpe) [1]
$f_{Ice,0}$	f_Ice0	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung der Entfrostung des Anergiesammlers [1]
T_{Ice}	T_Ice	Schwellentemperatur für Entfrostung [K]
ΔT_{con}	deltaT_Con	Temperaturdifferenz im Kondensator [K] (Grädigkeit des Kondensators)
ΔT_{vap}	deltaT_Vap	Grädigkeit des Verdampfers [K]
N	Count	Zahl identischer Wärmepumpen [1]
$T_{con,Max}$	T_ConMax	Maximal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{con,Min}$	T_ConMin	Minimal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{vap,Max}$	T_VapMax	Maximal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{vap,Min}$	T_VapMin	Minimal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,Ex,0}$	T_0 (optional)	Vorgegebene Vorlauftemperatur [K] (nur falls Flag = 2)
c	c	} Fitparameter zur Bestimmung der } Wärmequellentemperatur T_{HS} [K] bzw. [1]
d	d	

Weitere Parameter:	.piv-File	
η_{Mech}	eta_Mech	Mechanischer Motorwirkungsgrad [1]
a	a	Anteil der nutzbaren Abwärme am Brennstoffeinsatz im Motor [1]
λ_H^{El}	lambdaEl_H	spez. Bedarf an el. Energie (Zusatzenergie) bezogen auf eine Einheit abgegebener Wärme [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}, \omega_{\nu, Fuel}$		Vektor bzw. Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2, Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
Verallg. Kosten:		
$\frac{\dot{P}^{Var}}{P}$		Vektor der Emissionen [$\frac{kg}{s}$]
Einflußgrößen:		
T_A		Außentemperatur [K]
Hilfsgrößen:		
ε_{HP}		Wirkungsgrad der (eigentlichen) Wärmepumpe [1]
T_{con}		Kondensatortemperatur [K]
T_{vap}		Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,con}$		Vorlauftemperaur im Abnehmerteil des Kondensators [K]
T_{HS}		Temperatur der Wärmequelle [K]
$\dot{E}_{H,HP}$		Wärmeabgabe (pro Zeiteinheit) der eigentlichen Wärmepumpe =Wärmeabgabe des Kondensators [W]
\dot{E}_{Mech}		Mechanische Antriebsleistung des Verdichters der Wärmepumpe [W]
$\dot{E}_{H,M}$		Nutzbare Motorwärme pro Zeiteinheit (Abgaswärme, Motorkühlung) [W]
φ		Heizzahl der Wärmepumpe [1]
$\dot{m} \cdot c$		Wärmekapazitätsstrom des Heizmittels [$\frac{kg}{s} \cdot \frac{J}{kgK}$]

Beispielparameter

$$\eta_G = \begin{cases} 0,5 - 0,6 & [\text{Rec95}] \\ 0,45 - 0,65 & [\text{RWE83}] \\ 0,5 & [\text{Ric82}], \text{ S. 43 für Elektrowärmepumpen} \\ & (\text{El. Motorwirkungsgrad von } 0,97 \text{ enthalten.}) \\ 0,52 & [\text{Ric82}], \text{ S. 43 für Gaswärmepumpen} \\ 0,5 & [\text{Mie81}], \text{ S. 3.38} \\ 0,52 & \cdot \frac{\eta_M}{1+(0,03\dots 0,08)} \text{ bei 3 bis 8\% el. Hilfsenergiebedarf} \\ & (\text{z.B. für Absorber}). \text{ Nur gültig für Elektrowärmepumpen} \\ & (\text{s.u.}) [\text{Die84}]. \end{cases}$$

Bei Elektrowärmepumpen ist in η_G der Elektromotorwirkungsgrad η_M zu berücksichtigen ([RWE83], S.22):

Motorleistung [kW]	Wirkungsgrad η_M
1	0,75
5	0,85
10	0,87
20	0,88
50	0,90
100	0,93
1000	0,96

$$\Delta T_{con} = \begin{cases} \geq 3 \text{ K} & [\text{Rec95}], \text{ S. 498} \\ 5 \text{ K} & [\text{Mie81}], \text{ S. 3.37} \\ 3 \text{ K} & [\text{Ric82}], \text{ S. 43} \end{cases}$$

$$\Delta T_{vap} = \left\{ \begin{array}{lll} \geq 5 \text{ K} & [\text{Rec95}], \text{ S. 498} & \\ 5 \text{ K} & [\text{Mie81}], \text{ S. 3.37} & \\ 5 \text{ K} & [\text{Ric82}], \text{ S. 43} & \text{Luft-Wasser-Übergang} \\ & & \text{(Bestwerte)} \\ 3 \text{ K} & [\text{Ric82}], \text{ S. 43} & \text{Wasser-Wasser-Übergang} \\ & & \text{(Bestwerte)} \\ 20 \text{ K} & [\text{Mai86}], \text{ S. 79} & \text{(Ab-)Luft-} \\ & & \text{Wasser-Übergang} \\ 5 \text{ K} & [\text{Mai86}], \text{ S. 79} & \text{Wasser-Wasser-Übergang} \\ 10-20 \text{ K} & [\text{Ric82}], \text{ S. 31} & \text{Luft-Wasser-Übergang} \\ & \text{Standardwert} & \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} f_{Ice} = 0,75 \\ T_{Ice} = 277 \text{ K} \end{array} \right\} [\text{Mie81}], \text{ S. 3.38}$$

$$c = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{für Außenluftwärmepumpen} \\ 210,36 \text{ K} & \text{für Erdreich- bzw. Gewässerwärmepumpen} \end{array} \right\} [\text{Ric82}], \text{ S. 39}$$

$$d = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{für Außenluftwärmepumpen} \\ 0,25 & \text{für Erdreich- bzw. Gewässerwärmepumpen} \end{array} \right\} [\text{Ric82}], \text{ S. 39}$$

Zusätzliche Parameter für Motorwärmepumpen:

$$\lambda_H^{El} = 0,009-0,028 \quad (3-8\% \text{ bezogen auf die Stromaufnahme bei EWP}) \\ \text{[Die84]}$$

$$\eta_{Mech} = \left\{ \begin{array}{ll} 0,32 & \dot{E}_{Mech} \leq 150 \text{ kW } (\dot{E}_{H,Ex} \leq 750 \text{ kW}) \text{ [Ric82], S. 35} \\ 0,33 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Gasmotor} \\ 0,39 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Dieselmotor} \end{array} \right\} \text{ [Rec95]}$$

$$\left. \begin{array}{l} 0,25 - 0,35 \text{ Gasmotor} \\ 0,30 - 0,42 \text{ Dieselmotor} \end{array} \right\} \text{ [RWE83], S. 23}$$

$$a = \left\{ \begin{array}{ll} 0,48 & \dot{E}_{Mech} \leq 150 \text{ kW} ; \text{ [Ric82], S. 35} \\ 0,50 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Gasmotor} \\ 0,44 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Dieselmotor} \end{array} \right\} \text{ [Rec95]}$$

$$\left. \begin{array}{l} 0,53 - 0,63 \text{ Gasmotor: } a + \eta_{Mech} \leq 0,88 \\ 0,42 - 0,54 \text{ Dieselmotor: } a + \eta_{Mech} \leq 0,84 \end{array} \right\} \text{ [RWE83], S. 23}$$

$T_{F,Ex,0}$ wird bei Motorwärmepumpen begrenzt durch die typische minimale Abgastemperatur:

Sie beträgt:

$$\left. \begin{array}{l} 393 \text{ K } (120^\circ\text{C}) \text{ bei Gasmotoren} \\ 453 \text{ K } (180^\circ\text{C}) \text{ bei Dieselmotoren} \end{array} \right\} \text{ [Rec95], [RWE83]}$$

333 K (60°C) bei Gasmotoren. Falls eine Brennwertnutzung möglich ist gilt:
 $a = 0,56$ ($\eta_{Mech} = 0,33$) [Jue81].

5.2.6 Gegendruck-Heizkraftwerk

CBPT

Theorie:

Bei einem Gegendruck-Heizkraftwerk 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 Wärme⁸ $\dot{E}_{H,1,Ex}$, die durch die sog. Stromkennziffer σ_{Cog} beschrieben wird:

$$\sigma_{Cog} := \frac{\dot{E}_{El,Ex}}{\dot{E}_{H,1,Ex}}. \quad (5.14)$$

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 Temperaturniveau⁹ 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 gilt:¹⁰

$$\dot{E}_{El,Con} - \dot{E}_{El,Ex} = \eta_G \left\{ 1 - \frac{T_{Con}}{T_M} \right\} \cdot \dot{E}_{H,1,Ex}, \quad (5.15)$$

wobei $1 - \frac{T_{Con}}{T_M}$ den Carnotwirkungsgrad darstellt und der Faktor η_G die im realen Prozeß auftretenden Irreversibilitäten berücksichtigt.¹¹ Es gilt $\eta_G \approx 0,7$ [Boh85], S.427.

⁸Beim Gegendruck-Heizkraftwerk tritt nur eine Abwärmesorte auf ($l = 1$). Der Nettoenthalpiestrom $\dot{E}_{H,Ex}$ (s. Abb. 5.3) 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.

⁹Im Sinne einer thermodynamischen Mitteltemperatur, bei der die Wärmeabgabe stattfindet [Bae89], S.99.

¹⁰Eine strengere Ableitung der hier wiedergegebenen Beziehungen findet sich in [Boh85], S.425ff.

¹¹In η_G soll der innere Wirkungsgrad der Turbine, der Generator- und der mechanische Wirkungsgrad sowie der elektrische Eigenbedarf enthalten sein.

Die sog. Stromverlustkennziffer τ_{Cog} wird definiert als

$$\tau_{Cog} := \frac{\dot{E}_{El,Con} - \dot{E}_{El,Ex}}{\dot{E}_{H,1,Ex}} \quad (5.16)$$

und ergibt sich zu:

$$\tau_{Cog} = \eta_G \left\{ 1 - \frac{T_{Con}}{T_M} \right\}. \quad (5.17)$$

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

$$T_M = (T_{1,F,Ex} + \Delta T) - (T_{1,F,Ex} - T_{1,R,Ex}) \frac{n-1}{2n} \quad (5.18)$$

$$= \frac{n+1}{2n} T_{1,F,Ex} + \frac{n-1}{2n} T_{1,R,Ex} + \Delta T. \quad (5.19)$$

Dabei stellt ΔT die Temperaturdifferenz¹² in den wärmeabführenden Wärmeübertragern 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:

$$\dot{E}_{H,Boi} = \dot{E}_{El,Ex} + \dot{E}_{H,1,Ex}. \quad (5.20)$$

Daraus folgt:

$$\dot{E}_{H,1,Ex} = (1 - \eta_{Cog}) \dot{E}_{H,Boi}, \quad (5.21)$$

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 ergeben sich somit zu:

$$\sigma_{Cog} = \frac{\eta_{Cog}}{1 - \eta_{Cog}} \quad (5.22)$$

bzw.

$$\tau_{Cog} = \frac{\eta_{Con} - \eta_{Cog}}{1 - \eta_{Cog}}. \quad (5.23)$$

Dabei ist η_{Con} der Wirkungsgrad der Produktion elektrischer Energie¹³ aus $\dot{E}_{H,Boi}$ im reinen Kondensationsbetrieb, d.h. $\eta_{Con} := \frac{\dot{E}_{El,Con}}{\dot{E}_{H,Boi}}$. Auflösen von Gl. 5.23 nach η_{Cog} und Einsetzen in Gl. 5.22 liefert:

$$\sigma_{Cog} = \frac{\eta_{Con} - \tau_{Cog}}{1 - \eta_{Con}}. \quad (5.24)$$

¹²Die Variation dieser Temperaturdifferenz bei variablen Nettoenthalpieströmen $\dot{E}_{H,1,Ex}$ wird 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.

¹³Elektrischer Wirkungsgrad ohne Kesselverluste; aber inkl. Generator-, Eigenbedarfs- und mechanischer Verluste.

Zusammenfassend wird ein Gegendruck-Heizkraftwerk im Rahmen von *deeco* wie folgt modelliert:

- NB 1 $\dot{E}_{El,Ex} \leq \dot{E}_{El,Ex,0} \cdot N$ Der Maximalwert von $\dot{E}_{El,Ex}$ ist im Gegensatz zum Maximalwert von $\dot{E}_{H,1,Ex}$ unabhängig von $T_{1,F,Ex}$ und $T_{1,R,Ex}$ ([Dub86], S. 82).
- NB 2 $\dot{E}_{Fuel,En} \leq \dot{E}_{Fuel,En,0} \cdot N$ Dies bewirkt eine implizite Beschränkung für $\dot{E}_{H,1,Ex}$.
- NB 3
$$\begin{aligned} \dot{E}_{Fuel,En} &= \frac{1}{\eta_{Boi} \cdot \eta_{con}} \cdot \dot{E}_{El,con} = \frac{1}{\eta_{Boi} \cdot \eta_{con}} \left\{ \tau_{Cog} \dot{E}_{H,1,Ex} + \dot{E}_{El,Ex} \right\} \\ &= \frac{1 - \tau_{Cog}}{\eta_{Boi} (\eta_{con} - \tau_{Cog})} \cdot \dot{E}_{El,Ex} \end{aligned}$$
- NB 4
$$\dot{E}_{H,1,Ex} = \sigma_{Cog}^{-1} \cdot \dot{E}_{El,Ex} = \left\{ \frac{\eta_{con} - \tau_{Cog}}{1 - \eta_{con}} \right\}^{-1} \cdot \dot{E}_{El,Ex}$$
- NB 5 $\dot{E}_{H,1,Ex} = 0$ falls $T_{1,F,Ex} \leq T_{1,R,Ex}$ oder $\tau_{Cog} \geq \eta_{con}$.
- ZF $\dot{P}^{Var} = \vec{\omega}_{Fuel} \cdot \dot{E}_{Fuel,En}$ Emissionen am Ort des Gegendruck-Heizkraftwerks
- IO-A $T_{1,F,Ex} = T_{F,Ex,0}$ (nur notwendig falls Flag = 2; z.B. bei Speicherbeladung).

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,1,Ex}$		Produzierte (nutzbare) Abwärme (pro Zeiteinheit) [W]
$\dot{E}_{El,Ex}$		Produzierte elektrische Energie (pro Zeiteinheit) [W]
$\dot{E}_{Fuel,En}$		Aufgenommene chemische Energie (pro Zeiteinheit) [W]
Attribute:		
$T_{1,F,Ex}$		Vorlauftemperatur [K] von $\dot{E}_{H,1,Ex}$
$T_{1,R,Ex}$		Rücklauftemperatur [K] von $\dot{E}_{H,1,Ex}$
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{El,Ex,0}$	DotEEl_0	Obergrenze für Abgabe elektrischer Energie (Maximalleistung) (pro Zeiteinheit) [W]
$\dot{E}_{Fuel,En,0}$	DotEFuel_0	Maximal mögliche Zufuhr chemischer Energie (pro Zeiteinheit) [W]
η_{Boi}	eta_Boi	Gesamtwirkungsgrad des Heizkraftwerkes (\approx Boilerwirkungsgrad) [1]
η_{con}	eta_Con	Elektrischer Wirkungsgrad des Heizkraftwerkes bei Kondensationsbetrieb (inkl. Eigenbedarfs-, Generator- und Mechanik-Verluste, aber ohne Berücksichtigung des Kesselverlustes)
T_{con}	T_Con	(zu eta_Con gehörende) Kondensationstemperatur [K]
η_G	eta_G	Gütefaktor zur Berücksichtigung von Irreversibilitäten im Bereich zwischen dem mittleren Heißdampfdruck und dem Kondensatordruck [1], s. [Boh85], S. 427
ΔT	deltaT	Grädigkeit der Heizmittelerwärmungsstufen [K]
n	n	Zahl der Heizmittelerwärmungsstufen [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]

$T_{F,Ex,0}$	TF_0 (optional)	vorgegebene Vorlauf­temperatur [K] (nur falls Flag= 2)
N	Count	Zahl identischer Heizkraftwerke
$Flag$	Flag	= 4 : $\dot{E}_{H,1,Ex} \hat{=} \text{Typ } 4(T)$; = 2 : $\dot{E}_{H,1,Ex} \hat{=} \text{Typ } 2(T)$;
Verallg. Kosten:		
\dot{P}^{Var}		Vektor der Emissionen am Ort des Heizkraftwerkes [$\frac{kg}{s}$]
Hilfsgrößen:		
σ_{Cog}		Stromkennziffer [1]
$\dot{E}_{El,con}$		Produktion elektrischer Energie (pro Zeiteinheit) im reinen Kondensationsbetrieb (bei einer Kondensati- onstemperatur von T_{con}) [W]
T_M		Thermodynamische Mitteltemperatur der Wärmeab- gabe (bei Wärmeentnahme) [K]
τ_{Cog}		Stromverlustkennziffer [1]
$\dot{E}_{H,Boi}$		Frischdampfenthalpie (pro Zeiteinheit) [W]
η_{Cog}		elektrischer Wirkungsgrad bei Wärmeentnahme (variabel) [1]

Beispielparameter

$$\eta_G = \begin{cases} 0,7 & [\text{Boh85}], \text{ S. 427} \\ 0,65 - 0,75 & [\text{Boh85}], \text{ S. 430} \end{cases}$$

$$T_{con} = \begin{cases} 313,15 \text{ K} & (= 40^\circ\text{C}) [\text{Boh85}], \text{ S. 430} \\ 309,15 \text{ K} & (= 36^\circ\text{C}) [\text{Sau84}], \text{ S. 9} \\ 298,65 \text{ K} & (= 25,5^\circ\text{C}), \text{ Flußwasserkühlung} [\text{Cub83}] \\ 309,15 \text{ K} & (= 36^\circ\text{C}), \text{ Kühlturm (Kühlwasser mit } 21,5^\circ\text{C)} [\text{Cub83}] \end{cases}$$

$$\eta_{con} = \begin{cases} 0,38 & [\text{Boh84}], \text{ S. 257} \\ 0,38 & [\text{Cub83}], \text{ S. 361} \end{cases}$$

(Jeweils ohne die Berücksichtigung von Kesselverlusten.)

$$\Delta T = \begin{cases} 5 \text{ K} & [\text{Cub83}], \text{ S. 363} \\ 5 \text{ K} & [\text{VDI88}] \end{cases}$$

$n = 1 - 4$ $[\text{Boh84}], \text{ S. 260, Parametervariationsbereich.}$

$$\eta_{Boi} = \begin{cases} 0,85 & [\text{Cub83}], \text{ S. 359} \\ 0,83 - 0,89 & [\text{BMF77}], \text{ S. 49} \\ 0,80 - 0,89 & [\text{Enq94}], \text{ S. 167} \end{cases}$$

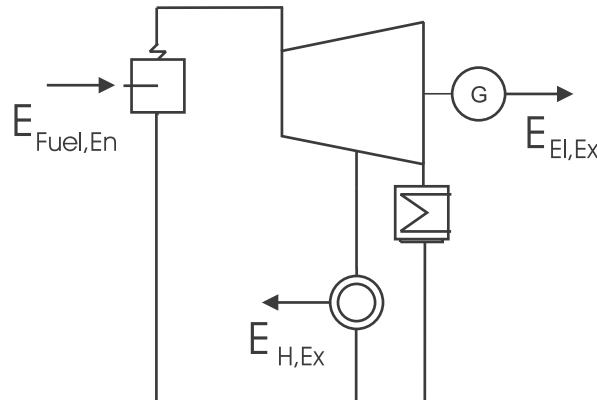
Literatur

$[\text{Cub83}], [\text{Boh85}], [\text{Mie81}], [\text{Dub86}].$

5.2.7 Entnahmekondensations-Heizkraftwerk

CECT

Theorie:



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 bereitzustellen. Technologisch realisiert wird dies z.B. durch eine i.allg. unvollständige Dampfentnahme 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. Die Energie $\dot{E}_{H,Ex}$ des entnommenen Dampfes 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 5.2.6) 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, s. Abb. 5.4) lassen sich mit Hilfe linearisierter Beziehungen zwischen $\dot{E}_{Fuel,En}$, $\dot{E}_{H,Ex}$ und $\dot{E}_{El,Ex}$ darstellen¹⁴ [Thi85, Mie81, Dub86].

¹⁴Da sich das Heizkraftwerk nur selten in Bereichen mit kleiner Auslastung „bewegt“ [Fog85], kann auf die

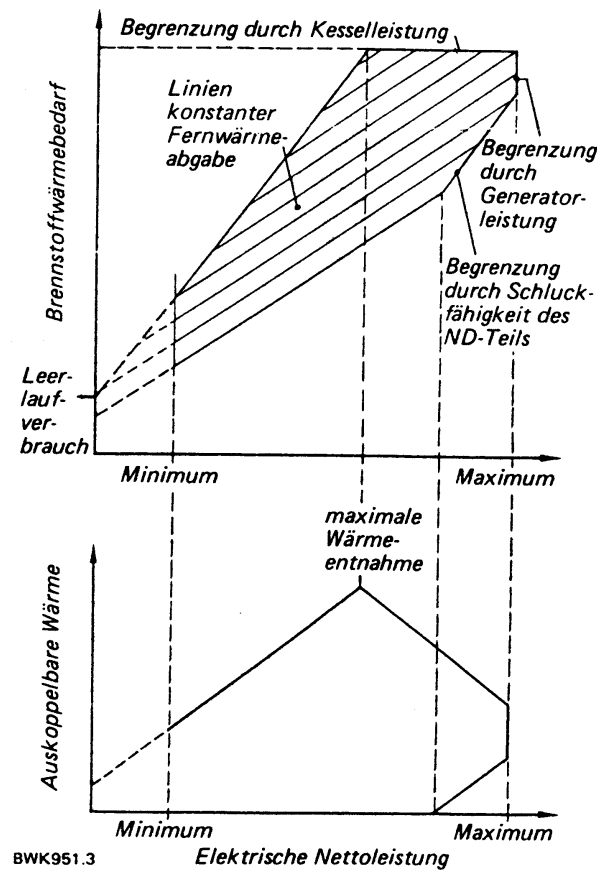


Abbildung 5.4: Einsatzgrenzen eines Entnahmekondensations-Heizkraftwerkes [Thi85]:

Die formale Ähnlichkeit des Hochdruckteils der Turbine mit einer Gegendruckturbine läßt gemäß Abschnitt 5.2.6 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].

Unter Heranziehung des differentiellen Wirkungsgrades der Niederdruckturbine η_{LP} , des Stromerzeugungswirkungsgrades im reinen Kondensationsbetrieb

$$\eta_{con} := \left. \frac{\partial \dot{E}_{El,Ex}}{\partial \dot{E}_{H,Boi}} \right|_{\text{Kondensationsbetrieb}} \quad (5.25)$$

sowie des Kesselwirkungsgrades

$$\eta_{Boi} := \frac{\dot{E}_{H,Boi}}{\dot{E}_{Fuel,En}} \quad (5.26)$$

Berücksichtigung von Minimalwerten für $\dot{E}_{H,Ex}$ und $\dot{E}_{El,Ex}$ verzichtet werden. Etwas genauere Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn für den Brennstoffeinsatz eine quadratische Funktion angesetzt wird, was in *deeco* jedoch nicht zulässig ist.

gilt in guter Näherung [Ale88, Thi85]:

$$\dot{E}_{Fuel,En} = c + \frac{1}{\eta_{Boi}} \left\{ \frac{1}{\eta_{Con}} \dot{E}_{El,Ex} + \frac{\eta_{LP}}{\eta_{con}} \dot{E}_{H,Ex} \right\}, \quad (5.27)$$

wobei zusätzlich ein lastunabhängiger Grundbedarf c eingeführt wurde.

Für die Stromverlustkennziffer τ gilt darüber hinaus $\tau = \eta_{LP}$.

Mit Hilfe der Abkürzungen $a := \frac{1}{\eta_{Boi}} \cdot \frac{1}{\eta_{con}}$ und $b := \frac{\eta_{LP}}{\eta_{Boi} \cdot \eta_{con}}$ lassen sich die weiteren Modellannahmen und -gleichungen zusammenfassend quantitativ wie folgt angeben, wobei zu beachten ist, daß aufgrund der Temperaturabhängigkeit von η_{LP} auch b temperaturabhängig wird.

$$\eta_{Boi} = const.$$

$$\eta_{con} = const.$$

$$c = const.$$

$$b = b(T_{F,Ex,0}, T_{R,Ex,0}) + d_{F,B} \cdot (T_{F,Ex} - T_{F,Ex,0}) + d_{R,B} \cdot (T_{R,Ex} - T_{R,Ex,0})$$

$$g_H = g_H(T_{F,Ex,0}, T_{R,Ex,0}) + d_{F,G} \cdot (T_{F,Ex} - T_{F,Ex,0}) + d_{R,G} \cdot (T_{R,Ex} - T_{R,Ex,0})$$

$$\dot{E}_{H,Ex,0} = \dot{E}_{H,Ex,0}(T_{F,Ex,0}, T_{R,Ex,0}) + d_{F,H} \cdot (T_{F,Ex} - T_{F,Ex,0}) + d_{R,H} \cdot (T_{R,Ex} - T_{R,Ex,0})$$

Entnahmekondensations-Heizkraftwerke werden somit wie folgt modelliert:

NB 1	$\dot{E}_{Fue,En} \leq \dot{E}_{Fue,En,0} \cdot N$	„Maximale Kesselleistung“ (optional)
NB 2	$\dot{E}_{El,Ex} \leq \dot{E}_{El,Ex,0} \cdot N$	„Maximale Generatorleistung“ (optional)
NB 3	$\dot{E}_{El,Ex} - g_H \cdot \dot{E}_{H,Ex} \leq c_{LP} \cdot N$	„Maximale Schluckfähigkeit der Niederdruckturbine“ $c_{LP} \geq 0$ (optional)
NB 4	$g_H \cdot \dot{E}_{H,Ex} - \dot{E}_{El,Ex} \leq c_{BP} \cdot N$	„Gegendruckbetrieb“ $c_{BP} \geq 0$ <u>(nicht optional !)</u>
NB 5	$\dot{E}_{H,Ex} \leq N \cdot \dot{E}_{H,Ex,0}$	„Maximale Heizdampfentnahme“ ($\dot{E}_{H,Ex} \leq 0$ falls $\dot{E}_{H,Ex,0} \leq 0$ ist.) (optional)
NB 6	$\dot{E}_{Fue,En} - a \cdot \dot{E}_{El,Ex} - b \cdot \dot{E}_{H,Ex} = N \cdot c$	Brennstoffaufwand
ZF	$\dot{P}^{Var} = \vec{\omega}_{Fue} \cdot \dot{E}_{Fue,En}$	Emissionen am Ort des Heizkraftwerks
IO-A	$T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$	(nur falls Flag =2)
NB 7	$\dot{E}_{H,Ex} = 0$	falls: $T_{F,Ex} \notin [T_{F,Ex,Min}, T_{F,Ex,Max}] \vee$ $T_{R,Ex} \notin [T_{R,Ex,Min}, T_{R,Ex,Max}] \vee$ $b, g_H \leq 0 \vee T_{F,Ex} \leq T_{R,Ex}$

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{Fuel,En}$		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{El,Ex}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}$		
$T_{R,Ex}$		
Verallg. Kosten:		
\vec{P}^{Var}		Vektor der Emissionen am Ort des Heizkraftwerkes [$\frac{kg}{s}$]
Parameter:	für .piv-File	
$Flag$	Flag	= 4 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4(T)}$; = 2 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2(T)}$;
N	Count	Zahl identischer Heizkraftwerke
$\dot{E}_{Fuel,En,0}$	DotEFuel_0	Obergrenze des Brennstoffeinsatzes [W]
$\dot{E}_{El,Ex,0}$	DotEEl_0	Maximale elektrische Leistung [W]
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Maximale Wärmeleistung (bei $T_{F,Ex,0}$ und $T_{R,Ex,0}$) [W]
g_H	g_h	differentielle Stromkennziffer im Gegendruckbetrieb (bei $T_{F,Ex,0}$ und $T_{R,Ex,0}$) d.h. Steigung in NB 3 und 4 [1]
c_{BP}	c_BP (> 0 !)	Achsenabschnitt in NB 4 [W]
c_{LP}	c_LP (> 0 !) (optional)	Achsenabschnitt in NB 3 [W]
a	a	differentieller spezifischer Einsatz chemischer Energie zur Produktion einer Einheit el. Energie [1]
b	b	differentieller spezifischer Einsatz chemischer Energie zur Produktion einer Einheit Wärme (bei $T_{F,Ex,0}$ und $T_{R,Ex,0}$) [1]
c	c	Lastunabhängiger Bedarf an chem. Energie [W]

Parameter: (optional)	für .piv-File	
$\vec{\omega}_{Fuel}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0	vorgegebene Vorlauftemperatur [K], nur falls Flag= 2 und dann identisch mit:
$T_{F,Ex,0}$	TF_0	Vorlauftemperatur im Auslegungsfall (Bezugstemperatur für b , g_H und $\dot{E}_{H,Ex,0}$) [K]
$T_{R,Ex,0}$	TR_0	Rücklauftemperatur im Auslegungsfall (Bezugstemperatur für b , g_H und $\dot{E}_{H,Ex,0}$) [K]
$T_{F,Ex,Min}$	TF_Min	Minimal zulässige Vorlauftemperatur [K]
$T_{F,Ex,Max}$	TF_Max	Maximal zulässige Vorlauftemperatur [K]
$T_{R,Ex,Min}$	TR_Min	Minimal zulässige Rücklauftemperatur [K]
$T_{R,Ex,Max}$	TR_Max	Maximal zulässige Rücklauftemperatur [K]
$d_{F,B}$; $d_{R,B}$	d_FB; d_RB	$= \frac{\partial b}{\partial T_{F,Ex}} \Big _{T_{F,Ex,0}}$; $= \frac{\partial b}{\partial T_{R,Ex}} \Big _{T_{R,Ex,0}}$ [K^{-1}]
$d_{F,G}$; $d_{R,G}$	d_FG; d_RG ($< 0 K^{-1}$!)	$= \frac{\partial g}{\partial T_{F,Ex}} \Big _{T_{F,Ex,0}}$; $= \frac{\partial g}{\partial T_{R,Ex}} \Big _{T_{R,Ex,0}}$ [K^{-1}]
$d_{F,H}$; $d_{R,H}$	d_FH; d_RH	$= \frac{\partial \dot{E}_{H,Ex,0}}{\partial T_{F,Ex}} \Big _{T_{F,Ex,0}}$; $= \frac{\partial \dot{E}_{H,Ex,0}}{\partial T_{R,Ex}} \Big _{T_{R,Ex,0}}$ [$\frac{W}{K}$]
Hilfsgrößen:		
η_{Boi}		differentieller Kesselwirkungsgrad [1]
η_{con}		differentieller el. Wirkungsgrad im Kondensationsbetrieb [1] (ohne η_{Boi})
$\dot{E}_{H,Boi}$		Frischdampfenthalpiestrom [W]
η_{LP}		differentieller el. Wirkungsgrad der Niederdruckturbinen [1]
τ		Stromverlustkennziffer [1]

Beispielparameter

s. a. Literaturwerte:

[Bub93]-M	= [Bub93]-„Meßergebnisse“, 70 MW _{el} , 120 MW _{th}
[Bub93]-S	= [Bub93]-„Simulation“, 140 MW _{el} , 195 MW _{th}
[Sch94a]	= [Sch94a]-„TS II-neu“, 25 MW _{el} , 50 MW _{th}

$$a = \begin{cases} 2,8143 & \text{[Bub93]-M} \\ 2,5829 & \text{[Bub93]-S} \\ 3,242 & \text{[Sch94a]} \end{cases}$$

$$b = \begin{cases} 0,419 & \text{[Bub93]-M} \\ 0,351 & \text{[Bub93]-S} \\ 0,478 & \text{[Sch94a]} \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 26,832 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Bub93]-M} \\ 21,429 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Bub93]-S} \\ 8,842 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Sch94a]} \end{cases} \left. \vphantom{c} \right\} \text{Diese Werte sind absolute Werte und deshalb nur unter Berücksichtigung der Maximalleistung des Heizkraftwerkes vergleichbar.}$$

$$\dot{E}_{Fuel,En,0} = \begin{cases} 223,2 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Bub93]-M, S.65} \\ 375 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Bub93]-S (aus Bild 31)} \\ 103,16 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Sch94a]} \end{cases}$$

$$\dot{E}_{El,En,0} = \begin{cases} (70 \cdot 10^6 \text{ W}) & \text{[Bub93]-M, nicht notwendig} \\ (140 \cdot 10^6 \text{ W}) & \text{[Bub93]-S, nicht notwendig} \\ (25 \cdot 10^6 \text{ W}) & \text{[Sch94a], nicht notwendig} \end{cases}$$

$$\dot{E}_{H,Ex,0} = \begin{cases} (120 \cdot 10^6 \text{ W}) & \text{[Bub93]-M, nicht notwendig} \\ 195 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Bub93]-S} \\ 50,36 \cdot 10^6 \text{ W} & \text{[Sch94a]} \end{cases}$$

$$g_H = \begin{cases} 0,448 & [\text{Bub93}]\text{-M} \\ 0,644 & [\text{Bub93}]\text{-S} \\ 0,2738 & [\text{Sch94a}] \end{cases}$$

$$c_{BP} = \begin{cases} 0 \text{ W} & [\text{Bub93}]\text{-M} \\ 6,87 \cdot 10^6 \text{ W} & [\text{Bub93}]\text{-S} \\ 1,818 \cdot 10^6 \text{ W} & [\text{Sch94a}]\text{-M} \end{cases}$$

$$c_{LP} = \begin{cases} - & [\text{Bub93}]\text{-M} \\ - & [\text{Bub93}]\text{-S} \\ 21,515 \cdot 10^6 \text{ W} & [\text{Sch94a}]\text{-M} \end{cases}$$

$$T_{F,Ex,0} = \begin{cases} 383,15 \text{ K} & [\text{Bub93}]\text{-M} \\ 383,15 \text{ K} & [\text{Bub93}]\text{-S} \end{cases}$$

$$d_{F,B} = \begin{cases} 1,964 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} & [\text{Bub93}]\text{-M} \\ 4,029 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} & [\text{Bub93}]\text{-S} \end{cases}$$

$$d_{F,M} = 1,697 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{K}} \quad [\text{Bub93}]\text{-S}$$

$$T_{F,Min} = 273,15 \text{ K} , \quad T_{F,Max} = 383,15 \text{ K} \quad [\text{Bub93}]\text{-S}$$

$$T_{R,Min} = 273,15 \text{ K} , \quad T_{R,Max} = 328,15 \text{ K} \quad [\text{Bub93}]\text{-S, S. 87}$$

$$T_{R,Ex,0} = \begin{cases} 325,75 \text{ K} & [\text{Bub93}]\text{-M} \\ 328,15 \text{ K} & [\text{Bub93}]\text{-S} \end{cases}$$

Anwendungshinweise für CECT

Entnahmekondensations-Heizkraftwerke stellen aufgrund ihres relativ hohen, optimierungsunabhängigen Grundbedarfs eine Technik dar, die im Rahmen von *deeco* nur mit äußerster Sorgfalt eingesetzt werden soll. Eine ständige Kontrolle des elektrischen und thermischen Wirkungsgrades (unter Heranziehung des .pov-Files) empfiehlt sich.

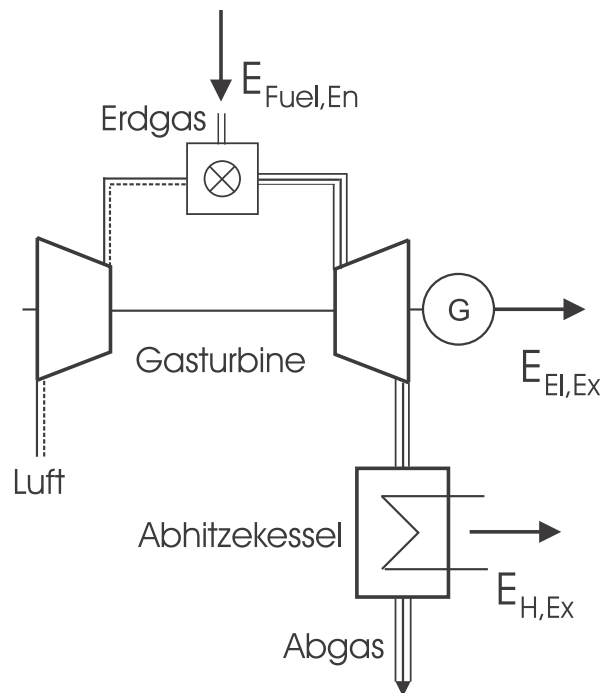
Dabei ist Folgendes zu beachten:

1. Die Größe der CECT-Anlage muß an den vorhandenen Wärme- und (bei verbotenen Export) auch an den elektrischen Energiebedarf angepaßt sein. Eine Überdimensionierung führt aufgrund eines unnötig hohen Grundbedarfs zu schlechten Wirkungsgraden. Die entsprechenden Überlegungen gelten auch für die Gesamtleistung mehrerer Anlagen.
2. Eine Veränderung der maximalen Energieströme sollte nicht für jeden Energiestrom getrennt vorgenommen werden, sondern nur durch Umskalieren der Beispieldaten mit Hilfe des Parameters „Count“ (Count < 1 ist möglich, ebenso nichtganzzahlige Werte).
3. Die Minimalwerte der Vor- und Rücklauftemperaturen sollten (vor allem bei Bedarfsprozessen die niedrige Temperaturen verlangen, z. B. DRoom im Sommer) nicht zu restriktiv gehandhabt werden. Sie sollten deutlich unter den Werten realer Fernwärmenetze liegen, sonst wird der Einsatz der CECT-Anlage gerade bei geringem Wärmebedarf und niedrigen Temperaturen verboten; der Grundbedarf würde aber bleiben.
4. Bei der Bestimmung der Mittelwerte der Wirkungsgrade aus dem .pov-File sollen aufgrund des Grundbedarfs nicht Mittelwerte der NB-Koeffizienten, die differentielle Größen darstellen, betrachtet werden, sondern die absoluten Energieströme.

5.2.8 Gasturbinen-Heizkraftwerk

siehe CECT

Theorie:



Die hohen Abgastemperaturen von Gasturbinen ($\approx 500^\circ\text{C}$) erlauben die Nutzung der Abwärme im allgemeinen ohne zusätzliche Aufheizung des Heizwassers. „Im Abhitzeessel können daher die gewünschte Vorlauftemperatur und die Höhe der Heizleistung praktisch ohne Auswirkung auf Brennstoffverbrauch und elektrische Heizleistung der Anlage eingestellt werden“ [Dub86], S. 83.

In [Dub86] wird empfohlen, Gasturbinen-Heizkraftwerke analog zu Entnahmekondensations-Heizkraftwerke zu modellieren, wobei folgende Vereinfachungen möglich sind:

- Alle Vorlauf- und Rücklauftemperaturabhängigkeiten entfallen (solange die Vorlauftemperatur deutlich - d. h. unter Berücksichtigung einer ausreichenden Grädigkeit im Abhitzeessel - kleiner ist als die Abgastemperatur).
Dies stellt eine Möglichkeit dar, $T_{F,Ex,Max}$ und $T_{R,Ex,Max}$ zu bestimmen.
- Der Beitrag von $\dot{E}_{H,Ex}$ zum Brennstoffaufwand $\dot{E}_{Fuel,Ex}$ ist sehr klein, d.h. $b = 0$.
- Alle Grenzen, bis auf die Gegendrucklinie können entfallen; die Vorgabe von Maximalwerten ist erlaubt.
- Die Vorlauftemperatur wird durch Beimischen des Rücklaufmediums eingestellt.

Auf die Modellierung der Außentemperaturabhängigkeit des elektrischen Wirkungsgrades sowie der maximalen elektrischen Leistung wird in Anlehnung an [Dub86] und [Mie81] verzichtet (s. z.B. [Kor83], S. 378).

Die relativ starke Lastabhängigkeit des elektrischen Wirkungsgrades läßt sich (zumindest teilweise) durch Abspaltung eines lastunabhängigen Grundbedarfs (an chemischer Energie) auch im Rahmen eines linearisierten Modells beschreiben.

Beispielparameter

$$a = \begin{cases} 2,4865 & \text{(lineare Regression von [Mie81], S. 3.41 (Anhang) = [Mie81]-R)} \\ 3,0834 & \text{(Taylorentwicklung um } \dot{E}_{El,Ex} = 90 \cdot 10^6 \text{ W von [Mie81], S. 3.41 (Anhang)} \\ & \text{= [Mie81]-T} \\ \text{siehe: } & \text{„}\eta_{el10/25}\text{“ in [ASU92]} \end{cases}$$

$$b \approx 0$$

$$c = 48,346 \cdot 10^6 \text{ W [Mie81]-R}$$

$$c_{BP} = 0 \text{ W [Mie81]-R \& T}$$

$$g_H = \begin{cases} 0,56 & \text{[Mie81]-R \& T} \\ \text{siehe: } & \text{„}P_{el\ 10/25} / \dot{Q}_N(140^\circ\text{C})\text{“ [ASU92]} \end{cases}$$

$$T_{F,Ex,Max} \leq \text{„tg“ in [ASU92].}$$

$T_{R,Ex,Max} \leq 413,15 \text{ K}$. Die Temperatur von 140°C ist die Bezugstemperatur für $\dot{Q}_N(140^\circ\text{C})$ in [ASU92]. Bei allen Temperaturangaben ist eine ausreichende Grädigkeit zu berücksichtigen.

Literatur

[Kor83],[ASU92].

5.2.9 Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit konstantem Wirkungsgrad

CCogConst

Theorie:

Im allgemeinen ist der elektrische Wirkungsgrad sowie der Wärmewirkungsgrad einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage nicht streng konstant. Für einige Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (z. B. Blockheizkraftwerke) gilt dies aber näherungsweise, so daß mit einer konstanten Stromkennzahl gearbeitet werden kann. Ein elektrischer Zusatzenergiebedarf ist durch eventuelle Modifikation von η_{el} zu berücksichtigen.

Definitionen:

$$\eta_{El} := \frac{\dot{E}_{El,Ex}}{\dot{E}_{Fue,En}}, \quad \eta_H := \frac{\dot{E}_{H,Ex}}{\dot{E}_{Fue,En}}$$

Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta := \frac{\dot{E}_{El,Ex} + \dot{E}_{H,Ex}}{\dot{E}_{Fue,En}} = \eta_{El} + \eta_H$$

Stromkennzahl:

$$\sigma := \frac{\dot{E}_{El,Ex}}{\dot{E}_{H,Ex}} = \frac{\eta_{El}}{\eta_H}$$

NB 1 $\dot{E}_{El,Ex} \leq \dot{E}_{El,Ex,0} \cdot N$ (optional)

NB 2 $\dot{E}_{Fue,En} = \eta_{El}^{-1} \cdot \dot{E}_{El,Ex}$

NB 3 $\dot{E}_{H,Ex} = \eta_H \cdot \dot{E}_{Fue,En} = \sigma^{-1} \cdot \dot{E}_{El,Ex}$

NB 4 $\dot{E}_{H,Ex} = 0$

falls:

- 1.) $T_{F,Ex} \leq T_{R,Ex}$
- 2.) $T_{F,Ex} \notin [T_{F,Ex,Min}, T_{F,Ex,Max}]$
- 3.) $T_{R,Ex} \notin [T_{R,Ex,Min}, T_{R,Ex,Max}]$

ZF $\dot{P}^{Var} = \vec{\omega}_{Fue} \cdot \dot{E}_{Fue,En}$

Emissionen am Ort der Kraft-Wärme-Kopplungsanlage

IO-A $T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}$ (nur falls Flag = 2 bzw. Flag = 1)

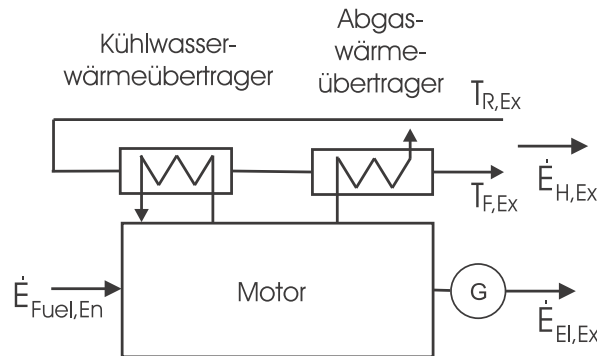
IO-A $T_{R,Ex} = T_{R,Ex,0}$ (nur falls Flag = 1)

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{El,Ex}$ $\dot{E}_{H,Ex}$ $\dot{E}_{Fuel,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}, T_{R,Ex}$		
Verallg. Kosten:		
\vec{P}^{Var}		Vektor der Emissionen [$\frac{kg}{s}$]
Parameter:	für .piv-File	
<i>Flag</i>	Flag	= 1 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 1(T)}$; = 2 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2(T)}$; = 4 : $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4(T)}$;
<i>N</i>	Count	Zahl identischer KWK-Anlagen [1]
$\dot{E}_{El,Ex,0}$	DotEE1_0	Maximale elektrische Leistung [W]
η_{El}	eta_El	Elektrischer Wirkungsgrad [1]
η_H	eta_H	Wärmewirkungsgrad [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}$		Vektor der spezifischen Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0 (optional)	vorgegebene Vorlauftemperatur [K] (falls Flag = 1 bzw. 2)
$T_{R,Ex,0}$	TR_0 (optional)	vorgegebene Rücklauftemperatur [K] (falls Flag = 1)
$T_{F,Ex,Min}$	TF_Min (optional)	Minimal zulässige Vorlauftemperatur [K]
$T_{F,Ex,Max}$	TF_Max (optional)	Maximal zulässige Vorlauftemperatur [K]
$T_{R,Ex,Min}$	TR_Min (optional)	Minimal zulässige Rücklauftemperatur [K]
$T_{R,Ex,Max}$	TR_Max (optional)	Maximal zulässige Rücklauftemperatur [K]

5.2.10 Blockheizkraftwerke (BHKW)

siehe CCogConst

Theorie:



Unter Block- bzw. 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)¹⁵ 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 als Schranken für den zulässigen Bereich der Rücklauftemperaturen des (zur Kühlung herangezogenen) Wärmetransportmittels angesehen werden können [Ley82]. Normalerweise liegen diese im Bereich von mindestens 50°C bzw. maximal 72°C. 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.

Wie oben angesprochen darf die Rücklauftemperatur eine fest vorgegebene maximale Rücklauftemperatur nicht überschreiten ($T_{R,Ex} \leq T_{R,Ex,Max}$). Die Temperatur im Heizmedium nach Durchströmen des Kühlmittelwärmeübertragers muß, damit ein Wärmeübergang stattfinden kann, unterhalb der maximalen Kühlwassertemperatur im Kühlkreislauf liegen. Bei vorgegebener (geforderter) Kühlleistung muß somit der Wärmekapazitätsstrom des Heizmediums einen bestimmten Mindestwert überschreiten. Dient nun derselbe Wärmekapazitätsstrom gleichzeitig zur Nutzung der Abgaswärme, so ist damit auch die Vorlauftemperatur begrenzt

¹⁵Die Abwärme fällt somit auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus an: Abgas (450°C - 550°C), Kühlwasser durch Ladeluft-, Öl- und Zylinderkühlung ($\approx 80^\circ\text{C}$).

$$(T_{R,Ex} \leq T_{R,Ex,Max}).$$

$T_{F,Ex}$ kann somit nur dann hohe Temperaturen erreichen, wenn bereits die Motorkühlung hohe Temperaturen erlaubt (sog. „Heißkühlung“).¹⁶

Möglichkeiten zur Einbindung in Wärmeversorgungssysteme:

- 1.) „Flag = 4“ : BHKW schaltet ab, sobald die von außen vorgegebenen Werte von $T_{R,Ex}$ und $T_{F,Ex}$ ihre zulässigen Maximalwerte überschreiten (BHKW ohne Notkühlung).
 \downarrow
 $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4(T)}$
- 2.) „Flag = 1“ : BHKW gibt selbst $T_{F,Ex}$ ($= T_{F,Ex,Max}$) und $T_{R,Ex}$ ($= T_{R,Ex,Max}$) vor. Im allgemeinen muß dann zwischen dem BHKW und dem Verbraucher ein Enthalpieanpassungsprozeß geschaltet werden. Das dann unter bestimmten Umständen auftretende „Waste heat dumping“ erlaubt die (grobe) Simulation eines BHKW mit Notkühlung.
 \downarrow
 $\dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 1(T)}$
- 3.) „Flag = 2“ : BHKW schaltet bei zu hoher Rücklauftemperatur ab (z.B. Speicheranschluß).

Wird ein BHKW dazu verwendet einen Speicher zu beladen, so ist die Einbindungsart „Flag = 2“ zu verwenden und gleichzeitig darauf zu achten, daß $T_{F,Ex,0}$ und $T_{R,Ex,0}$ möglichst hoch gewählt werden.

¹⁶Bei aufwendigen BHKW-Systemen, die hier nicht weiter untersucht werden sollen, verwendet man zur Nutzung der Abgaswärme einen getrennten Heizmittelkreislauf. Dadurch wird $T_{F,Ex}$ unabhängig von der Motorkühlung (Möglichkeit zur Dampferzeugung).

Beispielparameter

Die in [ASU94] verwendeten Bezeichnungen zur Kennzeichnung der dort angegebenen Zahlenwerte übersetzen sich in die hier gewählte Notation wie folgt:

DotEEL_0	=	Leistungsdaten (elektrisch)
η_{El}	=	Wirkungsgrade (elektrisch)
η_H	=	Wirkungsgrade (thermisch)
TF_0 bzw. TF_Max	=	Heizwassertemperatur (Vorlauf)
TR_0 bzw. TR_Max	=	Heizwassertemperatur (Rücklauf)

Literatur

[Kor83], [Pau91], [Ley82].

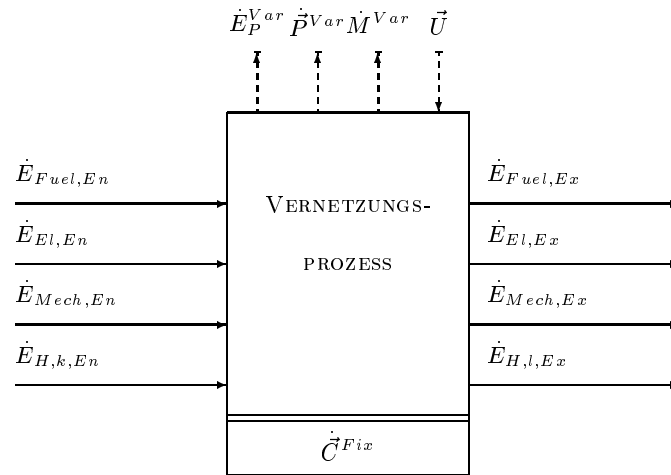


Abbildung 5.5: Vernetzungsprozeß.

5.3 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 Wärmeübertrager sowie der (verlustbehaftete) Wärmetransport, 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.¹⁷ 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 Transformation¹⁸ der Energieströme verallgemeinerte variable Kosten \dot{M}^{Var} , \dot{E}_P^{Var} und \dot{P}^{Var} auf.

¹⁷ORC = **O**rganic **R**ankine **C**ycle, s. z.B. [Kug90], S.274.

¹⁸Es ist möglich, die bereits beschriebenen Umwandlungsprozesse (s. Abschnitt 5.2) als vereinfachte Vernetzungsprozesse anzusehen. Aus Anschaulichkeitsgründen heraus wird von dieser Möglichkeit jedoch kein Gebrauch gemacht.

Verfügbare Module	<i>procType</i>
Enthalpieanpassung durch Beimischen und Waste-Heat-Dumping	NBW
Enthalpieanpassung durch Beimischen, Waste-Heat-Dumping und Nachheizen (konst. Wirkungsgrad)	NBWAConst
Enthalpieanpassung durch Beimischen, Waste-Heat-Dumping und Nachheizen mit konventionellem Öl- oder Gaskessel	NBWAConv
Enthalpieanpassung durch Beimischen, Waste-Heat-Dumping und Nachheizen mit Gas- bzw. Öl- Brennwertkessel	NBWACond
Wärmeübertrager mit konstanter Temperaturspreizung	NHEx
Enthalpietransport (idealisiert) durch Wärmetransportmittel	NHTrans
Wärmetransport (inkl. Vergleich der Vorlauftemperaturen)	NQTrans
Elektrowärmepumpe (Abwärmenutzung, Solarenergienutzung)	NEHP
Gaswärmepumpe (Abwärmenutzung, Solarenergienutzung)	NGHP

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
NBW	Enthalpieanpassung durch <ul style="list-style-type: none"> • Beimischen • WHD (Waste-Heat-Dumping) 	$\begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{\text{NBW}} \begin{array}{c} \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	99
NBWConst	Enthalpieanpassung durch <ul style="list-style-type: none"> • Beimischen • Waste-Heat-Dumping • Nachheizen gemäß CBoiConst (konst. Wirkungsgrad) 	$\begin{array}{c} \dot{E}_{Fuel,En} \\ \dot{E}_{El,En} \\ \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{\text{NBWConst}} \begin{array}{c} \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	103
NBWConv	Enthalpieanpassung durch <ul style="list-style-type: none"> • Beimischen • Waste-Heat-Dumping • Nachheizen gemäß CBoiConv (konventioneller Öl- oder Gaskessel) 	$\begin{array}{c} \dot{E}_{Fuel,En} \\ \dot{E}_{El,En} \\ \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{\text{NBWConv}} \begin{array}{c} \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	103
NBWCond	Enthalpieanpassung durch <ul style="list-style-type: none"> • Beimischen • Waste-Heat-Dumping • Nachheizen gemäß CBoiCond (Brennwertkessel) 	$\begin{array}{c} \dot{E}_{Fuel,En} \\ \dot{E}_{El,En} \\ \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{\text{NBWCond}} \begin{array}{c} \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	103
NHEx	Wärmeübertrager mit konst. Temperaturspreizung	$\begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 3,(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{\text{NHEx}} \begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 3,(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	108
NHTrans	Enthalpietransport durch Wärmetransportmittel	$\begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 3(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{\text{NHTrans}} \begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 2(T) \\ \text{Typ } 3(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	113
NQTrans	Wärmetransport (inkl. Vergleich der Vorlauftemperatur)	$\begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,En} \end{array} \rightarrow \boxed{\text{NQTrans}} \begin{array}{c} \text{Typ } 1(T) \\ \text{Typ } 4(T) \\ \dot{E}_{H,Ex} \end{array}$	111

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
NEHP	Elektrowärmepumpe zur <ul style="list-style-type: none"> • Abwärmenutzung • Solarenergienutzung (inkl. Speichernutzung) 		117
NGHP	Gaswärmepumpe zur <ul style="list-style-type: none"> • Abwärmenutzung • Solarenergienutzung (inkl. Speichernutzung) 		120

5.3.1 Enthalpieanpassung durch Beimischen und Waste-Heat-Dumping

NBW

Theorie:

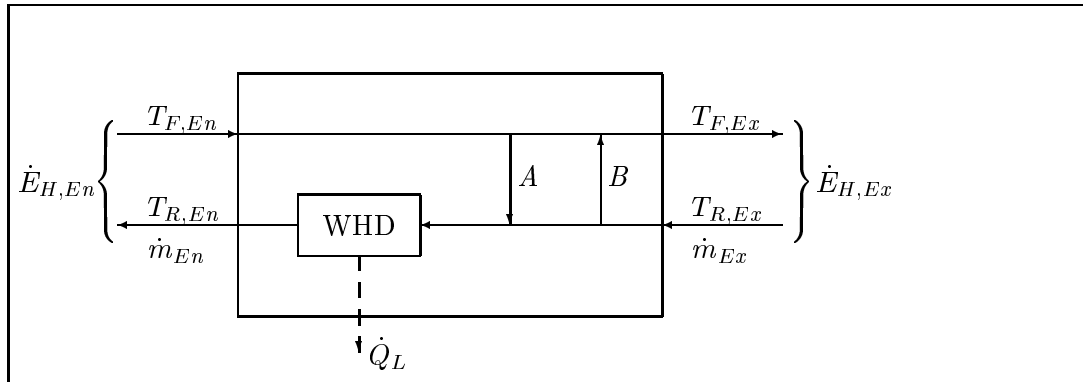


Abbildung 5.6: Energie- und Massenströme bei der Enthalpieanpassung (WHD = Waste Heat Dumping).

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. 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 5.2.3 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 Rücklauftemperatur (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. Dieses Vorgehen wird als Waste Heat Dumping (WHD) bezeichnet [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 die Notwendigkeit,

zeitlich variable intensive Größen, wie z.B. Bedarfs- und Abwärmtemperaturen, mit in die Modellierung energietechnischer Prozesse einzubeziehen.

Aufgabenbeispiele:

- Absenken der Vorlauftemperatur durch Beimischen von kaltem Rücklaufmedium über das Mischventil B (s. Abb. 5.6), z.B. bei Fernwärme-Hausübergabestationen.
- Anheben der Rücklauftemperatur durch Beimischen von warmem Vorlaufmedium in Mischventil A , z. B. bei älteren Heizkesseln um Wasserdampfkondensation zu vermeiden.
- Absenken der Rücklauftemperatur durch externe Kühlung (= Waste-Heat-Dumping), z. B. bei Blockheizkraftwerken, die durch einen Ventilator gekühlt werden können.
- Die Mischventile A und B werden meist zu einem „4-Wege-Mischer“ kombiniert.

Vereinfachende Annahme:

Die Wärmekapazität ist im gesamten Temperaturbereich temperaturunabhängig, d.h. die auftretenden Wärmeströme sind darstellbar durch:

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

Solange stets $T_{F,En} > T_{R,En}$ und $T_{F,Ex} > T_{R,Ex}$ gewährleistet ist, lassen sich 4 Fälle unterscheiden, wobei der Prozeß jeweils eine Anpassung von $T_{F,En}$ nach $T_{F,Ex}$ sowie von $T_{R,En}$ nach $T_{R,Ex}$ ermöglichen soll. Zunächst seien $T_{F,Ex}$, $T_{R,Ex}$, $T_{F,En}$ und $T_{R,En}$ als bekannt vorausgesetzt.

$$\left. \begin{array}{l} 1.) \quad T_{F,En} \geq T_{F,Ex} \\ 1.1.) \quad T_{F,Ex} \geq T_{R,En} \\ 1.1.1.) \quad T_{R,En} \geq T_{R,Ex} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Vorlauftemperatur durch Beimischen senken;} \\ \text{Rücklauftemperatur durch Beimischen anheben.} \end{array}$$

$$\text{NB 1} \quad \boxed{\dot{E}_{H,En} = \dot{E}_{H,Ex}}$$

1.1.2) $T_{R,En} < T_{R,Ex}$ Vorlauftemp. senken (Beimischen), Rücklauftemp. senken (WHD).

$$\text{NB 1} \quad \boxed{\dot{E}_{H,En} = \frac{T_{F,En} - T_{R,En}}{T_{F,En} - T_{R,Ex}} \cdot \dot{E}_{H,Ex}}$$

1.2) $T_{F,Ex} < T_{R,En}$

$$\text{NB 1} \quad \boxed{\dot{E}_{H,En} = \dot{E}_{H,Ex}} \quad (\text{Beimischen})$$

2.) $T_{F,Ex} > T_{F,En}$: Wärmenutzung ist ohne Nachheizen nicht möglich.

NB 1 $\dot{E}_{H,En} = \dot{E}_{H,Ex}$

NB 2 $\dot{E}_{H,Ex} = 0$ (d.h. $\dot{E}_{H,En} = 0$)

Flag = 14 : $\dot{E}_{H,En}$ ist Typ 1 (T)-Enthalpiestrom; $\dot{E}_{H,Ex}$ ist Typ 4 (T)-Enthalpiestrom (z.B. Abwärmenutzung).

In diesem Fall ist keine Input-Output-Relation für Attribute (IO-A) zu erstellen.

Flag = 24 : $\dot{E}_{H,En}$ ist Typ 2 (T)-Enthalpiestrom; $\dot{E}_{H,Ex}$ ist Typ 4 (T)-Enthalpiestrom (z.B. Entladen eines gut-durchmischten Wärmespeichers):

IO-A $T_{R,En} = T_{R,Ex}$

Flag = 12 : $\dot{E}_{H,En}$ ist Typ 1 (T)-Enthalpiestrom; $\dot{E}_{H,Ex}$ ist Typ 2 (T)-Enthalpiestrom (z.B. Beladen eines gut-durchmischten Wärmespeichers mit Abwärme).

IO-A $T_{F,Ex} = T_{F,En}$

Falls $(T_{F,Ex} < T_{R,Ex}) \vee (T_{F,En} < T_{R,En})$:

NB 1 Keine Forderung an $\dot{E}_{H,En}$

NB 2 $\dot{E}_{H,Ex} = 0$

Literatur

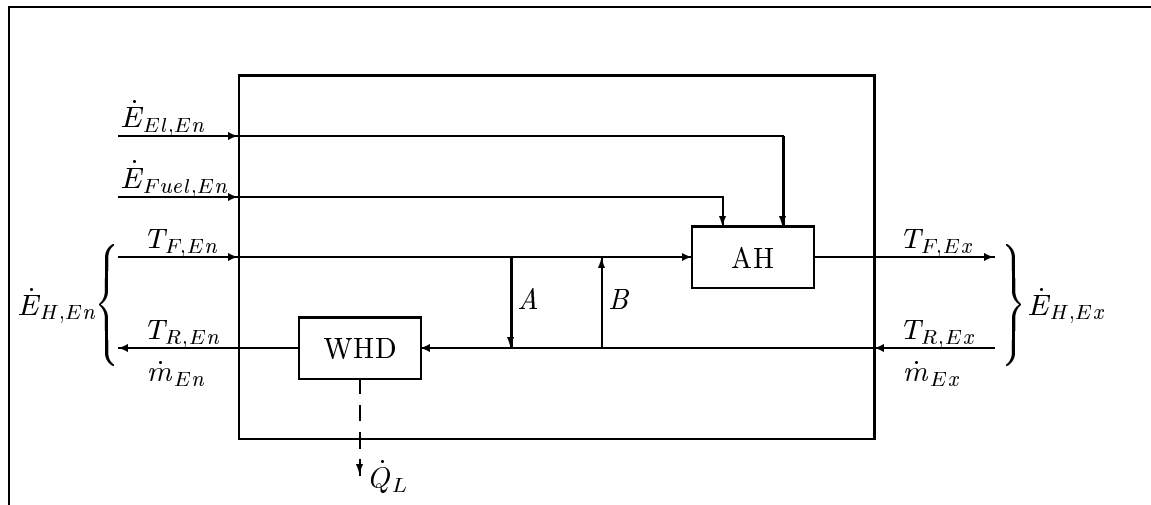
[Hel94], [Bru92].

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
Attribute		
$T_{F,En}$		
$T_{R,En}$		
$T_{F,Ex}$		
$T_{R,Ex}$		
Zeitunabh. Parameter:	für .piv-File	
<i>Flag</i>	Flag	$\left\{ \begin{array}{l} 14 \quad \dot{E}_{H,En} \cong \text{Typ 1 (T)} \\ \quad \quad \dot{E}_{H,Ex} \cong \text{Typ 4 (T)} \\ 24 \quad \dot{E}_{H,En} \cong \text{Typ 2 (T)} \\ \quad \quad \dot{E}_{H,Ex} \cong \text{Typ 4 (T)} \\ 12 \quad \dot{E}_{H,En} \cong \text{Typ 1 (T)} \\ \quad \quad \dot{E}_{H,Ex} \cong \text{Typ 2 (T)} \end{array} \right.$
Hilfsgrößen:		
\dot{Q}_L		Wärmeverlust durch WHD [W]

5.3.2 Enthalpieanpassung durch Beimischen, Waste-Heat-Dumping und Nachheizen

- a) Nachheizen mit konstantem Wirkungsgrad gemäß NBWACnst
CBoiConst
- b) Nachheizen mit konventionellem Öl- oder Gaskessel gemäß NBWACnv
CBoiConst
- c) Nachheizen mit Gas- bzw. Öl-Brennwertkessel NBWACnd

Theorie:



WHD = Waste-Heat-Dumping (externe Kühlung); AH = Additional Heating (entspricht CBoiConst oder CBoiConv bzw. CBoiCond).

Bereitstellung von $\dot{E}_{H,Add}$:

Der zum Nachheizen erforderliche Energiestrom $\dot{E}_{H,Add}$ wird innerhalb von NBWACnst, NBWACnd bzw. NBWACnv aufgefaßt als Nettoenthalpiestrom mit der Vorlauftemperatur $T_{F,Add} = T_{F,Ex}$ und der Rücklauftemperatur $T_{R,Add} = T_{F,En}$,¹⁹ der mit den in den Abschnitten 5.2.1, 5.2.2 bzw. 5.2.3 beschriebenen Techniken bereitgestellt werden muß, d.h. die entsprechenden Nebenbedingungen werden auch in NBWACnst, NBWACnv und NBWACnd verwendet (dabei erhöht sich die Nummer der entsprechenden NB von CBoiConst, CBoiConv und CBoiCond um 2, da die NB1 und NB2 schon belegt sind). Bezüglich der Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme siehe Abschnitt 5.3.1.

¹⁹Im Falle 2.2 gilt $T_{R,Add} = T_{R,Ex}$. Falls $\dot{E}_{H,En}$ (z.B. wegen $T_{F,En} \leq T_{R,En}$) nicht nutzbar ist, muß $\dot{E}_{H,Ex}$ vollständig durch Nachheizen bereitgestellt werden. Auch dann gilt $T_{R,Add} = T_{R,Ex}$.

Solange stets $T_{F,En} > T_{R,En}$ und $T_{F,Ex} > T_{R,Ex}$ gilt, lassen sich die folgenden 6 Fälle unterscheiden, wobei stets eine Anpassung von $T_{F,En}$ nach $T_{F,Ex}$ sowie von $T_{R,Ex}$ nach $T_{R,En}$ ermöglicht werden soll:

1.) $T_{F,En} \geq T_{F,Ex}$. Insgesamt 3 Fälle (siehe Abschnitt 5.3.1).
Nachheizen ist nicht erforderlich.

2.) $T_{F,En} \leq T_{F,Ex}$. Nachheizen ist erforderlich.

2.1.) $T_{F,En} \geq T_{R,Ex}$

2.1.1.) $T_{R,Ex} \geq T_{R,En}$, Waste-Heat-Dumping ist erforderlich; Beimischen jedoch nicht.

$$\text{NB 1} \quad \dot{E}_{H,En} = \frac{T_{F,En} - T_{R,En}}{T_{F,Ex} - T_{R,Ex}} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$$

$$\text{Nachheizen:} \quad \dot{E}_{H,Add} = \frac{T_{F,Ex} - T_{F,En}}{T_{F,Ex} - T_{R,Ex}} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$$

2.1.2.) $T_{R,En} > T_{R,Ex}$ Beimischen ist erforderlich.

$$\text{NB 1} \quad \dot{E}_{H,En} = \frac{T_{F,En} - T_{R,Ex}}{T_{F,Ex} - T_{R,Ex}} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$$

$$\text{Nachheizen:} \quad \dot{E}_{H,Add} = \frac{T_{F,Ex} - T_{F,En}}{T_{F,Ex} - T_{R,Ex}} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$$

2.2.) $T_{R,Ex} > T_{F,En}$

$$\text{NB 1} \quad \dot{E}_{H,En} = 0$$

$$\text{Nachheizen:} \quad \dot{E}_{H,Add} = \dot{E}_{H,Ex}$$

NBWAConst

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{Fuel,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}$		
$T_{R,Ex}$		
$T_{F,En}$		
$T_{R,En}$		
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe (Maximalleistung) [W]
η	eta	Wärmeerzeugungswirkungs- bzw. Nutzungsgrad [1]
λ_H^{El}	lambdaEl_H	spez. Elektroenergiebedarf (Zusatzenergie), bezogen auf eine Einheit abgegebene Wärme [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
N	Count	Zahl identischer Kessel [1]
$Flag$	Flag	$\begin{cases} 14 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 24 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 12 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \end{cases}$
Hilfsgrößen:		
$\dot{E}_{H,Add}$		Durch Nachheizen bereitzustellender Nettoenthalpiestrom [W]
\dot{Q}_L		Energieverlust durch WHD [W]

NBWAConv		
Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{Fuel,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}, T_{R,Ex}$		
$T_{F,En}, T_{R,En}$		
Parameter:		
	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe (Maximalleistung) [W]
T_{Env}	T_Env	Kesselumgebungstemperatur [K]
A_1, B	A_1, B	Beiwerte gemäß 1. BImSchVO vom 15.7.88 [K ⁻¹]
X_{CO_2}	X_CO2	CO ₂ - Gehalt des Abgases (Volumen-%) [1]
N	Count	Zahl identischer Kessel [1]
$T_{W,0}$	T_W	Abgastemperatur bei Nennleistung [K]
$T_{B,0}$	T_B	Kesseltemperatur bei Nennleistung [K]
$\dot{Q}_{Rad,0}$	DotQ_Rad	Abstrahlverlust bei Nennleistung [W]
λ_H^{El}	lambdaEl_H	spez. Elektroenergiebedarf (Zusatzenergie), bezogen auf eine Einheit abgegebener Wärme [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$Flag$	Flag	$\begin{cases} 14 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 24 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 12 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \end{cases}$
Hilfsgrößen:		
$\dot{E}_{H,Add}$		Durch Nachheizen bereitzustellender Nettoenthalpiestrom [W]
\dot{Q}_L		Energieverlust durch WHD [W]

NBWACond

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{Fuel,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}, T_{R,Ex}$		
$T_{F,En}, T_{R,En}$		
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe (Maximalleistung) [W]
T_0	T_0	Bezugstemperatur [K]
T_{Cond}	T_Cond	Kondensations-Rücklaufstemperatur [K]
A_1, A_2	A_1, A_2	Fit-Parameter Gl. 5.9 [1]
B_1, B_2	B_1, B_2	Fit-Parameter Gl. 5.9 [$\frac{1}{K}$]
C_1	C_1	Fit-Parameter Gl. 5.9 [$\frac{1}{K^2}$]
N	Count	Zahl identischer Kessel [1]
$Flag$	Flag	$\begin{cases} 14 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 24 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 12 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \end{cases}$
$T_{R,Max}, T_{R,Min}$	TR_Max, TR_Min	maximale bzw. minimale Rücklaufstemperatur (im Brennwertkessel) [K]
λ_H^{El}	lambdaEl_H	spez. Elektroenergiebedarf (Zusatzenergie), bezogen auf eine Einheit abgegebener Wärme [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
Hilfsgrößen:		
$\dot{E}_{H,Add}$		Durch Nachheizen bereitzustellender Nettoenthalpiestrom [W]
\dot{Q}_L		Energieverlust durch WHD [W]
$\eta(T_{R,Ex})$		Wirkungsgrad [1]

5.3.3 Wärmeübertrager mit konstanter Temperaturspreizung

NHE_x

Theorie:

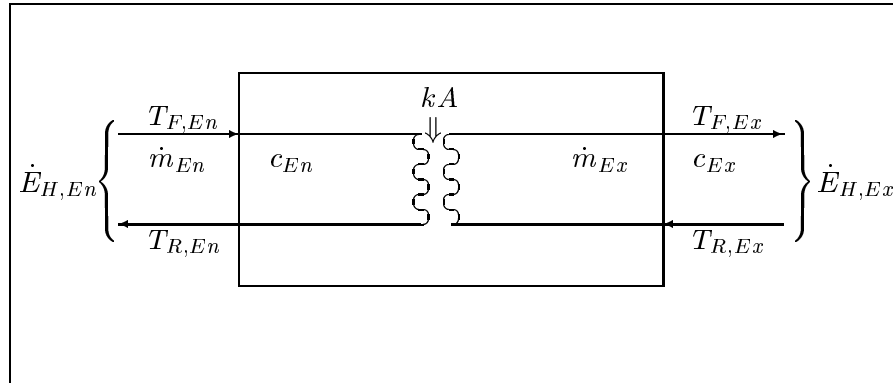


Abbildung 5.7: Energie- und Massenströme beim Wärmeübertrager.

Vereinfachende Annahmen:

- Konstante spezifische Wärmekapazitäten.
- Druckverluste sind vernachlässigbar.
- Bei festgehaltenem genügend großem kA ist der Exergiewirkungsgrad maximal für $\dot{m}_{En} \cdot c_{En} = \dot{m}_{Ex} \cdot c_{Ex}$.
- kA sei beliebig variierbar.

Solange $\Delta T \leq T_{F,En} - T_{R,Ex}$ ist, kann eine konstante Temperaturspreizung aufrechterhalten werden:

$$T_{R,En} = T_{R,Ex} + \Delta T$$

$$T_{F,En} = T_{F,Ex} + \Delta T$$

Dies erlaubt es, die Wärmeübertrager im Rahmen von *deeco* wie folgt zu modellieren:

NB 1 $\dot{E}_{H,Ex} = \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N$ (optional)

NB 2 $\dot{E}_{H,En} = \dot{E}_{H,Ex}$

NB 3 $\dot{E}_{H,Ex} = 0$ falls $T_{F,En} - T_{R,Ex} < \Delta T$ oder $\Delta T < T_{R,En} - T_{F,Ex}$

Je nach vorgegebenen Enthalpiestromtypen sind folgende Fälle zu unterscheiden:

$$\text{Flag} = 11 : \quad \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}$$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{F,Ex} = T_{F,En} - \Delta T, \quad T_{R,Ex} = T_{R,En} - \Delta T}$$

$$\text{Flag} = 44 ; \quad \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 4 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)}$$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{F,En} = T_{F,Ex} + \Delta T, \quad T_{R,En} = T_{R,Ex} + \Delta T}$$

$$\text{Flag} = 22 : \quad \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}$$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{F,Ex} = T_{F,En} - \Delta T, \quad T_{R,En} = T_{R,Ex} + \Delta T}$$

$$\text{Flag} = 33 : \quad \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 3 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 3 (T)}$$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{F,En} = T_{F,Ex} + \Delta T, \quad T_{R,Ex} = T_{R,En} - \Delta T}$$

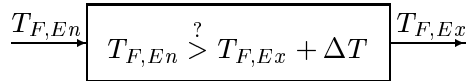
Literatur

[Kre87], [Bec84].

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,En}$ $\dot{E}_{H,Ex}$		
Attribute		
$T_{F,En}$ $T_{R,En}$ $T_{F,Ex}$ $T_{R,Ex}$		
Zeitunabh. Parameter:	für .piv-File	
ΔT $\dot{E}_{H,Ex,0}$ N $Flag$	deltaT DotEH_0 Count Flag	Temperaturspreizung [K] Obergrenze für Wärmeabgabe (Maximalleistung) [W] Zahl identischer Wärmeübertrager [1] $\left\{ \begin{array}{l} 11 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 1 (T)} \\ 22 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \\ 33 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 3 (T)} \\ 44 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \end{array} \right.$
Hilfsgrößen:		
A k $\dot{m}_{En}, \dot{m}_{Ex}$ c_{En}, c_{Ex}		Wärmeübertragerfläche [m^2] Wärmedurchgangszahl [$\frac{W}{m^2K}$] Massenströme [$\frac{kg}{s}$] spez. Wärmekapazitäten [$\frac{J}{kgK}$]

5.3.4 Wärmetransport (Wärmestrom)

NQTrans



Theorie:

Der Transport von Wärme wird in *deeco* ausschließlich aus Kompatibilitätsgründen zum Optimierungsmodell *ecco*²⁰ zugelassen. Der Transport von Wärme ist mit Verlusten verbunden und erfordert gegebenenfalls elektrische Hilfsenergie. Der Prozeß NQTrans wird zugleich herangezogen, um zu entscheiden, ob eine gegebene Wärmequalität ausreicht, d.h. größer als eine geforderte Wärmequalität ist.

NB 1 $\boxed{\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N}$ (optional)

NB 2 $\boxed{\dot{E}_{H,En} = \eta^{-1} \cdot \dot{E}_{H,Ex}}$

NB 3 $\boxed{\dot{E}_{El,En} = \lambda_H^{El} \cdot \dot{E}_{H,Ex}}$ Zusatzenergiebedarf (erlaubt auch die Berücksichtigung von Elektrowärmepumpen)

NB 4 $\boxed{\dot{E}_{H,Ex} = 0}$ falls $T_{F,En} < T_{F,Ex} + \Delta T$ und Flag = 14

IO-A $\boxed{T_{F,Ex} = T_{F,En} - \Delta T}$ falls Flag = 11

IO-A $\boxed{T_{F,En} = T_{F,Ex} + \Delta T}$ falls Flag = 44

$T_{R,Ex}$ und $T_{F,Ex}$ sind unbestimmt; sie werden programmtechnisch gleich 0 gesetzt.

Die den Qualitätsverlust charakterisierende Temperaturabnahme ΔT wird im hier beschriebenen einfachen Modell als lastunabhängig angesehen und darüber hinaus unabhängig von der Umgebungstemperatur angenommen.

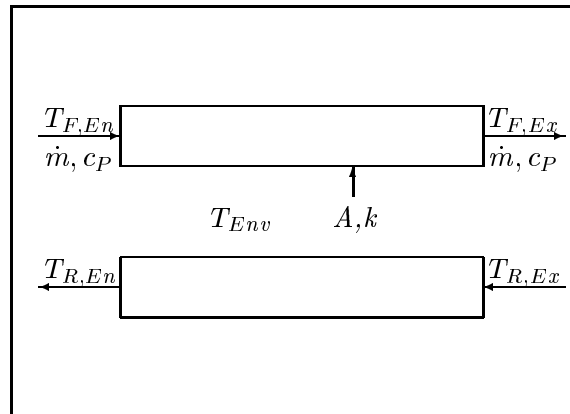
²⁰Einem Vorläufer von *deeco*, siehe [Gro92].

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
Attribute		
$T_{F,En}$		
$T_{R,En}$		
$T_{F,Ex}$		
$T_{R,Ex}$		
Zeitunabh. Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe (Maximalleistung) [W]
η	eta	Wärmetransportwirkungsgrad [1]
λ_H^{El}	lambdaEl_H	spez. Bedarf an elektrischer Energie, bezogen auf eine Einheit abgegebener Wärme[1]
N	Count	Zahl der Leitungen [1]
ΔT	deltaT	Temperaturabnahme durch Wärmeverluste [K]
$Flag$	Flag	$\left\{ \begin{array}{l} 14 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)} \\ \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 11 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)} \\ \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 1 (T)} \\ 44 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \end{array} \right.$

5.3.5 Nettoenthalpietransport durch Wärmetransportmittel

NHTrans

Theorie:



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. Rücklauf-temperatur des Wärmetransportmittels modelliert werden. Dabei ist folgendes zu beachten:

- Der Pumpenenergiebedarf, der Temperaturabfall und die Wärmeverluste einer Wärmetransportleitung hängen von einer Vielzahl von Einflußfaktoren ab, die modellmäßig nur schwer zu erfassen sind. Dazu zählen die Außentemperatur, die Temperatur im Kanal, die Isolierung, die Schwachstellen der Isolierung (z. B. Ventile), die Vor- und Rücklauf-temperaturen, die Regelung, die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärme (verursacht durch Pumpen) sowie die Reliefform (aufgrund der damit einhergehenden Druckveränderungen).
- Der Pumpenenergiebedarf und die Wärmeverluste sind jedoch i.allg. klein im Vergleich zur transportierten Wärme, so daß eine lineare Approximation zulässig ist.

Vereinfachende Annahmen:

- $\frac{kA}{\dot{m} \cdot c_P} = \text{const.}$ für alle $\dot{E}_{H,En}$.
- $\frac{kA}{\dot{m} \cdot c_P} \ll 1$ („gute Wärmedämmung“).

Unter diesen Annahmen läßt sich das zunächst unbekannte Verhältnis $\frac{kA}{\dot{m}c_P}$ durch meßbare Größen ausdrücken, die leicht für einen repräsentativen Referenzzustand des Wärmetransportsystems („Auslegungszustand“) bestimmt werden können. (Ist η_0 der mittlere Wirkungsgrad des Wärmetransportes, so sollten $T_{F,En,0}$ und $T_{R,En,0}$ ebenfalls geeignete Mittelwerte darstellen.):

$$\frac{kA}{\dot{m}c_P} = \frac{(1 - \eta_0)(T_{F,En,0} - T_{R,En,0})}{T_{F,En,0} + T_{R,En,0} - 2T_{Env}}$$

Damit läßt sich der Nettoenthalpietransport in *deeco* wie folgt modellieren:

NB 1	$\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0}$	(optional)
NB 2	$\dot{E}_{H,En} = \frac{T_{F,En} - T_{R,En}}{T_{F,Ex} - T_{R,Ex}} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$	Unter der Annahme einer stets gleichbleibenden Massenstromgeschwindigkeit [Bru92], S.55
NB 3	$\dot{E}_{El,En} = \frac{p_{El}}{(T_{F,Ex} - T_{R,Ex}) \cdot c_P} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$	
NB 4	$\dot{E}_{H,Ex} = 0$	
IO-A	$T_{F,Ex} = T_{Env} + (T_{F,En} - T_{Env}) \cdot \left(1 - \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 11
IO-A	$T_{R,Ex} = T_{Env} + (T_{R,En} - T_{Env}) \cdot \left(1 + \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 11
IO-A	$T_{F,En} = T_{Env} + (T_{F,Ex} - T_{Env}) \cdot \left(1 + \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 44
IO-A	$T_{R,En} = T_{Env} + (T_{R,Ex} - T_{Env}) \cdot \left(1 - \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 44
IO-A	$T_{F,Ex} = T_{Env} + (T_{F,En} - T_{Env}) \cdot \left(1 - \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 22
IO-A	$T_{R,En} = T_{Env} + (T_{R,Ex} - T_{Env}) \cdot \left(1 - \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 22
IO-A	$T_{F,En} = T_{Env} + (T_{F,Ex} - T_{Env}) \cdot \left(1 + \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 33
IO-A	$T_{R,Ex} = T_{Env} + (T_{R,En} - T_{Env}) \cdot \left(1 + \frac{kA}{\dot{m}c_P}\right)$	falls Flag = 33

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
Attribute		
$T_{F,En}$		
$T_{R,En}$		
$T_{F,Ex}$		
$T_{R,Ex}$		
Zeitunabh. Parameter:		
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe (Maximalleistung) [W]
η_0	eta_0	Wärmetransportwirkungsgrad im Auslegungszustand [1]
$T_{F,En,0}, T_{R,En,0}$	TF_0, TR_0	Vor- bzw. Rücklauf­temperatur im Auslegungszustand [K]
T_{Env}	T_Env	Umgebungstemperatur (z.B. mittlere Bodentemperatur)[K]
p_{El}	p_El	spez. Pumpenenergiebedarf, bezogen auf \dot{m} [$\frac{W}{kg/s}$]
c_P	c_p	Wärmekapazität [$\frac{J}{kgK}$]
Flag	Flag	$\left\{ \begin{array}{l} 11 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \cong \text{Typ 1 (T)} \\ 22 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \cong \text{Typ 2 (T)} \\ 33 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \cong \text{Typ 3 (T)} \\ 44 : \dot{E}_{H,En}, \dot{E}_{H,Ex} \cong \text{Typ 4 (T)} \end{array} \right.$
Hilfsgrößen:		
A		Rohroberfläche (für ein Rohr) [m^2]
k		Wärmedurchgangskoeffizient [$\frac{W}{m^2K}$]
\dot{m}		Massenstrom [$\frac{kg}{s}$]

Beispielparameter

$\eta_0 = 0,88$ bis $0,92$ (Leistungsverluste)

$\eta_0 = 0,86$ (inkl. Übergabeverluste bei Fernwärme)

$$\dot{E}_{El,En} = 0,01 \cdot \dot{E}_{H,Ex}$$

Literatur

[Gro91], S. 63.

5.3.6 Elektrowärmepumpen (z.B. zur Abwärme- oder Solarenergienutzung)

NEHP

Theorie:

Elektrowärmepumpen zur Abwärme oder Solarenergienutzung unterscheiden sich von den in Abschnitt 5.2.4 diskutierten Wärmepumpen nur durch eine veränderte Temperatur der Wärmequelle T_{HS} :

$$T_{HS} = T_{R,En} \quad (\text{z. B. Abwärmenutzung, Flag} = 14 \text{ bzw. Flag} = 12)$$

$$T_{HS} = T_{F,En} \quad \text{falls Flag} = 24 \text{ bzw. Flag} = 22.$$

Dieser Trick ermöglicht die Modellierung eines Verdampfers im Wärmespeicher, d. h. $T_{HS} \approx$ Speichertemperatur $\approx T_{F,En}$ und $T_{R,En} = T_{R,En,0}$. $T_{R,En,0}$ kann - solange $T_{R,En} \leq T_{F,En}$ erfüllt ist - beliebig gewählt werden.

Zusammenfassend lassen sich Elektrowärmepumpen zur Abwärme oder Solarenergienutzung somit wie folgt beschreiben:

$$\text{NB 1} \quad \boxed{\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N} \quad \text{optional}$$

$$\text{NB 2} \quad \boxed{\dot{E}_{El,En} = \left\{ \eta_G \cdot \frac{T_{F,con} + \Delta T_{con}}{T_{F,con} + \Delta T_{con} - T_{HS} + \Delta T_{vap}} \right\}^{-1} \cdot \dot{E}_{H,Ex}}$$

$$\text{NB 3} \quad \boxed{\dot{E}_{H,Ex} = 0} \quad \text{falls} \quad \left. \begin{array}{l} 1.) \left\{ \begin{array}{l} T_{con,Min} \leq T_{con} \leq T_{con,Max} \\ T_{vap,Min} \leq T_{vap} \leq T_{vap,Max} \end{array} \right\} \text{ nicht erfüllt ist} \\ 2.) T_{con} < T_{vap} \\ 3.) T_{F,Ex} < T_{R,Ex} \\ 4.) T_{F,En} < T_{R,En} \\ 5.) \varepsilon_{HP} < 1 \end{array} \right\}$$

$$\text{NB 4} \quad \dot{E}_{H,Ex} = \dot{E}_{El,En} + \dot{E}_{H,En}, \text{ d.h.}$$

$$\boxed{\dot{E}_{H,En} = \left[1 - \left\{ \eta_G \frac{T_{F,con} + \Delta T_{con}}{T_{F,con} + \Delta T_{con} - T_{HS} + \Delta T_{vap}} \right\}^{-1} \right] \cdot \dot{E}_{H,Ex}}$$

$$T_{F,con} = \begin{cases} T_{F,Ex} & \text{falls Flag} = 14 \text{ bzw. Flag} = 24 \\ T_{F,Ex,0} & \text{falls Flag} = 12 \text{ bzw. Flag} = 22 \text{ (z.B. Speicherbeladung)} \end{cases}$$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0}} \quad (\text{nur falls Flag} = 12 \text{ bzw. Flag} = 22)$$

$$\text{IO-A} \quad \boxed{T_{R,En} = T_{R,En,0}} \quad (\text{nur falls Flag} = 22 \text{ bzw. Flag} = 24)$$

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}$		Vorlauftemperatur des Heizmediums [K]
$T_{R,Ex}$		Rücklauftemperatur des Heizmediums [K]
$T_{F,En}$		Vorlauftemp. des abzukühlenden Mediums [K] (z.B. Abwärme, zugleich Speichertemp.)
$T_{R,En}$		Rücklauftemp. des abzukühlenden Mediums [K]
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe [W]
η_G	eta_G	Gütefaktor [1] (Vergleich zur idealen Wärmepumpe)
<i>Flag</i>	Flag	$\left\{ \begin{array}{l} 12 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \\ 14 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 22 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \\ 24 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \quad \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \end{array} \right.$
ΔT_{con}	deltaT_con	Temperaturdifferenz im Kondensator [K] „Grädigkeit“ des Kondensators
ΔT_{vap}	deltaT_vap	Grädigkeit des Verdampfers [K]
N	Count	Zahl identischer Wärmepumpen [1]
$T_{con,Max}$	T_ConMax	Maximal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{con,Min}$	T_ConMin	Minimal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{vap,Max}$	T_VapMax	Maximal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{vap,Min}$	T_VapMin	Minimal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0 (optional)	vorgegebene Vorlauftemperatur [K], (nur falls Flag = 12 bzw. Flag = 22)
$T_{R,Ex,0}$	TR_0 (optional)	vorgegebene Rücklauftemperatur [K], (nur falls Flag = 22 bzw. Flag = 24)

Hilfsgrößen:	
ε_{HP}	Wirkungsgrad der (eigentlichen) Wärmepumpe [1]
T_{con}	Kondensatortemperatur [K]
T_{vap}	Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,con}$	Vorlauftemp. im Abnehmerteil des Kondensators [K]
T_{HS}	Temperatur der Wärmequelle [K]

Beispielparameter

s.S. 123.

5.3.7 Gaswärmepumpe (z.B. zur Abwärme- oder Solarenergienutzung)

NGHP

Theorie:

Die Modellierung der Gaswärmepumpen zur Abwärme und Solarenergienutzung folgt der in den Abschnitten 5.2.5 und 5.3.6. Somit lassen sich Gasmotorwärmepumpen im Rahmen von *deeco* wie folgt modellieren:

NB 1
$$\dot{E}_{H,Ex} \leq \dot{E}_{H,Ex,0} \cdot N$$

NB 2
$$\dot{E}_{Fuel,En} = \{a + \varepsilon_{HP}(T_{HS}, T_{F,Ex}, T_{R,Ex}) \cdot \eta_{Mech}\}^{-1} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$$

NB 3
$$\dot{E}_{H,Ex} = 0 \quad \text{falls} \quad \left. \begin{array}{l} 1.) \left\{ \begin{array}{l} T_{con,Min} \leq T_{con} \leq T_{con,Max} \\ T_{vap,Min} \leq T_{vap} \leq T_{vap,Max} \end{array} \right\} \text{ nicht erfüllt ist} \\ 2.) T_{con} < T_{vap} \\ 3.) T_{F,Ex} < T_{R,Ex} \\ 4.) T_{F,En} < T_{R,En} \\ 5.) \varepsilon_{HP} < 1 \end{array} \right\}$$

NB 4
$$\dot{E}_{H,En} = \frac{(\varepsilon_{HP} - 1) \cdot \eta_{Mech}}{a + \varepsilon_{HP} \cdot \eta_{Mech}} \cdot \dot{E}_{H,Ex}$$

NB 5
$$\dot{E}_{El,En} = \lambda_H^{El} \cdot \dot{E}_{H,Ex} \quad \text{Zusatzenergiebedarf}$$

ZF
$$\dot{\vec{P}}^{Var} = \vec{\omega}_{Fuel} \cdot \dot{E}_{Fuel,En} \quad \text{Emissionen am Ort der Wärmepumpe}$$

IO-A
$$T_{F,Ex} = T_{F,Ex,0} \quad \text{(nur falls Flag =12 bzw. Flag =22)}$$

IO-A
$$T_{R,En} = T_{R,En,0} \quad \text{(nur falls Flag =22 bzw. Flag =24)}$$

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}$		
$\dot{E}_{H,En}$		
$\dot{E}_{El,En}$		
$\dot{E}_{Fuel,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}$		Vorlauftemperatur des Heizmediums [K]
$T_{R,Ex}$		Rücklauftemperatur des Heizmediums [K]
$T_{F,En}$		Vorlauftemp. des abzukühlenden Mediums [K] (z.B. Abwärme, zugleich Speichertemperaturen)
$T_{R,En}$		Rücklauftemp. des abzukühlenden Mediums [K]
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{H,Ex,0}$	DotEH_0	Obergrenze für Wärmeabgabe [W]
η_G	eta_G	Gütefaktor [1] (Vergleich zur idealen Wärmepumpe)
Flag	Flag	$\begin{cases} 12 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \\ 14 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 1 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \\ 22 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 2 (T)} \\ 24 : \dot{E}_{H,En} \hat{=} \text{Typ 2 (T)}, \dot{E}_{H,Ex} \hat{=} \text{Typ 4 (T)} \end{cases}$
ΔT_{con}	deltaT_con	Temperaturdifferenz im Kondensator [K] „Grädigkeit“ des Kondensators
ΔT_{vap}	deltaT_vap	Grädigkeit des Verdampfers [K]
N	Count	Zahl identischer Wärmepumpen [1]
$T_{con,Max}$	T_ConMax	Maximal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{con,Min}$	T_ConMin	Minimal zulässige Kondensatortemperatur [K]
$T_{vap,Max}$	T_VapMax	Maximal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{vap,Min}$	T_VapMin	Minimal zulässige Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,Ex,0}$	TF_0 (optional)	vorgegebene Vorlauftemperatur [K] (nur falls Flag = 12 bzw. Flag = 22)
$T_{R,Ex,0}$	TR_0 (optional)	vorgegebene Rücklauftemperatur [K] (nur falls Flag = 22 bzw. Flag = 24)

Weitere Parameter:	.piv-File	
η_{Mech}	eta_Mech	Mechanischer Motorwirkungsgrad [1]
a	a	Anteil der nutzbaren Abwärme am Brennstoffeinsatz im Motor [1]
λ_H^{El}	lambdaEl_H	spez. Bedarf an el. Energie (Zusatzenergie) bezogen auf eine Einheit abgegebener Wärme [1]
$\vec{\omega}_{Fuel}, \omega_{\nu, Fuel}$		Vektor bzw. Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2, Fuel}$	sVarCO2 (optional)	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
<hr/>		
Verallg. Kosten		
\dot{P}^{Var}		Vektor der Emissionen [$\frac{kg}{s}$]
<hr/>		
Hilfsgrößen:		
ε_{HP}		Wirkungsgrad der (eigentlichen) Wärmepumpe [1]
T_{con}		Kondensatortemperatur [K]
T_{vap}		Verdampfertemperatur [K]
$T_{F,con}$		Vorlauftemperatur im Abnehmerteil des Kondensators [K]
T_{HS}		Temperatur der Wärmequelle [K]
$\dot{E}_{H,HP}$		Wärmeabgabe pro Zeiteinheit der eigentlichen Wärmepumpe = Wärmeabgabe des Kondensators [W]
\dot{E}_{Mech}		Mechanische Antriebsleistung des Verdichters der Wärmepumpe [W]
$\dot{E}_{H,M}$		Nutzbare Motorwärme pro Zeiteinheit [W] (Abgaswärme, Motorkühlung)
φ		Heizzahl der Wärmepumpe [1]
$\dot{m} \cdot c$		Wärmekapazitätsstrom des Heizmittels [$\frac{kg}{s} \cdot \frac{J}{kgK}$]

Beispielparameter

$$\eta_G = \begin{cases} 0,5 - 0,6 & [\text{Rec95}] \\ 0,45 - 0,65 & [\text{RWE83}] \\ 0,5 & [\text{Ric82}], \text{ S. 43 für Elektrowärmepumpen} \\ & \text{(El. Motorwirkungsgrad von 0,97 enthalten.)} \\ 0,52 & [\text{Ric82}], \text{ S. 43 für Gaswärmepumpen} \\ 0,5 & [\text{Mie81}], \text{ S. 3.38} \end{cases}$$

Bei Elektrowärmepumpen ist in η_G der Elektromotorwirkungsgrad η_M zu berücksichtigen [RWE83], S.22:

Motorleistung [kW]	Wirkungsgrad η_M
1	0,75
5	0,85
10	0,87
20	0,88
50	0,90
100	0,93
1000	0,96

$$\Delta T_{con} = \begin{cases} \geq 3 \text{ K} & [\text{Rec95}], \text{ S. 498} \\ 5 \text{ K} & [\text{Mie81}], \text{ S. 3.37} \\ 3 \text{ K} & [\text{Ric82}], \text{ S. 43} \end{cases}$$

$$\Delta T_{vap} = \begin{cases} \geq 5 \text{ K} & [\text{Rec95}], \text{ S. 498} \\ 5 \text{ K} & [\text{Mie81}], \text{ S. 3.37} \\ 5 \text{ K} & [\text{Ric82}], \text{ S. 43} & \text{Luft-Wasser-Übergang} \\ 3 \text{ K} & [\text{Ric82}], \text{ S. 43} & \text{Wasser-Wasser-Übergang} \\ 20 \text{ K} & [\text{Mai86}], \text{ S. 79} & \text{(Ab-)Luft-} \\ & & \text{Wasser-Übergang} \\ 5 \text{ K} & [\text{Mai86}], \text{ S. 79} & \text{Wasser-Wasser-Übergang} \end{cases}$$

Zusätzliche Parameter für Motorwärmepumpen:

$$\lambda_H^{El} = 0,009-0,028 \quad (3-8\% \text{ bezogen auf die Stromaufnahme bei EWP}) \\ \text{[Die84]}$$

$$\eta_{Mech} = \left\{ \begin{array}{ll} 0,32 & \dot{E}_{Mech} \leq 150 \text{ kW } (\dot{E}_{H,Ex} \leq 750 \text{ kW}) \text{ [Ric82], S. 35} \\ 0,33 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Gasmotor} \\ 0,39 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Dieselmotor} \end{array} \right\} \text{ [Rec95]}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0,25 - 0,35 & \text{Gasmotor} \\ 0,30 - 0,42 & \text{Dieselmotor} \end{array} \right\} \text{ [RWE83], S. 23}$$

$$a = \left\{ \begin{array}{ll} 0,48 & \dot{E}_{Mech} \leq 150 \text{ kW [Ric82], S. 35} \\ 0,50 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Gasmotor} \\ 0,44 & \dot{E}_{Mech} \geq 100 \text{ kW, Dieselmotor} \end{array} \right\} \text{ [Rec95]}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} 0,53 - 0,63 & \text{Gasmotor: } a + \eta_{Mech} \leq 0,88 \\ 0,42 - 0,54 & \text{Dieselmotor: } a + \eta_{Mech} \leq 0,84 \end{array} \right\} \text{ [RWE83], S. 23}$$

$T_{R,En,0}$ sollte möglichst niedrig ($\approx 273 \text{ K}$) vorgegeben werden. $T_{F,Ex,0}$ wird bei Motorwärmepumpen begrenzt durch die typische minimale Abgastemperatur. Sie beträgt:

$$\left. \begin{array}{l} 393 \text{ K bei Gasmotoren} \\ 453 \text{ K bei Dieselmotoren} \end{array} \right\} \text{ [Rec95], [RWE83]}$$

333 K bei Gasmotoren. Falls eine Brennwertnutzung möglich ist gilt:
 $a = 0,56$ ($\eta_{Mech} = 0,33$) [Jue81].

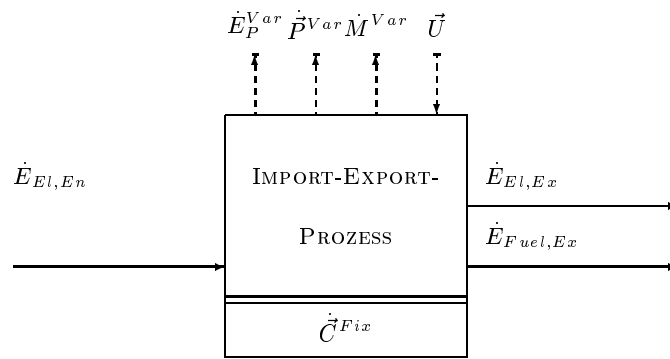


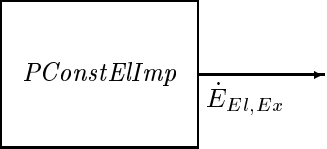
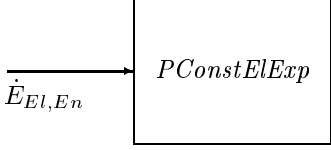
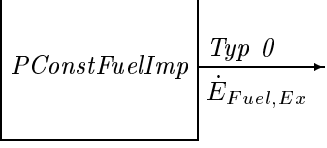
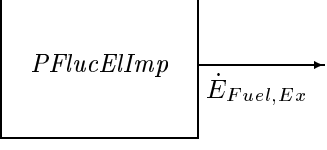
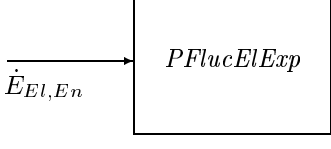
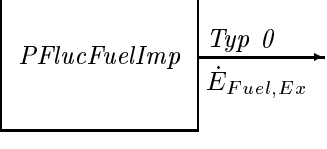
Abbildung 5.8: Import-Export-Prozeß.

5.4 Übergabeprozesse (= Import-Export-Prozesse)

Import-Export-Prozesse beschreiben die energetische Anknüpfung des EVS an das übergeordnete EVS (vgl. Abb. A.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. 5.8). Diese Form der Modellierung der Import-Export-Prozesse führt zu einer gewissen Verwechslungsgefahr,²¹ 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{P}^{Var} in die Gesamtbilanz 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 Anlagenkosten des übergeordnete EVS, der dem EVS aufgrund des Energieimports anzulasten ist bzw. der aufgrund des Exports von elektrischer Energie vermieden werden kann.

²¹Der 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.

Verfügbare Module	<i>procType</i>
Import elektrischer Energie (zeitunabhängige Parameter)	PConstElImp
Export elektrischer Energie (zeitunabhängige Parameter)	PConstElExp
Import chemischer Energie (zeitunabhängige Parameter)	PConstFuelImp
Import elektrischer Energie (zeitabhängige Parameter)	PFlucElImp
Export elektrischer Energie (zeitabhängige Parameter)	PFlucElExp
Import chemischer Energie (zeitabhängige Parameter)	PFlucFuelImp

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
PConstElImp	Import elektrischer Energie (zeitunabhängige Parameter des übergeordneten EVS)		128
PConstElExp	Export elektrischer Energie (zeitunabhängige Parameter des übergeordneten EVS)		128
PConstFuelImp	Import chemischer Energie (zeitunabhängige Parameter des übergeordneten EVS)		128
PFlucElImp	Import elektrischer Energie (zeitabhängige Parameter des übergeordneten EVS)		130
PFlucElExp	Export elektrischer Energie (zeitabhängige Parameter des übergeordneten EVS)		130
PFlucFuelImp	Import chemischer Energie (zeitabhängige Parameter des übergeordneten EVS)		130

5.4.1 Übergabeprozesse (zeitunabhängig)

PConstElImp, PConstElExp, PConstFuelImp

Theorie:

Übergabeprozesse des Typs PConst α Imp, mit $\alpha \in \{El, Fuel\}$, beschreiben den Import von elektrischer Energie \dot{E}_{El} bzw. chemischer Energie \dot{E}_{Fuel} . PConstElExp steht für den Export elektrischer Energie. „Const“ weist darauf hin, daß die Parameter des übergeordneten EVS als zeitunabhängig angesehen werden.

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">PConstElImp</div>	ZF	$\begin{aligned}\dot{E}_P^{Var} &= \pi_{El,Imp} \cdot \dot{E}_{El,Ex} \\ \dot{P}^{Var} &= \vec{\omega}_{El,Imp} \cdot \dot{E}_{El,Ex} \\ \dot{M}^{Var} &= \kappa_{El,Imp} \cdot \dot{E}_{El,Ex}\end{aligned}$	<p>Import elektrischer Energie</p> <p>NB 1 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">$\dot{E}_{El,Ex} \leq \dot{E}_{El,Ex,0}$</div></p> <p>(optional)</p>
--	----	---	---

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">PConstElExp</div>	ZF	$\begin{aligned}\dot{E}_P^{Var} &= -\pi_{El,Exp} \cdot \dot{E}_{El,En} \\ \dot{P}^{Var} &= -\vec{\omega}_{El,Exp} \cdot \dot{E}_{El,En} \\ \dot{M}^{Var} &= -\kappa_{El,Exp} \cdot \dot{E}_{El,En}\end{aligned}$	<p>Export elektrischer Energie</p> <p>NB 1 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">$\dot{E}_{El,En} \leq \dot{E}_{El,En,0}$</div></p> <p>(optional)</p>
--	----	--	---

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">PConstFuelImp</div>	ZF	$\begin{aligned}\dot{E}_P^{Var} &= \pi_{Fuel,Imp} \cdot \dot{E}_{Fuel,Ex} \\ \dot{P}^{Var} &= \vec{\omega}_{Fuel,Imp} \cdot \dot{E}_{Fuel,Ex} \\ \dot{M}^{Var} &= \kappa_{Fuel,Imp} \cdot \dot{E}_{Fuel,Ex}\end{aligned}$	<p>Import chemischer Energie</p> <p>NB 1 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">$\dot{E}_{Fuel,Ex} \leq \dot{E}_{Fuel,Ex,0}$</div></p> <p>(optional)</p>
--	----	---	---

ZF = Zielfunktionskomponente

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{El,Ex}, \dot{E}_{El,En}$ $\dot{E}_{Fuel,Ex}$		
Parameter:	für .piv-File	(„spezifisch“ bedeutet bezogen auf $\dot{E}_{El,Ex}$, $\dot{E}_{El,En}$, bzw. $\dot{E}_{Fuel,Ex}$)
$\dot{E}_{El,Ex,0}$	DotEEL0 (optional)	Obergrenze für importierte elektrische Energie [W]
$\pi_{El,Imp}$	sVarE	spezifischer Primärenergieeinsatz [1]
$\vec{\omega}_{El,Imp}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
$\omega_{\nu,El,Imp}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,El,Imp}$	sVarCO2	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
$\kappa_{El,Imp}$	sVarM	spezifischer Kostenfaktor [$\frac{DM}{s} W^{-1}$]
$\dot{E}_{El,En,0}$	DotEEL0 (optional)	Obergrenze für exportierte elektrische Energie [W]
$\pi_{El,Exp}$	sVarE	spezifischer Primärenergieeinsatz [1]
$\vec{\omega}_{El,Exp}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
$\omega_{\nu,El,Exp}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,El,Exp}$	sVarCO2	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
$\kappa_{El,Exp}$	sVarM	spezifischer Kostenfaktor [$\frac{DM}{s} W^{-1}$]
$\dot{E}_{Fuel,Ex,0}$	DotEFuel0 (optional)	Obergrenze für importierte chemische Energie [W]
$\pi_{Fuel,Imp}$	sVarE	spezifischer Primärenergieeinsatz [1]
$\vec{\omega}_{Fuel,Imp}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel,Imp}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel,Imp}$	sVarCO2	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s} W^{-1}$]
$\kappa_{Fuel,Imp}$	sVarM	spezifischer Kostenfaktor [$\frac{DM}{s} W^{-1}$]
Verallgm. Kosten		
\dot{E}_P^{Var}		Primärenergieeinsatz [W]
\dot{P}^{Var}		Vektor der Emissionen [$\frac{kg}{s}$]
\dot{M}^{Var}		monetäre Kosten [$\frac{DM}{s}$]

5.4.2 Übergabeprozesse (zeitabhängig)

PFlucElImp, PFlucElExp, PFlucFuelImp

Theorie:

Übergabeprozesse des Typs PFluc α Imp, mit $\alpha \in \{El, Fuel\}$, beschreiben den Import von elektrischer Energie \dot{E}_{El} bzw. chemischer Energie \dot{E}_{Fuel} . PFlucElExp steht für den Export elektrischer Energie. „Fluc“ weist darauf hin, daß die Parameter des übergeordneten EVS als zeitlich variabel angesehen werden.

PFlucElImp	ZF	$\begin{aligned}\dot{E}_P^{Var} &= \pi_{El,Imp} \cdot \dot{E}_{El,Ex} \\ \dot{P}^{Var} &= \vec{\omega}_{El,Imp} \cdot \dot{E}_{El,Ex} \\ \dot{M}^{Var} &= \kappa_{El,Imp} \cdot \dot{E}_{El,Ex}\end{aligned}$	Import elektrischer Energie NB 1 $\dot{E}_{El,Ex} \leq \dot{E}_{El,Ex,0}$ (optional)
--	----	---	---

PFlucElExp	ZF	$\begin{aligned}\dot{E}_P^{Var} &= -\pi_{El,Exp} \cdot \dot{E}_{El,En} \\ \dot{P}^{Var} &= -\vec{\omega}_{El,Exp} \cdot \dot{E}_{El,En} \\ \dot{M}^{Var} &= -\kappa_{El,Exp} \cdot \dot{E}_{El,En}\end{aligned}$	Export elektrischer Energie NB 1 $\dot{E}_{El,En} \leq \dot{E}_{El,En,0}$ (optional)
--	----	--	---

PFlucFuelImp	ZF	$\begin{aligned}\dot{E}_P^{Var} &= \pi_{Fuel,Imp} \cdot \dot{E}_{Fuel,Ex} \\ \dot{P}^{Var} &= \vec{\omega}_{Fuel,Imp} \cdot \dot{E}_{Fuel,Ex} \\ \dot{M}^{Var} &= \kappa_{Fuel,Imp} \cdot \dot{E}_{Fuel,Ex}\end{aligned}$	Import chemischer Energie NB 1 $\dot{E}_{Fuel,Ex} \leq \dot{E}_{Fuel,Ex,0}$ (optional)
--	----	---	---

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{El,Ex}$, $\dot{E}_{El,En}$ $\dot{E}_{Fuel,Ex}$		
Parameter:	für .piv-File	
$\dot{E}_{El,Ex,0}$	DotEEl_0 (optional)	Obergrenze für importierte elektrische Energie [W]
$\dot{E}_{El,En,0}$	DotEEl_0 (optional)	Obergrenze für exportierte elektrische Energie [W]
$\dot{E}_{Fuel,Ex,0}$	DotEFuel_0 (optional)	Obergrenze für importierte chemische Energie [W]
Zeitabh. Parameter:	für .pit-File	(„spezifisch“ bedeutet bezogen auf $\dot{E}_{El,Ex}$, $\dot{E}_{El,En}$ bzw. $\dot{E}_{Fuel,Ex}$)
$\pi_{El,Imp}$	sVarE	spezifischer Primärenergieeinsatz [1]
$\vec{\omega}_{El,Imp}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,El,Imp}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,El,Imp}$	sVarCO2	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\kappa_{El,Imp}$	sVarM	spezifischer Kostenfaktor [$\frac{DM}{s}W^{-1}$]
$\pi_{El,Exp}$	sVarE	spezifischer Primärenergieeinsatz [1]
$\vec{\omega}_{El,Exp}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,El,Exp}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,El,Exp}$	sVarCO2	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\kappa_{El,Exp}$	sVarM	spezifischer Kostenfaktor [$\frac{DM}{s}W^{-1}$]
$\pi_{Fuel,Imp}$	sVarE	spezifischer Primärenergieeinsatz [1]
$\vec{\omega}_{Fuel,Imp}$		Vektor der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\omega_{\nu,Fuel,Imp}$		Komponente des Vektors der spez. Emissionsfaktoren [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
z.B. $\omega_{CO_2,Fuel,Imp}$	sVarCO2	spez. CO ₂ -Emissionsfaktor [$\frac{kg}{s}W^{-1}$]
$\kappa_{Fuel,Imp}$	sVarM	spezifischer Kostenfaktor [$\frac{DM}{s}W^{-1}$]
Verallgm. Kosten		
\dot{E}_P^{Var}		Primärenergieeinsatz [W]
\dot{P}^{Var}		Vektor der Emissionen [$\frac{kg}{s}$]
\dot{M}^{Var}		monetäre Kosten [$\frac{DM}{s}$]

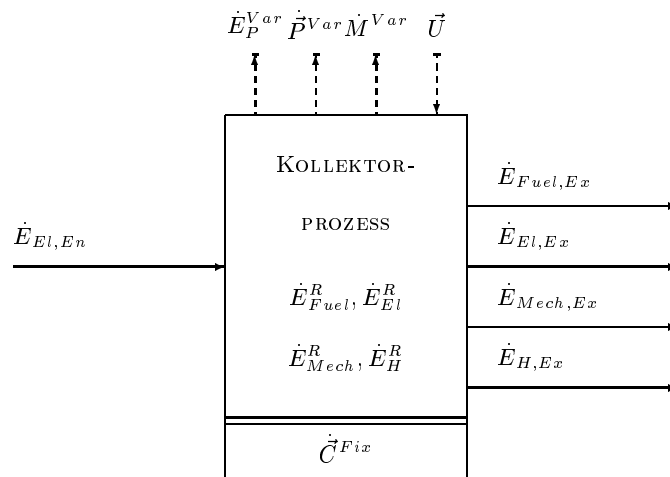


Abbildung 5.9: Kollektorprozeß

5.5 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 Biomassennutzung) 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 Umweltdatenvektor \vec{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{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. 5.9 wiedergegeben.

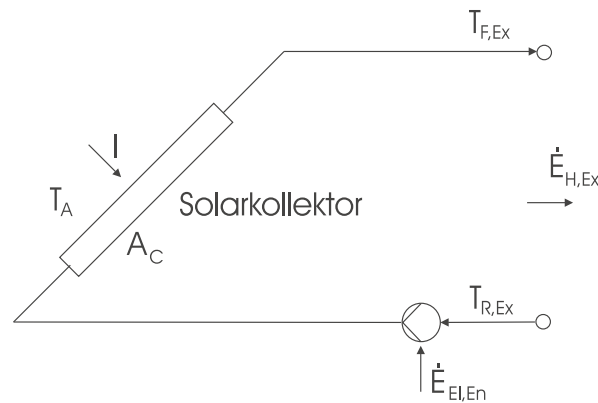
Verfügbare Module	<i>procType</i>
Thermische Nutzung der Solarenergie	OSol

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
OSol	Solkollektor, (thermische Nutzung), ohne Modellierung eines Wärmeübertragers im Speicher, lin. Wirkungsgradkennlinie		133

5.5.1 Thermische Nutzung der Solarenergie

OSol

Theorie:



Die von einer Kollektoranlage maximal abgebbare (nützliche) Wärmeleistung $\dot{E}_{H,Ex,0}$ lässt sich mit Hilfe der Hottel-Whillier-Bliss-Gleichung ([Hot42], [Hot55] und [Bli59]) berechnen, die für die meisten Flachkollektorarten gültig ist und bei der ein konstanter Massenstrom \dot{m} des Wärmetransportmittels durch den Kollektor angenommen wird:

$$\dot{E}_{H,Ex,0} = \theta(t) F_{Rem} A_C \{ \eta_0 I - k_C (T_{R,Ex} - T_A) \} \quad \text{mit} \quad (5.28)$$

$$F_{Rem} = \frac{\dot{m} c_P}{k_C A_C} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{F' k_C A_C}{\dot{m} c_P} \right) \right\}. \quad (5.29)$$

Dabei ist A_C die Kollektorfläche, k_C der Gesamtkollektorstärkekoeffizient, 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.

NB 1

$$\dot{E}_{H,Ex} \leq \theta(t) \cdot N$$

$$\cdot \underbrace{\left\{ 1 - \exp \left(- F' k_C \cdot \frac{1}{c_P} \cdot \frac{A_C}{\dot{m}} \right) \right\} \cdot \frac{\dot{m}}{A_C} \cdot c_P \cdot A_C \cdot \left\{ \frac{F' \eta_0}{F' k_C} I - (T_{R,Ex} - T_A) \right\}}_{\dot{E}_{H,Ex,0}}$$

Falls $\text{Flag} = 1$ ist, ist dabei das „ \leq “-Zeichen zu verwenden; im Falle $\text{Flag} = 0$ das „ $=$ “-Zeichen.

NB 2

$$\dot{E}_{El,En} = N \cdot p_{El} \cdot A_C \cdot \theta(t) \Rightarrow \dot{E}_{El,En} - \left(p_{El} \cdot A_C \cdot \frac{1}{\widetilde{\dot{E}_{H,Ex,0}}} \right) \cdot \dot{E}_{H,Ex} = 0$$

Interpretation: Falls $\dot{E}_{H,Ex} < \theta(t) \cdot \widetilde{\dot{E}_{H,Ex}}$ ist, wird die nützliche Wärmeleistung $\dot{E}_{H,Ex} = \theta(t) \cdot \widetilde{\dot{E}_{H,Ex,0}}$ nur für einen Bruchteil des zugrundeliegenden Zeitintervalls abgegeben, d. h. auch die Pumpe läuft nur während dieser Zeit: $\dot{E}_{El,En} \sim \dot{E}_{H,Ex} / \widetilde{\dot{E}_{H,Ex,0}}$.

$$\theta(t) = \begin{cases} 1 & \text{falls } \dot{E}_{H,Ex,0} \text{ (ohne } \theta(t) \text{) } \geq \Gamma \cdot \dot{E}_{El,En,0} = N \cdot p_{El} \cdot A_C \text{ (ohne } \theta(t) \text{)} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$\dot{E}_{H,Ex,0} = \dot{m}_{cP}(T_{F,Ex} - T_{R,Ex})$ ergibt:

$$\text{IO-A} \quad T_{F,Ex} = \frac{\dot{E}_{H,Ex,0}}{\dot{m}_{cP}} + T_{R,Ex}$$

Die Bestimmung von $F'k_C$ und $F'\eta_0$ erfolgt anhand eines entsprechenden Kollektorwirkungsgraddiagramms unter Berücksichtigung folgender Überlegungen:

Wählt man statt der Rücklauftemperatur die Mitteltemperatur T_{Fl} des Fluids im Kollektor, so gilt:

$$\dot{E}_{H,Ex} = F' A_C \{ \eta_0 I - k_C (T_{Fl} - T_A) \} = A_C \{ F' \eta_0 I - F' k_C (T_{Fl} - T_A) \}$$

Somit erhält man aus einer Darstellung des Wirkungsgrades als Funktion der Variablen $\frac{T_{Fl}-T_A}{I}$ durch einfaches Ablesen des Y-Achsenabschnittes bzw. der Steigung der Geradengleichung sofort $F'\eta_0$ und $F'k_C$:

$$\eta = \frac{\dot{E}_{H,Ex}}{A_C \cdot I} = F' \eta_0 - F' k_C \frac{T_{Fl}-T_A}{I}.$$

Notation	Symbole für Eingabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,Ex}, \dot{E}_{EL,En}$		
Attribute:		
$T_{F,Ex}, T_{R,Ex}$		
Einflußgrößen:		
T_A	T	Außentemperatur [K]
I	I	solare Einstrahlung (45°, Süd) [$\frac{W}{m^2}$]
Parameter:		
	für .piv-File	
$Flag$	Flag	Flag = 1: „≤“-NB1, Flag = 0: „=“ -NB1 (Speichereinsatz)
A_C	A_c	Kollektorfläche [m^2]
$F'(\tau\alpha) = F'\eta_0$	FDashEta_0	Konversionsfaktor [1] effektiver Verlustfaktor } aus dem Kollektorwirkungsgraddiagramm
$F'k_C$	FDashK_c	
c_P	c-p	spez. Wärmekapazität des Fluids [$\frac{J}{kgK}$] (bei konstantem Druck)
\dot{m}/A_C	DotMOverA_c	Massenstrom durch d. Kollektor (bezogen auf A_C) [$\frac{kg}{sm^2}$]
p_{El}	p-El	spez. Pumpenergiebedarf (elektrisch), bezogen auf A_C [$\frac{W}{m^2}$]
Γ	Gamma	Abschaltfaktor [1]
N	Count	Anzahl identischer Kollektoranlagen [1]
	sFixM, sFixE,...	spez. fixe Kosten, bezogen auf A_C [$\frac{DM}{sm^2}$], [$\frac{J}{s m^2}$]
Hilfsgrößen		
F'		Kollektorwirkungsgradfaktor [1]
η_0		optischer Wirkungsgrad [1]
k_C		Gesamtkollektorwärmedurchgangskoeffizient [$\frac{W}{m^2K}$]
T_{Fl}		Mitteltemperatur des Fluids im Kollektor [K]
F_{Rem}		Wärmeabfuhrfaktor [1]
η		Kollektorwirkungsgrad [1]
$\dot{E}_{H,Ex,0}$		(maximal) nutzbare Wärmeleistung [W]
$\dot{E}_{EL,En,0}$		el. Energiebedarf bei Abgabe von $\dot{E}_{H,Ex,0}$ [W]

Beispielparameter

Gemäß [Nas87] gilt:

	η_0	k_C	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$	
Private Haushalte	0,82	4,2		mittlerer sel. Flachkollektor
	0,69	1,45		Vakuumpollektor
Prozeßwärme	0,7	1 (+0,006 ΔT)		sehr guter Vakuumpollektor
Nahwärme	0,75	2,8		LGB-Kollektor
Nahwärme	0,7	1,0		sehr guter Vakuumpollektor
Nahwärme	0,74	1,87		Großflächenkollektor

$$F' = 0,95 \quad [\text{Duf80}]$$

$$c_P = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \quad \text{Wasser}$$

$$\frac{\dot{m}}{A_C} = 0,015 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \quad [\text{Hol89}]$$

$$\left. \begin{array}{l} p_{El} = 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \\ \Gamma = 6 \end{array} \right\} [\text{Nas92}]$$

Literatur

[Rie91], [Nas87].

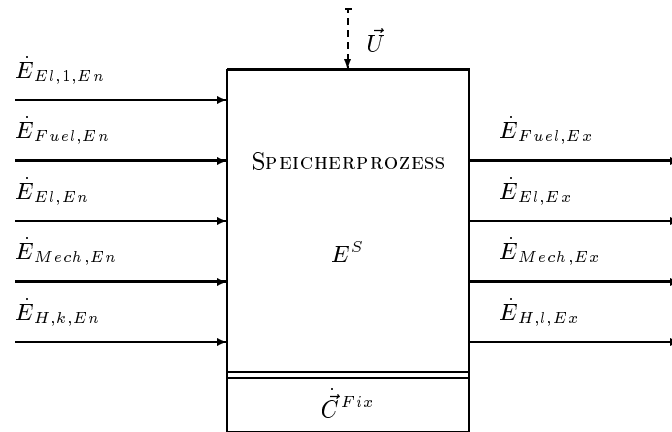


Abbildung 5.10: Speicherprozeß.

5.6 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 energietechnische Prozesse wieder abgeben. $\{k\}$ bzw. $\{l\}$ steht für die Menge der entsprechenden 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 gegebenenfalls 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. 5.10 zeigt die Energieströme, die bei Speicherprozessen auftreten können (aber nicht müssen).

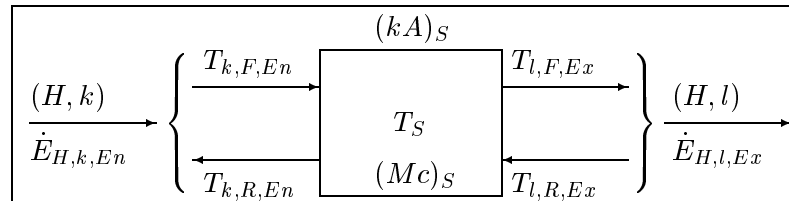
Stimmt der Speicherenergieinhalt am Ende des Optimierungszeitraums nicht mit dem am Anfang überein, so wird der Beitrag den der Speicher zur Energieversorgung liefern könnte unter- bzw. überschätzt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, in einem iterativen Prozeß die Endtemperatur des Speichers als Anfangstemperatur für einen neuen Optimierungslauf zu verwenden bis eine weitgehende Übereinstimmung zwischen beiden Werten (Selbstkonsistenzbedingung der Speicherenergieinhalte) erzielt wurde (s.a. S. 203).

Verfügbare Module	<i>procType</i>
Gut durchmischter, temperatur-ungeschichteter Wärmespeicher	SSenH
Supraleitender magnetischer Energiespeicher (SMES)	SSupEl

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Angesprochene Energieströme	Seite
SSenH	Gut durchmischter, temperatur-ungeschichteter Wärmespeicher (flüssiges Medium, sensible Wärme, temperatur-unabhängige Wärmekapazität)		139
SSupEl	Supraleitender magnetischer Energiespeicher (ohne Kurzschluß im belastungsfreien Fall)		144

5.6.1 Gut durchmischter, temperatur-ungeschichteter Wärmespeicher

SSenH

Theorie:

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 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 Gesamtwärme-kapazität (bei konstantem Druck) des Speichers, so läßt sich der Energieinhalt E_S (genauer: Enthalpieinhalt) des Speichers wie folgt angeben

$$E_S = (Mc)_S(T_S - T_{S,0}). \quad (5.30)$$

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_{Env} die (zeitlich konstant angenommene) Speicherumgebungstemperatur, so ergeben sich die Wärmeverluste \dot{E}_L des Speichers zu:

$$\dot{E}_L = (kA)_S(T_S - T_{Env}). \quad (5.31)$$

Die zeitliche Entwicklung des Energieinhalts des Speichers der durch (gegebenenfalls mehrere, durch $k \in \{k\} := \{1, \dots, k_0\}$ unterschiedene) Wärmeströme $\dot{E}_{H,k,En}$ be- und durch (gegebenenfalls mehrere, durch $l \in \{l\} := \{1, \dots, l_0\}$ unterschiedene) Wärmeströme $\dot{E}_{H,l,Ex}$ entladen wird, läßt sich dann wie folgt beschreiben:

$$\tilde{E}_S(t + \Delta t) - E_S(t) := \Delta t \cdot \left\{ \sum_{k \in \{k\}} \dot{E}_{H,k,En} - \sum_{l \in \{l\}} \dot{E}_{H,l,Ex} - (kA)_S \cdot \left(\frac{E_S(t)}{(Mc)_S} + T_{S,0} - T_{Env} \right) \right\}$$

$$E_S(t + \Delta t) = \begin{cases} \tilde{E}_S(t + \Delta t) & \text{falls } \tilde{E}_S(t + \Delta t) \leq E_{S,Max} = (Mc)_S(T_{S,Max} - T_{S,0}) \\ E_{S,Max} & \text{sonst (dann findet „Waste Heat Dumping“ statt.)} \end{cases}$$

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

$$\text{IO-A} \quad T_{l,F,Ex}(t) = T_{k,R,En}(t) = \frac{E_S(t)}{(Mc)_S} + T_{S,0}$$

Zur Sicherstellung der zulässigen Mindesttemperatur (z.B. $T_S \geq 273\text{K}$) muß gefordert werden: $E_S(t + \Delta t) \geq E_{S,Min}$.

Daraus ergeben sich Einschränkungen für die Be- und Entladung des Speichers, die wie folgt angegeben werden können:

$$\text{NB1} \quad \sum_{k \in \{k\}} \dot{E}_{H,k,En} - \sum_{l \in \{l\}} \dot{E}_{H,l,Ex} \geq (kA)_S \left(\frac{E_S(t)}{(Mc)_S} + T_{S,0} - T_{Env} \right) + \frac{E_{S,Min} - E_S(t)}{\Delta t}$$

mit $E_{S,Min} := (Mc)_S(T_{S,Min} - T_{S,0})$.

Gleichzeitig muß sichergestellt werden, daß die Beladung bzw. Entladung stoppt, sobald der Speicher zu heiß bzw. zu kalt wird:

$$\begin{array}{ll} \dot{E}_{H,k,En} = 0 & \text{falls } T_{k,F,En} \leq T_{k,R,En} \quad (\text{Beladung stoppt}) \\ \dot{E}_{H,l,Ex} = 0 & \text{falls } T_{l,F,Ex} \leq T_{l,R,Ex} \quad (\text{Entladung stoppt}) \end{array}$$

Zur Vereinfachung von Sensitivitätsrechnungen wird angenommen, daß der Speicher zylinderförmig gebaut ist und daß seine Höhe mit seinem Durchmesser übereinstimmt. Dann gilt $A_S \approx 5,536 \cdot V_S^{2/3}$.

Notation	Symbole für Ein- bzw. Ausgabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{H,k,En}$		
$\dot{E}_{H,l,Ex}$		
Attribute:		
$T_{k,F,En}, T_{k,R,En}$		
$T_{l,F,Ex}, T_{l,R,Ex}$		
Parameter:	für .piv-File	
l_0	L_0	Zahl der austretenden Nettoenthalpieströme [1]
k_0	k_0	Zahl der eintretenden Nettoenthalpieströme [1]
$T_{S,I}$	T_I	Temperatur des Speichers bei t=0 [K]
$T_{S,0}$	T_0	Bezugstemperatur für Speicherinhalt [K]
$T_{S,Min}$	T_Min	minimal zulässige Speichertemperatur [K]
$T_{S,Max}$	T_Max	maximal zulässige Speichertemperatur [K]
V_S	V	Speichervolumen [m^3]
c_S	c_p	Wärmekapazität des Speichers [$\frac{J}{kgK}$]
ρ_S	Rho	Dichte des Speichermediums [$\frac{kg}{m^3}$]
k_S	K	Wärmedurchgangszahl der Speicherhülle [$\frac{W}{Km^2}$]
T_{Env}	T_Env	Umgebungstemperatur [K]
N	Count	Zahl identischer Speicheranlagen [1]
	sFixM, sFixE, sFixCO ₂ ,...	spezifische fixe Kosten, bezogen auf V_S [$\frac{DM}{s \cdot m^3}$], [$\frac{J}{s \cdot m^3}$], [$\frac{kg}{s \cdot m^3}$]
ΔT_{Max}	deltaT	max. zulässige Speichertemperaturänderung [K]
Hilfsgrößen		
A_S		Oberfläche der Speicherhülle [m^2]
$E_{S,Min}$		minimaler Speicherenergieinhalt [J]
$E_{S,Max}$		maximaler Speicherenergieinhalt [J]
T_S		Speichertemperatur [K]
M_S		Masse des Speichermediums [kg]
k, l		Nummer des ein- bzw. austretenden Nettoenthalpieströms [1]
\dot{E}_L		Speicherenergieverlust [W]

zeitabh. Ausgabegrößen	für .pot-File	
T_S	T_S	Speichertemperatur [K]
Zustandsgröße		
$E_S(t)$		Speicherenergieinhalt [J]

Beispielparameter

$$T_{S,0} = 273 \text{ K}$$

$$T_{S,Min} = 273 \text{ K}$$

$$T_{S,Max} = 373 \text{ K} \quad (\text{druckloser Speicher})$$

$$c_S = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \quad (\text{Wasser})$$

$$\rho_S = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{Wasser})$$

$$k_S = 0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$T_{Env} = 288 \text{ K} \quad (\text{Keller}) \text{ bzw. } 283 \text{ K} \quad (\text{Erdreich})$$

$$\Delta T_{Max} = 3,6 \text{ K}$$

5.6.2 Supraleitender magnetischer Energiespeicher (SMES)

SSupEl

Theorie:

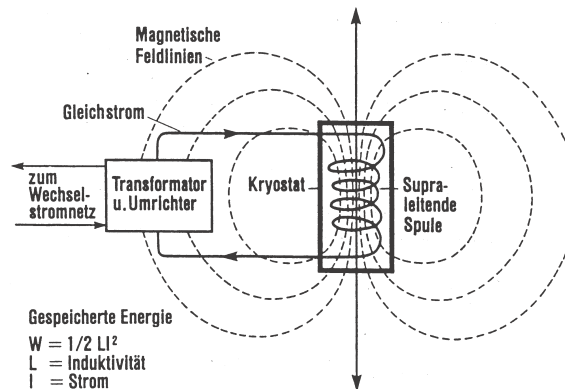


Abbildung 5.11: Prinzipskizze eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers [Fle95], S. 22.

Ein supraleitender magnetischer Energiespeicher (SMES) besteht aus [Fle95]:

- einer in einem Kryostatgefäß untergebrachten supraleitenden Spule,
- einer Kälteanlage zur Erzeugung einer Temperatur, die unterhalb der kritischen Temperatur des verwendeten Supraleiters liegt, und
- einem Wandlersystem (Stromrichter) als Lade- und Entladeeinheit.

Die Speicherung der elektrischen Energie erfolgt im Magnetfeld der supraleitenden Spule, die vom Gleichstrom I_S durchflossen wird. Im Ladezustand wird der aus dem Netz entnommene Wechselstrom im Stromrichter in Gleichstrom überführt und in die Spule eingespeist. Im Entladefall wird der entnommene Gleichstrom nach Durchlaufen des Wandlersystems als Wechselstrom ans Netz zurückgegeben. Aufgrund der Supraleitfähigkeit des verwendeten Materials zeigt der in der Spule fließende Dauerstrom keine Verluste.

- Für den Energieinhalt gilt: $E_S = \frac{1}{2} L \cdot I_S^2$
- Die erforderliche Kühlleistung kann in erster Näherung als konstant angesehen werden ([Sch94a], S. 45, [Mas91]):

$$\text{NB 1 } \dot{E}_{El,1,En} = a_1 \left(\frac{E_{S,Max}}{E_{S,0}} \right)^{2/3} + a_2 \frac{E_{S,Max}}{E_{S,0}} \quad \text{mit } E_{S,0} = 1 \text{ MWh}$$

- Die Stromrichterverluste lassen sich wie folgt quantifizieren:

- Ohmsche Verluste in den Wirkwiderständen: $R_{ges} \cdot I_S^2$
- Durchflußverluste in den Thyristoren: $n\Delta UI_S$
- Verluste im Transformator: $R_{tr} \cdot I_S^2$

Zusammenfassend gilt somit: $\dot{E}_L = (R_{tr} + R_{ges})I_S^2 + n\Delta UI_S = k_1 E_S + k_2 \sqrt{E_S}$,

mit $k_1 = \frac{2}{L}(R_{tr} + R_{ges})$ und $k_2 = n\Delta U \sqrt{\frac{2}{L}}$.

Daraus ergibt sich die folgende Zustandstransformationsgleichung:

$$\tilde{E}_S(t + \Delta t) = \left[\dot{E}_{El,0,En} - \dot{E}_{El,0,Ex} - \left[k_1 E_S(t) + k_2 \sqrt{E_S(t)} \right] \right] \Delta t + E_S(t)$$

Im Gegensatz zu [Sch94a] wird hier angenommen, daß die Stromrichterverluste auch dann auftreten, wenn weder be- noch entladen wird. Der SMES besitzt somit keinen Kurzschlußschalter, der in der Lage wäre, im belastungsfreien Fall einen Kurzschluß zu ermöglichen. Dies entspricht der heute üblichen Betriebsweise von SMES.

$$E_S(t + \Delta t) = \begin{cases} \tilde{E}_S(t + \Delta t) & \text{falls } \tilde{E}_S(t + \Delta t) \leq E_{S,Max} \\ E_{S,Max} & \text{sonst} \end{cases}$$

Mindestenergieinhalt: $E_{S,Min} = b \cdot E_{S,Max}$ [Mas91, Lor89, Sch94a]

$$\text{NB2} \quad \dot{E}_{El,0,En} - \dot{E}_{El,0,Ex} \geq k_1 E_S(t) + k_2 \sqrt{E_S(t)} + \frac{b \cdot E_{S,Max}}{\Delta t} - \frac{E_S(t)}{\Delta t}$$

(Eine im Quelltext von *deeco* existierende NB3 dient programminternen Zwecken.)

$|\dot{E}_S|$ darf nicht zu groß werden, da sonst ein Quench die Speicherspule zerstören könnte, d.h. es soll stets $-\dot{E}_{S,Max} \leq \dot{E}_{ES} \leq \dot{E}_{S,Max}$ (Nennspeicherleistung; $\dot{E}_{S,Max} \geq 0$) erfüllt sein. Dies ergibt die folgenden Nebenbedingungen:

$$\begin{array}{l} \text{NB4} \quad \dot{E}_{El,0,En} - \dot{E}_{El,0,Ex} \leq \dot{E}_{S,Max} + k_1 E_S(t) + k_2 \sqrt{E_S(t)} \\ \text{NB5} \quad -\dot{E}_{El,0,En} + \dot{E}_{El,0,Ex} \leq \dot{E}_{S,Max} - k_1 E_S(t) - k_2 \sqrt{E_S(t)} \end{array}$$

Die technischen Parameter des SMES werden im wesentlichen durch $E_{S,Max}$ bestimmt:

$$\dot{E}_{S,Max} = \frac{E_{S,Max}}{c_1 \log\left(\frac{E_{S,Max}}{E_{S,0}}\right) - c_2}; \quad I_{S,Max} = \frac{\dot{E}_{S,Max}}{U_{S,Max}}; \quad L = \frac{2E_{S,Max}}{I_{S,Max}^2}$$

$$R_{ges} = \frac{U_{S,Max}^2 \cdot \left[c_1 \log\left(\frac{E_{S,Max}}{E_{S,0}}\right) - c_2 \right]}{E_{S,Max} \cdot d}; \quad R_{tr} = \frac{U_{S,Max}^2 \cdot \left[c_1 \log\left(\frac{E_{S,Max}}{E_{S,0}}\right) - c_2 \right]}{E_{S,Max} \cdot e}$$

Notation	Symbole für Ein- bzw. Ausgabefile	Bedeutung
Flüsse:		
$\dot{E}_{El,0,En}$		Beladeleistung
$\dot{E}_{El,0,Ex}$		Entladeleistung
$\dot{E}_{El,1,En}$		Kühlenergieverbrauch (elektrisch) pro Zeiteinheit
Zustandsgröße	für .pot-File	
$E_S(t)$	E_S	Speicherenergieinhalt [J]
Parameter:	für .piv-File	
$E_{S,Max}$	E_Max	maximaler Speicherenergieinhalt [J]
	E_I	Speicherenergieinhalt bei t=0 [J]
a_1, a_2	a_1, a_2	Kühlleistungsparameter (gem. [Sch94a], S. 45) [W]
b	b	Verhältnis von minimalem zu maximalem Speicherenergieinhalt [1]
c_1, c_2	c_1, c_2	charakteristische Ladezeiten (gem. [Sch94a], S. 47, Gl. 2.74) [s]
$U_{S,Max}$	U_Max	Spannung an d. Spule bei Nennspeicherleistung [V]
n	n	Zahl der Thyristoren in Serie [1]
ΔU	deltaU	„forward voltage drop“ in den Thyristoren [V]
d	d	Koeffizient zur Bestimmung von R_{ges} (gem. [Sch94a], S. 47, Gl. 2.79) [1]
ΔE_{Max}	deltaE	maximal zulässige Energieänderung [J]
e	e	Koeffizient zur Bestimmung von R_{tr} (gem. [Sch94a], S. 48, Gl. 2.80) [1]
N	Count	Zahl identischer Speicheranlagen [1]
	sFixM, sFixE, sFixCO ₂ , ...	spezifische fixe Kosten, bezogen auf $E_{S,Max}$ [$\frac{DM}{s \cdot m^3}$], [$\frac{J}{s \cdot m^3}$], [$\frac{kg}{s \cdot m^3}$]

Hilfsgrößen	
I_S	Spulenstrom [A]
L	Induktivität der Spule [$\frac{Vs}{A}$]
R_{ges}	gesamter Wirkwiderstand außerhalb des Transformators [Ω]
R_{tr}	Widerstand (inkl. Reaktanz) d. Transformators [Ω]
k_1, k_2	Verlustkoeffizienten (gem. [Sch94a], S. 45) [$\frac{1}{s}$], [$\frac{J^{\frac{1}{2}}}{s}$]
$I_{S,Max}$	maximaler Spulenstrom [A]
$E_{S,Max}$	Nennspeicherleistung [W]
$E_{S,0}$	Bezugsbasis für E_S [J]

Beispielparameter

a_1	=	$1,361 \cdot 10^4 \text{ W}$	}	[Sch94a], S. 45, Gl. 2.65, 2.66
a_2	=	$6,041 \cdot 10^2 \text{ W}$		
b	=	0,1		[Mas91, Lor89].
c_1	=	10800 s	}	[Sch94a], S. 47, Gl. 2.74, 2.75
c_2	=	7200 s		
$U_{S,Max}$	=	2200 V	}	[Mas91].
ΔU	=	1 V		
d	=	500	}	[Sch94a], S, 47, Gl. 2.79, 2.80
e	=	200		
N	=	1		

Literatur

[Sch94a, Mas91, Lor89, Fle95].

Erweiterung von *deeco* um Wärmedämmtechniken

6.1 Überblick

Im Rahmen des Projekts ISOTEG¹ der Bayerischen Forschungsstiftung wurde das Energieoptimierungsmodell *deeco* durch Herrn Dr. Dietmar Lindenberger um verschiedene Wärmedämmtechniken erweitert. Neben konventioneller Wärmedämmung (z.B. auf Polystyrolbasis) wurden die in ISOTEG weiter entwickelten Techniken der Transparenten Wärmedämmung (TWD) und der Transparenten Schaltbaren Wärmedämmung (SWD) modelliert.

Die Wirkung der Dämmmaßnahmen wird abgebildet durch sich dämmungsbedingt ändernde effektive Wärmedurchgangskoeffizienten und solare Energiedurchlassgrade der jeweiligen Teile der Gebäudehülle. Dabei ergeben sich die U - und g -Werte des gedämmten Systems im allgemeinen aus der "Serienschaltung" der Komponenten des jeweiligen Dämmsystems (einschließlich der zu dämmenden Ausgangsfassade). Da das *deeco*-Modell zeitlich hochaufgelöst (i.d.R. mit Stundenmittelwerten) arbeitet, wird bei der Modellierung der Auswirkungen von Wärmedämmmaßnahmen der Einfluss der zeitlichen Schwankungen von Größen wie (Außen-) Temperaturen und solare Einstrahlung ebenso berücksichtigt wie die standort- und orientierungsabhängigen Winkelabhängigkeiten des gerichteten Anteils der solaren Einstrahlung. Außerdem wird die Winkelabhängigkeit der g -Werte aufgrund des im Zeitgang veränderlichen Einfallswinkels der solaren Einstrahlung berücksichtigt, was bei großflächiger Verwendung transparenter Bauteile (bei TWD, SWD) wichtig ist.²

Nachfolgend wird zunächst der gewählte Ansatz zur Modellierung von Dämmmaßnahmen skizziert (Abschnitt 6.2). Dann werden die einzelnen Dämmtechniken (6.3), der Programmaufruf und die vom Modellanwender vorzugebenden Daten und Parameter (6.4) sowie die vom Programm erzeugten Ausgabedateien (6.5) behandelt.

¹Innovative Systeme und optimierte Techniken zur energetischen Gebäudesanierung

²Hierbei konnte auf Werte zurückgegriffen werden, die vom Zentrum für angewandte Energieforschung ZAE Bayern experimentell bestimmt wurden und die auch in den Richtlinienentwurf des Fachverbands Transparente Wärmedämmung e.V. vom März 1999 "Bestimmung des solaren Energiegewinns durch Massivwände mit Transparenter Wärmedämmung" eingegangen sind.

6.2 Modellansatz

Ausgehend von der gegebenen Zeitreihe des Wärmebedarfs vor Dämmung $Q(t)$ berechnet das Programm die Zeitreihe des durch die Dämmung reduzierten Wärmebedarfs $Q^R(t)$,

$$Q^R(t) = Q(t) - \Delta Q^R(t). \quad (6.1)$$

Dabei bezeichnet $\Delta Q^R(t)$ die Reduzierung des (stündlichen) Wärmebedarfs durch die Dämmmaßnahme.

Es wird angenommen, dass durch die Dämmung bedingte Änderungen der Wärmekapazitäten der Gebäude vernachlässigbar sind und dass die Auswirkungen der Dämmmaßnahmen im wesentlichen durch sich ändernde Wärmedurchgangskoeffizienten (U) beschrieben werden können. Im Falle von Dämmmaßnahmen mit transparenten Bauteilen sind auch die Änderungen der solaren Energiedurchlassgrade g zu berücksichtigen. Infolge der Dämmmaßnahmen ergibt sich die (stündliche) Reduzierung des Wärmebedarfs $\Delta Q^R(t)$ infolge sich ändernder U - und g -Werte damit im allgemeinen zu

$$\Delta Q^R(t) = (\vartheta_i - \vartheta_a(t)) \cdot \sum_j r_j A_j \Delta U_j - \sum_j z_j \Delta g_j(t) \sum_d I_{d,j}(t) A_{d,j}, \quad (6.2)$$

mit $\Delta U = U_{alt} - U_{neu}$ und $\Delta g = g_{alt} - g_{neu}$.

Der erste Term in Gl. (6.2) berücksichtigt die Änderung der Wärmeverluste (Wärmefluss von innen nach außen) und der zweite Term berücksichtigt die Änderung der solaren Gewinne (Strahlungsfluss von außen nach innen). Vorteilhaft an der hier gewählten Form (Gl. 6.1 und Gl. 6.2) der Modellierung ist, dass nur für Bauteile, die energetisch verbessert werden, Angaben über den wärmetechnischen Istzustand gemacht werden müssen. Die Wärmeverluste und solaren Gewinne der anderen Bauteile ändern sich nicht. Ihr Beitrag zur Energiebilanz des Gebäudes kann deshalb durch Verwendung des empirisch bestimmten Wärmebedarfs im Istzustand erfaßt werden.

In Gl. (6.2) steht ϑ_i für die (als zeitkonstant angenommene) Innentemperatur und $\vartheta_a(t)$ für die Zeitreihe der Außentemperaturen. Der Index j läuft über die Teile der Gebäudehülle, für die Dämmmaßnahmen definiert werden (Abschnitt 6.4). Als zu dämmende Teile der Gebäudehülle können Fassadenflächen, Fensterflächen sowie Boden- und Dachflächen abgebildet werden. A_j bezeichnet die zugehörigen Flächen. Die r_j sind "Reduktionsfaktoren" wie in der Wärmeschutzverordnung, über die sich z.B. die Wärmedämmung ungeheizter Dachböden berücksichtigen lässt (für Hüllflächen, die den beheizten Raum gegenüber dem Dachboden oder dem Keller abgrenzen, wird i.d.R. $r=0,8$ gesetzt, ansonsten $r=1,0$). Die z_j im zweiten Term sind Reduktionsfaktoren zur Berücksichtigung von Verschattungen, z.B. infolge von umgebender Bebauung oder auch bedingt durch Befestigungsstrukturen bei TWD oder SWD. Im Falle von Dämmmaßnahmen mit transparenten Bauteilen (TWD, SWD oder Fensteraustausch) wird den entsprechenden Flächen (durch Angabe zweier Winkel, s. Abschnitt 6.4) eine Orientierung und Neigung zugeordnet, was in Gl. (6.2) durch den Richtungsindex d angedeutet ist. $I_{d,j}(t)$ steht für die Zeitreihe der solaren Einstrahlung, deren Standort- und Orientierungsabhängigkeit vom Modell, ausgehend von der vorzugebenden Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche, errechnet wird.³ Die dämmungsbedingten Änderungen der Wärmedurchgangskoeffizienten ΔU_j und solaren Energiedurchlassgrade Δg_j sind natürlich von der jeweiligen Dämmmaßnahme abhängig (für eine konventionelle Fassadendämmung ist der g -Term Null); ihre Modellierung wird nachfolgend für i) konventionelle Dämmung, ii) TWD, iii) SWD sowie iv) Fensteraustausch erläutert.

³Einzelheiten hierzu finden sich in [Duf80].

6.3 Modelle der einzelnen Dämmtechniken

6.3.1 Konventionelle Wärmedämmung

Der Wärmedurchgangskoeffizient nach Dämmung (U_{neu}) berechnet sich hier aus der einfachen ‘‘Serienschaltung’’ der entsprechenden Koeffizienten vor Dämmung (U_{alt}) und der aufzubringenden Dämmung (U_{add}). Der Eintrag von Solarenergie durch Massivwände ohne transparente Bauteile ist vernachlässigbar.

$$U_{neu} = \frac{U_{alt}U_{add}}{U_{alt} + U_{add}}, \quad (6.3)$$

$$g_{neu} = 0. \quad (6.4)$$

U_{alt} und U_{add} sind vom Modellanwender als Parameter vorzugeben (Abschnitt 6.4).

6.3.2 Transparente Wärmedämmung (TWD)

Im Falle von TWD ergibt sich der resultierende U -Wert analog aus den Werten der zu dämmenden Fläche (U_{alt}) und des transparenten Bauteils (U_t).

Der effektive solare Energiedurchlassgrad (g_{neu}) ist darüber hinaus abhängig vom Absorptionskoeffizienten der zu dämmenden Fläche (α) und dem g -Wert des transparenten Bauteils (g).

$$U_{neu} = \frac{U_t U_{alt}}{U_t + U_{alt}}, \quad (6.5)$$

$$g_{neu} = \frac{U_{alt}}{U_t + U_{alt}} \cdot \alpha \cdot g. \quad (6.6)$$

U_{alt} , U_t , α und g sind vom Modellanwender als Parameter vorzugeben.

6.3.3 Transparente Schaltbare Wärmedämmung (SWD)

Die Berücksichtigung des in seiner Wärmeleitfähigkeit variierbaren Paneels (mit entsprechend veränderlichem Wärmedurchgangskoeffizient U_p) zwischen transparenter Dämmung und Fassade führt für den Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten und den solaren Energiedurchlassgrad der SWD auf

$$U_{neu} = \frac{U_t U_p U_{alt}}{U_t U_p + U_t U_{alt} + U_p U_{alt}} \quad \text{und} \quad (6.7)$$

$$g_{neu} = \frac{U_t U_p U_{alt}}{U_t U_p + U_t U_{alt} + U_p U_{alt}} \cdot \alpha \cdot g. \quad (6.8)$$

U_{alt} , U_t , α und g sind vom Modellanwender als Parameter vorzugeben. Für U_p sind zwei Werte, für den leitenden und den nichtleitenden Zustand, vorzugeben (Abschnitt 6.4).⁴

⁴Die Gln. (6.7) und (6.8) stellen einen vereinfachten Ansatz der SWD-Modellierung dar, der von den

6.3.4 Fensteraustausch

Wärmedurchgangskoeffizient und solarer Energiedurchlassgrad des neuen Fensters werden mit U_t bzw. g bezeichnet.

$$U_{neu} = U_t, \quad (6.9)$$

$$g_{neu} = g. \quad (6.10)$$

6.4 Programmaufruf, benötigte Daten und Parameter

6.4.1 Programmaufruf

Das Programm wird aus der Befehlszeile mit dem Kommando `daemmung daemmszenarioname` aufgerufen.

Der *daemmszenarioname* kann vom Modellanwender gewählt werden. Das Programm geht dann davon aus, dass ein Eingabedaten-File namens *daemmszenarioname.def* existiert (Abschnitt 6.4.2.2) und es schreibt die Ergebnisse dann in die Ausgabedaten-Files *daemmszenarioname.pit* und *daemmszenarioname.bil* (Abschnitt 6.5).

Es ist empfehlenswert, die Verzeichnisstruktur der CD

```
/deecodaemm/input/
/deecodaemm/program/
/deecodaemm/output/
```

samt der darin enthaltenen Dateien zu kopieren. Das Programm 'daemmung' befindet sich im Verzeichnis `/deecodaemm/program/` und sollte aus diesem heraus aufgerufen werden.⁵

Im weiteren werden die vom Modellanwender bereitzustellenden Eingabedaten des Programms behandelt. Es empfiehlt sich, die entsprechenden Dateien im Verzeichnis `/deecodaemm/input/` abzulegen.⁶

6.4.2 Eingabedaten

Eingabedaten sind i) die Zeitreihen der Wetterdaten und Energienachfrage, ii) geografische und sonstige Parameter sowie iii) die Wärmedämmung charakterisierende Parameter.

tatsächlichen und zeitweise wichtigen Nichtgleichgewichtsprozessen des Aufheizens und der Abkühlung abstrahiert. Da die Modellparameter jedoch so eingestellt werden konnten, dass am ZAE gemessene Energieeinsparungen durch SWD gut reproduziert werden, wurde von einer detaillierteren und wesentlich aufwändigeren Modellierung abgesehen.

⁵Bei Verwendung anderer Pfadnamen sind die entsprechenden Bezeichnungen in 'daemmung.C' zu ändern und das Programm mit dem Befehl 'g++ daemmung.C -lm -o daemmung' neu zu kompilieren.

⁶Zur Verwendung anderer Pfad- und Dateinamen, s. Fußnote 5

6.4.2.1 Zeitreihendaten

Die folgenden Größen müssen in Form von Zeitreihen vorliegen:

- Ausgangswärmebedarf [kW] (Stundenmittel kWh/h)
- Ausgangselektrizitätsbedarf⁷ [kW] (Stundenmittel kWh/h)
- Außentemperaturen [m°C] (Milli-Grad)
- Solare Einstrahlung⁸ [W/m²]

Die Zeitreihen müssen einen Eintrag (Zahlenwert) pro Zeile enthalten, gleich lang sein und im Verzeichnis `deecodaemm/input/` unter den Dateinamen 'H_kW', 'EL_kW', 'T_mC' und 'L_Wpersqm' abgelegt sein.⁹ Die Länge der Zeitreihen, z.B. '8760' (Stunden eines Jahres), ist als Parameter in der Definitionsdatei '`daemmszenarioname.def`' anzugeben, s. die nachfolgende Tabelle.

6.4.2.2 Geografische und sonstige Parameter

Die geografischen Parameter werden benötigt, um ausgehend von der solaren Globalstrahlung die standortabhängige Einstrahlung auf eine beliebig orientierte Fläche im Zeitgang zu berechnen.

Parameter	Bedeutung [Einheit]	Anmerkungen
φ	Geografische Breite [Grad nördlich Äquator]	(Würzburg: +49)
L_{loc}	Geografische Länge [Grad östlich Greenwich]	(Würzburg: +10)
$L_{standard}$	Zeitzone [Grad östlich Greenwich]	(Würzburg: +15)
A	Höhe über Meeresspiegel [km]	
T_i	Innentemperatur [°C]	(zeitkonstant angenommen)
$T_{i,Nacht}$	Innentemperatur bei Nachtabsenkung [°C]	(zeitkonstant angenommen)
T_{Grenz}	Heizgrenztemperatur [°C]	(zeitkonstant angenommen)
Q_{ww}	Warmwasserbedarf [kW]	(zeitkonstant angenommen, von der Dämmung unbeeinflusst)
t_{lange}	Zeitreihenlänge [1]	z.B. 8760 (Stunden eines Jahres)

Diese Parameter sind im Verzeichnis '`deecodaemm/input/`' in der Datei '`daemmszenarioname.def`' im folgenden Format abzulegen:¹⁰

Phi, Altitude, Lst , Lloc, T_i, T_i_n, T_HeizGrenz, Q_ww
 49.5 , 0.3 , 15 , 9.6 , 20 , 19 , 15 , 22.6e3 , 8760

⁷Der Elektrizitätsbedarf wird nur bei Verwendung von SWD verändert, da die Aufrechterhaltung des (wärme-) leitenden Zustands der SWD-Paneele einen elektrischen Leistungsbedarf (von 5 W/m²) erfordert.

⁸Globalstrahlung auf horizontale Fläche

⁹Beispieldateien befinden sich auf der Programm-CD im genannten Verzeichnis. Zur Verwendung anderer Datei-/ Verzeichnisnamen, s. Fußnote 5.

¹⁰Zu den Eingabeformaten siehe auch die Datei `bsp.def` auf der Programm-CD im genannten Verzeichnis.

6.4.2.3 Die Dämmung charakterisierende Parameter

Neben den obigen Parametern sind die Parameter zur Charakterisierung der Dämmung festzulegen. Dies erfolgt ebenfalls in der Datei ‘*daemmszenarioname.def*’.

Für jede vom Modellanwender zu definierende Dämmmaßnahme sind der Ausgangszustand des zu dämmenden Teils der Gebäudehülle und die Dämmmaßnahme zu definieren. Die für konventionelle Dämmung, TWD, SWD oder Fensteraustausch festzusetzenden Parameter enthält nachfolgende Tabelle.

Parameter	Bedeutung [Einheit]	Anmerkungen
Kennung Key	Kürzel für Dämmmaßnahme K: Konv. Dämmung, T: TWD, S: SWD, F: Fensteraustausch, 0: keine Maßnahme	(z.B. FensW für Westfenster)
U_{alt}	Wärmedurchgangskoeffizient vor Dämmung [$W/(m^2K)$]	
g_{alt}	Solarer Energiedurchlassgrad [1]	nur bei transp. Teilen, sonst Null
r	Reduktionsfaktor orientiert an WSchV [1]	i.d.R. für Keller u. Dach 0,8, sonst 1,0
A	Fläche [m^2]	
β	Neigung gegen Horizontale [Grad]	nur bei transparenten Bauteilen relevant; vertikales Fenster: +90
γ	Ausrichtung [Grad]	z.B. S: 0, O: -90, N/W: +135
f	Anteil der solar aktiven Fläche [1]	(=1-Fensterrahmenanteil)
v	Solare Verluste durch Verschattung [1]	typischer Wert: 0,9
ν	Solarer Nutzungsgrad [1]	TWD u. SWD: 0,9 (Absorption durch Wand); durch Fenster: 0,85
U_{add}	Wärmedurchgangskoeffizient [$W/(m^2K)$]	nur bei konv. Dämmung
g	Solarer Energiedurchlassgrad des transp. dämmenden Bauteils	nur bei TWD, SWD, Fensteraustausch, sonst: 0
U_t	Wärmedurchgangskoeffizient des transparent dämmenden Bauteils [$W/(m^2K)$]	nur bei TWD, SWD, Fensteraustausch, sonst 0
$U_{p,1}$	Wärmedurchgangskoeffizient des SWD-Paneels im leitenden Zustand [$W/(m^2K)$]	typischer Wert: 2,0; nur bei SWD
$U_{p,0}$	Wärmedurchgangskoeff. des SWD- Paneels nichtleitend [$W/(m^2K)$]	typischer Wert: 0,2; nur bei SWD
I_C	Schaltkriterium für SWD-Paneel [W/m^2]	sinnvoller Wert: 100; nur bei SWD

In der Definitionsdatei (‘*/deecodaemm/input/daemmszenarioname.def*’) können beliebig viele Teile der Gebäudehülle und zugehörige Dämmmaßnahmen definiert werden. Der Modellanwender ist dafür verantwortlich, dass die von ihm definierten Teile der Gebäudehülle und Dämmmaßnahmen zu der (durch die Dämmung zu reduzierenden) Ausgangswärmebedarfszeitreihe “passen”.

Exemplarische Auszüge der Definitionsdatei sehen wie folgt aus:¹¹

Bsp. "Fensteraustausch Westseite" (Key=F, gamma=+90):

```
Kennung , U_alt , r , A , g_alt , beta , gamma , f , v , n
FensW , 3.5 , 1.0 , 80 , 0.8 , 90 , +90 , 0.7 , 0.9 , 0.85
Kennung , Key , U_add , g , U_t , U_p_an , U_p_aus , I_c
FensW , F , 0 , 0.6 , 0.75 , 0 , 0 , 0
```

Bsp. "SWD an Südfassade" (Key=S, gamma=0):

```
Kennung , U_alt , r , A , g_alt , beta , gamma , f , v , n
FassS , 1.25 , 1.0 , 92.4 , 0 , 90 , 0 , 0.7 , 0.9 , 0.9
Kennung , Key , U_add , g , U_t , U_p_an , U_p_aus , I_c
FassS , S , 0 , 0.7 , 3.0 , 2.0 , 0.2 , 100.0
```

Bsp. "Konventionelle Fassadendämmung" (Key=K; beta, gamma, f, v und n sind nicht relevant):

```
Kennung , U_alt , r , A , g_alt , beta , gamma , f , v , n
FassN , 1.25 , 1.0 , 281 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0
Kennung , Key , U_add , g , U_t , U_p_an , U_p_aus , I_c
FassN , K , 0.2 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0
```

6.5 Ausgabedateien

6.5.1 Verbleibender Energiebedarf (.pit-file)

Die Zeitreihen des nach Dämmung verbleibenden Wärmebedarfs und des Gesamtelektrizitätsbedarfs¹² werden in die Datei *daemmszenarioname.pit* geschrieben (Verzeichnis /deecodaemm/output)

Diese Datei im .pit-Format kann dann der Optimierung der Wärme- und Strombereitstellung durch *deeco* zugrunde gelegt werden.

Bsp. für Zeitreihenformat des Elektrizitäts- und Wärmebedarfs im .pit-file:

```
0 , EIB , DotEEL0 , 72000
0 , WB , DotEH_0 , 243865
1 , EIB , DotEEL0 , 58000
1 , WB , DotEH_0 , 219865
2 , EIB , DotEEL0 , 49000
2 , WB , DotEH_0 , 219865
3 , EIB , DotEEL0 , 43000
3 , WB , DotEH_0 , 225465
4 , EIB , DotEEL0 , 43000
4 , WB , DotEH_0 , 231065
```

¹¹Zu den Formaten, siehe auch die Datei 'bsp.def' im Verzeichnis deecodaemm/input/ auf der Programm-CD.

¹²Dieser weicht nur im Falle von SWD-Einsatz vom Ausgangselektrizitätsbedarf ab, vgl. Fußnote 7.

6.5.2 Energieeinsparungen durch Dämmmaßnahmen (.bil-file)

Die Datei *daemmszenarioname.bil* listet für jede wärmedämmende Maßnahme die durch sie bewirkte Wärmebedarfsreduzierung (absolut (in kWh/a) und spezifisch (in kWh/(m²a))).

Beispiel (konv. Fassadendämmung Nord und Ost, SWD Süd und Fensteraustausch):

FassN, K, A=281, Bil.[kWh/a]:25395.4, 90.3751[kWh/(m²*a)]

FassO, K, A=332, Bil.[kWh/a]:30004.5, 90.3751[kWh/(m²*a)]

FassS, S, A=92.4, Bil.[kWh/a]:13929.6, 150.753[kWh/(m²*a)]

FensN, F, A=19, Bil.[kWh/a]:4068.16, 214.114[kWh/(m²*a)]

FensO, F, A=95, Bil.[kWh/a]:18951.3, 199.487[kWh/(m²*a)]

FensW, F, A=80, Bil.[kWh/a]:15482.9, 193.536[kWh/(m²*a)]

FensS, F, A=14, Bil.[kWh/a]:2473.69, 176.692[kWh/(m²*a)]

Hinweise zur Berechnung der Kosten

7.1 Bestimmung spezifischer Kostendaten

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 werden folgende Kostenarten unterschieden:

- Kapitalgebundene Kosten → Kapitalkosten, Instandsetzungskosten
- Verbrauchsgebundene Kosten → Brennstoff- bzw. Energiekosten
- Betriebsgebundene Kosten → Wartungskosten

Die verschiedenen Kostenanteile werden in *deeco* analog zu [Gro92] wie folgt aufgeteilt:

Gesamtkosten $\dot{C} = \dot{C}^{fix} + \dot{C}^{var}$.

Die variablen Kosten \dot{C}^{var} enthalten dabei diejenigen Kostenarten, deren Höhe sich bei variabler Auslastung der Energieversorgungstechniken ändert (verbrauchsgebundene Kosten). Unter den fixen Kosten \dot{C}^{fix} werden in *deeco* die unter Berücksichtigung des Zeitwertes des Geldes bestimmten nivellierten Werte der kapital- und betriebsgebundenen Kosten verstanden.

Im einfachsten Fall lassen sich die jährlichen fixen Kosten unter Berücksichtigung der Genauigkeitsanforderungen von *deeco*¹ wie folgt berechnen:

$$\dot{C}^{fix} = I \cdot a + I \cdot m. \quad (7.1)$$

Dabei ist a der Kapitalwiedergewinnungsfaktor (Annuitätenfaktor). m gibt (in % pro Jahr) die nivellierten Werte der Wartungs- und Instandhaltungskosten bezogen auf die Anfangsinvestition wieder.

Achtung: Vor der Eingabe der so berechneten Werte muß zur Herstellung einer Kompatibilität mit den variablen Kostendaten eine Umrechnung der jährlichen Werte auf Kosten pro Sekunde durchgeführt werden.

¹*deeco* untersucht primär das Zusammenwirken vieler Anlagen. Die Genauigkeitsanforderungen liegen deshalb unter denen, die bei der detaillierten Untersuchung einer einzelnen Anlage zugrundegelegt werden sollten.

Der Annuitätenfaktor ergibt sich aus (siehe z.B. [Kug90]):

$$a = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$$

Dabei ist i der Kalkulations- bzw. Diskontierungszinssatz und n die Lebensdauer der Anlage.

Bei der Berechnungen von Kostendaten ist folgendes zu beachten:

- Die Inflationsrate kann im Zinssatz so berücksichtigt, daß angenähert $i = \text{Realzins} = \text{Zinssatz} - \text{Inflationsrate}$ gesetzt wird [Win91].
- Energiepreissteigerungen, die über die Inflationsrate hinausgehen, bleiben unberücksichtigt.
- Restwerte am Ende der Lebensdauer der Anlage werden vernachlässigt bzw. abdiskontiert bei der Ermittlung der Investitionssumme berücksichtigt.
- Zur Berechnung der nivellierten Werte muß für alle Techniken ein übereinstimmender Diskontierungszinssatz verwendet werden.
- Alle Investitionskosten müssen auf ein gemeinsames Basisjahr (z.B. das in [Bru96] verwendete Basisjahr 1993) umgerechnet werden, falls diese primär für andere Basisjahre angegeben sind (vgl. [Sta94]).

7.2 Eingabe spezifischer Kostendaten

Programmtechnisch werden die Daten der spezifischen (verallgemeinerten) fixen Kosten im .piv-File abgelegt und durch sFix (ergänzt durch die entsprechende Kostenkomponente M, E, SO₂, etc.) gekennzeichnet.

Beispiele:

sFixM = spezifische monetäre Kosten
sFixE = spezifische fixe energetische Kosten (graue Energie)
sFixSO₂ = spezifische fixe SO₂ Emissionen

Während bei den monetären Kosten eine Diskontierung erfolgt, wird bei den anderen Kostenarten darauf verzichtet. Als Bezugsgröße zur Ermittlung der spezifischen Kosten dient i. allg. die Maximalleistung des betrachteten Prozesses. sFix muß sich jedoch nicht immer auf die Maximalleistung beziehen. Gerade bei Kollektor- und Speicherprozessen ist die Verwendung von nichtenergetischen Bezugsgrößen (z.B. Kollektorfläche oder Speichervolumen) sinnvoller. Im folgenden wird deshalb für jedes Modul angegeben, auf welche Größen sich die spezifischen (verallgemeinerten) fixen Kosten beziehen.

Die variablen, d.h. verbrauchsgebundenen Kosten sind modulspezifisch definiert. Sie werden in Kap. 5 ausführlich besprochen, so daß hier auf eine weitergehende Diskussion verzichtet werden kann.

<u>Prozeßmodul</u>	<u>Bezugsgröße zur Berechnung spezifischer Werte der fixen Kosten</u>
	Energiestromnummer (=0 falls nicht angegeben!)
DConstEl	$\dot{E}_{El,En}$
DConstMech	$\dot{E}_{Mech,En}$
DConstH	$\dot{E}_{H,En}$
DConstQ	$\dot{E}_{H,En}$
DConstWH	$\dot{E}_{H,Ex}$
DConstWQ	$\dot{E}_{H,Ex}$
DFlucEl	$\dot{E}_{El,En}$
DFlucMech	$\dot{E}_{Mech,En}$
DFlucH	$\dot{E}_{H,En}$
DFlucQ	$\dot{E}_{H,En}$
DFlucWH	$\dot{E}_{H,Ex}$
DFlucWQ	$\dot{E}_{H,Ex}$
DRoom	$\dot{E}_{H,En}$
CBoiConst	$\dot{E}_{H,Ex}$
CBoiConv	$\dot{E}_{H,Ex}$
CBoiCond	$\dot{E}_{H,Ex}$
CGHP	$\dot{E}_{H,Ex}$
CEHP	$\dot{E}_{H,En}$
CBPT	$\dot{E}_{El,Ex}$
CECT	$\dot{E}_{El,Ex}$
CCogConst	$\dot{E}_{El,Ex}$
NBW	$\dot{E}_{H,Ex}$
NBWConst	$\dot{E}_{H,Ex}$
NBWConv	$\dot{E}_{H,Ex}$
NBWCond	$\dot{E}_{H,Ex}$
NHEx	$\dot{E}_{H,Ex}$
NHTrans	$\dot{E}_{H,Ex}$
NQTrans	$\dot{E}_{H,Ex}$
NEHP	$\dot{E}_{H,Ex}$
NGHP	$\dot{E}_{H,Ex}$
PConstElImp	$\dot{E}_{El,Ex}$
PConstElExp	$\dot{E}_{El,En}$
PConstFuelImp	$\dot{E}_{Fuel,Ex}$
PFlucElImp	$\dot{E}_{El,Ex}$
PFlucElExp	$\dot{E}_{El,En}$
PFlucFuelImp	$\dot{E}_{Fuel,Ex}$
OSol	A_c (Kollektorfläche)
SSenH	V_s (Speichervolumen)
SSupEl	$E_{s,max}$ (max Speicherenergieinhalt)

Teil III

Ausgabedaten

Interpretation der Ausgabedateien

Die in den Ausgabefiles angegebenen Mittelwerte der Nebenbedingungs- und Zielfunktionskoeffizienten geben die auslastungsabhängigen Mittelwerte (z.B. mittlere Wirkungsgrade) an. Will man auslastungsunabhängige Mittelwerte, so muß man durch eine geeignete Szenariendefinition Bedingungen herstellen, die zu einer Norm-Auslastung führen.

Die mit Hilfe von *deeco* bestimmbaren Schattenpreise geben an, um wieviel der Optimalwert der Zielfunktion zunimmt, wenn eine „ \geq “ Nebenbedingungs-RHS („Rechte Seite“) um eine Einheit erhöht bzw. eine „ \leq “ Nebenbedingungs-RHS um eine Einheit erniedrigt wird. Mittlere Schattenpreise lassen sich deshalb nur dann sinnvoll interpretieren, wenn die Nebenbedingung im ganzen Zeitraum immer eine „ \geq “ bzw. „ \leq “ Bedingung ist. Inwieweit eine Nebenbedingung diese Bedingung erfüllt, läßt sich aus der Modulbeschreibung erkennen (Kap. 5).

Die in den Ausgabedateien angegebenen Abkürzungen sind wie folgt zu interpretieren, wobei Alternativen jeweils durch „/“ angedeutet sind („En/Ex“ zeigt somit an, daß die Bezeichnung sowohl für ein- als auch für austretende Energieströme verwendet werden kann).

„outputId“ (Kennwort)	Bedeutung [Einheit]
Im .sov-File	(d.h. auf das gesamte Szenario bezogen)
Goal	Mittelwert der (linear gewichteten) Zielfunktion [J/s]
SumDotEEen[energyFlowType]	Mittelwert der Summe der eintretenden Energieströme <u>aller</u> im EVS auftretenden Prozesse (nicht nur die der Bedarfsprozesse, sondern z.B. auch die der Vernetzungsprozesse, die ja einen Großteil wieder abgeben) [J/s]
SumDotEEx[energyFlowType]	Mittelwert der Summe der austretenden Energieströme <u>aller</u> Prozesse [J/s]
FixE, FixM, FixSO ₂ ,...	Fixe Kosten (Mittelwert) [$\frac{J}{s}$], [$\frac{DM}{s}$], [$\frac{kg}{s}$],...
VarE, VarM, VarSO ₂ ,...	Variable Kosten (Mittelwert) [$\frac{J}{s}$], [$\frac{DM}{s}$], [$\frac{kg}{s}$],...
E, M, SO ₂ ,...	Mittelwert der Gesamtkosten („Fix + Var“) [$\frac{J}{s}$], [$\frac{DM}{s}$], [$\frac{kg}{s}$],...
T	Mittelwert der Außentemperatur [K]
I	Mittelwert der solaren Einstrahlung [$\frac{W}{m^2}$]
W	Mittelwert der Windgeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]
(h	Mittelwert der Tageszeit [h])
(d	Mittelwert der Wochenzeit [d])
(s	Mittelwert der Jahreszeit [a])

„outputId“	Bedeutung [Einheit]
Im .aov-File	(d.h. auf die verschiedenen Aggregate bezogen)
Slack	Mittelwert der Schlupfvariablen [J/s]
Power	Mittelwert der Leistung (des Aggregates) [J/s]
SPrice	Mittelwert des Schattenpreises [1]
Im .pov bzw. .pot -File	(d.h. auf die verschiedenen Prozesse bezogen)
E_s[i]	i-te Komponente der Mittelwerte der Zustandsgrößen [Einheit ist modulabhängig]
E_sF[i]	i-te Komponente des Endwertes der Zustandsgrößen [Einheit ist modulabhängig]
RelDotE[En][energyFlowType] [energyFlowNumber]	Anteil des entsprechenden Energiestroms am Durchfluß durch die daran geknüpfte Bilanz [1]
RelDotE[Ex][energyFlowType] [energyFlowNumber]	analog [1]
DotE[En][energyFlowType] [energyFlowNumber]	Mittelwert des entsprechenden Energiestroms [J/s]
DotE[Ex][energyFlowType] [energyFlowNumber]	analog [J/s]
DotE_0[constraintNumber]	Mittelwert der entsprechenden Nebenbedingungs-Rhs [J/s]
Slack[constraintNumber]	Mittelwert der entsprechenden Schlupfvariablen [J/s]
SPrice[constraintNumber]	Mittelwert des entsprechenden Schattenpreises [1]

„outputId“	Bedeutung [Einheit]
Im .pov bzw. .pot -File	(d.h. auf die verschiedenen Prozesse bezogen)
CCoef[constraintNumber] [En/Ex] [energyFlowType] [energyFlowNumber]	Mittelwert des entsprechenden Nebenbedingungskoeffizienten („Constaint Coefficient“) [1]
OCoef[generalCostComp] [En/Ex] [energyFlowType] [energyFlowNumber]	Mittelwert des entsprechenden Zielfunktionskoeffizienten („Objective Function Coefficient“) [$\frac{DM}{s}(\frac{J}{s})^{-1}$], [$\frac{kg}{s}(\frac{J}{s})^{-1}$], [$\frac{J}{s}(\frac{J}{s})^{-1}$]
VecJ [energyFlowNumber] [En/Ex] [In/Out] [F/R] [T/P/x ...]	Mittelwert des entsprechenden Attributes [Einheit ist modulabhängig] Beispiel: VecJ[1][En][In][F][T] ist die Vorlauftemperatur (<u>F</u> = Flow), die dem ersten Nettoenthalpiestrom zugeordnet ist, der in den Prozeß eintritt (<u>En</u>). ([In] bzw. [Out] besitzen nur eine programminterne Bedeutung.)

Weitere Hinweise zur Bedeutung der Ausgabedaten

9.1 Allgemeine Hinweise zur Mittelwertberechnung

Die angegebenen Mittelwerte berechnen sich unter Berücksichtigung der entsprechenden zeitabhängigen Werte, die in den verschiedenen Zeitintervallen aufgetreten sind. Dabei handelt es sich jedoch i.allg. nicht um eine einfache Summation (inkl. Division durch die Anzahl der Zeitintervalle), da die Zeitintervalle unterschiedlich lang sein können, was in der Regel eine Gewichtung der zeitabhängigen Werte mit der tatsächlichen Länge der jeweiligen Optimierungszeitintervalle¹ erforderlich macht (im folgenden als algebraische Mittelwertbildung bezeichnet). Bei spezifischen Größen ist aber selbst dies nicht immer ausreichend. So ist z.B. ein mittlerer Wirkungsgrad nicht als algebraischer Mittelwert der zeitabhängigen Wirkungsgrade, sondern als Quotient der mittleren ein- und austretenden Energieflüsse zu verstehen, d.h. bei der Bestimmung der mittleren Wirkungsgrade erfolgt darüber hinaus eine Gewichtung durch die in den jeweiligen Zeitintervallen aufgetretenen Energieflüsse.

Im folgenden werden die in diesem Zusammenhang interessierenden Fälle kurz diskutiert. Im Abschnitt 9.2 wird dann angegeben, welche Methode zur Mittelwertberechnung den einzelnen Mittelwerten in den Ausgabedateien zugrundeliegt.

□

Einfachster Fall: $\langle X \rangle = \frac{\int_0^T x(t) dt}{\int_0^T dt}$, d.h. gesucht ist tatsächlich der algebraische Mittelwert der entsprechenden Größe.

Beispiel: Ein- bzw. austretende Energieströme.

¹Durch eine vom Optimierungsalgorithmus eingesetzte optimale Schrittweitensteuerung kann die Länge der Optimierungszeitintervalle erheblich unter der Länge der Zeitintervalle liegen, die der zeitlichen Auflösung der Eingabedaten (i.allg. Einstundenmittelwerte) zugrundeliegen. Aus diesem Grund stellen die im selben Zeitraster ausgegebenen Werte in den .sot und .pot-Files in vielen Fällen bereits Mittelwerte über mehrere Optimierungszeitintervalle dar.

2

Modifizierter Mittelwert: Bei Koeffizienten interessiert i. allg. nicht der algebraische Mittelwert, sondern der Koeffizient, der in die zu untersuchende Gleichung eingeht und zusammen mit bereits berechneten Mittelwerten für die weiteren relevanten Variablen eine zur ursprünglichen Gleichung formal analoge Gleichung erfüllt:

Beispiel:

Transiente Form der zu untersuchenden Gleichung:

$$a_1(t)x_1(t) + a_2(t)x_2(t) + a_3(t)x_3(t) = c(t)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \int_0^T [a_1(t)x_1(t) + a_2(t)x_2(t) + a_3(t)x_3(t)] dt &= \int_0^T c(t) dt \\ \Rightarrow \frac{\int_0^T a_1(t)x_1(t) dt}{\int_0^T dt} + \frac{\int_0^T a_2(t)x_2(t) dt}{\int_0^T dt} + \frac{\int_0^T a_3(t)x_3(t) dt}{\int_0^T dt} &= \frac{\int_0^T c(t) dt}{\int_0^T dt} \end{aligned}$$

Die modifizierten Mittelwerte \tilde{a}_i der Größen a_i sollen nun so bestimmt werden, daß folgende Gleichung erfüllt ist:

$$\tilde{a}_1 \langle x_1 \rangle + \tilde{a}_2 \langle x_2 \rangle + \tilde{a}_3 \langle x_3 \rangle = \langle c \rangle \quad (9.1)$$

wobei die spitzen Klammer nach Fall 1 bestimmte Mittelwerte kennzeichnen.

Somit gilt:

$$\tilde{a}_1 = \frac{\int_0^T a_1 x_1(t) dt}{\int_0^T x_1(t) dt}, \quad \tilde{a}_2 = \frac{\int_0^T a_2 x_2(t) dt}{\int_0^T x_2(t) dt}, \quad \tilde{a}_3 = \frac{\int_0^T a_3 x_3(t) dt}{\int_0^T x_3(t) dt} .$$

3

Mittelwert der Zielfunktionskomponente:

$$Z_i = \sum_l a_{li} x_l \quad (9.2)$$

Dabei durchläuft l alle Energieströme x , a_{li} sind die Zielfunktionskoeffizienten und Z_i stellt die i -te Komponente der Zielfunktion dar.

$$\Rightarrow \langle Z_i \rangle = \frac{\int_0^T z_i(t) dt}{\int_0^T dt} = \frac{\int_0^T \left(\sum_l a_{li} x_l \right) dt}{\int_0^T dt} = \frac{\sum_l \int_0^T a_{li}(t) x_l(t) dt}{\int_0^T dt}.$$

4

Mittelwert der Schattenpreise bei zeitabhängigen Nebenbedingungen:

Gewünschte Aussagekraft:

Der „mittlere“ Schattenpreis gibt an, um wieviel sich die Zielfunktion im Mittel erhöht, wenn der Mittelwert der rechten Seite (Rhs) der entsprechenden NB um 1 erhöht (bzw. erniedrigt) wird.

Sei b_i die Rhs der NB, y_i die dazugehörige duale Variable und DZ die duale Zielfunktion = $\sum_i y_i b_i$. Dann gilt:

$$\langle b_i \rangle + 1 = \frac{1}{T} \int_0^T b_i(t) dt + 1 = \frac{1}{T} \int_0^T b_i(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T 1 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (b_i(t) + 1) dt.$$

Im Optimalpunkt (gekennzeichnet durch einen Stern) gilt weiter:

y_i^* = Schattenpreis der i-ten NB sowie Z^* (= Optimalwert der Zielfunktion) = DZ^* , d.h.

$$DZ^* = \sum_i y_i^* b_i = Z^*.$$

Die durch die oben angesprochene Veränderung der NB verursachte Veränderung des Mittelwertes der Zielfunktion berechnet sich somit wie folgt:

$$\begin{aligned} \langle Z^* + \Delta Z \rangle &= \frac{\int_0^T \left\{ \sum_i y_i^* (b_i + 1) \right\} dt}{\int_0^T dt} = \sum_i \frac{\int_0^T \{ y_i^* (b_i(t) + 1) \} dt}{\int_0^T dt} = \\ &= \sum_i \frac{\int_0^T y_i^* (t) b_i(t) dt}{\int_0^T dt} + \sum_i \frac{\int_0^T y_i^* (t) 1 dt}{\int_0^T dt} = \langle Z^* \rangle + \sum_i \frac{\int_0^T y_i^* (t) dt}{\int_0^T dt} = \langle Z^* \rangle + \langle y_i^* \rangle \end{aligned}$$

Die Schattenpreise spielen somit als Optimalwerte der dualen Variablen eine analoge Rolle, wie die Optimalwerte der Energieströme (= primäre Variablen).

9.2 Konkrete Berechnung der Mittelwerte über den Optimierungszeitraum

Im folgenden wird für die verschiedenen Ausgabegrößentypen angegeben, welches Verfahren zur Mittelwertbildung herangezogen wurde.

- VecJ 1
- E_s 1
- Slack 1
- DotE_0 1
- SPrice 4
- DotE 1
- CCoef 2
- OCoef 2
- Mittelwert der Schlupfvariablen der Prozeßaggregate:
Slack 1
- Mittelwert der Leistung der Prozeßaggregate:
Power 1

Die Mittelwerte der verallgemeinerten Kosten setzen sich aus den fixen und variablen Anteilen zusammen. Die fixen Anteile werden nach Fall 1 berechnet. Die variablen Anteile ergeben sich gemäß 3. Entsprechende Aussagen gelten für die aus diesen Kostenbeiträgen durch lineare Gewichtung hervorgehende Zielfunktion (Goal).

Teil IV

Anhänge

Modellbeschreibung und Definitionen

A.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.

Modellzweck:¹ 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.² 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.

¹Teile der folgenden Ausführungen sind publiziert in [Gro95].

²„Ergebnisse von Energie- und Umweltmodellen dürfen (...) nie als direkte Empfehlung interpretiert werden. Sie sind nur ein Input in die Entscheidungsfindung“ [Wal88], S.174.

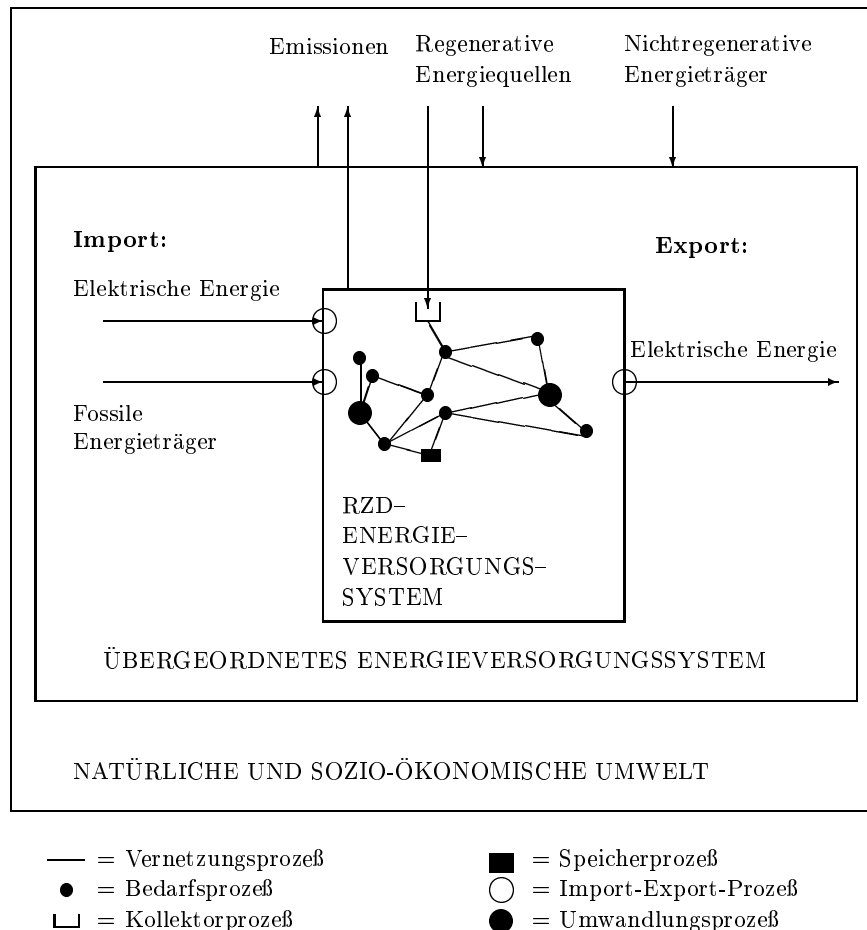


Abbildung A.1: Räumlich und zeitlich disaggregiertes Energieversorgungssystem (RZD-EVS) eingebettet in ein übergeordnetes EVS (s.u.). Beide befinden sich in der ihnen gemeinsamen natürlichen und sozioökonomischen Umwelt. Die Art und Weise der Verknüpfung der energietechnischen Prozesse des RZD-EVS ist 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.

Definition 2 (RZD-Energieversorgungssysteme) *Räumlich und zeitlich disaggregierte Energieversorgungssysteme (RZD-EVS)* sind Energieversorgungssysteme (EVS), in denen (im Prinzip) jeder energietechnische Prozeß³ 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 zugrunde liegenden kontinuierlichen Funktionen⁴ genügend genau widerspiegeln.⁵

³Genaue Definition s. Def.4.

⁴Der Übergang von kontinuierlichen Funktionen zu Zeitreihen wird in [Gro91] ausführlich besprochen.

⁵In der Praxis haben sich für die hier interessierenden Fragestellungen Zeitreihen bewährt, die aus Einstunden-Mittelwerten bestehen [Dub86], S.53.

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.⁶

Modellannahme 2 (Eigenschaften des RZD-EVS) RZD-EVS dienen 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 klein⁷ 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.⁸ 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 A.3).

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

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;

⁶Das übergeordnete EVS und die Umwelt bilden somit im systemanalytischen Sinne die Umgebung des zu untersuchenden (Energieversorgungs-) Systems.

⁷Gemäß [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 betragen 1992 4,7% des Gesamtverbrauchs. In der untersuchten Kommune Würzburg summierten sich die Netzverluste 1993 auf 1,8% [WV94].

⁸Typische Transportgeschwindigkeiten in Wärmeversorgungssystemen liegen im Bereich von 1 m/s [Buc83].

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. Solarenergie⁹) 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 importieren¹⁰ 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 SO_2 sowie die klimawirksamen Emissionen von CO_2 und CH_4 .

Definition 3 (Umweltdatenvektor) Die Darstellung der Umwelt erfolgt im Modell *deeco* mit Hilfe des *Umweltdatenvektors* \vec{U} . \vec{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.

⁹Der 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.

¹⁰Die Begriffe „Import“ und „Export“ werden im folgenden stets im hier definierten Sinne verwendet. Sie beziehen sich nicht auf den Energieaustausch mit dem Ausland.

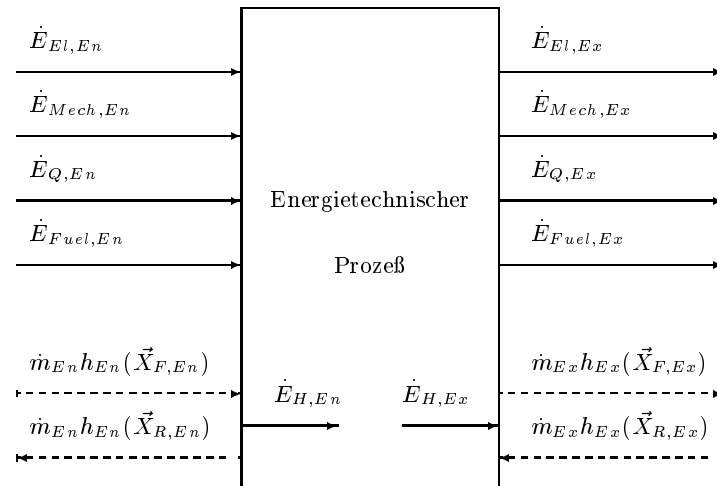


Abbildung A.2: Energieflußorientierte Beschreibung energietechnischer Prozesse. Die Energiestromrichtung wird mittels durchgezogener, die Massenstromrichtung mit Hilfe unterbrochener Pfeile angedeutet. Die auftretenden Symbole werden im Text erläutert.

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 intensiven¹¹ 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

¹¹Der Gebrauch der Begriffe „extensiv“ und „intensiv“ orientiert sich am Sprachgebrauch der Thermodynamik [Rei85], S.170.

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. A.2):

1. *Elektrische und mechanische Energie:* Der mit dem Transport von elektrischer¹² (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 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

$$\dot{H} = \dot{m}h. \quad (\text{A.1})$$

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}_{Fuel} berechnet sich bei Kenntnis des (unteren, auf eine Masseneinheit bezogenen) Heizwertes h_{LHV} aus (s. z.B. [Bae89], S.294):

$$\dot{E}_{Fuel} = \dot{m}h_{LHV}. \quad (\text{A.2})$$

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 be-

¹²In 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.

rechnet sich der dem Kernbrennstoffstrom zugeordnete Enthalpiestrom \dot{E}_{Fuel} ¹³ aus

$$\dot{E}_{Fuel} = \dot{m}h_N. \quad (\text{A.3})$$

\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.¹⁴ 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,¹⁵ so berechnet sich der Energieübertrag \dot{E}_H auf das System aus

$$\dot{E}_H = \dot{m}(h_F - h_R). \quad (\text{A.4})$$

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*¹⁶ 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 \vec{X}_F umfaßt alle intensiven Größen, die zur Berechnung der spezifischen Enthalpie im Vorlauf herangezogen werden. \vec{X}_R steht für die entsprechenden Größen im Rücklauf und

$$\vec{J} := (\vec{X}_F, \vec{X}_R)^\dagger \quad (\text{A.5})$$

¹³Die 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.

¹⁴genauer: 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.

¹⁵Der Index F erinnert dabei an „Flow“ (= Vorlauf) und R an „Return“ (= Rücklauf).

¹⁶Man kann in diesem Zusammenhang auch von einer Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion sprechen.

für alle intensiven Größen, die so dem Nettoenthalpiestrom zugeordnet werden. Treten im folgenden Vektoren als Komponenten von übergeordneten Vektoren auf, so stehen sie immer stellvertretend für ihre Komponenten. Das Symbol † 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 eintritt¹⁷ 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. Wenn in diesem Handbuch 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.¹⁸ 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 einen Prozeß ein bzw. aus diesem aus, so werden sie durchnumeriert. $\dot{E}_{H,i,Ex}$ 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 de-

¹⁷Es sei daran erinnert, daß Nettoenthalpieströme stets positiv gewählt werden.

¹⁸Bei 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 (Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme) [Sim90, Hes95].

tailliert erläutert wird, s. Abschnitt A.5) 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. A.14).¹⁹

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 5.6, 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 Emissionsarten \dot{P}_ν^{Var} (pro Zeiteinheit), $\nu \in \{\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \dots\}$ bilden die Komponenten des Emissionsvektors \vec{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* $\vec{C}^{Var} = (\dot{E}_P^{Var}, \vec{P}^{Var}, \dot{M}^{Var})^\dagger$ definiert, der sich aus dem variablen Primärenergieeinsatz \dot{E}_P^{Var} , den damit verbundenen variablen Emissionen \vec{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* \vec{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 erfolgt mit Hilfe der Annuitätenmethode, die z.B. in [Win91], S.301 ausführlich beschrieben wird. Diese Methode der Investitionsrechnung erlaubt die Umrechnung der

¹⁹Als 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.

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* $\dot{C}^{Fix} = (\dot{E}_P^{Fix}, \dot{P}^{Fix}, \dot{M}^{Fix})^\dagger$ zusammengefaßt. Die verallgemeinerten Gesamtkosten \dot{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*²⁰ 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*.

A.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, also als Vorgang, der innerhalb eines „schwarzen Kastens“ abläuft. Die mathematische Beschreibung dieses Vorgangs erfolgt mit Hilfe von *Input-Output-Relationen*, die die mathematischen Beziehungen wiedergeben, die zwischen Eingabegrößen²¹ (Inputs) $\vec{x}(t)$ und Ausgabegrößen (Outputs) $\vec{y}(t)$ in Abhängigkeit von evtl. vorhandenen Zustandsgrößen²² $\vec{z}(t)$

²⁰Diese Bezeichnungswiese wird von R. Kühner [Kue92] übernommen.

²¹Dabei 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 Bezeichnungswiese gewählt, die stärker den Datenflußcharakter der entsprechenden Größen betont.

²²Bei 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:

$$\vec{y}(t) = \vec{f}(\vec{z}(t), \vec{x}(t), t). \quad (\text{A.6})$$

Die Zustandstransformationsgleichung lautet:

$$\dot{\vec{z}}(t) = \vec{g}(\vec{z}(t), \vec{x}(t), t). \quad (\text{A.7})$$

Dabei sind \vec{f} und \vec{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 Differentialgleichung²³ bestimmen, s. z.B. [Soe79], S.518:

$$\frac{dE^S(t)}{dt} = \dot{E}_{En}(t) - \dot{E}_{Ex}(t) - \dot{E}^L \left[\dot{E}_{En}(t), \dot{E}_{Ex}(t), E^S(t), \vec{U}(t) \right]. \quad (\text{A.8})$$

Dabei gibt $\dot{E}_{En}(t)$ den Energiezufluß, $\dot{E}_{Ex}(t)$ den Energieabfluß und $\dot{E}^L \left[\dot{E}_{En}, \dot{E}_{Ex}, E^S, \vec{U} \right]$ 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 dazu gehörigen 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.²⁴ 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 Wärmeübertragern) 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 $\vec{U}(t)$) 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“.

²³Das Modell *deeco* beschränkt sich auf Systeme mit sog. konzentrierten Speichern [Sch91a], zu deren Beschreibung gewöhnliche Differentialgleichungen mit der Zeitvariablen t ausreichen.

²⁴Weitere Beispiele dazu finden sich in Definition 16.

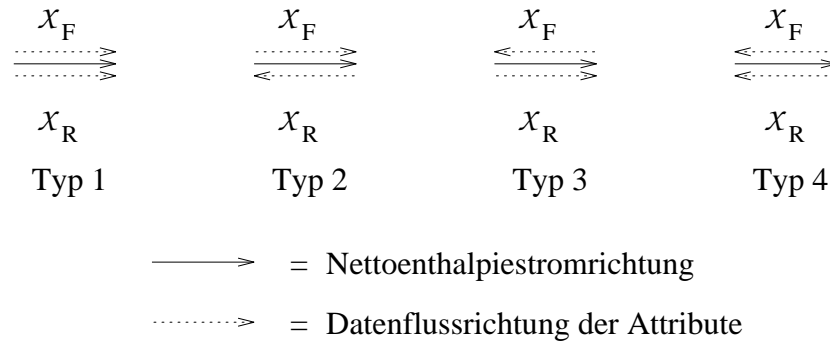


Abbildung A.3: Typeneinteilung der Nettoenthalpieströme. Die Abbildung zeigt, wie sich bei Kenntnis der Nettoenthalpiestromrichtung durch Typeneinteilung eindeutig die Datenflußrichtung der Attribute ergibt, die dem Nettoenthalpiestrom zugeordnet sind. (Die Vektoren der intensiven Größen \vec{X} sind in der Abbildung als \mathcal{X} wiedergegeben.)

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 \vec{X}_F und \vec{X}_R gekennzeichnet (s. Abb. A.3).

1. Typ: Datenfluß von \vec{X}_F und \vec{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 bezieht, als Informationen an die Prozesse weiter gibt, die durch den Abwärmestrom mit dem Abwärmeproduzenten verknüpft sind.
2. Typ: Datenfluß von \vec{X}_F parallel und von \vec{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 \vec{X}_F antiparallel und von \vec{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 \vec{X}_F und \vec{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 weiter gibt.

Anmerkung:

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

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 Steuer-

leitung 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 Attribute²⁵ 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 folgenden²⁶ sei $\alpha, \beta \in \{El, Mech, Q, H, Fuel, P\}$):

$$\lambda_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha, En}}{\partial \dot{E}_{\beta, Ex}}, \quad \varepsilon_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha, Ex}}{\partial \dot{E}_{\beta, En}}, \quad \mu_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha, Ex}}{\partial \dot{E}_{\beta, Ex}}, \quad \sigma_{\beta}^{\alpha} := \frac{\partial \dot{E}_{\alpha, En}}{\partial \dot{E}_{\beta, En}}. \quad (\text{A.9})$$

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. $\dot{E}_{\alpha, En, 0}$ ($\alpha \in \{El, Mech, Q, H, Fuel, P\}$)²⁷ 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.

²⁵Die Datenflußrichtung der Energieströme selbst spielt bei der Verknüpfung von Prozessen eine untergeordnete Rolle und braucht deshalb den Energieströmen (außer bei der Aufstellung der Input-Output-Relationen) nicht fest zugeordnet werden.

²⁶Werden 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.

²⁷Auch hier darf H durch weitere Indizes (z.B. l) näher charakterisiert werden (s.o.).

Bei der thermodynamischen Beschreibung energietechnischer Prozesse muß zwischen stationärem und instationärem Betrieb unterschieden werden. Bei letzterem ändern sich im Gegensatz zum stationären Betrieb die den Prozeß charakterisierenden Größen (z.B. die an ihm beteiligten²⁸ 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-stationär²⁹ 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*.

Definition 18 (Prozeßinterne Grenzwerte) Zur adäquaten Beschreibung vieler energietechnischer Prozesse reichen eindeutige, d.h. in Form von Gleichungen gegebene Input-Output-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 in beliebiger nichtlinearer Weise von den Attributen, den Zustandsgrößen und den prozeßexternen Einflußgrößen abhängig sein dürfen. Ihre explizite Form kann erst bei der konkreten Beschreibung eines Prozesses angegeben werden.

A.3 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. A.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

²⁸Darunter sollen im folgenden immer die Energieströme verstanden werden, die in das zum Prozeß gehörende System ein- bzw. aus diesem austreten.

²⁹Dies 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.

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 4 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 19 (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*.³⁰ 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 Graphentheorie³¹ näher beschrieben werden.

³⁰Die hier verwendeten Begriffe werden von Kühner [Kue92] übernommen.

³¹Die 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

Definition 20 (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 21 (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 7 (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 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. A.18).*

Modellannahme 8 (Modellierung des nicht-elektrischen EVS) *Das nicht-elektrische EVS läßt sich als Graph modellieren, dessen Knoten von Prozessen³² sowie von Bilanzpunkten und dessen Kanten von verlustlosen Energieströmen \dot{E}_α , $\alpha \in \{\text{Fuel, Mech, H}\}$ gebildet werden. Der dadurch entstehende Graph sei durch folgende Eigenschaften ausgezeichnet:³³*

1. Bilanzpunkte (mit Ausnahme der globalen Bilanz für die elektrische Energie) stellen graphentheoretisch gesehen einen Teil der Knoten des Graphen³⁴ dar. Sie repräsentieren Mengenzustände sowie gegebenenfalls Identitätsgleichungen (s. Def. 19).
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

[Fou92] und [Zim87]. Ein Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der Thermoökonomie bzw. der Modellierung nationaler Energiesysteme (EFOM-Modell) wird in [Val94] bzw. [Ode94] dargestellt.

³²Genau genommen werden manchen Bedarfsprozessen 2 Knoten zugeordnet (s.u.).

³³Ein Beispiel für die graphentheoretische Modellierung eines EVS ist in Abb. 1.2 wiedergegeben. Die dort ausgewiesenen Bilanzpunkte (= schwarze Punkte) bilden zusammen mit den gezeigten Prozessen (Kästchen) die Menge der Knoten des betrachteten EVS.

³⁴Der 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“.

einen abwärmeproduzierenden Teil zerlegt, denen jeweils ein eigener Knoten zugeordnet wird. Diese Zerlegung³⁵ ist möglich, da bei Bedarfsprozessen definitionsgemäß keine direkte Verknüpfung³⁶ 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 zyklenfrei, 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 zyklenfreien 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).³⁷

Definition 22 (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 weder einen chemischen oder mechanischen Energie- noch einen Nettoenthalpiestrom aufnimmt, stellt eine Quelle des Graphen dar.

Definition 23 (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

³⁵Diese Zerlegung spielt im Modell eine wesentliche Rolle, da sie dazu führt, daß der Graph des nicht-elektrischen EVS zyklenfrei wird (s.u.).

³⁶Dazu zählt nicht die Verknüpfung über \vec{U} .

³⁷Um eine Kontrolle dieser Verknüpfungsstruktur zu ermöglichen, müssen die Knoten des Graphen stets einer der beiden Mengen $\{a\}$ oder $\{b\}$ (s.u.) zugeordnet werden können.

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 5.2), 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. 5 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 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 24 (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.

A.4 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 \vec{U} die fundamentalen Eingabegrößen und die Komponenten der verallgemeinerten variablen und fixen Kosten \vec{C}^{Var} bzw. \vec{C}^{Fix} die fundamentalen Ausgabegrößen dieses (Energieversorgungs-)Systems dar.³⁸ 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. 25, s. Abschnitt A.5) ein optimales Systemverhalten realisieren läßt (= zeitlich lokale Optimierung, s. Abschnitt A.5.1). In Abschnitt A.5.1.2 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. Die bisher gemachten Modellannahmen gewährleisten die Linearität der Input-Output-Relationen und prozeßinternen Grenzwerte in bezug auf die Optimierungsvariablen. Deshalb und wegen der (trivialen) Linearität der Mengenbilanzen, die den Bilanzpunkten zugeordnet sind, läßt sich ihre Bestimmung mit Hilfe des Simplexalgorithmus (s. Abschnitt A.5) durchführen. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß alle Koeffizienten der entsprechenden linearen Gleichungen bereits vor der Optimierung bekannt sind. Da in diese Koeffizienten gemäß Kap. 5 neben Parametern auch prozeßexterne Einflußgrößen, Zustandsgrößen und Attribute eingehen, ist es erforderlich anzugeben, wie diese Größen, die (innerhalb eines Optimierungszeitintervalls) als optimierungsunabhängig angesehen werden, 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 A.5.1.2 ausführlich beschrieben. Im folgenden soll gezeigt werden, wie und unter welchen Voraussetzungen sich die Attribute berechnen lassen.

³⁸Eine detaillierte Diskussion dieses Sachverhaltes sowie eine vollständig auf Datenflüssen basierende Darstellung des EVS als Netzwerk im strengen graphentheoretischen Sinne findet sich in [Gro95].

Eine Betrachtung der Input-Output-Relationen von Kap. 5 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. rechenzeitsparende 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 Eingabe- 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 A.5 fortfahren.)

Datenfluß der Attribute

Modellannahme 9 (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.³⁹

1. Jedes Attribut, das Ausgabegröße eines Prozesses ist, muß sich eindeutig über die entsprechenden Input-Output-Relationen aus prozeßexternen Einflußgrößen, prozeßinternen Zustandsgrößen 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. A.3 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

³⁹Es 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).

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 [Bru96] zu gewährleisten. Sie stellen keine zu starke Einschränkung des Anwendungsbereichs von *deeco* dar.

3. Gemäß Def. 7 sind die Attribute eines Nettoenthalpiestroms, der an einem Prozeß beteiligt ist, durch die Angabe von $\vec{J} = (\vec{X}_F, \vec{X}_R)^\dagger$ eindeutig festgelegt. Input–Output–Relationen, die als Ausgabegrößen Attribute liefern, müssen folgende Eigenschaften besitzen (s.a. Abb. A.4):

- (a) Sie stellen keinen funktionalen Zusammenhang zwischen $\vec{X}_{F,En}$ und $\vec{X}_{R,En}$ her,⁴⁰ wenn $\vec{X}_{F,En}$ und $\vec{X}_{R,En}$ dem gleichen Nettoenthalpiestrom zugeordnet sind. 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 8 ist der Graph, der das nicht-elektrische EVS beschreibt, zyklennfrei. 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. A.4).

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. A.5). 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.

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

⁴⁰D.h. $\vec{X}_{F,En}$ geht nicht in die Berechnung von $\vec{X}_{R,En}$ ein und umgekehrt.

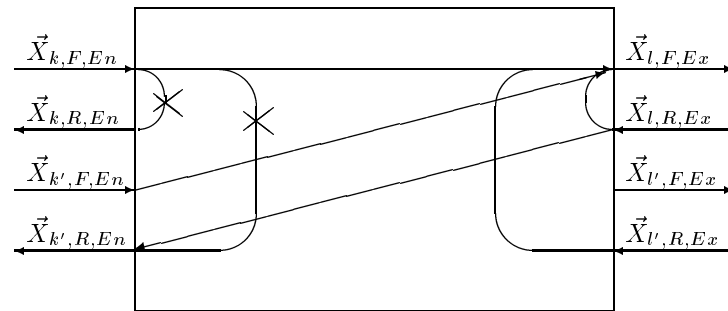


Abbildung A.4: Beispiele für erlaubte und verbotene (\times) funktionale Beziehungen zwischen den Attributen eines Prozesses, die Eingabe- bzw. Ausgabegrößen sind. Die Pfeile stellen die Datenflußrichtung dar.

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, werden die Input-Output-Relationen, die als Ausgabegrößen Attribute liefern, als eindeutige Relationen modelliert (s. Kap. 5). 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. A.5 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.

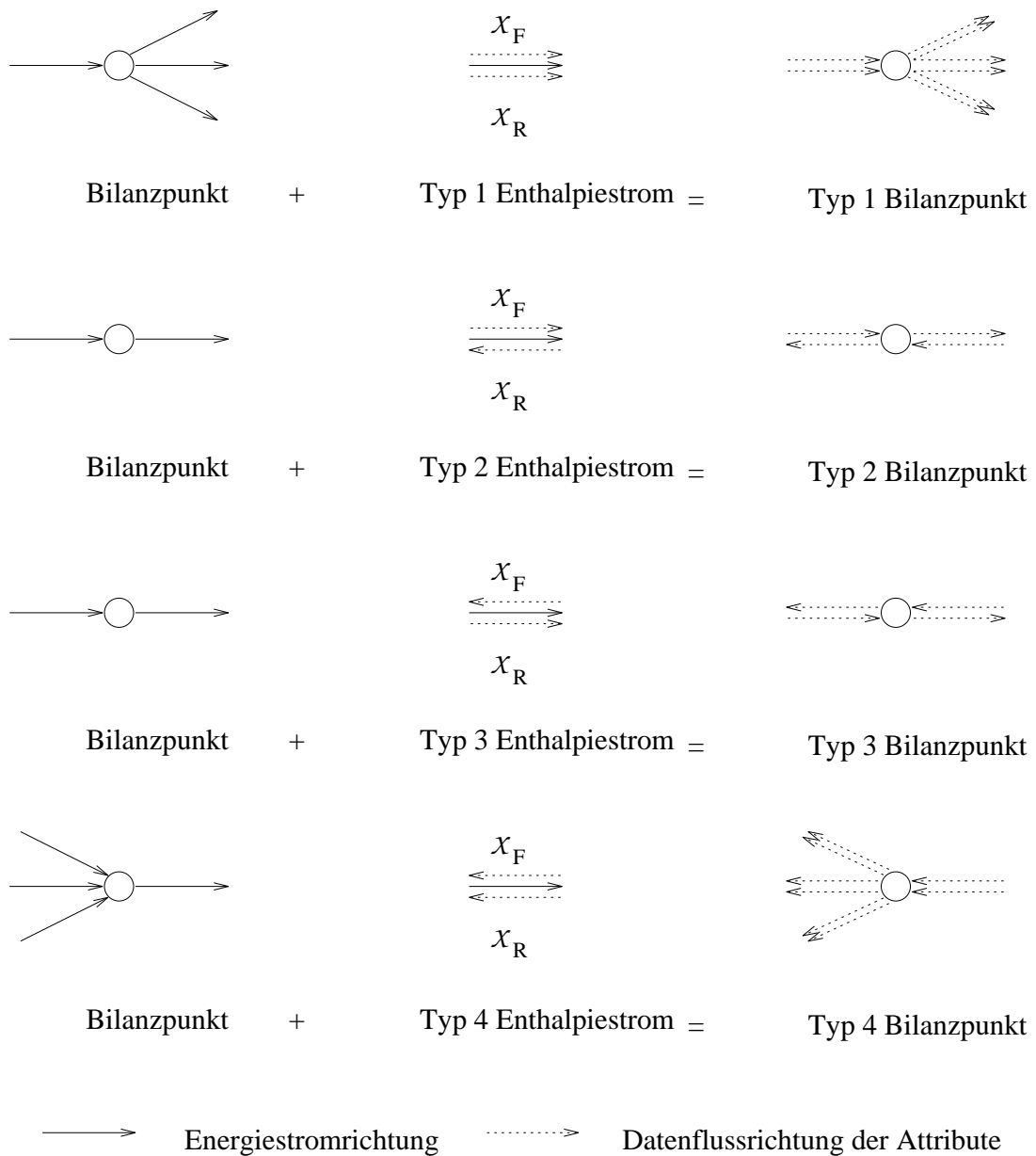


Abbildung A.5: Typeneinteilung der Bilanzpunkte: Die Abbildung zeigt anhand der Bilanzpunkte, wie der Graph, der das nicht-elektrische EVS beschreibt, durch Zuordnen von Typen zu den auftretenden Nettoenthalpieströmen in den Graphen übergeht, der den Datenfluß der Attribute wiedergibt. Im Falle des Typ 1 bzw. Typ 4 Bilanzpunktes dürfen auch mehr als die drei gezeichneten Nettoenthalpieströme aus- bzw. eintreten. (Die Vektoren der intensiven Größen \vec{X} sind in der Abbildung als \mathcal{X} wiedergegeben.)

A.5 Optimierung des Energieversorgungssystems

Definition 25 (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 geeigneter 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:

$${}^{\tau}G(t) := \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} G(t') dt'. \quad (\text{A.10})$$

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

$${}^{\Theta}G := \frac{1}{\Theta} \int_0^{\Theta} G(t') dt'. \quad (\text{A.11})$$

Modellannahme 10 (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 ${}^{\Theta}\dot{\vec{C}}_E$, gemittelt über den Optimierungszeitraum Θ , der in der Regel ein Jahr umfaßt:

$${}^{\Theta}\dot{\vec{C}}_E := \frac{1}{\Theta} \int_0^{\Theta} \left[\dot{\vec{C}}_E^{Var}(t) + \dot{\vec{C}}_E^{Fix}(t) \right] dt. \quad (\text{A.12})$$

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

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

$$\begin{aligned} \dot{\vec{C}}_E(t) &= (\dot{E}_{P,E}, \dot{P}_E, \dot{M}_E)^\dagger \\ &= (\dot{E}_{P,E}^{Var}, \dot{P}_E^{Var}, \dot{M}_E^{Var})^\dagger + (\dot{E}_{P,E}^{Fix}, \dot{P}_E^{Fix}, \dot{M}_E^{Fix})^\dagger. \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

Die Zielfunktion ${}^{\ominus}\Phi$ ist somit definiert durch:

$${}^{\ominus}\Phi = \rho_P \frac{{}^{\ominus}\dot{E}_{P,E}}{{}^{\ominus}\dot{E}_{P,E,0}} + \sum_{\nu} \rho_{\nu} \frac{{}^{\ominus}\dot{P}_{\nu,E}}{{}^{\ominus}\dot{P}_{\nu,E,0}} + \rho_M \frac{{}^{\ominus}\dot{M}_E}{{}^{\ominus}\dot{M}_{E,0}} \quad (\text{A.14})$$

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

Die Berechnung von $\dot{C}_E^{Var}(t)$ wird in Abschnitt A.5.1 (Gl. A.15) durchgeführt; die von $\dot{C}_E^{Fix}(t)$ in Abschnitt A.5.2.

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.

A.5.1 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. Kap. 5) 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.

A.5.1.1 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. A.5.1.2 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{C}_E^{Var} wie folgt angeben:

$$\dot{C}_E^{Var} = \sum_{c \in \{c\}} \dot{C}_c^{Var} + \sum_{o \in \{o\}} \dot{C}_o^{Var} + \sum_{p \in \{p\}} \dot{C}_p^{Var} + \sum_{n \in \{n\}} \dot{C}_n^{Var}. \quad (\text{A.15})$$

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 $\{c\}$, der Kollektorprozesse $\{o\}$, der Import-Export-Prozesse $\{p\}$ und der Vernetzungsprozesse $\{n\}$ zusammen. Die anderen Prozesse tragen nicht zu den verallgemeinerten variablen Kosten bei.

Als zeitlich lokale Zielfunktion wird eine entsprechend Gl. A.14 gewichtete Linearkombination der Komponenten von \vec{C}_E^{Var} herangezogen, die mit Φ^{Var} bezeichnet wird:

$$\Phi^{Var} := \rho_P \frac{\dot{E}_{P,E}^{Var}}{\Theta \dot{E}_{P,E,0}} + \sum_{\nu} \rho_{\nu} \frac{\dot{P}_{\nu,E}^{Var}}{\Theta \dot{P}_{\nu,E,0}} + \rho_M \frac{\dot{M}_E^{Var}}{\Theta \dot{M}_{E,0}}. \quad (\text{A.16})$$

Definition 26 (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* \vec{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.
4. Prozeßinterne Grenzwerte für Zustandsgrößen:
Alle prozeßinternen Grenzwerte, die sich auf Zustandsgrößen beziehen, müssen eingehalten werden.
5. Lokale Energiebilanz an Bilanzpunkten $b \in \{b\}$ des nicht-elektrischen EVS :

$$\forall b \in \{b\} \quad \sum_{(a,\alpha) \in P(b)} \dot{E}_{\alpha,Ex,a} = \sum_{(a',\alpha') \in S(b)} \dot{E}_{\alpha',En,a'}. \quad (\text{A.17})$$

Dabei gibt $P(b)$ die Menge der energetischen Vorgängerausgänge (s. Kap. A.3, Def. 24) 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:⁴¹

$$\sum_{a \in \{a\}} \dot{E}_{El,Ex,a} = \sum_{a \in \{a\}} \dot{E}_{El,En,a}. \quad (\text{A.18})$$

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.

A.5.1.2 Zeitlich globale Optimierung

Die zeitlich lokale Zielfunktion (Gl. A.16) 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

⁴¹In der Summe auf der rechten Seite dieser Gleichung sei auch $\dot{E}_{El,1,En}$ aus Abschnitt 5.6 enthalten.

in der Regel ein Jahr umfaßt. Die verallgemeinerten variablen Kosten, die vom EVS während des Zeitraums Θ verursacht werden, ergeben sich aus

$$\Theta \dot{C}_E^{Var} = \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta \dot{C}_E^{Var}(t) dt. \quad (\text{A.19})$$

Als zeitlich globale Zielfunktion $\Theta \Phi^{Var}$ wird eine entsprechend Gl. A.14 gewichtete Linearkombination der Komponenten von $\Theta \dot{C}_E^{Var}$ verwendet.

Definition 27 (Zustandsgrößenvektor, Einflußgrößenvektor) Es ist hilfreich, neben dem Vektor der zeitlich lokalen Optimierungsvariablen \vec{O} (s. Def. 26) einen *Zustandsgrößenvektor* \vec{S} , der die prozeßinternen Zustandsgrößen⁴² sämtlicher Prozesse des EVS umfaßt, und einen *Einflußgrößenvektor* \vec{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:

$$\Theta \Phi^{Var} [[\vec{S}(t), \vec{O}(t), \vec{R}(t), \Theta]] = \frac{1}{\Theta} \int_0^\Theta \Phi^{Var} [\vec{S}(t), \vec{O}(t), \vec{R}(t)] dt. \quad (\text{A.20})$$

Die doppelten eckigen Klammern deuten dabei an, daß es sich bei $\Theta \Phi^{Var}$ nicht um eine Funktion von $\vec{S}(t)$, $\vec{O}(t)$ und $\vec{R}(t)$, sondern um ein Funktional handelt. Anfangs- und Endzustand sollen übereinstimmen, so daß auf eine Bewertung des Endzustandes verzichtet werden kann. Gemäß den *deeco* zugrundeliegenden Modellannahmen 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, lassen sich mit Hilfe einer geeigneten Vektorfunktion \vec{F} wie folgt zusammenfassen:

$$\dot{\vec{S}}(t) = \vec{F} [\vec{S}(t), \vec{O}(t), \vec{R}(t)]. \quad (\text{A.21})$$

Die zeitlich lokalen Nebenbedingungen, die Anforderungen an die Energieströme stellen (s. Abschnitt A.5.1.1), definieren den *zulässigen Steuerbereich* $\Omega[\vec{S}(t), \vec{R}(t)]$. Es handelt sich dabei um die primären Nebenbedingungen, die prozeßinternen Grenzwerte für Energieströme, die Input-Output-Relationen für Energieströme und verallgemeinerte variable Kosten (s. Kap. 5), die lokalen Energiebilanzen an nicht-elektrischen Bilanzpunkten und die globale Bilanz der elektrischen Energie. Die zeitlich lokalen Nebenbedingungen, die sich auf die Zustandsgrößen beziehen (d.h. die prozeßinternen Grenzwerte für die Zustandsgrößen), definieren den *zulässigen Zustandsbereich* $\Gamma[\vec{R}(t)]$.

Da nun zusätzlich zu den in Abschnitt A.5.1.1 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 $\vec{S}(t=0)$)

$$\Theta \Phi^{Var} [[\vec{S}(t), \vec{O}(t), \vec{R}(t), \Theta]] \quad (\text{A.22})$$

⁴²Die 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).

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

$$\dot{\vec{S}} = \vec{F}[\vec{S}(t), \vec{O}(t), \vec{R}(t)], \quad (\text{A.23})$$

$$\vec{O} \in \Omega[\vec{S}(t), \vec{R}(t)], \quad (\text{A.24})$$

$$\vec{S} \in \Gamma[\vec{R}(t)]. \quad (\text{A.25})$$

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.371.⁴³ Der konstruktive Einsatz des Minimumprinzips von Pontryagin stößt vor allem durch die auftretenden Ungleichungsnebenbedingungen für die Zustandsgrößen 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.

Definition 28 (Quasidynamische Optimierung)

Unter *Quasidynamischer Optimierung* wird die Simulation des Betriebs des EVS bei zeitlich lokaler Optimierung unter Einbeziehung der Systemvergangenheit verstanden, s.a. [Bru96] 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.

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 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 vorhergesagbaren 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. 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.

⁴³Entscheidend 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.

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].⁴⁴

Algorithmus der Quasidynamischen Optimierung:

Der Algorithmus beginnt mit $t = 0$ und den Anfangswerten $\vec{S}(t = 0)$. 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 $\vec{R}(t)$, die in Form von Einstunden–Mittelwerten vorliegen, konstant sind, werden zunächst alle noch fehlenden Attribute berechnet (s. Abschnitt A.4). 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 $\Omega[\vec{S}(t), \vec{R}(t)]$ repräsentierten zeitlich lokalen Nebenbedingungen wird dazu benutzt, den Optimierungsgrößenvektor $\vec{O}(t)$, der im betrachteten Intervall ebenfalls konstant angenommen wird, zu bestimmen. Das hier angesprochene Verfahren der zeitlich lokalen Optimierung, das im Abschnitt A.5.1.1 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 \vec{S} am Ende des Intervalls berechnet werden:⁴⁵

$$\vec{S}(t + \Delta t) = \vec{S}(t) + \vec{F} [\vec{S}(t), \vec{O}(t), \vec{R}(t)] \cdot \Delta t. \quad (\text{A.26})$$

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

$$|\Delta S_\iota(t, \Delta t)| \leq \delta \cdot |S_\iota(t)|. \quad (\text{A.27})$$

Dabei ist δ eine feste, genügend klein gewählte Zahl und $S_\iota(t)$ die ι -te Komponente von $\vec{S}(t)$. Sind die Abweichungen zu groß, so wird das betrachtete Zeitintervall solange halbiert und das Verfahren solange wiederholt, bis die Bedingung A.27 erfüllt ist. Die Angabe von prozeßinternen Grenzwerten für die maximale Be- und Entladung von Energiespeichern (s. Kap. 5) 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 ξ , $\xi \in \{1, \dots, \Xi\}$, unterschieden und Optimierungszeitintervalle genannt werden:

$$\tau_\xi = [t_{\xi-1}, t_\xi]. \quad (\text{A.28})$$

⁴⁴Dieses 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 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.

⁴⁵Modelltechnisch betrachtet stellt Gl. A.26 eine Berechnungsvorschrift für $\vec{S}(t + \Delta t)$ 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.

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:

$$\tau_\xi \vec{O} := \frac{1}{t_\xi - t_{\xi-1}} \int_{t_{\xi-1}}^{t_\xi} \vec{O}(t) dt = \vec{O}(t_{\xi-1}). \quad (\text{A.29})$$

Mit Hilfe des Optimierungsgrößenvektors $\tau_\xi \vec{O}$ können die Mittelwerte der verallgemeinerten variablen Kosten (zusammengefaßt zu $\tau_\xi \dot{C}_E^{Var}$) im Intervall τ_ξ berechnet werden (s. Gl. A.15). Der Optimierungsgrößenvektor enthält darüber hinaus die Information über die Höhe der in die einzelnen Prozesse eintretenden bzw. aus ihnen austretenden Energieströme.

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

$$\Theta \dot{C}_E^{Var} = \frac{1}{\Xi} \sum_{\xi=1}^{\Xi} \tau_\xi \dot{C}_E^{Var}. \quad (\text{A.30})$$

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.

Selbstkonsistenzbedingung der Speicherenergieinhalte:

Die Methode der Quasidynamischen Optimierung beginnt bei einem zunächst beliebig vorgegebenen Wert für $\vec{S}(t=0)$ und liefert am Ende des Verfahrens den Vektor $\vec{S}(t=\Theta)$. Um die Verringerung des Primärenergieeinsatzes (und damit verbunden aller verallgemeinerten variablen Kosten) durch ein Entleeren der Energiespeicher unter ihren Anfangsenergieinhalt $\vec{S}(t=0)$ zu verhindern, wird $\vec{S}(t=0) = \vec{S}(t=\Theta)$ gefordert. Diese Bedingung läßt sich im Rahmen der Quasidynamischen Optimierung nur durch ein iteratives Verfahren erfüllen, bei dem der Endwert $\vec{S}(t=\Theta)$ solange als Anfangswert eines anschließenden Optimierungslaufes verwendet wird, bis $\vec{S}(t=\Theta)$ um weniger als (z.B.) 1% von $\vec{S}(t=0)$ 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 den entsprechenden Gleichungen in Kap. 5 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. A.26 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 Speicherverlust in Erscheinung. Die Verwendung der Quasidynamischen Optimierung erfordert somit eine diesem Verfahren angepaßte Modellierung der Prozesse.

A.5.2 Optimierung der verallgemeinerten fixen Kosten

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

$$\dot{C}_E^{Fix} = \sum_{a \in \{a\}} \dot{C}_a^{Fix}. \quad (\text{A.31})$$

Aufgrund der zeitlichen Konstanz dieser Größen läßt sich die Integration des 2. Terms auf der rechten Seite von Gl. A.12 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 bestimmbaren 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.⁴⁶ Wie dies genau zustandekommt und welche

⁴⁶Die bereits besprochenen Zustandstransformationsgleichungen führen im Gegensatz dazu nur zu einer Kopplung zeitlich aufeinander folgender Zeitintervalle!

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. 5.30 auch von den Wärmespeicherenergieinhalten, die Zustandsgrößen darstellen, für die zeitlich globale Optimierung nicht mehr. Diese Nichtlinearität und die Vielzahl der Optimierungsvariablen und zu beachtenden Nebenbedingungen⁴⁷ verhindern eine simultane, exakte Optimierung aller Optimierungszeitintervalle und damit eine gleichzeitige Minimierung der verallgemeinerten variablen und fixen Kosten.

A.5.3 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 11 (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.

Prozeßaggregate:

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)

⁴⁷In der in [Bru96] beschriebenen Anwendung von *deeco* auf die Modellstadt „Würzburg“ ergäben sich bei 8760 Optimierungszeitintervallen etwa 1 Mio. Optimierungsvariablen und 1,4 Mio. Nebenbedingungen.

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 A.5.1.1) zusätzlich zu den dort angegebenen Nebenbedingungen zu berücksichtigen, daß die aufaddierte Leistung der Einzelprozesse die Maximalleistung des Prozeßaggregats nicht übersteigen darf.

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. 25).
3. Treten Vektoren als Komponenten von übergeordneten Vektoren auf, so stehen sie stellvertretend für ihre Komponenten.
4. Der Index † 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)

$\ominus \dot{\bar{C}}_E$: Verallgemeinerte Kosten im EVS (pro Zeiteinheit; gemittelt über den Zeitraum Θ)
$\ominus \dot{\bar{C}}_{E,0}$: Verallgemeinerte Kosten im EVS (pro Zeiteinheit), Referenzsystem (gemittelt über den Zeitraum Θ)
$\ominus \dot{\bar{C}}_E^{Fix}$: Verallgemeinerte fixe Kosten im EVS (pro Zeiteinheit; gemittelt über den Zeitraum Θ)
$\ominus \dot{\bar{C}}_E^{Var}$: 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)
$\ominus \dot{E}_{P,E}$: Primärenergieeinsatz im EVS (pro Zeiteinheit) (gemittelt über den Zeitraum Θ)
$\ominus \dot{E}_{P,E,0}$: Primärenergieeinsatz im EVS (pro Zeiteinheit), Referenzsystem (gemittelt über den Zeitraum Θ)
\dot{E}_Q	: Wärmestrom
\vec{f}	: (geeignet zu wählende) Vektorfunktion
G	: Platzhalter für eine beliebige Größe
$\ominus G$: Mittelwert von G , gebildet über den Optimierungszeitraum Θ
${}^\tau G$: Mittelwert von G , gebildet über einen Zeitraum der Länge τ

\vec{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)
$\vec{J} = (\vec{X}_F, \vec{X}_R)^\dagger$: Vektor der intensiven Größen (=Attribute, s. Def. 13) eines Nettoenthalpiestromes
\vec{J}_{En}	: Vektor der intensiven Größen eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
$\vec{J}_{En,In}$: Gesamtheit der Komponenten von \vec{J}_{En} , die Eingabegrößen darstellen
$\vec{J}_{En,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von \vec{J}_{En} , die Ausgabegrößen darstellen
\vec{J}_{Ex}	: Vektor der intensiven Größen eines austretenden Nettoenthalpiestromes
$\vec{J}_{Ex,In}$: Gesamtheit der Komponenten von \vec{J}_{Ex} , die Eingabegrößen darstellen
$\vec{J}_{Ex,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von \vec{J}_{Ex} , die Ausgabegrößen darstellen
\vec{J}_{In}	: Vektor der intensiven Eingabegrößen eines Nettoenthalpiestromes
$\vec{J}_{k,En}$: Vektor der intensiven Größen des eintretenden Nettoenthalpiestromes der Sorte k
$\vec{J}_{\{k\},En}$: Gesamtheit der Vektoren der intensiven Größen der eintretenden Nettoenthalpieströme $k \in \{k\}$
$\vec{J}_{k,En,In}$: Gesamtheit der Komponenten von $\vec{J}_{k,En}$, die Eingabegrößen darstellen
$\vec{J}_{k,En,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von $\vec{J}_{k,En}$, die Ausgabegrößen darstellen
$\vec{J}_{l,Ex}$: Vektor der intensiven Größen des austretenden Nettoenthalpiestromes der Sorte l
$\vec{J}_{\{l\},Ex}$: Gesamtheit der Vektoren der intensiven Größen der austretenden Nettoenthalpieströme $l \in \{l\}$
$\vec{J}_{l,Ex,In}$: Gesamtheit der Komponenten von $\vec{J}_{l,Ex}$, die Eingabegrößen darstellen
$\vec{J}_{l,Ex,Out}$: Gesamtheit der Komponenten von $\vec{J}_{l,Ex}$, die Ausgabegrößen darstellen
\vec{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
\vec{O}	: Vektor der Optimierungsgrößen
$\tau_\xi \vec{O}$: Vektor der Optimierungsgrößen (gemittelt über die Länge des Intervalls τ_ξ)

$\dot{\vec{P}}$: Vektor der Emissionen (pro Zeiteinheit)
$\dot{\vec{P}}^{Fix}$: Vektor der fixen Emissionen (pro Zeiteinheit)
$\dot{\vec{P}}^{Var}$: Vektor der variablen Emissionen (pro Zeiteinheit)
$\dot{\vec{P}}_E$: Vektor der Emissionen im EVS (pro Zeiteinheit)
$\dot{\vec{P}}_E^{Fix}$: Vektor der fixen Emissionen im EVS (pro Zeiteinheit)
$\dot{\vec{P}}_E^{Var}$: 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)
$\ominus \dot{P}_{\nu,E}$: Emissionen der Sorte ν im EVS (pro Zeiteinheit) (gemittelt über den Zeitraum Θ)
$\ominus \dot{P}_{\nu,E,0}$: 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
\vec{R}	: Vektor der prozeßexternen Einflußgrößen
$\tau_\xi \vec{R}$: Vektor der Einflußgrößen (gemittelt über die Länge des Intervalls τ_ξ)
\vec{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
$\vec{U} = (T_A, I, \dots)^\dagger$: Umweltdatenvektor
u	: Spezifische innere Energie (bezogen auf eine Masseneinheit)
v	: Spezifisches Volumen (bezogen auf eine Masseneinheit)
$\vec{X}_F = (T_F, p_F, x_F)^\dagger$: Vektor der intensiven Größen im Vorlauf eines Nettoenthalpiestromes
$\vec{X}_{F,En}$: Vektor der intensiven Größen im Vorlauf eines eintretenden Nettoenthalpiestromes
$\vec{X}_{F,Ex}$: Vektor der intensiven Größen im Vorlauf eines austretenden Nettoenthalpiestromes
$\vec{X}_R = (T_R, p_R, x_R)^\dagger$: Vektor der intensiven Größen im Rücklauf eines Nettoenthalpiestromes
$\vec{X}_{R,En}$: Vektor der intensiven Größen im Rücklauf eines eintretenden Nettoenthalpiestromes

$\vec{X}_{R,Ex}$: Vektor der intensiven Größen im Rücklauf eines austretenden Nettoenthalpiestromes
\vec{x}	: Vektor der Eingabegrößen
\vec{x}_{Att}	: Vektor der Eingabegrößen, die Attribute darstellen (s. Def. 13)
\vec{x}_{Fl}	: Vektor der Eingabegrößen, die Flüsse darstellen
\vec{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
\vec{y}	: Vektor der Ausgabegrößen
y	: Ausgabegröße
y_{Att}	: Ausgabegröße, die ein Attribut darstellt (s. Def. 13)
y_{Fl}	: Ausgabegröße, die einen Fluß darstellt
\vec{z}	: Vektor der Zustandsgrößen

Formelzeichen (griechisch)

$\Gamma[\vec{R}(t)]$: 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
$\vec{\omega}_{\alpha}$: (bezogen auf Energiestrom der Sorte $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$)
$\vec{\omega}_{El,En}$: (bezogen auf exportierte el. Energie)
$\vec{\omega}_{El,Ex}$: (bezogen auf importierte el. Energie)
$\vec{\omega}_{Fuel}$: (bezogen auf chemische Energie)

$\vec{\omega}_{Fuel,Ex}$: (bezogen auf importierte chemische Energie)
	Spezifischer Emissionsfaktor des Stoffes $\nu \in \{CO_2, SO_2, NO_x, \dots\}$
$\omega_{\nu,\alpha}$: (bezogen auf Energiestrom der Sorte $\alpha \in \{Fuel, El, Mech, H\}$)
$\omega_{\nu,El,En}$: (bezogen auf exportierte el. Energie)
$\omega_{\nu,El,Ex}$: (bezogen auf importierte el. Energie)
$\omega_{\nu,Fuel}$: (bezogen auf chemische Energie)
$\omega_{\nu,Fuel,Ex}$: (bezogen auf importierte chemische Energie)
ρ_M	: Gewichtungsfaktor der monetären Kosten
ρ_P	: Gewichtungsfaktor des Primärenergieeinsatzes
ρ_ν	: Gewichtungsfaktor der Emissionen der Sorte $\nu \in \{CO_2, SO_2, NO_x, \dots\}$
	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
$\Omega[\vec{S}(t), \vec{R}(t)]$: 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	: Emissionsorte $\nu \in \{CO_2, SO_2, NO_x, \dots\}$
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. 24)
$\{\alpha\}_{Ex,a}$: Menge der energetischen Ausgänge von a (s. Def. 24)
$\{a\}$: 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>co</u> llector)
$\{p\}$: Menge aller Import-Export-Prozesse (<u>im</u> port- <u>ex</u> port)
$p(j)$: Menge der (unmittelbaren) Vorgänger (<u>p</u> redecessor) des Knoten j
$P(b)$: Menge der Vorgängerausgänge von b (s. Def. 24)
$\{s\}$: 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. 24)

Zur Entstehungsgeschichte und Portierung des Programmes *deeco*

Das dynamische Energie-, Emissions- und Kostenoptimierungsmodell *deeco* wurde vom Autor dieses Handbuches im Rahmen seiner Doktorarbeit im Zeitraum von 1992-1996 entwickelt und implementiert. Das Programm arbeitet mit einer hohen zeitlichen Auflösung (betrachtet werden Einstundenmittelwerte), die eine transiente Modellierung des Verhaltens der zu untersuchenden Energieversorgungsanlagen in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Energiebedarfs- und Energieangebotsituation (z.B. im Hinblick auf die Verfügbarkeit regenerativer Energiequellen) erlaubt. Gleichzeitig ermöglicht die Verwendung graphentheoretischer Ansätze eine flexible Netzwerkbeschreibung der jeweils vor Ort vorhandenen räumlichen Struktur der zu optimierenden Energieversorgungssysteme. Zudem können ohne Modifikation des Programmkerns Erweiterungen (z.B. Einführung neuer Technologien oder Berücksichtigung zusätzlicher Schadstoffkomponenten) vorgenommen werden, da alle im Modell auftretenden Optimierungsvariablen und Zustandsgrößen nicht direkt benannt, sondern als Komponenten geeignet definierter Arrays (sog. associative arrays) indirekt über Schlüsselwörter angesprochen werden. Diese im Vergleich zu anderen Energieoptimierungsmodellen sehr große Flexibilität konnte im Verbund mit graphentheoretischen Programmbibliotheken nur durch die Verwendung der innovativen objektorientierten Programmiersprache C++ realisiert werden, deren Normierung zum Zeitpunkt der Implementierung von *deeco* noch nicht abgeschlossen war. Im Hinblick auf eine spätere Portierung hat sich, wie 1998 deutlich wurde, die schnelle Übernahme der auf der Entwicklungsplattform (Hewlett-Packard RISC 700 Series Workstation unter dem UNIX-Betriebssystem HP-UX 8.07) verfügbaren plattformspezifischen C++ Variante (AT&T cfront 3.0.1 C++ Compiler) zusammen mit den verwendeten graphentheoretischen Programmbibliotheken (AT&T USL Standard Components Library) jedoch als hinderlich erwiesen. Der damals verfügbare C++ Compiler stimmt nicht mit dem nach langen Standardisierungsbemühungen neu entstandenen ISO/IEC 14882 Standard für C++ Compiler überein und wird aus diesem Grund von HP langfristig nicht mehr unterstützt.¹ Um eine weitere Nutzung des Modells *deeco* sicherzustellen, wurden deshalb im Rahmen des Projektes ISOTEG von der Bayerischen Forschungsstiftung Mittel zur Portierung (nicht jedoch zur Schaffung einer datenbank-gestützten graphischen Benutzeroberfläche) auf eine PC-Plattform unter Heranziehung einer geeigneten PC-Unix Version bereitgestellt.

Im Rahmen dieser Förderung gelang es in Zusammenarbeit mit Herrn Robbie Morrison, University of Otago, Dunedin, New Zealand, das gesamte, mehr als 18.000 Programmzeilen

¹Dies kam sehr überraschend, da die Programmiersprache C++ von Bjarne Stroustrup, einem Mitarbeiter von AT&T, entwickelt wurde.

umfassende Programmpaket *deeco* auf ein modernes UNIX-Betriebssystem (SCO UnixWare 2.1.2 SDK) umzustellen. Dieses Unix-Betriebssystem kann (z.B. auch parallel zu einem Windows Betriebssystem) auf einem marktüblichen PC installiert werden und erlaubt damit die Nutzung von *deeco* auf Rechnern, die (im Gegensatz zu Workstations) bei potentiellen Anwendern im allgemeinen verfügbar sind. Die portierte Version wurde am Institut für Theoretische Physik der Universität Würzburg umfangreichen Tests unterzogen, die gezeigt haben, dass die portierte Version im Rahmen der rechnerabhängigen Rechengenauigkeit zu Ergebnissen führt, die mit denen der Ausgangsversion übereinstimmen. Die PC-basierte *deeco* Version wird derzeit am Institut für Theoretische Physik der Universität Würzburg, am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Berlin (Fachgebiet Energieumwandlung und Umweltschutz) sowie an der University of Otago, Dunedin, New Zealand, verwendet.

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass durch die im Rahmen von ISOTEG gewährte Förderung die Voraussetzung für eine effiziente Nutzung des Programms in anwendungsnahen Forschungsinstituten, energietechnischen Ingenieurbüros und Planungsabteilungen größerer Energieversorger geschaffen wurde. Gleichzeitig konnte durch die Förderung ein wissenschaftlicher Fadenriß verhindert werden, so dass die Weiterentwicklung von *deeco* nun im Rahmen verschiedener Initiativen nahtlos fortgeführt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [Ale88] G. Alefeld, *Zur Bewertung von Heizkraftwerken*, Brennstoff-Wärme-Kraft **40**, 231-236 (1988).
- [And93] C.D. Andriese, *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).
- [ASU92] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) (Hrsg.), *Kenndaten, Gasturbinen in der Praxis*, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Stuttgart (1992).
- [ASU94] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) (Hrsg.), *BHKW-Kenndaten*, Verlag Rationeller Energieeinsatz, Hamburg (1994).
- [AT&T92] AT&T and UNIX System Laboratories (USL), Inc. (Eds.), *USL C++ Standard Components, Release 3.0, Programmer's Guide* (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).
- [BMW83] BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft), *Weniger Heizkosten*, Bonn (1983).
- [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, *Dynamische Energie- und Emissionsoptimierung regionaler Energiesysteme*, Dissertation, Institut für Theoretische Physik, Universität Würzburg (1996).

- [Bru97] Th. Bruckner, H.-M. Groscurth, R. Kümmel, *Konkurrenz und Synergie moderner Energieversorgungstechniken in kommunalen Energiesystemen*, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 47. Jg., Heft 3, 139-146 (1997).
- [Bru97a] Th. Bruckner, H.-M. Groscurth, R. Kümmel, *Competition and Synergy between Energy Technologies in Municipal Energy Systems*, Energy - The International Journal **22**, 1005-1014 (1997).
- [Bub93] D. Bublitz, *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).
- [Die84] B. Dietrich, *Betriebsergebnisse von Energieabsorberanlagen*, Sonderdruck aus *elektrowärme international*, 3/84 in RWE informiert 202 (1984).
- [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. Zybell, *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).
- [Fle95] T. Fleischer, K. Jüngst, V. Brandl, W. Maurer, E. Nieke: *Energiespeicherung in Supraleitenden Spulen (SMES)*, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 5575 (1995).
- [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).
- [Fog85] C.-J. Fogelholm, *Optimale Auslegung von Turbinenanlagen für Industriekraftwerke*, VGB Kraftwerkstechnik **65**, Heft 6 (1985).

-
- [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 wärme-pumpenbetriebenen 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. Ziolk, 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. Ziolk, 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 Intersociety 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 Thermo-economic 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).
- [Hah92] E. Hahne, N. Fisch, *Solar unterstützte Wärmeversorgung für private Haushalte*, DPG Tagung, AKE, Tagungsband (1992).
- [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 Abwärmennutzung*, *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 Energiespartechiken*, Band 2, C.F. Müller, Karlsruhe, S. 6-32 (1983).
- [Hol89] K. G. T. Hollands, M. F. Lightstone, *A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems*, Sol. Eng. 43, pp 97, 105 (1989).
- [Hom77] G.Homonay, *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).
- [Jue81] H. Jüttemann, *Anwendung der Gas- und Dieselwärmepumpe in der Haustechnik*, C. F. Müller, Karlsruhe (1981).
- [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 Haushaltlastkurven 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 Energietechniken, 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).
- [Kri83] Th. Krist, *Heizungstechnik*, Fikentscher & Co., Darmstadt (1983).
- [Kro74] A. Kroms, *Zur Auslegung der Heizkraftaggregate*, ÖZE **27**, 74-83 (1974).
- [Kue66] Künzi, *Mathematische Optimierung*, Teubner, Stuttgart, 80 (1966).
- [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).
- [Lin00] D. Lindenberger, Th. Bruckner, H.-M. Groscurth, R. Kümmel, *Optimization of Solar District Heating Systems: Seasonal Storage, Heat Pumps, and Cogeneration*, Energy - The International Journal **25**, 591-608 (2000).
- [Loo89] P. Loose, *Atmosphärische Gaskessel im Teillastbetrieb*, Heizung-Lüftung/Klima-Haustechnik (HLH) **40**, Nr.3, 123-128 (1989).
- [Lor89] H.W. Lorenzen, *Hybride Energiespeicher mit supraleitenden Spulen*, VDI-Berichte 733, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 189-206 (1989).
- [Lun89] P. D. Lund, *A General Design Methodology for Seasonal Storage Solar Systems*, Solar Energy, Vol. 42, No. 3, pp. 235-251, (1989).
- [Mai86] W. Maier, G. Angerer, *Rationelle Energieverwendung durch neue Technologien*, Band 2, TÜV Rheinland, Köln, 79 (1986)
- [Mar88] G. Marquardt, H. Hübner, T. Nadler, Ch. Seifert, A. Trogisch, *Wärmerückgewinnung aus Fortluft*, VEB Verlag Technik, Berlin (1988).
- [Mas91] M. Masuda, *Economical and technological aspects of small SMES*, in: K.P. Jüngst, P. Komarek, W. Maurer (Hrsg.), *Proceedings of the first international SMES Workshop (Karlsruhe)*, Vol 2, pp. 364-384 (1991).
- [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).
- [Mor00] R. Morrison, *Optimizing Exergy-Services Supply Networks for Sustainability*, Master Thesis, University of Otago, Dunedin, New Zealand (2000).
- [Mun80] H. Munser, *Fernwärmeerzeugung*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1980).

- [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).
- [Nas92] P.-M. Nast, *Dokumentation zum Programm nas511*, (unveröffentlicht), DLR, Stuttgart (1992).
- [Neu77] K. Neumann, *Operations Research Verfahren, Band II, Dynamische Optimierung, Lagerhaltung, Simulation, Warteschlangen*, Carl Hauser Verlag, München, Wien (1977).
- [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).
- [Pau91] R. Paul, *Technik und Emissionen der Energiespartechniken*, in: VDI (Hrsg.): „Möglichkeiten und Grenzen der Kraft-Wärme-Kopplung“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 51 - 86 (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, *Energiebericht 2010*, PROGNOSE AG, Stuttgart (1992).
- [Rec95] Recknagel, Sprenger, Schramek, *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, Oldenbourg, München, Wien, 489 (1995).
- [Ree79] J. Reeker, P. Kraneburg, *Haustechnik*, Werner-Verlag, Düsseldorf (1979).
- [Rei85] F. Reif, *Statistische Physik und Theorie der Wärme*, de Gruyter, Berlin, New York (1985).
- [Res93] W. Rissing, *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).

- [Rie91] H.-J. Riechert, P. Obert, *Rationelle Energieversorgung durch Kombination von Solaranlagen und Block-Heizkraftwerk mit saisonalem Groß-Wärmespeicher*, Steinhilber Transferzentrum Energietechnik an der FH Ulm (1991)
- [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).
- [RWE83] RWE (ed.), *Wärmepumpeneinsatz in Industrie und Gewerbe*, RWE Verfahrensinformation, RWE Informationszentrum (1983).
- [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, *Rechnagel-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).
- [Sta94] Statistisches Bundesamt (Hrsg.), *Statistisches Jahrbuch 1994*, Metzler-Poeschel-Verlag, Wiesbaden (1994).
- [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. Tröscher, *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).
- [VDI88] VDI (Hrsg.), *Wärmetechnische Arbeitsmappe*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1988).
- [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 (1984).
- [Wal87] H. Walther, G. Nagler, *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).
- [Win91] 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).