

Herausgeber:

Thorsten Claus/ Wieland Appelfeller/ Wolfgang Buchholz/ Bernd Lemser

Patricia Stange

**Methodik für das Engineering
von Steuerungen und Regelungen
an Verbund-Gebäudeheizungsanlagen
mit verschiedenen Wärmequellen
zur Optimierung des Energieverbrauchs**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Patricia Stange

**Methodik für das Engineering von Steuerungen und Regelungen
an Verbund-Gebäudeheizungsanlagen mit verschiedenen
Wärmequellen zur Optimierung des Energieverbrauchs**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010

Zugl.: (IHI) Zittau, Univ., Diss., 2010

978-3-86955-452-5

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-452-5

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Zittau in der Arbeitsgruppe MaxXControl, welche von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. C. Rähder geleitet wird. Ihm gilt mein herzlicher Dank für die fachliche und mentale Unterstützung während der gesamten Promotionszeit. Seine beständige Unterstützung hat die Arbeit wesentlich geprägt.

Herrn Prof. Dr. rer. pol. habil. T. Claus danke ich für die inspirierenden Gespräche, welche maßgeblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Felsmann für die Übernahme des Drittgutachtens sowie dessen wertvolle Hinweise herzlich bedanken.

Meinen Arbeitskollegen Stefan, Thomas, Carsten und Ronny möchte ich für die vielen ermunternden Gespräche und die fachliche Unterstützung danken.

Ebenso bedanke ich mich bei den Doktoranden des Promotionsnetzwerkes des IHI Zittau, welche in den regelmäßigen Treffen mir immer wieder neue Impulse gegeben haben.

Ich bedanke mich bei meinem Mann Roman sowie meiner Familie für das entgegengebrachte Verständnis in den vergangenen 3 Jahren. Nur so war es für mich möglich, die Arbeit in dieser Gestalt zu erstellen.

Patricia Stange

Geleitwort

Ein hinsichtlich des Verbrauchs und der Kosten energetischer Ressourcen optimaler Betrieb komplexer Wärmeversorgungsanlagen mit verschiedenen Versorgungskomponenten und zeitlich wechselnden Verfügbarkeiten verlangt eine qualifizierte Koordination des Anlageneinsatzes.

Das vorliegende Buch beschreibt eine Methodik, durch deren Anwendung es möglich ist, eine optimale Koordination von alternativ nutzbaren Wärmequellen durch einen Anlagenbetrieb selbsttätig optimierende leittechnische Funktion zu erreichen. In der von der Verfasserin vorgelegten Dissertation zum Thema „Methodik für das Engineering von Steuerungen und Regelungen an Verbund-Gebäudeheizungsanlagen mit verschiedenen Wärmequellen zur Optimierung des Energieverbrauchs“ wird in schlüssiger Form ein Algorithmus vorgestellt, durch dessen Nutzung eine Lösung für die sehr anspruchsvolle Optimierungsaufgabe als leittechnisches System umgesetzt werden kann.

Die besondere Schwierigkeit der Optimierung komplexer Prozesse ist die praktikable Bestimmung eines Algorithmus, der mit ingenieurmäßigen Voraussetzungen die numerisch umsetzbare Formulierung gestattet.

Durch die zweckgerichtete Zerlegung der Optimierungsaufgabe in einen technologischen und einen betriebswirtschaftlichen Teil ist es leicht, die Methodik auf andere Aufgaben der optimalen Koordination komplexer technologischer Anlagen zu übertragen.

Die Verfasserin leistet mit ihrer Arbeit einen wichtigen und sehr nützlichen Beitrag zur Schließung einer derzeitig noch erkennbaren Lücke im Leistungsspektrum moderner Leittechnik.

Indem sowohl die modellbasierte Simulation impliziert wird als auch die Einzelschritte des iterativen Optimierungsprozesses visualisiert werden, sind die Ergebnisse der numerischen Systemarbeit transparent.

Das Buch wird für viele wissenschaftliche wie industrienahen Aufgaben der komplexen Optimierung hilfreiche Anregungen geben.

Prof.Dr.-Ing. habil. Christian Rähder

Prof. Dr. rer.pol. habil. Thorsten Claus

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------|
| Geleitwort | II |
| Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen | V |
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Tabellenverzeichnis | X |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Problemanalyse | 6 |
| 2.1 Komplexe Prozesse, Gegenstand und Begriffe | 6 |
| 2.2 Verbundheizungsanlagen | 9 |
| 2.3 Zielstellung | 12 |
| 3 Prozessmodelle | 16 |
| 3.1 Erläuterung zur Modellverwendung | 16 |
| 3.2 Simulationsmodelle | 18 |
| 3.2.1 Wärmespeicher | 18 |
| 3.2.2 Wärmesenke | 20 |
| 3.2.3 Wärmequellen | 25 |
| 3.3 Simulations-Software MaxXControl® | 37 |
| 3.4 Einbeziehen der Wetterprognose | 37 |
| 3.5 Prozesskennfelder der Wärmequellen | 40 |
| 3.6 Anforderungen an die Optimierungsmethode | 42 |
| 4 Optimierungsmethoden | 45 |
| 4.1 Allgemeines | 45 |
| 4.2 Vollständige Enumeration | 46 |
| 4.3 Optimierungsmethoden zur Lösung des Zielfunktionalis | 47 |
| 4.4 Dynamische Programmierung | 49 |
| 5 Optimierungsmethodik für Verbundheizungsanlagen | 54 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Aufbau und Gliederung der Methodik | 54 |
| 5.2 | Technologische Optimierung | 55 |
| 5.2.1 | Bestimmung des Speichersollwertverlaufes..... | 56 |
| 5.2.2 | Bestimmung des Speicheristwertverlaufes..... | 57 |
| 5.2.3 | Bestimmung der dem Speicher zuzuführenden Energiemenge | 58 |
| 5.3 | Betriebswirtschaftliche Optimierung..... | 59 |
| 5.3.1 | Allgemeines..... | 59 |
| 5.3.2 | Nutzung der Dynamischen Programmierung | 59 |
| 5.4 | Zusammenwirken der technologischen und betriebswirtschaftlichen Optimierung | 67 |
| 6 | Anwendung und Bewertung der Methodik | 69 |
| 6.1 | Beschreibung der Beispielanlage..... | 69 |
| 6.2 | Anwendung der Optimierungsmethodik | 70 |
| 6.3 | Gegenüberstellung der entwickelten Methodik und des praktizierten Konzeptes..... | 85 |
| 6.4 | Bewertung der Methodik | 90 |
| 7 | Schlussfolgerungen | 91 |
| 7.1 | Generalisierung der Methodennutzung..... | 91 |
| 7.2 | Zusammenfassung und Ausblick | 92 |
| | Literaturverzeichnis | 96 |
| | Anhang A..... | 103 |
| | Anhang B..... | 135 |
| | Anhang C..... | 141 |

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Großbuchstaben:

| | | |
|-----------|---------------------------------|--|
| A | Fläche | [m ²] |
| C | Hydraulischer Widerstand | [Pa/(m ³ /h) ²] |
| H_u | Unterer Heizwert | [J/kg] |
| I | Stromstärke | [A] |
| K | Betriebskosten, Konstante | [€] |
| N | Stufenanzahl | |
| P | Elektrische Leistung | [kW] |
| Q | Energie | [kWh] |
| \dot{Q} | Leistung | [kW] |
| RSW | Raumsollwert | [°C] |
| \dot{s} | Globalstrahlung | [W/ m ²] |
| T | Zeitschrittlänge, Zeitkonstante | [min], [s] |
| U | Spannung | [V] |
| \dot{V} | Volumenstrom | [m ³ /h] |
| Z | Zielfunktionswert | |

Kleinbuchstaben:

| | | |
|-----------|----------------------------|----------------------|
| c_p | Spezifische Wärmekapazität | [J/kg K] |
| d | Durchmesser | [m] |
| g | Erdbeschleunigung | [m/s ²] |
| h | Höhe | [m] |
| k | Wärmedurchgangswiderstand | [W/m ² K] |
| m | Masse | [kg] |
| \dot{m} | Massenstrom | [kg/h] |
| n | Optimierungszeitraum | |

| | | |
|-----------------|-------------------------|------|
| \underline{u} | Stellgrößenvektor | |
| u_k | Entscheidung in Stufe k | |
| x | Steuervariable | |
| x_o | Anfangszustand | |
| x_k | Zustand in Stufe k | |
| x_N | Endzustand | |
| y | Steuervariable | |
| Δp | Druckdifferenz | [Pa] |

Griechische Formelzeichen:

| | | |
|-------------|--------------------|----------------------|
| η | Wirkungsgrad | |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | [W/m K] |
| ρ | Dichte | [kg/m ³] |
| ϑ | Temperatur | [°C] |

Indizes:

| | |
|-----|--------------------------------|
| A | außen |
| ab | abgeführt |
| Abs | Absorber |
| Br | Brennstoff |
| BW | Trinkwarmwasser (Brauchwasser) |
| C | Kondensation |
| D | Dämmung |
| E | Einsatz |
| el | elektrisch |
| F | Feuerung |
| Fl | Fluid |
| ges | gesamt |
| HK | Heizkreis |
| HR | Heizraum |

| | |
|------|--------------------------|
| i | innen |
| ist | Istwert |
| j | Laufvariable |
| k | Stufe |
| K | Heizkessel |
| Kond | Kondensator |
| KW | Kaltwasser |
| L | Luft |
| m | Anzahl der Wärmeerzeuger |
| N | Norm |
| P | Pumpe |
| R | Raum |
| RL | Rücklauf |
| RSW | Raumsollwert |
| Sol | Solaranlage |
| soll | Sollwert |
| Sp | Wärmespeicher |
| St | Stahl |
| VD | Verdichter |
| VL | Vorlauf |
| W | Wasser |
| WE | Wärmeerzeuger |
| WP | Wärmepumpe |
| WT | Wärmeübertrager |
| zu | zugeführt |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Zusammenwirken der Einflussgrößen des Prozesses | 4 |
| Abbildung 1-2: Hierarchisches Prozessrechensystem mit Kopplung zum Prozess | 5 |
| Abbildung 2-1: Beispiel einer komplexen Prozessstruktur | 7 |
| Abbildung 2-2: Allgemeiner einschleifiger Regelkreis | 8 |
| Abbildung 2-3: Leittechnische Systemstruktur komplexer Prozesse | 8 |
| Abbildung 2-4: Anlagenschema einer Verbundanlage..... | 10 |
| Abbildung 2-5: Wirkzusammenhänge bei Verbundheizungsanlagen..... | 11 |
| Abbildung 2-6: Ebenen-Modell einer Verbundanlage | 13 |
| Abbildung 2-7: Komplexer Regelkreis der Betriebsführung einer Verbundanlage | 14 |
| Abbildung 3-1: Schnittstellen zwischen den Teilprozessmodellen..... | 17 |
| Abbildung 3-2: Aufbauschema des modellierten Wärmespeichers..... | 19 |
| Abbildung 3-3: Schema der Heizkreisabnahme mit hydraulischer Einbindung..... | 21 |
| Abbildung 3-4: Energieflussschema Wärmeübertrager Speicher-Heizkreis | 22 |
| Abbildung 3-5: Prozessstruktur des Raummodells | 24 |
| Abbildung 3-6: Wärmepumpenschema mit Einbindung in den Wärmespeicher | 25 |
| Abbildung 3-7: Log p,h-Diagramm für R407C mit Arbeitsbereich [37] | 26 |
| Abbildung 3-8: Energieflussschema Wärmeübertrager Kondensator | 28 |
| Abbildung 3-9: Energieflussschema Wärmeübertrager Wärmepumpe-Speicher..... | 29 |
| Abbildung 3-10: Energieflussschema des Heizkreismodells..... | 31 |
| Abbildung 3-11: Energieflussschema des Solaranlagenmodells | 34 |
| Abbildung 3-12: Außenlufttemperaturkennfeld | 39 |
| Abbildung 3-13: Globalstrahlungskennfeld | 40 |
| Abbildung 3-14: Prozesskennfelder der Wärmeerzeuger | 41 |
| Abbildung 3-15: Kennfeld des Heizkessels..... | 42 |
| Abbildung 3-16: Wechselwirkungen der Komponenten der Verbundanlage..... | 43 |
| Abbildung 4-1: Klassifizierung von Optimierungsmethoden..... | 48 |
| Abbildung 4-2: Untergliederung der Funktionenoptimierung..... | 48 |
| Abbildung 4-3: Dekomposition eines mehrstufigen Entscheidungsprozesses | 51 |
| Abbildung 5-1: Darstellung der Optimierungsmethodik am Regelkreis..... | 55 |
| Abbildung 5-2: Dekomposition nach diskreten Zeitschritten | 60 |
| Abbildung 5-3: Dekomposition nach der Anzahl der Wärmequellen..... | 62 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 6-1: Dynamischer Verlauf des Vorlauftemperatursollwertes | 71 |
| Abbildung 6-2: Verlauf durch die Heizkreisanforderungen..... | 72 |
| Abbildung 6-3: Speicherentzugsleistung im Betrachtungszeitraum | 72 |
| Abbildung 6-4: Dynamischer Speichersollwertverlauf..... | 73 |
| Abbildung 6-5: Verlauf der zuzuführenden Energie | 74 |
| Abbildung 6-6: Verlauf nach betriebswirtschaftlicher Optimierung (k=19) | 79 |
| Abbildung 6-7: Verlauf nach betriebswirtschaftlicher Optimierung (k=62) | 80 |
| Abbildung 6-8: Verlauf nach betriebswirtschaftlicher Optimierung (k=64) | 81 |
| Abbildung 6-9: Verlauf der Speicherenergie nach der Optimierung für 24h..... | 83 |
| Abbildung 6-10: Speichertemperaturverlauf für die nächsten Zeitschritte | 84 |
| Abbildung 6-11: Speicherladezustand verursacht durch konventionelles Regelungskonzept..... | 86 |
| Abbildung 6-12: Eingebrachte Energiemengen durch konventionelle Regelung | 86 |
| Abbildung 6-13: Speicherladezustand durch Anwendung der entwickelten Methodik | 88 |
| Abbildung 6-14: Eingebrachte Energiemengen durch Nutzung der entwickelten Methodik..... | 89 |
| Abbildung 7-1: Prozesszusammenhänge | 92 |
| Abbildung 7-2: Grafische Zusammenfassung der entwickelten Methodik..... | 94 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 3-1: Außenlufttemperaturdaten in Abhängigkeit von Monat und Uhrzeit..... | 39 |
| Tabelle 5-1: Rekursionstabelle | 64 |
| Tabelle 6-1: Technologische Startwerte der Optimierung..... | 69 |
| Tabelle 6-2: Allgemeinen und betriebswirtschaftlichen Optimierungswerte | 70 |
| Tabelle 6-3: Mindestschaltzeiten und Sperrzeiten der Wärmeerzeuger | 70 |
| Tabelle 6-4: Rekursionstabelle für Zeitschritt 19..... | 77 |
| Tabelle 6-5: Rekursionstabelle für Zeitschritt 62..... | 79 |
| Tabelle 6-6: Rekursionstabelle für Zeitschritt 64..... | 80 |
| Tabelle 6-7: Rekursionstabelle für Zeitschritt 65..... | 82 |
| Tabelle 6-8: Einsatz der Wärmeerzeuger nach konventionellem Regelungskonzept | 87 |

1 Einleitung

Der wirtschaftliche Energieverbrauch ist eine wichtige Aufgabe der heutigen Gesellschaft, um die Nachhaltigkeit in Bezug auf ökologische, ökonomische und soziale Gesichtspunkte zu wahren. Aus dem Ziel des effizienten Wirtschaftens zugunsten nachfolgender Generationen lassen sich zwei Problemfelder ableiten. Zum einen die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und zum anderen die Minimierung des Energieverbrauchs aus fossilen Primärenergieträgern.

Der größte Anteil am Gesamtenergieverbrauch im Haushalt entfällt auf die Bereitstellung von Wärme für Heizung und Trinkwarmwasserbereitung [1], sodass auf diesen Bereich ein hohes Optimierungspotential entfällt. Für eine umweltgerechte Energieversorgung sind regenerative Energien zu nutzen, welche in der Lage sind einen erheblichen Beitrag zur Verminderung der Treibhausgase zu leisten [2]. Die fortschreitende Verknappung fossiler Primärenergieträger [3], die mit einer enormen Kostensteigerung einher geht, führt zusätzlich auf eine zunehmende Nutzung von regenerativen Energiequellen [4].

Aufgrund der hohen Optimierungspotentiale in der Gebäudeheizungstechnik und der verstärkten Nutzung von regenerativen Energiequellen sind die Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit auf diese Bereiche gelegt. Es ist eine Methodik für die selbsttätige optimale Betriebsführung, das sogenannte Engineering von Steuerungen und Regelungen, für Wärmeversorgungsanlagen als Hauptenergieverbraucher im Bereich der Gebäudetechnik zu entwickeln. Das Ziel ist es, die entstehenden Betriebskosten durch die Nutzung der Methodik zu minimieren. Die Wirtschaftlichkeit beim Betrieb derartiger Anlagen ist durch eine Verringerung des Energieverbrauches zu verbessern.

Die zu entwickelnde Methodik ist am Beispiel einer Wärmeversorgungsanlage darzustellen, welche aus einer Kombination von regenerativen und konventionellen Wärmeerzeugern im Verbund und einem Wärmespeicher besteht. Diese Anlagen, auch Kombinationsheizungsanlagen oder Verbundanlagen genannt, sind in der Praxis stark vertreten [5]. Die Berücksichtigung von Investitionskosten derartiger Anlagen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Der interessierte Leser sei auf die Literatur [6] und [7] verwiesen.

Die zu optimierende Prozessführung der Heizungsanlage steht in unmittelbarem Zusammenhang mit nutzbaren leittechnischen Einrichtungen, beziehungsweise deren Funktionen. Sie dient maßgeblich dazu in reproduzierender Arbeitsweise für wiederkehrende Prozesszustände, optimale Bedingungen zu sichern. Für die automatische Informationsverarbeitung ist geeignete Prozessleittechnik zu verwenden, welche durch Erfassungssysteme selbsttätig Messdaten in die umgesetzten Algorithmen einbezieht.

Das Ziel der automatischen Betriebsführung von Verbundanlagen, ist die Minimierung der Betriebskosten. Diese resultieren aus dem Einsatz der Wärmeerzeuger, im Speziellen aus der dadurch verursachten Brennstoffnutzung beziehungsweise dem Verbrauch an elektrischer Energie. Der Wärmeerzeugereinsatz bewirkt dabei gleichzeitig eine Anhebung der Wärmespeichertemperatur auf ein höheres Energieniveau. Der Wärmespeicher ist damit in der Lage, die Heizkreisanforderungen sowie die Trinkwarmwasserbereitstellung umzusetzen. Es ist gewünscht, die regenerativen Energiequellen vorrangig, je nach Verfügbarkeit einzusetzen. Der Einsatz der konventionellen Energiequellen ist aufgrund der hohen Kostenverursachung zu senken.

Aktuell regeln autarke Leitgeräte die einzelnen Komponenten der Verbundanlage separat. Teilweise stammen die Leitgeräte von verschiedenen Herstellern, da die Anlagen in der Regel historisch gewachsen sind. Es ist ihnen nicht möglich, prädiktiv auf Störwirkungen, verursacht durch ein anderes Leitgerät zu reagieren. Lediglich bei auftretenden Störwirkungen, können sie durch Veränderung der Betriebsparameter entgegenwirken. Damit erfolgt keine operative Koordination der Wärmeerzeuger, wobei vereinzelt jedoch eine Zeitsteuerung umgesetzt ist.

Die Prozessführung ist aufgrund der fehlenden Koordination der Betriebsparameter der Wärmeerzeuger untereinander nicht optimal zu realisieren. Dies ist zum einen mit der fehlenden Informationsverarbeitung von prognostizierten Wetterdaten zu begründen, welche zum Fehlen einer vorausschauenden Planung der Verfügbarkeit von regenerativen Quellen führt. Zum anderen erfolgt kein Bezug der Wärmespeichertemperatur zu den realen Nutzeranforderungen. Dies ist jedoch von entscheidendem Einfluss, da der Wärmebedarf von Gebäuden in Abhängigkeit des

Lüftungsverhaltens, dem Nutzerverhalten und den Wetterbedingungen um bis zu 300% schwankt (100% Wärmebedarf entspricht dem Normwärmebedarf) [8].

Um die Prozessführung zu optimieren, ist eine detaillierte Prozessanalyse durchzuführen. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, die ablaufenden internen und externen Prozesse zu erfassen und zu bewerten sowie bestehende Probleme aufzudecken. Idealerweise mündet die Analyse in der Schaffung eines Prozessabbildes in Form eines deskriptiv erstellten Modells.

Voraussetzung für die Bewertung eines Prozesses ist die Definition einer Bewertungsfunktion (Zielfunktion) [9]. Bei der Optimierung der Betriebsführung von Verbundanlagen ist diese durch die entstehenden Betriebskosten erklärt. Sie setzt sich aus den Betriebskosten verursacht durch die einzelnen Wärmeerzeuger additiv zusammen und ist durch technische und technologische Prozesszusammenhänge beschränkt. Die definierten Beschränkungen lassen sich durch das erstellte Prozessmodell in Form von Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen mathematisch beschreiben [10].

Eine Herausforderung bei der Optimierung ist die Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Wärmeerzeuger untereinander. Diese ergibt sich aufgrund der Energieeinspeisung über Wärmeübertrager und der resultierenden Variation der Energieeinspeisungs-Wirkungsgrade je nach Speichertemperatur. Ist diese sehr hoch, verringert sich der Wirkungsgrad im Gegensatz zu einer Einspeisung in einen kühleren Speicher.

Eine andere Hürde ergibt sich durch das Zusammenwirken verschiedenster Einflussgrößen auf die Betriebsführung des Prozesses [11]. So nehmen das Klima und die Nutzeranforderungen (in der Grafik als Nutzer gekennzeichnet) zusammen mit der Wärmeverteilung und –Abgabe Einfluss auf das Gebäude mit seinen bauphysikalischen Besonderheiten. Das Klima beeinflusst weiterhin die regenerativen Wärmeerzeuger (wie zum Beispiel die Solaranlage) und verändert deren Verfügbarkeit. Die Betriebskosten variieren in Abhängigkeit aller beschriebenen Einflussgrößen und bilden die zentrale Größe in dem vernetzten, mehrfach rückgekoppelten System, welches in Abbildung 1-1 gezeigt ist.

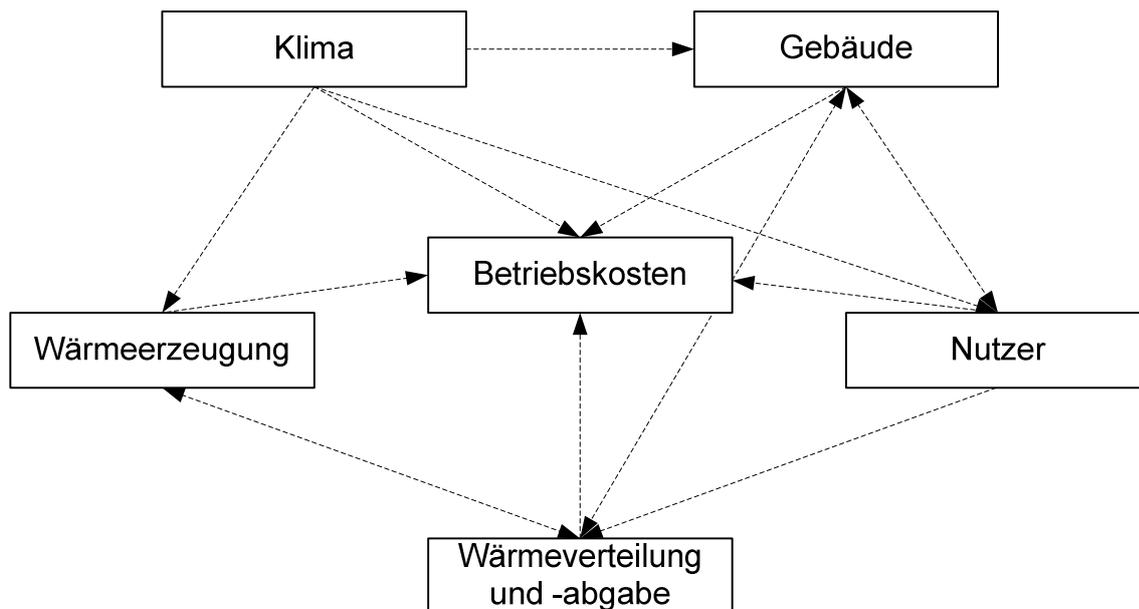


Abbildung 1-1: Zusammenwirken der Einflussgrößen des Prozesses

Die beschriebenen Einflussgrößen treten teilweise stochastisch auf, sodass operative Korrekturen der Betriebsführung unter Beachtung der dynamischen Systemeigenschaften, wie zum Beispiel der Speicherfähigkeit des Gebäudes und innerhalb der Heizungsanlagen erforderlich sind. Dies begründet die Notwendigkeit, in dieser Arbeit vorgesehene Untersuchungen auf Basis von dynamischen Prozessmodellen zu führen.

Das Abbilden der Zusammenhänge im dynamischen Prozessmodell ermöglicht deren Bewertung. Dadurch ist das Ziel, den kostengünstigsten Wärmeerzeuger vorrangig einzusetzen, zu erreichen. Der Einsatz von fossilen Energiequellen ist aufgrund der hohen Kostenverursachung zu minimieren, womit die Betriebskosten gering zu halten sind.

Eine gezielte vorausschauende Koordination der Wärmeerzeuger sowie eine Prognose über den real benötigten Wärmebedarf führen zu einer Minimierung der Speichertemperatur und damit der Verbesserung der Einspeisungs-Wirkungsgrade. Die Lastprognose ist durch die Erstellung eines detaillierten Prozessmodells der Verbundanlage und des Wärmeverbrauches zu erreichen [12]. Die Lösung der definierten Zielfunktion führt auf die minimierten Betriebskosten sowie die dazugehörigen optimalen Betriebsparameter der Wärmeerzeuger. Aufgrund der mathematischen Struktur der Zielfunktion und der dazugehörigen technisch und technologisch bedingten Restriktionen ist als Lösungsmethode die dynamische Programmierung zu wählen.

Die zu entwickelnde Optimierungsmethodik ist in einem hierarchischen Prozessrechensystem umzusetzen. Dieses ist definiert als ein System bei dem mehrere untergeordnete Prozessrechensysteme parallel mit dem Prozess und einem übergeordneten System gekoppelt sind. Dieses übergeordnete System in welches die Methodik zu implementieren ist, koordiniert die Arbeitsweise der Untergeordneten [13]. Die Besonderheit bei dem Einsatz der Methodik ist die zwingend erforderliche Kopplung zwischen dem übergeordneten System und dem Prozess mit der Messdatenerfassung, wie in Abbildung 1-2 dargestellt.

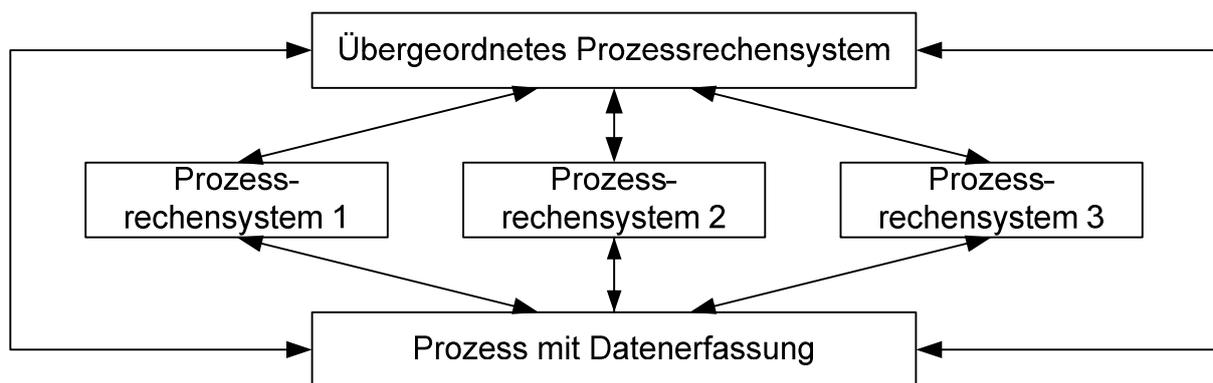


Abbildung 1-2: Hierarchisches Prozessrechensystem mit Kopplung zum Prozess

Im folgenden Abschnitt der Arbeit erfolgt eine detaillierte Problemanalyse. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung des Prozessmodells, welches zur Darstellung und Bewertung der Prozesszusammenhänge sowie der wirkenden Einflussgrößen notwendig ist. Da in der vorliegenden Arbeit ein modellbasierter Forschungsansatz gewählt wurde, ist dieser Abschnitt sehr detailliert gearbeitet. Es folgt eine allgemeine Zusammenfassung von Optimierungsmethoden und die Begründung, warum die dynamische Programmierung die einzige Möglichkeit zur Lösung des Zielfunktional darstellt. Die Vorstellung der entwickelten Methodik, welche aus zwei Teilen besteht, erfolgt in Abschnitt 5. Im darauffolgenden Abschnitt ist die Anwendung und Bewertung der Methodik beschrieben, was im letzten Abschnitt für die Generalisierung der Methodennutzung verwendet wird. Dabei ist im Speziellen auf weitere Anwendungsmöglichkeiten der Methodik hingewiesen und am Beispiel erläutert.

2 Problemanalyse

2.1 Komplexe Prozesse, Gegenstand und Begriffe

Komplexe Prozesse besitzen eine vernetzte Prozessstruktur, welche die Kopplung der verschiedenen Systemkomponenten beschreibt. In technischen Anlagen besitzt jede Systemkomponente eine oder mehrere Input-Faktoren (Einflüsse auf den Eingang der Komponente) und Output-Faktoren (auftretende Wirkungen am Ausgang der Systemkomponente). Diese treten zumeist in Form physikalischer Größen und Koeffizienten auf und genügen physikalisch und mathematisch erklärbaren Zusammenhängen¹ [14].

Die vorgelegte Arbeit widmet sich einer Methodik für die Optimierung der Betriebsführung komplexer Prozesse. Damit ein komplexer Prozess in seiner Gesamtheit optimal im Sinne einer technologischen, ökonomischen oder ökologischen Zielvorgabe arbeitet, müssen alle Komponenten mit einer dieser Zielstellung dienlichen Arbeitsweise eingesetzt werden. Die Beschreibung der optimalen Betriebsführung erfolgt durch eine Zielfunktion oder ein Zielfunktional.

Zur Bestimmung der Betriebsführungsvorschrift für einen komplexen Prozess sind daher die Eigenschaften der Systemkomponenten ebenso zu ermitteln, wie deren Kopplungsbeziehungen untereinander. Das führt dazu die Komplexität sowohl in Form der technischen Struktur als auch deren physikalischen Wirkungen und Zusammenhänge zu formalisieren.

Die Komplexität entsteht neben einer möglichen zeitabhängigen Verfügbarkeit von Faktoren durch die vorhandenen Wechselwirkungen. Neben einseitig gerichteten Prozessbeeinflussungen, treten auch vernetzte Wirkzusammenhänge auf.

Beispielsweise lassen sich mehrere Output-Faktoren zu einem Input-Faktor einer anderen Systemkomponente addieren. Es kann auch zu Rückkopplungen zwischen den Komponenten kommen. Dies ist dann der Fall, wenn der Output einer Systemkomponente als Input einer anderen auftritt. Deren Output stellt wiederum einen Input der ersten Komponente dar. Diese Rückkopplungen können weiter

¹ System, Struktur und Prozess sind nach VDI 3633 Blatt 1 Seite 3 definiert

vernetzt sein, indem mehrere Komponenten miteinander rückgekoppelt wirken. In Abbildung 2-1 ist ein Beispiel für eine komplexe Prozessstruktur dargestellt.

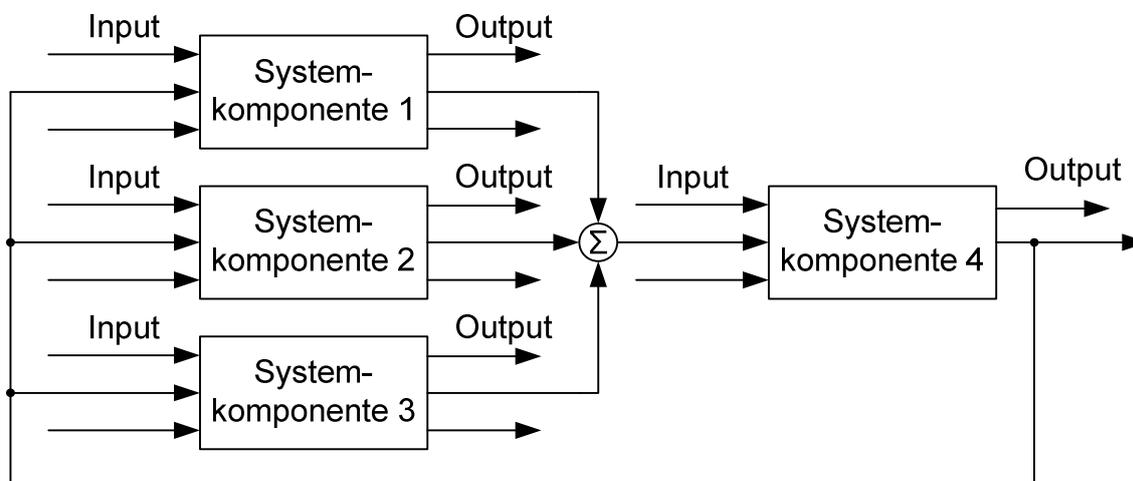


Abbildung 2-1: Beispiel einer komplexen Prozessstruktur

Die optimale Prozessführung erfolgt mit dem Ziel, einen gewünschten Output in einer vorgegebenen Zeit und mit einer hohen Effizienz zu erzeugen. Sie ist als effizient² zu bezeichnen, wenn eine vorgegebene Wirkung (zum Beispiel hoher Output) mit möglichst geringem Aufwand (geringer Inputmenge) zu erreichen ist [15].

Das Ziel der optimierten Prozessführung ist es demzufolge, einen gewünschten Output nach einem definierten Gütekriterium mit möglichst geringem Einsatz an Input zu erhalten. Dies ist zu erreichen, indem andere nicht erwünschte Output-Faktoren wie zum Beispiel Verluste minimal sind.

Die automatische Betriebsführung hat zum einen die Aufgabe, die zeitabhängig veränderlichen Sollwerte auf Basis bekannter Bedingungen (zum Beispiel Umweltzustände) für die Systemkomponenten zu bestimmen. Zum anderen sind bei Abweichungen der Bedingungen (z.B. durch Störungen) und bei Nichterreichung von Sollwerten durch die Istwerte, die berechneten Stellwirkungen zu korrigieren, was wegen der Rückkopplung wie bei einem Regelkreis durch eine Struktur gemäß Abbildung 2-2 zu erklären ist.

² Effizienz definiert nach DIN EN ISO 9000

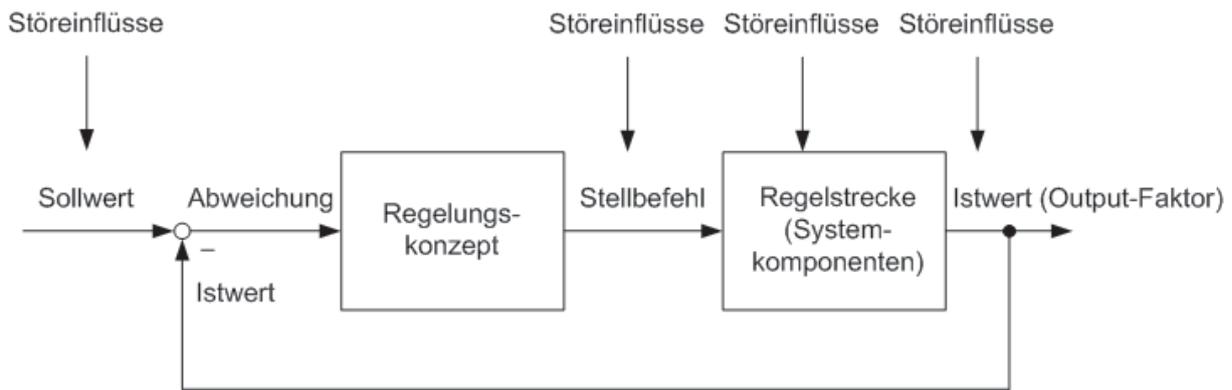


Abbildung 2-2: Allgemeiner einschleifiger Regelkreis

Das Sicherstellen der Einhaltung der zeitabhängigen Sollwerte erfolgt durch die Bewertung der Abweichung aus Sollwert und Istwert in einem geeigneten Regelungskonzept und dem daraus abgeleiteten Stellbefehl. Dieser ist an die entsprechenden Prozesskomponenten zu übergeben, welche wiederum eine Rückmeldung über den aktuellen Wert des Output-Faktors (Istwertes) liefern. Die dynamische Störkompensation gleicht auf den Prozess wirkende Störeinflüsse aus, welche an verschiedenen Stellen des Prozesses auftreten können.

Durch die vorhandenen Rückkopplungen in komplexen zeitabhängigen Prozessen ist die Prozessführung erheblich erschwert. Neben Systemkomponenten, welche indirekt durch die Prozesswirkungen der anderen Komponenten geführt werden, existieren in derartigen Prozessen mehrere Komponenten mit autarken Leitgeräten³ [16]. Diese berechnen die statischen Sollwerte für die jeweilige Komponente selbsttätig. Die leittechnische Systemstruktur ist beispielhaft in Abbildung 2-3 dargestellt.

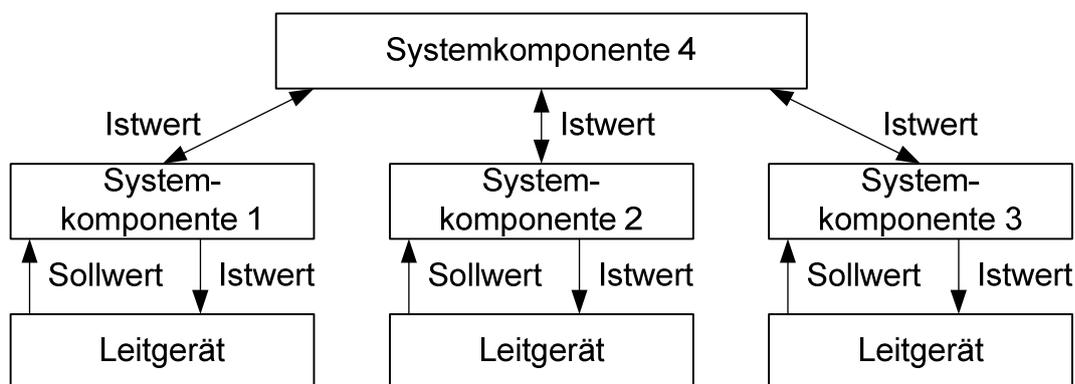


Abbildung 2-3: Leittechnische Systemstruktur komplexer Prozesse

³ Erkenntnis nach einem Experteninterview

Um den Prozess nach einem definierten Gütekriterium zu optimieren, sind die Sollwerte der einzelnen Komponenten aufeinander abzustimmen. Damit ist zu erreichen, dass alle auf die Komponenten wirkenden Input-Faktoren in der Informationsverarbeitungsstrategie berücksichtigt und eintretende Störwirkungen schon vor ihrer Reaktion auf den Prozess ausgeglichen werden.

In deutschen Haushalten findet 90% der Energie Verwendung für die Raumluft- und Trinkwarmwassererwärmung [17]. Der Handlungsbedarf bei der Optimierung von Heizungsanlagen ist durch den Zwang zur Einhaltung der gesetzlichen Regelungen, wie der Energieeinsparverordnung (EnEV) und dem Energieeinsparungsgesetz (EnEG) zu erklären.

Eine Handlungsvariante ist die Erneuerung der Heizungstechnik, welche jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Eine Möglichkeit mit geringeren Investitionskosten bei welcher gleichzeitig erhebliche Einspareffekte zu erzielen sind, ist die Optimierung der Prozessführung bestehender Anlagen.

Durch eine verbesserte Prozessführung kann eine dynamische Anpassung der bereitgestellten Wärmeleistung an die konkreten Nutzungsbedingungen des Gebäudes erfolgen. Ebenso ist die Erschließung von Einsparpotentialen bei der Energiebereitstellung mittels leittechnischer Unterstützung möglich.

Aufgrund der vielfältigen noch nicht genutzten Möglichkeiten bei der Optimierung der Prozessführung von Wärmeversorgungsanlagen, bezieht sich die vorliegende Arbeit auf diesem Themenschwerpunkt.

2.2 Verbundheizungsanlagen

Mit Inkrafttreten des Gesetzes zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG)⁴ sind Eigentümer von neu errichteten Gebäuden zur anteiligen Nutzung erneuerbarer Energien für die Wärmeerzeugung verpflichtet. Da diese die Versorgungssicherheit nicht immer bedarfsgerecht gewährleisten können [18], kommen Verbundheizungsanlagen zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um

⁴ Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz - EEWärmeG) vom 07.08.2008

kombinierte Wärmeversorgungsanlagen, die regenerative und fossile Wärmequellen sowie einen Wärmespeicher nutzen [19]. In der vorliegenden Arbeit erfolgt eine Beschränkung auf Verbundanlagen mit den Wärmeerzeugern Solaranlage, Heizkessel und Erdwärmepumpe.

Die Nutzung des Speichers dient dem zeitlichen Ausgleich von Wärmeangebot und -nachfrage [20], womit die Möglichkeit für den Einsatz von regenerativen Energien geschaffen ist. Das zur Verfügung stehende Wärmeangebot wird durch die Wärmequelle in Form von konventionellen und regenerativen Wärmeerzeugern bereitgestellt. Die Wärmenachfrage resultiert aus der Wärmesenke, welche als Raumheizungs- und Trinkwarmwasser-Anforderungen vorliegt. Für die beschriebene Beispielanlage ist das Anlagenschema in Abbildung 2-4 dargestellt.

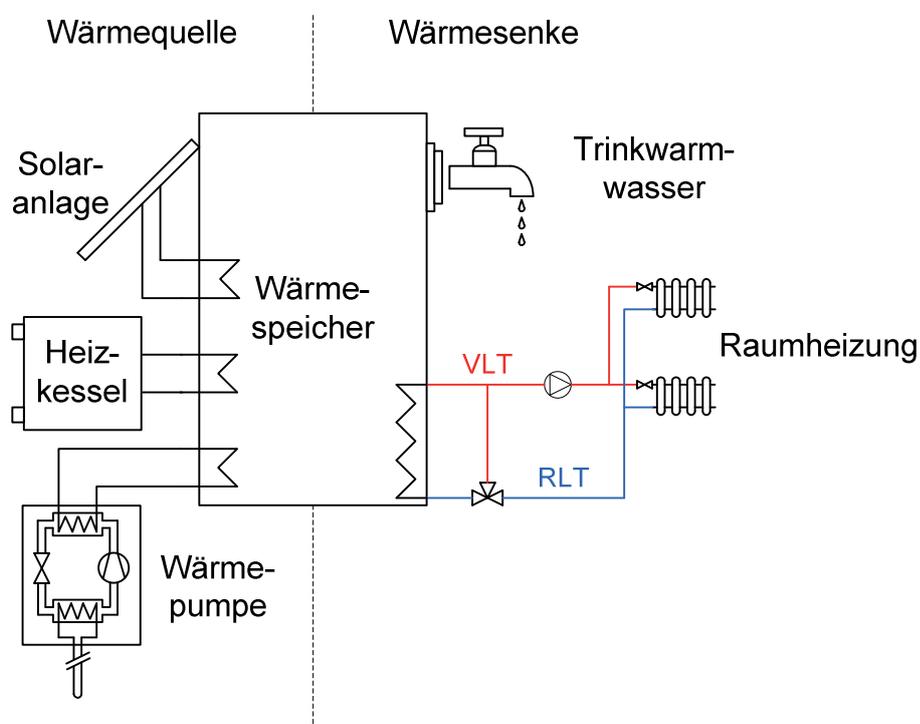


Abbildung 2-4: Anlagenschema einer Verbundanlage

Eine Betriebsführung einer Verbundheizungsanlage ist als zeitabhängiger Prozess mit den Systemkomponenten Solaranlage, Heizkessel, Erdwärmepumpe, Wärmespeicher, Raumheizungs- und Trinkwarmwasser-Abnahme anzusehen, wobei die Raumheizungs- und die Trinkwarmwasser-Abnahme als Last zusammenzufassen sind. Jede einzelne Komponente transformiert Input-Faktoren in Form von physikalischen Prozessen in Output-Faktoren. Die Input-Faktoren der Wärmeerzeuger und der Last sind als Einflussgrößen zu bezeichnen. Als Output-Faktoren liefern diese eine Wärmeleistung, welche in den Wärmespeicher

einzubringen oder aus diesem zu entnehmen sind. Damit ist der Input-Faktor für den Wärmespeicher aus den Wärmeleistungen der Wärmeerzeuger und der Last zusammengesetzt. Der Output-Faktor des Wärmespeichers ist die pro Zeiteinheit gespeicherte Energie. Die Wirkzusammenhänge sind in Abbildung 2-5 zusammengefasst.

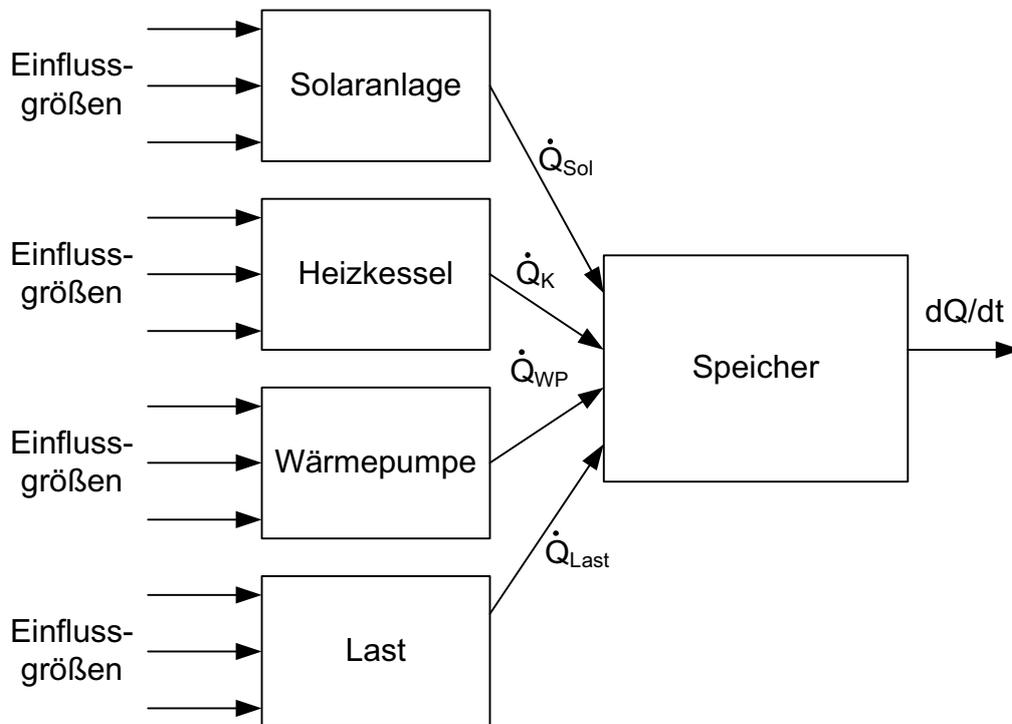


Abbildung 2-5: Wirkzusammenhänge bei Verbundheizungsanlagen

Bei den Einflussgrößen ist zwischen Parametern und Variablen zu unterscheiden. Zu den Einflussparametern gehören physikalische Größen, welche die technische Anlage näher spezifizieren. Dazu zählen Angaben über die Anlagendimension (beispielsweise die Kollektorfläche, die Kesselmasse, die Wärmeübertragerfläche zwischen Wärmepumpe und Speicher), Parameter resultierend aus den verwendeten Materialien (wie zum Beispiel der Wärmedurchgangskoeffizient, die spezifische Wärmekapazität oder die Wärmeleitfähigkeit) und andere als konstant angenommene physikalische Größen (Absorberwirkungsgrad, unterer Brennwert, Verlustfaktor des Verdichters, Lüftungsmassenstrom der Räume). Die Parameter sind zumeist aus dem Anlagendatenblatt zu entnehmen und über den gesamten Optimierungszeitraum konstant.

Unter Einflussvariablen sind zeitlich veränderliche Größen zusammengefasst, welche teilweise in Abhängigkeit von der technologischen Prozessführung variieren. Als Beispiel ist sowohl für alle Wärmeerzeuger, als auch für die Last die

Speichertemperatur zu benennen. Auf die Solaranlage haben weiterhin die Globalstrahlung und die Außenluft-Temperatur Einfluss. Wie viel Wärmeleistung der Heizkessel in den Speicher einbringen kann, ist unter anderem vom Brennstoffmassenstrom abhängig. Für die Wärmepumpe sind vom Energieversorger vorgegebene Sperrzeiten und die Kondensationsleistung des Verflüssigers zu berücksichtigen. Die aktuellen und prognostizierten Werte der Variablen sind bei der Optimierung dynamisch zu berücksichtigen. Es ist möglich, dass Beschränkungen vorliegen, welche bei der Prozessführung zu beachten sind. So darf die Speichertemperatur der Verbundanlage eine Maximaltemperatur nicht überschreiten.

Wie bereits beschrieben, stellt die Speichertemperatur einen Input-Faktor der Wärmeerzeuger dar. Diese leitet sich direkt aus dem Output-Faktor des Speichers ab. Damit existiert in der Prozessstruktur eine vernetzte Rückkopplung.

2.3 Zielstellung

Das Betreiben von Verbundheizungsanlagen erfolgt mit dem Ziel, die von den Nutzern benötigte Wärmemenge kostenoptimal bereitzustellen. Damit ist das Gütekriterium der Prozessführung in Form von zu minimierenden Betriebskosten festgelegt. Diese lassen sich als Summe aus den durch die Wärmeerzeuger resultierenden Betriebskosten berechnen (2-1).

$$K = \sum_{j=1}^m K_{WEj} \quad (2-1)$$

Als Optimierungsmaßnahmen der Prozessführung von Verbundheizungsanlagen ist entweder die Verbesserung der dynamischen Störkompensation oder eine neuartige Methode zur Berechnung der statischen Sollwerte durchzuführen.

Die Verbesserung der dynamischen Störkompensation ist durch die Entwicklung neuartiger Regelalgorithmen, wie zum Beispiel dem wissensbasiert analytischen Regelverfahren (WAR) [21] bereits in ihrer Entwicklung vorangetrieben. Daher beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Entwicklung einer Methodik für die koordinierte Berechnung der Betriebssollwerte für die Systemkomponenten.

Oftmals besitzt in der Praxis jeder Wärmeerzeuger einer Verbundanlage ein eigenes Leitgerät. Die Sollwerte für die Energieeinspeisung in den Speicher sind an diesen eingestellt oder werden autark berechnet. Damit ist eine Koordination der Leistungsparameter der verschiedenen zusammenwirkenden Wärmeerzeuger nicht oder nur schwierig erreichbar.

Um eine kostenoptimierte Zusammensetzung der durch die Erzeuger eingebrachten Wärmemengen und damit der entstehenden Betriebskosten zu erreichen, sind diese in einer den Leitgeräten übergeordneten Hierarchieebene zu bestimmen. Diese Ebene übernimmt die Koordinator-Funktion und ist daher als Energiemanager zu bezeichnen (Abbildung 2-6).

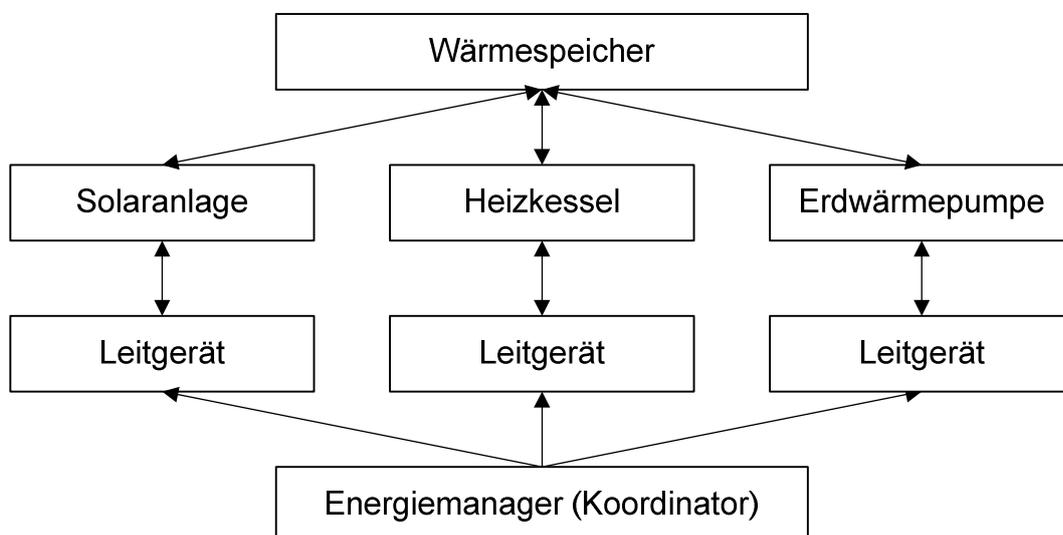


Abbildung 2-6: Ebenen-Modell einer Verbundanlage

Es ist zu beachten, dass die Nutzeranforderungen des Heizkreises und der Trinkwarmwasser-Abnahme dabei jederzeit zu decken sind. Dies ist nur zu erreichen, wenn im Wärmespeicher ein ausreichendes Energieniveau zur Verfügung gestellt wird. Daraus lassen sich einige Einflussfaktoren der Berechnung der Sollwerte direkt ableiten. Um alle Einflüsse erfassen zu können erfolgt zusätzlich eine andere Betrachtungsweise des komplexen Prozesses.

Betrachtet man die Bestimmung der optimalen Sollwerte als Regelung, so sind die aufgezeigten Wirkzusammenhänge der Verbundanlage als Regelstrecke zu bezeichnen. Die dem Speicher zuzuführende Energie ergibt sich aus dem dynamischen Sollwert-Istwert-Vergleich. Die vorausschauende Berechnung der kostenoptimalen Stellgrößenwerte (Betriebsparameter) ist in einem modellbasierten prädiktiven Regelungskonzept umzusetzen. Die Stellgrößenwerte für die einzelnen

Wärmeerzeuger sind zusammenfassend als Stellgrößenvektor \underline{u} bezeichnet. Der gesamte Regelkreis ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

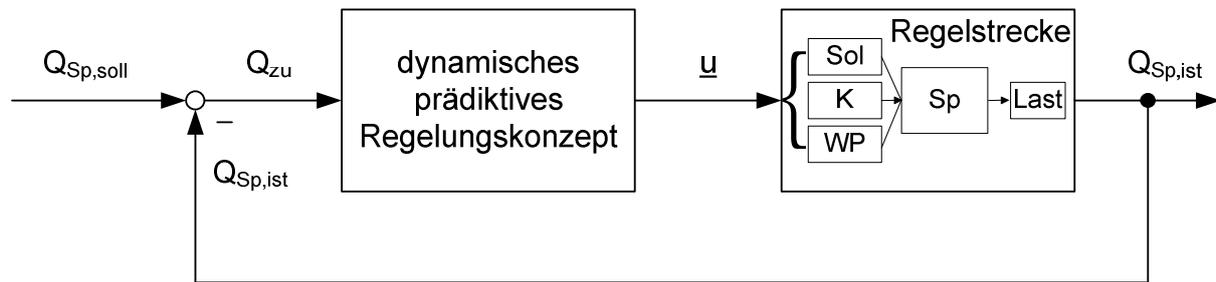


Abbildung 2-7: Komplexer Regelkreis der Betriebsführung einer Verbundanlage

Die Darstellung des Stellgrößenvektors \underline{u} erfolgt entsprechend Formel (2-2). Die Indizierung analog der Anzahl an Wärmeerzeugern (1...m).

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} u_{WE1} \\ \vdots \\ u_{WE m} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Er ist unter anderem durch die Regelungen und Steuerungen in den autarken Leitgeräten der Wärmeerzeuger begrenzt. In diesen erfolgt die Umsetzung aller Sicherheitsfunktionen, wie Mindestabschalt- oder -Zuschaltdauer und Zwangszuschaltungen. Die Leitgeräte nutzen die vom Stellgrößenvektor vorgegebenen Sollwerte im Rahmen der dynamischen Störkompensation.

Im Zeitverlauf bestimmt der Stellgrößenvektor, wann und wie lange ein Wärmeerzeuger zuzuschalten ist. Die daraus abzuleitende Zuschaltdauer gibt die durch die Stellwirkung entstehenden Kosten an. Für die einzelnen Wärmeerzeuger ergeben sich unterschiedliche Energiebereitstellungskosten. Diese sind in den Kostenfunktionen der Wärmeerzeuger dargestellt. Für den Heizkessel, die Solaranlage und die Wärmepumpe lassen sich folgende Kostenfunktionen aufstellen:

$$K_K = k_{Br} \cdot \int \dot{m}_{Br} dt + k_{el} \cdot \int P_P dt \quad (2-3)$$

$$K_{Sol} = k_{el} \cdot \int P_P dt \quad (2-4)$$

$$K_{WP} = k_{el} \cdot \int P_{VD} dt \quad (2-5)$$

Die Optimierung der Betriebsführung erfolgt über die Bewertung der Kostenfunktionen im Zusammenhang mit den möglichen einzubringenden Energiemengen. Das Ziel ist es, die Gesamtkosten zu minimieren und dabei gleichzeitig dynamisch die Nutzeranforderungen zu decken. Diese sind nur zu erfüllen, wenn dem Wärmespeicher eine ausreichende Wärmeleistung zugeführt wird. Diese verbale Formulierung der Problemstellung ist mathematisch als Zielfunktional wie in Formel (2-6) auszudrücken. Die dem Speicher zuzuführende Leistung setzt sich dabei additiv aus den Wärmeleistungen der Wärmeerzeuger zusammen (2-7).

$$K_{Opt}(\dot{Q}_{zu}(t)) = \text{MIN} \sum_{j=1}^m [K_{WEj}(\dot{Q}_{WEj}(t))] \quad (2-6)$$

$$\dot{Q}_{zu}(t) = \sum_{j=1}^m \dot{Q}_{WEj}(t) \quad (2-7)$$

Um die einzelnen Wärmeleistungen in Abhängigkeit von den äußeren Einflussgrößen und Systemzusammenhängen zu bestimmen, ist ein Prozessmodell der Anlage zu deklarieren, welches eine prädiktive Ableitung der Prozesszustände erlaubt.

3 Prozessmodelle

3.1 Erläuterung zur Modellverwendung

Die Betriebsführung gebäudetechnischer Anlagen soll sowohl die signifikanten Anlageneigenschaften als auch die Wirkungen von Einflussgrößen, wie nutzerbestimmten Temperaturanforderungen oder Wetterparameter berücksichtigen. Das Nutzen von Simulationsmöglichkeiten für die vorausschauende Untersuchung der geplanten Betriebsführung bildet eine wichtige Grundlage zum Erreichen eines optimalen Betriebsergebnisses [22].

Da die beschriebenen Einflussgrößen teilweise stochastisch auftreten, sind die dynamischen Eigenschaften des Systems, wie zum Beispiel die bauphysikalisch bedingte Speicherfähigkeit des Gebäudes oder Speicherwirkungen innerhalb des Modells⁵ zu berücksichtigen [14].

Die Realisierung kann nur in einem dynamischen Modell erfolgen, welches neben der Bewertung der in Abhängigkeit der Einflussfaktoren wirkenden Energieströme, auch die Energiespeicher innerhalb des Systems berücksichtigen kann.

Der zu modellierende Systemumfang schließt zusätzlich zu der Verbundheizungsanlage bestehend aus dem Wärmespeicher, den Wärmequellen Solaranlage, Heizkessel sowie Wärmepumpe, auch die Wärmesenke ein. Die Modellierung erfolgt analog dazu in mehreren Teilmodellen, welche durch definierte Schnittstellen miteinander verbunden sind. Dies ermöglicht die Erweiterbarkeit des Modells, durch Austauschen oder Hinzufügen beziehungsweise Entfernen einzelner Komponenten. Eine Anpassung an reale Verbundheizungsanlagen, welche aus anderen Systemkomponenten bestehen, ist dadurch vereinfacht. In Abbildung 3-1 ist die Modellstruktur mit den definierten Schnittstellen dargestellt.

⁵ Die Verwendung des Begriffes Modell und Simulation erfolgt entsprechend der Definition in der VDI 3633 Blatt 1.

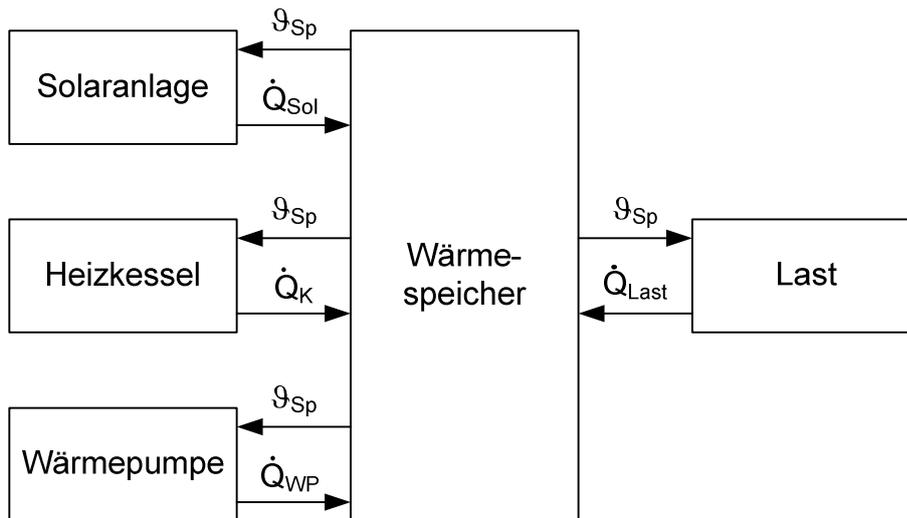


Abbildung 3-1: Schnittstellen zwischen den Teilprozessmodellen

Für die deskriptive Erstellung eines Modells, ist im Rahmen der Prozessanalyse wie folgt vorzugehen:

- Aufstellen der Energiebilanz
- Analysieren der Wärmeübertragungsmechanismen
- Aufstellen der Differentialgleichungen
- Umsetzung in Form eines Signalflussplanes
- Programmieren der Signalflusspläne im Simulationssystem
- Modellverifikation

Für die Aufstellung der Energiebilanz ist jede Teilkomponente des Gesamtsystems als separater Bilanzbereich zu betrachten [23]. Als Bilanzgrenzen werden bei der Verbundanlage die bereits festgelegten Schnittstellen der Teilanlagen definiert.

Bei den Wärmeübertragungsmechanismen ist zwischen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung zu unterscheiden [24], [25], [26]. Durch die genaue Analyse der Wärmetransportvorgänge der Verbundanlage werden diese identifiziert und in die Energiebilanzen eingepflegt. Durch das Umstellen der Gleichungen nach den definierten Schnittstellen ergeben sich Differentialgleichungen, welche abschließend als Signalflusspläne in der Simulationssoftware MaxXControl umzusetzen sind.

Die Modellverifikation hat das vorhandene Simulationsmodell hinsichtlich der Konsistenz zum konzeptionellen Modell in Form der Energiebilanzen und Differentialgleichungen zu überprüfen. Dazu ist die Plausibilitätsprüfung mit

Maßnahmen wie der Kausalitätsprüfung (stimmen Ursache und Wirkung in Realität und Modell überein), dem Bilanzprinzip (stimmen die Bilanzen innerhalb des Modells), der Wertebereichsüberprüfung (es sind keine negativen Energien, Flächen und Volumen zu errechnen) sowie der Einheitenkonsistenz (stimmen die Einheiten und Potenzen als Kriterium für konsistente Einheiten) auszuführen[27].

Diese Vorgehensweise der Prozessmodellerstellung und -nutzung ermöglicht die Simulation, wodurch Erkenntnisse über die dynamischen Wärmeübertragungsvorgänge in Abhängigkeit der Einflussfaktoren zu gewinnen und die operative Verfolgung der Prozessführung begünstigt sind [28]. Die Prozessmodelle der Komponenten der Verbundheizungsanlage werden nachfolgend detailliert erläutert.

3.2 Simulationsmodelle

3.2.1 Wärmespeicher

Die Modellierung des Wärmespeichers erfolgt als Pufferspeicher mit implementierten Wärmeübertragern für die Wärmequellen und Wärmesenke. Es wurde auf die Modellierung eines Schichtspeichers verzichtet, da in der Praxis häufig nur eine geringe Temperaturdifferenz zwischen der obersten und der untersten Schicht nachzuweisen ist. Darüber hinaus existiert keine eindeutige Definition, ab welcher Temperaturdifferenz ein Wärmespeicher als Schichtspeicher zu bezeichnen ist [29].

Für die Modellierung gelten folgende Annahmen und Voraussetzungen:

- Die Modellierung erfolgt als Einspeicherglied.
- Zwischen den Wärmeübertragern der Wärmeerzeuger und dem Speicher findet ausschließlich Wärmedurchgang statt.
- Es treten lediglich Verluste in Form von Wärmeleitung durch die Speicherwand auf.

Allgemein lautet die Wärmebilanz des Speichers:

$$dQ_{Sp}(t)/dt = \dot{Q}_{Sp,zu}(t) - \dot{Q}_{Sp,ab}(t) \quad (3-1)$$

Mit den Wärmeerzeugern Wärmepumpe (\dot{Q}_{WP}), Heizkessel (\dot{Q}_K) und Solaranlage (\dot{Q}_{Sol}) ergibt sich die zugeführte Wärmeleistung ($\dot{Q}_{Sp,zu}$) nach Formel (3-2):

$$\dot{Q}_{Sp,zu}(t) = \dot{Q}_{WP}(t) + \dot{Q}_K(t) + \dot{Q}_{Sol}(t) \quad (3-2)$$

Die dem Speicher entnommene Wärmeleistung ($\dot{Q}_{Sp,ab}$) setzt sich aus der Wärmesenke, bestehend aus der Trinkwarmwasser-Abnahme (\dot{Q}_{BW}) und der Heizkreisabnahme (\dot{Q}_{HK}), sowie den Speicherverlusten ($\dot{Q}_{Verlust}$) zusammen:

$$\dot{Q}_{Sp,ab}(t) = \dot{Q}_{BW}(t) + \dot{Q}_{HK}(t) + \dot{Q}_{Verlust}(t) \quad (3-3)$$

Speicherverluste treten anhand der Wärmeleitung durch die Speicherwand auf, welche aus einer Stahlschicht und Dämmschicht besteht. Das dazugehörige Aufbauschema ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

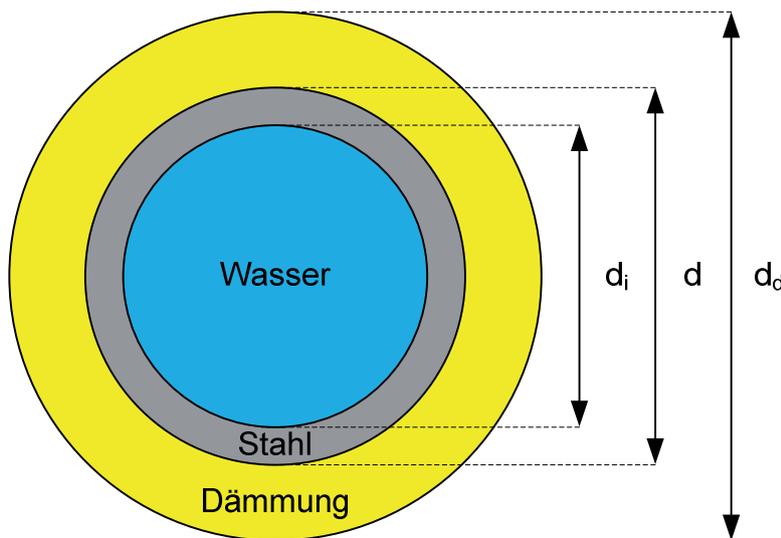


Abbildung 3-2: Aufbauschema des modellierten Wärmespeichers

Die bestimmenden Gleichungen für die Speicherverluste ($\dot{Q}_{Verlust}$) und die Speicherleistung (\dot{Q}_{Sp}) sind nach Gleichung (3-4) und (3-5) definiert [24].

$$\dot{Q}_{Verlust}(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\left(\frac{1}{\lambda_{St}} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{1}{\lambda_D} \cdot \ln \frac{d_p}{d} \right)} \cdot (\vartheta_{Sp} - \vartheta_{HR}) \quad (3-4)$$

$$\dot{Q}_{Sp}(t) = \frac{dQ_{Sp}(t)}{dt} = m_{Sp} \cdot c_{p,W} \cdot \frac{d\vartheta_{Sp}(t)}{dt} \quad (3-5)$$

Werden die bestimmenden Gleichungen der Wärmeübertragung eingesetzt ergibt sich die Energiebilanz des Speichers nach Formel (3-6):

$$m_{Sp} \cdot c_{p,W} \cdot \frac{d\vartheta_{Sp}(t)}{dt} = \dot{Q}_{WP}(t) + \dot{Q}_K(t) + \dot{Q}_{Sol}(t) - \dot{Q}_{BW}(t) - \dot{Q}_{HK}(t) - \frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\left(\frac{1}{\lambda_{St}} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{1}{\lambda_D} \cdot \ln \frac{d_D}{d}\right)} \cdot (\vartheta_{Sp} - \vartheta_{HR}) \quad (3-6)$$

Durch Umstellung erhält man die Integralform (Formel (3-7)) mit der in der Formel (3-8) dargestellten Zeitkonstante $T_{Sp,1}$ und den Verstärkungsfaktoren $K_{Sp,1}$ und $K_{Sp,2}$. Es ist ersichtlich, dass die Zeitkonstante direkt proportional zu dem Verstärkungsfaktor $K_{Sp,1}$ ist. $K_{Sp,1}$ und $K_{Sp,2}$ weisen den gleichen Wert mit entgegengesetztem Vorzeichen auf.

$$\vartheta_{Sp}(t) = \frac{1}{T_{Sp,1}} \int (K_{Sp,1} \cdot \dot{Q}_{WE} + \vartheta_{HR} + K_{Sp,2} \cdot (\dot{Q}_{BW} + \dot{Q}_{HK}) - \vartheta_{Sp}) dt \quad (3-7)$$

$$\dot{Q}_{WE} = \dot{Q}_{WP} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_{Sol}$$

$$T_{Sp,1} = \frac{m_{Sp} \cdot c_{p,W} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_{St}} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{1}{\lambda_D} \cdot \ln \frac{d_D}{d}\right)}{2 \cdot \pi \cdot h};$$

$$K_{Sp,1} = \frac{\frac{1}{\lambda_{St}} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{1}{\lambda_D} \cdot \ln \frac{d_D}{d}}{2 \cdot \pi \cdot h}; \quad (3-8)$$

$$K_{Sp,2} = -K_{Sp,1} = -\frac{\frac{1}{\lambda_{St}} \cdot \ln \frac{d}{d_i} + \frac{1}{\lambda_D} \cdot \ln \frac{d_D}{d}}{2 \cdot \pi \cdot h}$$

3.2.2 Wärmesenke

Die Wärmesenke setzt sich aus den Anforderungen resultierend aus Heizkrisenanforderungen und der Trinkwarmwasser-Abnahme zusammen. Daher ist diese Komponente in zwei weitere Teilmodelle zu untergliedern.

3.2.2.1 Heizkreisanforderungen

Heizkreisanforderungen resultieren aus den Anforderungen durch den Nutzer und den gebäudespezifischen Einflussgrößen. Die Nutzeranforderungen sind im Modell durch einen dynamisch frei wählbaren Raumtemperatursollwert berücksichtigt. Einflussgrößen, hervorgerufen durch die bauphysikalischen Besonderheiten des Gebäudes, sind in Form eines parametrierbaren Raummodells erfasst. Dabei sind beispielsweise die Raumgröße, die Fensterflächen, Heizkörperparameter sowie die Wanddicken und die Wärmedurchgangskoeffizienten frei einstellbar. In Abbildung 3-3 ist das Schema der Heizkreisabnahme mit hydraulischer Einbindung in den Wärmespeicher abgebildet.

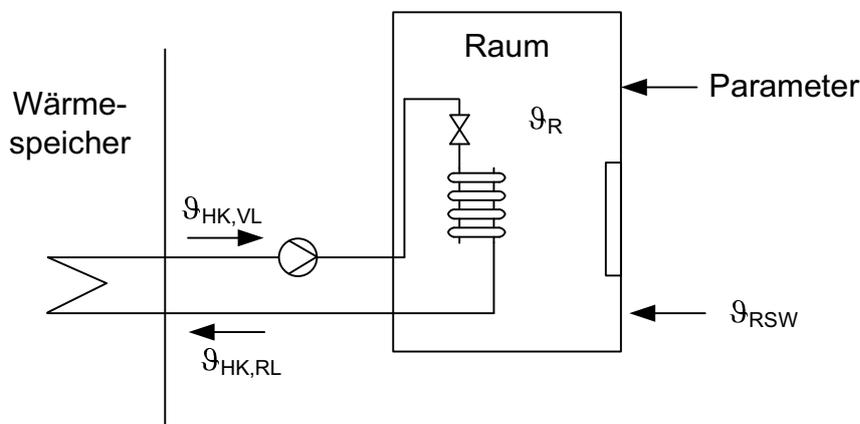


Abbildung 3-3: Schema der Heizkreisabnahme mit hydraulischer Einbindung

Die aus dem Speicher entnommene Heizleistung lässt sich nach Formel (3-9) in Abhängigkeit von dem Massenstrom über den Wärmeübertrager Speicher-Heizkreis ($\dot{m}_{W,HK}$), der spezifischen Wärmekapazität des Wassers ($c_{p,W}$) sowie der Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- ($\vartheta_{HK,VL}$) und Rücklauf- ($\vartheta_{HK,RL}$) berechnen.

$$\dot{Q}_{HK}(t) = \dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{HK,VL} - \vartheta_{HK,RL}) \tag{3-9}$$

Für die Bestimmung des benötigten Massenstromes sind die nachfolgend dargestellten Formeln zu nutzen [30].

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l \cdot 8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d^5} \cdot \dot{V}_{W,HK}^2 = C \cdot \dot{V}_{W,HK}^2 = C \cdot \left(\frac{\dot{m}_{W,HK}}{\rho} \right)^2 \tag{3-10}$$

$$\dot{m}_{W,HK} = \sqrt{\frac{\Delta p}{C}} \cdot \rho = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot h}{C}} \cdot \rho \quad (3-11)$$

Durch die Aufarbeitung der physikalischen Zusammenhänge in [31] entstand der im Simulationssystem verfügbare Modellbaustein „Thermostatregelventil“. Durch diesen erfolgt die Berechnung des hydraulischen Widerstandes C in Abhängigkeit der Eingangsgrößen Raumsollwert (ϑ_{RSW}) und Raumistwert (ϑ_R). Durch die dynamische Anpassung des hydraulischen Widerstandes gilt der in (3-11) dargestellte Zusammenhang für den Massenstrom für das modellierte hydraulische System.

Die Modellierung des Wärmetauschers Speicher-Heizkreis erfolgt als Vier-Schicht-Modell, wobei sich der Wärmestrom zwischen Speicher und Heizkreis auf alle Schichten gleichmäßig verteilt. Auf die Bildung der mittleren Temperatur innerhalb der Schichten ist durch die mehrschichtige Modellierung zu verzichten. Als Schichttemperatur ist die jeweilige Ausgangstemperatur zu nutzen. In Abbildung 3-5 ist das Energieflussschema des Modells Wärmeübertrager Speicher-Heizkreis dargestellt.

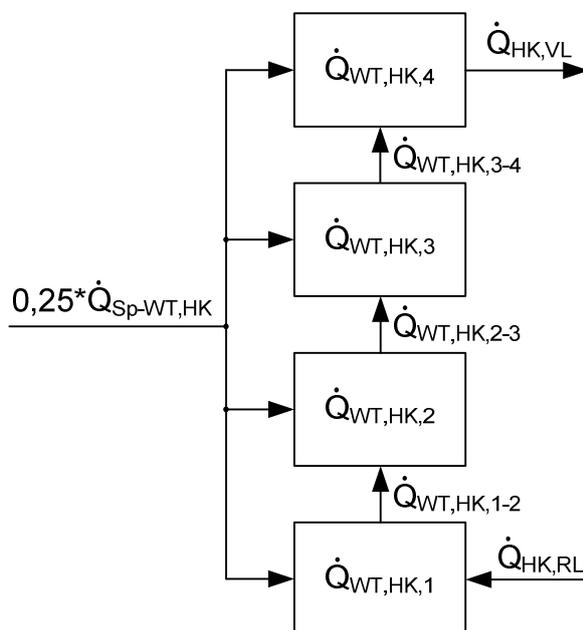


Abbildung 3-4: Energieflussschema Wärmeübertrager Speicher-Heizkreis

Unter der Annahme, dass innerhalb der Schicht keine Energiespeicherung erfolgt ergeben sich die Energiebilanz der Schichten mit den eingesetzten bestimmenden Gleichungen nach folgender Formel:

$$\frac{A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}{4} \cdot (\vartheta_{Sp} - \vartheta_{WT,HK,1}) = \dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{WT,HK,1} - \vartheta_{HK,RL}) \quad (3-12)$$

$$\frac{A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}{4} \cdot (\vartheta_{Sp} - \vartheta_{WT,HK,2}) = \dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} (\vartheta_{WT,HK,2} - \vartheta_{WT,HK,1}) \quad (3-13)$$

$$\frac{A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}{4} \cdot (\vartheta_{Sp} - \vartheta_{WT,HK,3}) = \dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} (\vartheta_{WT,HK,3} - \vartheta_{WT,HK,2}) \quad (3-14)$$

$$\frac{A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}{4} \cdot (\vartheta_{Sp} - \vartheta_{HK,VL}) = \dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{HK,VL} - \vartheta_{WT,HK,3}) \quad (3-15)$$

Daraus lässt sich die Vorlauftemperatur ($\vartheta_{HK,VL}$) wie in Formel (3-16) dargestellt ableiten.

$$\vartheta_{HK,VL} = (x_1^3 \cdot x_2 + x_1^2 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 + x_2) \cdot \vartheta_{Sp} + x_1^4 \cdot \vartheta_{HK,RL} \quad (3-16)$$

$$x_1 = \frac{\dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W}}{\dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} + 0,25 \cdot A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}$$

$$x_2 = \frac{0,25 \cdot A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}{\dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} + 0,25 \cdot A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}$$

Die Berechnung der Rücklauftemperatur des Heizkreises erfolgt durch Nutzung des Modellbausteins „Raummodell“, welches aus den Teilmodellen Raumlufte, Heizkörper, Außenwand und Innenwand zusammengesetzt ist. In Abhängigkeit der Raumtemperatur (ϑ_R), der Vorlauftemperatur ($\vartheta_{HK,VL}$), des Massenstromes ($\dot{m}_{W,HK}$) sowie den Parametern spezifische Wärmekapazität ($c_{p,W}$), Wärmedurchgangskoeffizient (k_{HK}) und Heizkörperfläche (A_{HK}) ist die Rücklauftemperatur nach Formel (3-17) zu ermitteln [32].

$$\vartheta_{RL} = \vartheta_R + (\vartheta_{VL,Sp} - \vartheta_R) \cdot e^{-\frac{k_{HK} \cdot A_{HK}}{\dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W}}} \quad (3-17)$$

Die Struktur der zur Berechnung der Heizkreisanforderungen benötigten physikalischen Größen ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Die bisher noch nicht näher erläuterte dynamische Variable Luftmassenstrom (\dot{m}_L) ist als Verlauf durch den Nutzer vorzugeben.

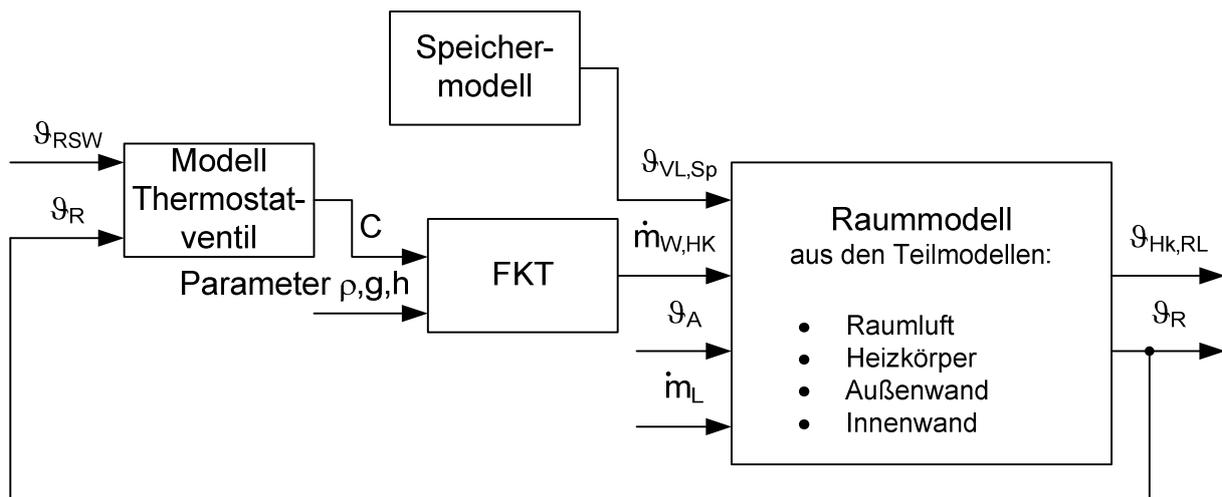


Abbildung 3-5: Prozessstruktur des Raummodells

Zur Nutzung des Modells für regelungstechnische Simulationen ist es möglich, zwischen das Speichermodell und das Raummodell eine Rücklauftemperaturbeimischung in Form eines Dreiwegeventilmodells einzufügen. Dieses ist in der vorliegenden Betrachtung ausgegrenzt, da hierbei nur der Wärmestrom zwischen dem Wärmespeicher und den Heizkrisanforderungen in die Bilanzrechnung eingeht.

3.2.2.2 Trinkwarmwasser-Abnahme

Zur Berechnung der Trinkwarmwasser-Abnahme sind folgende Annahmen zu beachten:

- Die Abnahme des Trinkwarmwassers erfolgt direkt aus dem Speicher mit einem durch den Nutzer zeitabhängig festgelegten Massenstrom (\dot{m}_{BW}).
- Dem Speicher ist die gleiche entnommene Wassermenge als Kaltwasser mit der Temperatur ϑ_{KW} zuzuführen.
- Wärmeübertragungsvorgänge durch Vermischung der unterschiedlich temperierten Wasserschichten innerhalb des Speichers sind zu vernachlässigen.

Die Ermittlung der dem Speicher entnommenen Trinkwarmwasserleistung (\dot{Q}_{BW}) erfolgt nach Formel (3-18):

$$\dot{Q}_{BW}(t) = \dot{m}_{BW} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{Sp} - \vartheta_{KW}) \tag{3-18}$$

Dabei sind die Kaltwassertemperatur (ϑ_{KW}) und der Trinkwarmwassermassenstrom (\dot{m}_{BW}) durch den Nutzer als dynamischer Verlauf vorzugeben. Die Speichertemperatur ist aus dem Wärmespeichermodell aufgeschaltet.

3.2.3 Wärmequellen

3.2.3.1 Wärmepumpe

Es ist eine Kompressionswärmepumpe mit der Quelle Erdwärme (Sole, das heißt Wasser mit Frostschutzzusatz) und Wärmeabgabemedium Wasser modelliert. Die Entscheidung fiel auf eine Erdwärmepumpe, da diese in der Praxis häufig in Gebäudeheizungsanlagen eingesetzt sind [33]. Die Darstellung des Anlagenschemas erfolgt in Abbildung 3-6.

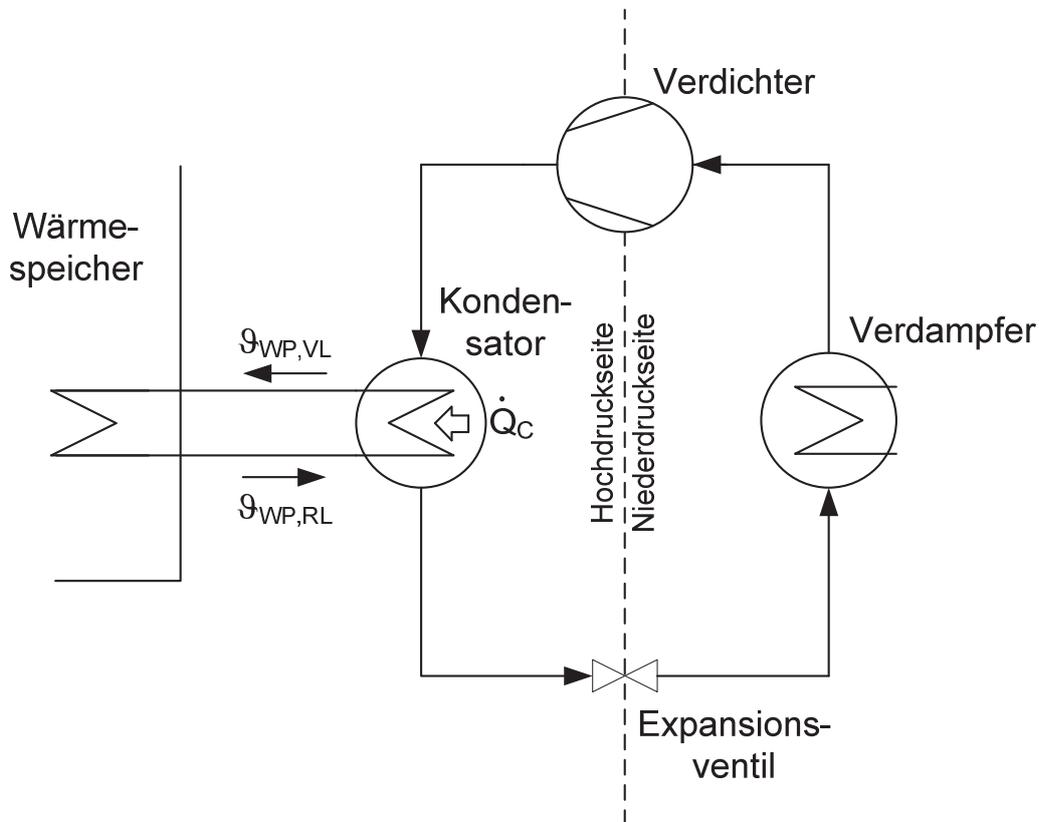


Abbildung 3-6: Wärmepumpenschema mit Einbindung in den Wärmespeicher

Die Parametrierungsgrundlage für die Modellierung bildet die Sole/Wasser-Wärmepumpe Buderus WPS 140 IK [34], mit dem aus Umweltaspekten zu verwendenden Kältemittel R407C [35]. In Abbildung 3-7 ist das zugehörige log p,h-Diagramm mit eingezeichnetem Arbeitsbereich dargestellt [36].

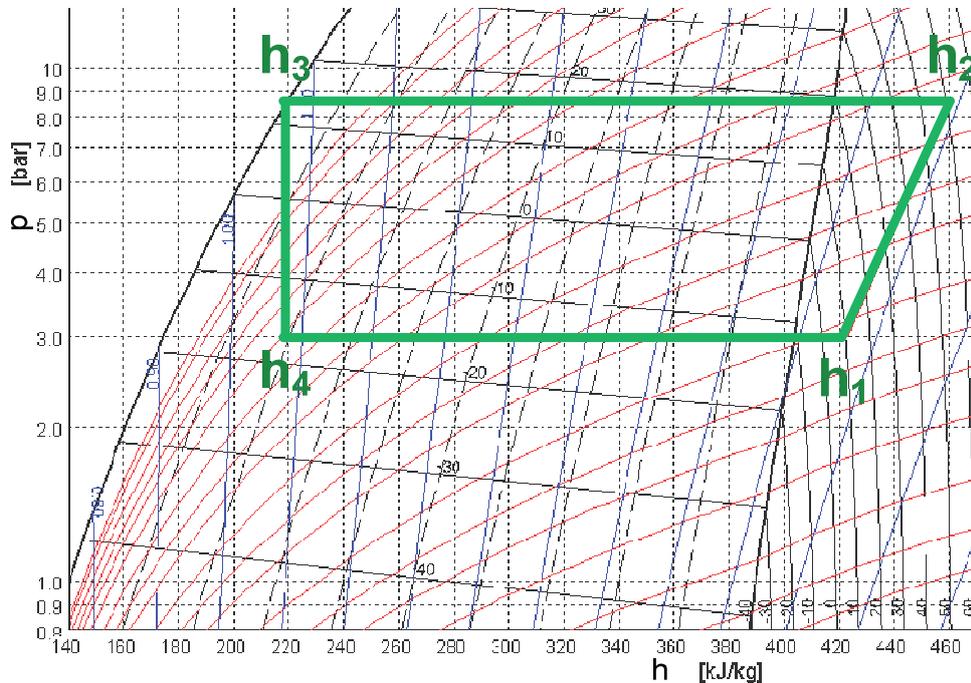


Abbildung 3-7: Log p,h-Diagramm für R407C mit Arbeitsbereich [37]

Für die Optimierung der Betriebsführung der Verbundheizungsanlage ist das Stellübertragungsverhalten, welches der gewollten Leistungsänderung am Kondensator entspricht zu modellieren. Dessen Realisierung erfolgt über die Anpassung am Expansionsventil und am Verdichter sowie an der Umwälzung auf der Wärmequellenseite (Sole- oder Luftwärmestrom). Die dabei auftretenden Zeitkonstanten des Stellübertragungsverhaltens liegt bei Untersuchungen [38] zwischen 1 und 3 Minuten. Aufgrund dieser sehr kleinen Zeitkonstanten ist der Wärmepumpenprozess statisch zu modellieren. Dynamisch ist die Wärmeübertragung des Kondensators modelliert.

Es gelten die folgenden Annahmen für die Modellierung der durch die Wärmepumpe eingebrachten Leistung in den Wärmespeicher:

- Vernachlässigung von Anfahr- und Abfahrvorgängen.
- Konstante Stromaufnahme des Verdichters bei zugeschalteter Wärmepumpe.
- Wärmedurchgangskoeffizienten und spezifische Wärmekoeffizienten werden über den gesamten Arbeitsbereich als konstant angenommen.

- Konstante Kondensationsleistung, da die Modellierung statisch erfolgt.
- Gleichmäßige Wirkung der Kondensationsleistung über den gesamten Kondensator.
- Konstante Stromaufnahme des Verdichters.
- Wärmeverluste an die Umgebung sind nicht berücksichtigt.
- Keine Wärmespeicherung innerhalb des Wärmeübertragers Wärmepumpenspeicher.

Die für die Ermittlung der Betriebskosten benötigte elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters berechnet sich in Abhängigkeit der Stromaufnahme (I) sowie den Parametern Spannung (U) und Phasenverschiebung ($\cos \varphi$) nach Formel (3-19) [39]:

$$P = U \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3-19)$$

Für den in Abbildung 3-7 dargestellten Arbeitsbereich der Wärmepumpe ergibt sich die Leistungszahl (ε) nach Formel (3-20):

$$\varepsilon = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (3-20)$$

Aus der elektrischen Leistungsaufnahme und der Leistungszahl lässt sich die für diesen Arbeitsbereich anliegende Kondensationsleistung (\dot{Q}_c) nach Formel (3-21) bestimmen.

$$\dot{Q}_c = P \cdot \varepsilon \quad (3-21)$$

Wärmeübertrager Kondensator

Die Modellierung der Wärmeübertragung im Kondensator erfolgt als Fünf-Schicht-Modell. Dadurch ist auf die Bildung der mittleren Temperatur innerhalb der Schichten zu verzichten und deren Ausgangstemperatur zu nutzen. Das dazugehörige Energieflussschema ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Durch die getroffene Annahme der gleichmäßigen Wirkung der Kondensationsleistung über den gesamten Kondensator ergibt sich für jede Schicht ein Anteil von $0,2 \cdot \dot{Q}_c$.

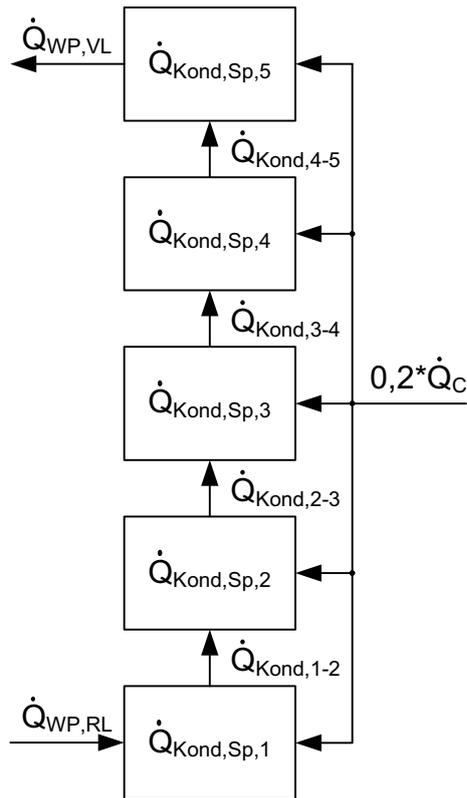


Abbildung 3-8: Energieflussschema Wärmeübertrager Kondensator

Die Energiebilanz einer Schicht lässt sich nach Formel (3-22) in Abhängigkeit der in der Schicht gespeicherten Energie ($\dot{Q}_{Kond,Sp,j}$), des zugeführten Wärmestromes ($\dot{Q}_{Kond,Zu,j}$), des Kondensationswärmestromes (\dot{Q}_C) sowie des abgeführten Wärmestromes ($\dot{Q}_{Kond,Ab,j}$) aufstellen.

$$\dot{Q}_{Kond,Sp,j} = \dot{Q}_{Kond,Zu,j} + 0,2 \cdot \dot{Q}_C - \dot{Q}_{Kond,Ab,j} \quad (3-22)$$

In Schicht 1 entspricht der zugeführte Wärmestrom ($\dot{Q}_{Kond,Zu,1}$) der Rücklaufleistung aus dem Wärmeübertrager des Speichers ($\dot{Q}_{WP,RL}$), in Schicht 2 $\dot{Q}_{Kond,1-2}$, in Schicht 3 $\dot{Q}_{Kond,2-3}$, in Schicht 4 $\dot{Q}_{Kond,3-4}$ und in Schicht 5 $\dot{Q}_{Kond,4-5}$. Die abgeführte Wärmeleistung ($\dot{Q}_{Kond,Ab,j}$) entspricht in Schicht 1 $\dot{Q}_{Kond,1-2}$, in Schicht 2 $\dot{Q}_{Kond,2-3}$, in Schicht 3 $\dot{Q}_{Kond,3-4}$, in Schicht 4 $\dot{Q}_{Kond,4-5}$ und in Schicht 5 $\dot{Q}_{WP,VL}$. Die Wärmepumpen-Vorlauftemperatur ($\vartheta_{VL,WP}$) ist der Kondensatortemperatur in Schicht 5 ($\vartheta_{Kond,5}$) gleichzusetzen. Als zugeführte Temperatur in Schicht 1 ($\vartheta_{Kond,Zu,1}$) ist die Wärmepumpen-Rücklauftemperatur einzusetzen. Durch Einsetzen der bestimmenden Gleichungen für die Wärmeübertragungsprozesse ergeben sich die Differentialgleichungen der einzelnen Schichten wie folgt:

$$\vartheta_{Kond,1} = \frac{\dot{m}_{WP,W}}{m_{W,Kond}} \cdot \int \left(\vartheta_{WP,RL} + \frac{0,2}{\dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W}} \cdot \dot{Q}_C - \vartheta_{Kond,1} \right) dt \quad (3-23)$$

$$\vartheta_{Kond,2} = \frac{\dot{m}_{WP,W}}{m_{W,Kond}} \cdot \int \left(\vartheta_{Kond,1} + \frac{0,2}{\dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W}} \cdot \dot{Q}_C - \vartheta_{Kond,2} \right) dt \quad (3-24)$$

$$\vartheta_{Kond,3} = \frac{\dot{m}_{WP,W}}{m_{W,Kond}} \cdot \int \left(\vartheta_{Kond,2} + \frac{0,2}{\dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W}} \cdot \dot{Q}_C - \vartheta_{Kond,3} \right) dt \quad (3-25)$$

$$\vartheta_{Kond,4} = \frac{\dot{m}_{WP,W}}{m_{W,Kond}} \cdot \int \left(\vartheta_{Kond,3} + \frac{0,2}{\dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W}} \cdot \dot{Q}_C - \vartheta_{Kond,4} \right) dt \quad (3-26)$$

$$\vartheta_{WP,VL} = \frac{\dot{m}_{WP,W}}{m_{W,Kond}} \cdot \int \left(\vartheta_{Kond,4} + \frac{0,2}{\dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W}} \cdot \dot{Q}_C - \vartheta_{WP,VL} \right) dt \quad (3-27)$$

Wärmeübertrager Wärmepumpe-Speicher

Die Modellierung der Wärmeübertragung im Wärmetauscher Wärmepumpe-Speicher erfolgt als Zwei-Schicht-Modell, nach dem in Abbildung 3-9 dargestellten Energieflussschema. Mit der Modellierung in zwei Schichten ist es möglich auf die Bildung der mittleren Temperatur innerhalb zu verzichten und die Ausgangstemperatur für die Berechnungen zu nutzen

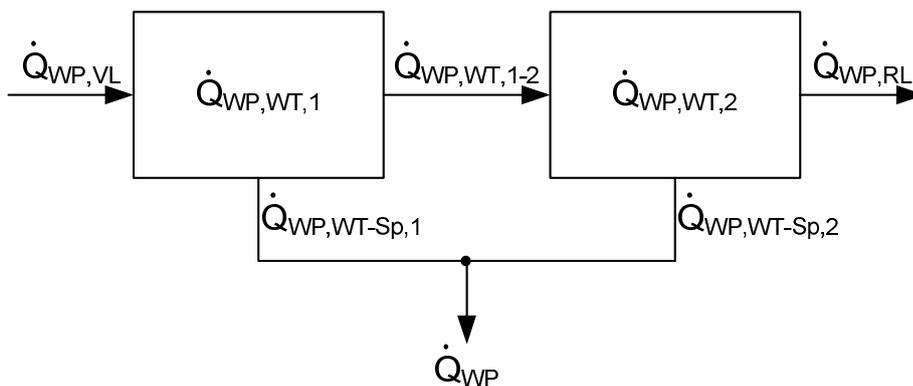


Abbildung 3-9: Energieflussschema Wärmeübertrager Wärmepumpe-Speicher

Die Wärmeleistung setzt sich additiv aus den Teilleistungen, berechnet in den einzelnen Schichten zusammen:

$$\dot{Q}_{WP} = \dot{Q}_{WP,WT-Sp,1} + \dot{Q}_{WP,WT-Sp,2} \quad (3-28)$$

Aufgrund der getroffenen Annahme, dass innerhalb des Wärmeübertragers keine Energiespeicherung erfolgt ergeben sich die Energiebilanz und die bestimmenden Gleichungen für Schicht 1 wie nachfolgend gezeigt:

$$\dot{Q}_{WP,WT-sp,1} = \dot{Q}_{WP,VL} - \dot{Q}_{WP,WT,1-2} \quad (3-29)$$

$$\dot{Q}_{WP,WT-sp,1} = \frac{A_{WT,WP} \cdot k_{WT,WP}}{2} \cdot (\vartheta_{WP,WT,1} - \vartheta_{Sp}) \quad (3-30)$$

$$\dot{Q}_{WP,VL} - \dot{Q}_{WP,WT,1-2} = \dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{WP,VL} - \vartheta_{WP,WT,1}) \quad (3-31)$$

Die Energiebilanz und die bestimmenden Gleichungen für Schicht 2 ergeben sich nach den Formeln (3-32) bis (3-34).

$$\dot{Q}_{WP,WT-sp,2} = \dot{Q}_{WP,WT,1-2} - \dot{Q}_{WP,RL} \quad (3-32)$$

$$\dot{Q}_{WP,WT-sp,2} = \frac{A_{WT,WP} \cdot k_{WT,WP}}{2} \cdot (\vartheta_{WP,RL} - \vartheta_{Sp}) \quad (3-33)$$

$$\dot{Q}_{WP,WT,1-2} - \dot{Q}_{WP,RL} = \dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{WP,WT,1} - \vartheta_{WP,RL}) \quad (3-34)$$

Daraus lässt sich die Wärmepumpen-Rücklauftemperatur, wie in Formel (3-35) dargestellt, ableiten:

$$\begin{aligned} \vartheta_{WP,RL} &= \left(\frac{\dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W}}{N} \right)^2 \cdot \vartheta_{WP,VL} \\ &+ \left(\frac{\dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W} \cdot A_{WT,WP} \cdot k_{WT,WP}}{2 \cdot N^2} + \frac{A_{WT,WP} \cdot k_{WT,WP}}{2 \cdot N} \right) \cdot \vartheta_{Sp} \quad (3-35) \\ N &= \frac{A_{WT,WP} \cdot k_{WT,WP}}{2} + \dot{m}_{WP,W} \cdot c_{p,W} \end{aligned}$$

Die Berechnung der dem Wärmespeicher zugeführten Leistung erfolgt nach Formel (3-36) durch Nutzung der bereits ermittelten Größen für Vorlauf- und Rücklauftemperatur.

$$\dot{Q}_{WP}(t) = \dot{m}_{W,WP} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{WP,VL} - \vartheta_{WP,RL}) \quad (3-36)$$

3.2.3.2 Heizkessel

Die Modellierung des Heizkessels erfolgt dynamisch in drei Teilmodellen, welche Kesselkonstruktion, Kesselwasser und Wärmeübertrager Kessel-Speicher benannt sind [31]. Bei dem in Abbildung 3-10 dargestellten Energieflussschema ist zu beachten, dass der durch die Pfeilrichtungen vorgegebene Energiefluss aufgrund von Beeinflussung der Teilprozesse untereinander, auch entgegengesetzt stattfinden kann.

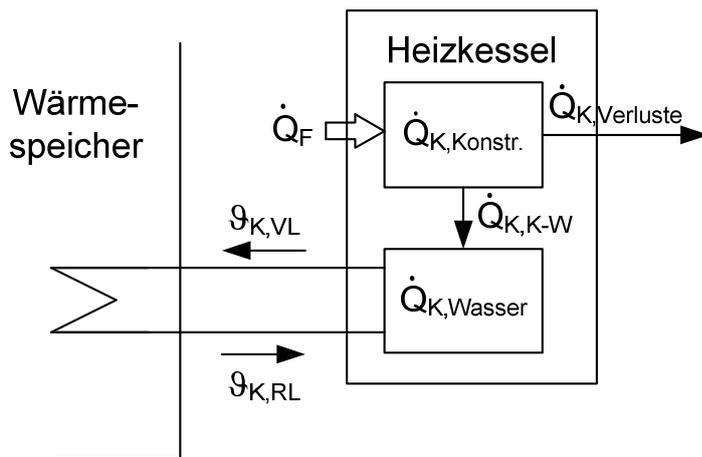


Abbildung 3-10: Energieflussschema des Heizkreismodells

Für die Modellierung gelten die Annahmen:

- Brenneverluste sowie An- und Abfahrvorgänge sind zu vernachlässigen.
- Es ist eine gleichmäßige Erwärmung der Kesselkonstruktion und des Heizwassers anzunehmen.
- Wärmedurchgangskoeffizienten und spezifische Wärmekapazitäten werden über den gesamten Arbeitsbereich als konstant angenommen.
- Die Temperatur des Kesselwassers entspricht der Heizkessel-Vorlauftemperatur ($\vartheta_{K,VL}$)

Kesselkonstruktion

Die Energiebilanz der Kesselkonstruktion setzt sich aus der gespeicherten Wärme ($\dot{Q}_{K,Konstr.}$), der Feuerungsleistung (\dot{Q}_F), der Verlustleistung der Kesselkonstruktion ($\dot{Q}_{K,Verluste}$) sowie der übertragenen Wärmeleistung an das Kesselwasser ($\dot{Q}_{K,K-W}$) zusammen.

$$\dot{Q}_{K,Konstr.} = \dot{Q}_F - \dot{Q}_{K,K-W} - \dot{Q}_{K,Verluste} \quad (3-37)$$

Die bestimmenden Gleichungen ergeben sich wie in den Formeln (3-38) bis (3-41) beschrieben. Die verwendeten konstruktiv bedingten Wärmeübergangskonstanten zwischen Kesselkonstruktion und Kesselwasser ($C_{K,K-W}$) und zwischen Kesselkonstruktion und Heizraum ($C_{K,K-HR}$) sind über ein Parameterschätzverfahren zu ermitteln[31].

$$\dot{Q}_{K,Konstr.} = m_{K,Konstr.} \cdot c_{p,Stahl} \cdot \dot{\vartheta}_{K,Konstr.} \quad (3-38)$$

$$\dot{Q}_F = \eta \cdot H_u \cdot \dot{m}_{Br} \quad (3-39)$$

$$\dot{Q}_{K,K-W} = C_{K,K-W} \cdot (\vartheta_{K,Konstr.} - \vartheta_{K,VL}) \quad (3-40)$$

$$\dot{Q}_{K,Verluste} = C_{K,K-HR} \cdot (\vartheta_{K,Konstr.} - \vartheta_{HR}) \quad (3-41)$$

Die Konstruktionstemperatur berechnet sich, wie in Formel (3-42) dargestellt.

$$\vartheta_{K,Konstr.} = \frac{1}{T_{K,1}} \cdot \int (K_{K,1} \cdot \dot{m}_{Br} + K_{K,2} \cdot \vartheta_{K,VL} + K_{K,3} \cdot \vartheta_{HR} - \vartheta_{K,Konstr.}) dt \quad (3-42)$$

$$T_{K,1} = \frac{m_{K,Konstr.} \cdot c_{p,Stahl}}{C_{K,K-W} + C_{K,K-HR}}$$

$$K_{K,1} = \frac{\eta \cdot H_u}{C_{K,K-W} + C_{K,K-HR}}$$

$$K_{K,2} = \frac{C_{K,K-W}}{C_{K,K-W} + C_{K,K-HR}}$$

$$K_{K,3} = \frac{C_{K,K-HR}}{C_{K,K-W} + C_{K,K-HR}}$$

(3-43)

Kesselwasser

Die Energiebilanz des Kesselwassers setzt sich aus der gespeicherten Wärme im Wasser ($\dot{Q}_{K,Wasser}$), der übertragenen Wärme durch die Kesselkonstruktion ($\dot{Q}_{K,K-W}$), sowie der Vorlauf- ($\dot{Q}_{K,VL}$) und Rücklaufleistung ($\dot{Q}_{K,RL}$) aus dem Wärmeübertrager

Kessel-Speicher zusammen. Die Energiebilanz sowie die bestimmenden Gleichungen sind nachfolgend erläutert.

$$\dot{Q}_{K,Wasser} = \dot{Q}_{K,K-W} + \dot{Q}_{K,RL} - \dot{Q}_{K,VL} \quad (3-44)$$

$$\dot{Q}_{K,Wasser} = \dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W} \cdot \vartheta_{K,VL} \quad (3-45)$$

$$\dot{Q}_{K,K-W} = C_{K,K-W} \cdot (\vartheta_{K,Konstr.} - \vartheta_{K,VL}) \quad (3-46)$$

$$\dot{Q}_{K,RL} - \dot{Q}_{K,VL} = \dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{K,RL} - \vartheta_{K,VL}) \quad (3-47)$$

Die Kesselwassertemperatur, welche durch die getroffene Annahme der Vorlauftemperatur gleichzusetzen ist ergibt sich nach Formel (3-48) mit den in (3-49) dargestellten Zeitkonstanten und Koeffizienten.

$$\vartheta_{K,VL} = \frac{1}{T_{Wasser,1}} \cdot \int (K_{Wasser,1} \cdot \vartheta_{K,Konstr.} + K_{Wasser,2} \cdot \vartheta_{K,RL} - \vartheta_{K,VL}) dt \quad (3-48)$$

$$T_{Wasser,1} = \frac{\dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W}}{C_{K,K-W} + \dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W}}$$

$$K_{Wasser,1} = \frac{C_{K,K-W}}{C_{K,K-W} + \dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W}} \quad (3-49)$$

$$K_{Wasser,2} = \frac{\dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W}}{C_{K,K-W} + \dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W}}$$

Wärmeübertrager Kessel-Speicher

Die Kessel-Rücklauftemperatur wird analog der Wärmepumpen-Rücklauftemperatur in einem Zwei-Schicht-Modell berechnet, wie in Formel (3-50) dargestellt.

$$\vartheta_{K,RL} = \left(\frac{\dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W}}{N} \right)^2 \cdot \vartheta_{K,VL} + \left(\frac{\frac{\dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W} \cdot A_{WT,K} \cdot k_{WT,K}}{2 \cdot N^2}}{\frac{A_{WT,K} \cdot k_{WT,K}}{2 \cdot N}} \right) \cdot \vartheta_{Sp} \quad (3-50)$$

$$N = \frac{A_{WT,K} \cdot k_{WT,K}}{2} + \dot{m}_{K,W} \cdot c_{p,W}$$

Die Berechnung der dem Wärmespeicher durch die Nutzung des Heizkessels zugeführten Leistung erfolgt nach Formel (3-51).

$$\dot{Q}_K(t) = \dot{m}_{W,K} \cdot c_{p,W} \cdot (\vartheta_{K,VL} - \vartheta_{K,RL}) \quad (3-51)$$

3.2.3.3 Solaranlage

Die Modellierung der Solaranlage erfolgt für eine Anlage mit Flachkollektor für die Wassererwärmung mit Heizungsunterstützung. Es wird in die Teilmodelle Absorber, Fluid und Wärmeübertrager Solaranlage-Speicher, nach dem folgenden Energieflussschema gegliedert (Abbildung 3-11).

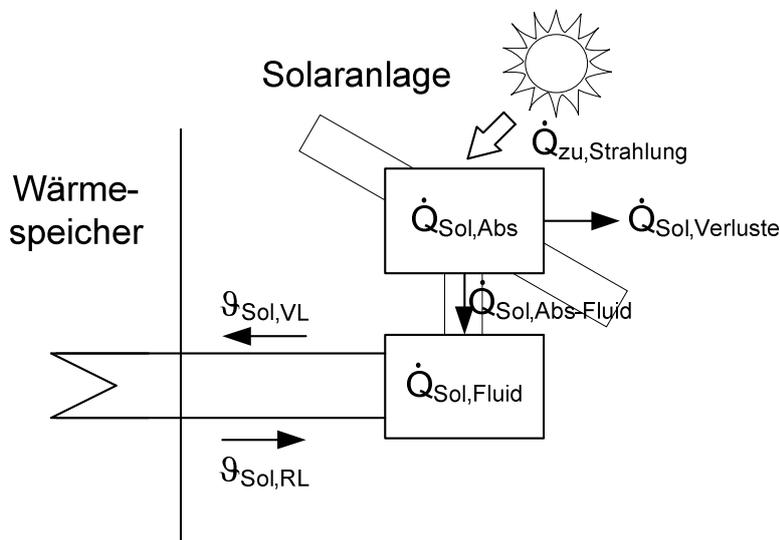


Abbildung 3-11: Energieflussschema des Solaranlagenmodells

Es gelten die Annahmen:

- Die Temperaturverteilung über den Absorber ist homogen.
- Es treten nur Verluste am Absorber auf.
- Die Fluidtemperatur gilt als konzentrierter Parameter.
- Am Fluid treten keine Zustandsänderungen auf.
- Das Fluid befindet sich in einem geschlossenen undurchlässigen Rohrsystem.
- Die Fluidtemperatur entspricht der Solaranlagen—Vorlauftemperatur.

Absorber

Die Energiebilanz für das Teilmodell Absorber ist aus dem Energieflussschema abgeleitet und in Formel (3-52) dargestellt.

$$\dot{Q}_{Sol,Abs} = \dot{Q}_{zu,Strahlung} - \dot{Q}_{Sol,Verluste} - \dot{Q}_{Sol,Abs-Fluid} \quad (3-52)$$

Damit ergibt sich für die Absorber-Temperatur folgende Differentialgleichung:

$$\vartheta_{Sol,Abs} = \frac{1}{T_1} \int (K_1 \cdot \dot{S}_{ges,A} + K_2 \cdot \vartheta_A + K_3 \cdot \vartheta_{Sol,Fluid} - \vartheta_{Sol,Abs}) dt \quad (3-53)$$

$$T_1 = \frac{m_{Abs} \cdot c_{p,Abs}}{A_{Abs} \cdot k_{Abs} + A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}$$

$$K_1 = \frac{\eta \cdot A_{Abs}}{A_{Abs} \cdot k_{Abs} + A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}$$

$$K_2 = \frac{A_{Abs} \cdot k_{Abs}}{A_{Abs} \cdot k_{Abs} + A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}$$

$$K_3 = \frac{A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}{A_{Abs} \cdot k_{Abs} + A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}$$

(3-54)

Fluid

Aufgrund der getroffenen Annahme, dass es sich um ein geschlossenes System handelt erfolgt die Berechnung in Form der Wärmeströme. Die im Fluid gespeicherte Leistung ($\dot{Q}_{Sol,Fluid}$) setzt sich aus der vom Absorber übertragenen Wärme ($\dot{Q}_{Sol,Abs-Fluid}$) sowie der Vorlauf- ($\dot{Q}_{Sol,VL}$) und Rücklaufleistung ($\dot{Q}_{Sol,RL}$) vom Wärmeübertrager Solaranlage-Speicher zusammen.

$$\dot{Q}_{Sol,Fluid} = \dot{Q}_{Sol,Abs-Fluid} + \dot{Q}_{Sol,RL} - \dot{Q}_{Sol,VL} \quad (3-55)$$

Die bestimmenden Gleichungen ergeben sich nach den Formeln (3-56) bis (3-58).

$$\dot{Q}_{Sol,Fluid} = m_{Fluid} \cdot c_{p,Fluid} \cdot \dot{\vartheta}_{Sol,VL} \quad (3-56)$$

$$\dot{Q}_{Sol,Abs-Fluid} = A_{Kol} \cdot k_{Fluid} \cdot (\vartheta_{Sol,Abs} - \vartheta_{Sol,VL}) \quad (3-57)$$

$$\dot{Q}_{Sol,RL} - \dot{Q}_{Sol,VL} = \dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid} \cdot (\vartheta_{Sol,RL} - \vartheta_{Sol,VL}) \quad (3-58)$$

Für die Fluidtemperatur, beziehungsweise Solaranlagen-Vorlauftemperatur (Formel (3-59)) berechnen sich die Zeitkonstante und die Koeffizienten nach (3-60).

$$\vartheta_{Sol,VL} = \frac{1}{T_{Fluid,1}} \cdot \int (K_{Fluid,1} \cdot \vartheta_{Sol,Abs} + K_{Fluid,2} \cdot \vartheta_{Sol,RL} - \vartheta_{Sol,VL}) dt \quad (3-59)$$

$$T_{Fluid,1} = \frac{m_{Fluid} \cdot c_{p,Fluid}}{\dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid} + A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}$$

$$K_{Fluid,1} = \frac{A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}{\dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid} + A_{Kol} \cdot k_{Fluid}} \quad (3-60)$$

$$K_{Fluid,2} = \frac{\dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid}}{\dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid} + A_{Kol} \cdot k_{Fluid}}$$

Wärmeübertrager Solaranlage-Speicher

Die Solaranlagen-Rücklauftemperatur berechnet sich nach dem gleichen Wärmeübertrager-Modell wie in Abschnitt 3.2.3 erklärt, nach Formel (3-61).

$$\vartheta_{Sol,RL} = \left(\frac{\dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid}}{N} \right)^2 \cdot \vartheta_{Sol,VL} + \left(\frac{\dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid} \cdot A_{WT,Sol} \cdot k_{WT,Sol}}{2 \cdot N^2} + \frac{A_{WT,Sol} \cdot k_{WT,Sol}}{2 \cdot N} \right) \cdot \vartheta_{Sp} \quad (3-61)$$

$$N = \frac{A_{WT,Sol} \cdot k_{WT,Sol}}{2} + \dot{m}_{Sol,Fluid} \cdot c_{p,Fluid}$$

Die dem Wärmespeicher zugeführte Wärmeleistung berechnet sich analog den bereits beschriebenen Wärmequellen nach Formel (3-62)

$$\dot{Q}_{Sol}(t) = \dot{m}_{Fluid,Sol} \cdot c_{p,Fluid} \cdot (\vartheta_{Sol,VL} - \vartheta_{Sol,RL}) \quad (3-62)$$

3.3 Simulations-Software MaxXControl®

MaxXControl® ist ein blockorientiertes Engineeringsystem für die dynamische Simulation, welches 1991 in der Arbeitsgruppe zur Projektierung wissensbasierter Regelungssysteme an der TH Zittau entwickelt wurde [40]. Dem Nutzer stehen vordefinierte Bausteine zur Verfügung, welche in der sogenannten Funktionsplan Oberfläche zu arrangieren und zu konfigurieren sind. Weiterhin existiert eine Reihe von Komponentenbausteinen (Unibausteine genannt) in denen spezielle Prozessstrukturen, wie zum Beispiel das beschriebene Raummodell oder das Thermostatventil-Modell zusammengefasst sind.

Für die Simulation von dynamischen Prozessen bietet die Software die Möglichkeit, externe Messdaten zu implementieren. Dies ist durch die Schaffung von Kopplern zu peripheren Leitgeräten, zum Beispiel dem Panther Controller von Honeywell oder der DDC 4000 von Kieback&Peter realisiert.

Eine weitere Besonderheit von MaxXControl, ist die Gelegenheit die Zykluszeiten der Abarbeitung in einem Runtimesystem zu verändern. Dabei ist auf die Einhaltung des Abtasttheorems zu achten.

Für die Auswertung von Simulationen bietet das Programm eine sehr gute Visualisierungsmöglichkeit sowie verschiedene Exportfunktionen der Simulationsergebnisse.

Die Software ist zur Simulation der beschriebenen dynamischen Prozessmodelle zu nutzen, da es die Möglichkeit bietet externe Daten einzubeziehen sowie alle intern ablaufenden Prozesse in Form von Signalanzeigen sichtbar zu machen. Die erstellten Funktionspläne für das Modell sind in Anhang A dargestellt.

3.4 Einbeziehen der Wetterprognose

Für eine vorausschauende Koordination der verschiedenen Komponenten einer Verbundheizungsanlage birgt die Einbindung der Wetterprognose ein erhebliches Optimierungspotential. Das Berücksichtigen der Außenlufttemperatur- und Globalstrahlungsprognose ermöglicht die genauere dynamische Bestimmung der Wärmesenke, da zukünftig auch solare Wärmegewinne zu berücksichtigen sind.

Weiterhin ist eine genaue Bestimmung der Verfügbarkeit von wetterabhängigen Wärmequellen, wie zum Beispiel der Solaranlage ausführbar.

In der Praxis kann eine Einbindung intern oder extern erfolgen [41]. Aktuell ist die interne Berücksichtigung in den Leitgeräten einiger Hersteller umgesetzt. Es erfolgt eine Vorausberechnung der Außenlufttemperatur auf Basis der korrigierten Vergangenheitswerte. Auf die Globalstrahlung reagieren die implementierten Regelungen und Steuerungen operativ.

Die externe Einbindung von prognostizierten Wetterdaten in die Leitgeräte ist durch das Einlesen über geeignete Schnittstellen umzusetzen. Für Deutschland bietet sich an, Wetterdaten über den deutschen Wetterdienst kostenpflichtig zu beziehen [42]. In einer Studie der Universität Oldenburg, der Hochschule Magdeburg-Stendal und der Meteocontrol GmbH sind bereits Ansätze untersucht, die zeitlich und räumlich grob gerasterten Aussagen des Wetterdienstes in standortspezifische und engmaschige Zeiträume zu überführen [43].

In dem Prozessmodell zum Anlagensystem existiert eine Schnittstelle zur Einbindung sowohl interner als auch externer Wetterdaten. Gegenwärtig sind reale Vergangenheitsdaten für die Außenlufttemperatur und die Globalstrahlung durch vordefinierte Kennfelder hinterlegt. Es ist jederzeit möglich diese Kennfelder auszutauschen, beispielsweise durch die Nutzung von TRY-Daten des Deutschen Wetterdienstes [42]⁶.

Außenlufttemperatur

Um die Simulation des Prozessmodells möglichst realitätsnah durchzuführen, erfolgt das Einbeziehen der Außenlufttemperatur als statisches Kennfeld mit den zu variierenden Eingangsgrößen Uhrzeit und Monat. Dessen Erstellung ist auf Basis von Messdaten in Potsdam nach [44] aus [45] in Form Tabelle 3-1 ausgeführt.

⁶ Bei TRY-Daten handelt es sich um Testreferenzjahre, welche regionale Wetterdatensätze beinhalten. Sie sind kostenpflichtig über den deutschen Wetterdienst zu beziehen.

| Uhrzeit \ Monat | 1 Uhr | 2 Uhr | ... | 24 Uhr |
|-----------------|-------|-------|-----|--------|
| Januar | -9,5 | -10 | ... | -9,4 |
| Februar | -5,4 | -6,5 | ... | -5,5 |
| ⋮ | ... | ... | ... | ... |
| Dezember | -7,7 | -8 | ... | -8 |

Tabelle 3-1: Außenlufttemperaturdaten in Abhängigkeit von Monat und Uhrzeit

Die Tabellenwerte sind in die Simulationssoftware zu übertragen, welche durch Nutzung eines Interpolationsverfahrens in der Lage ist Zwischenwerte zu ermitteln. In Abhängigkeit von den Eingangsvariablen Uhrzeit und Monat, erfolgt die Ausgabe des Kennfeldwertes der Außenlufttemperatur. Aufgrund der dynamischen Variation der Eingangsgrößen ist dies zum Beispiel als Tagesverlauf in der Simulation zu nutzen. Für die Eingangsvariablen gibt der Nutzer lediglich die Startwerte in der Simulation vor. Deren Variation erfolgt durch Integratoren automatisch.

In Abbildung 3-12 ist das Kennfeld der Außenlufttemperatur mit den Eingangsgrößen Monat und Uhrzeit dargestellt. Das Kennfeld stellt die Datenbasis für die Ermittlung der Außenlufttemperatur für jeden definierten Wert der Eingangsgrößen⁷ dar.

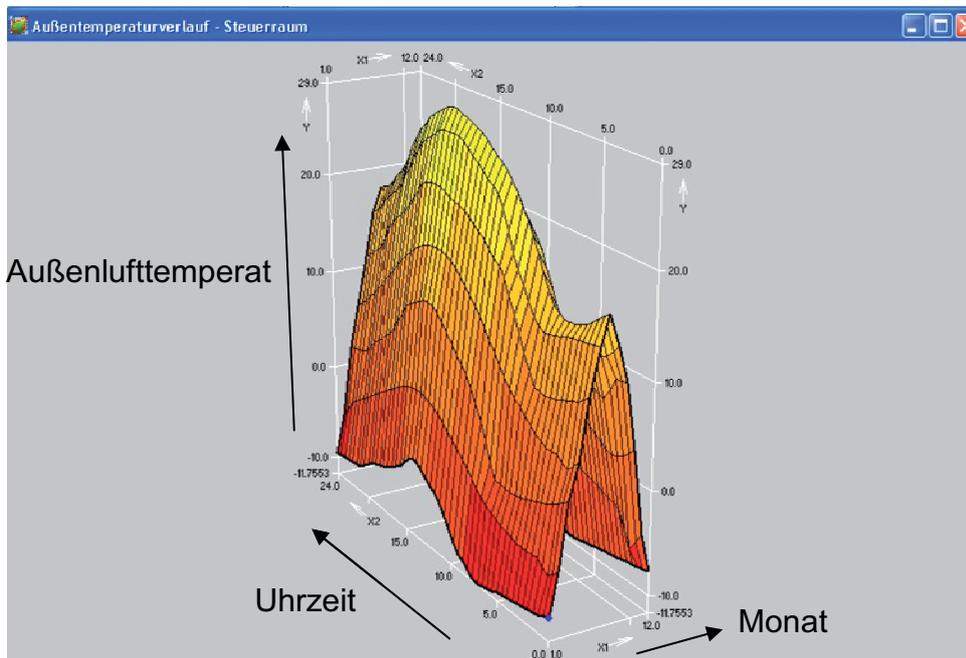


Abbildung 3-12: Außenlufttemperaturkennfeld

⁷ Die Definition der Eingangsgröße Monat erfolgt zwischen den Werten 1 = Januar und 12 = Dezember. Die Eingangsgröße Uhrzeit ist für die Werte 0 bis 24 Uhr definiert.

Globalstrahlung

Das Kennfeld der Globalstrahlung ist analog dem Außenlufttemperaturkennfeld mit den gleichen Eingangsgrößen eingebunden (Abbildung 3-13). Die Definition der Eingangsgröße Monat liegt bei diesem Kennfeld zwischen 1 (Januar) und 7 (Juli). Es ist auf Basis der Messdaten aus [46] angefertigt.

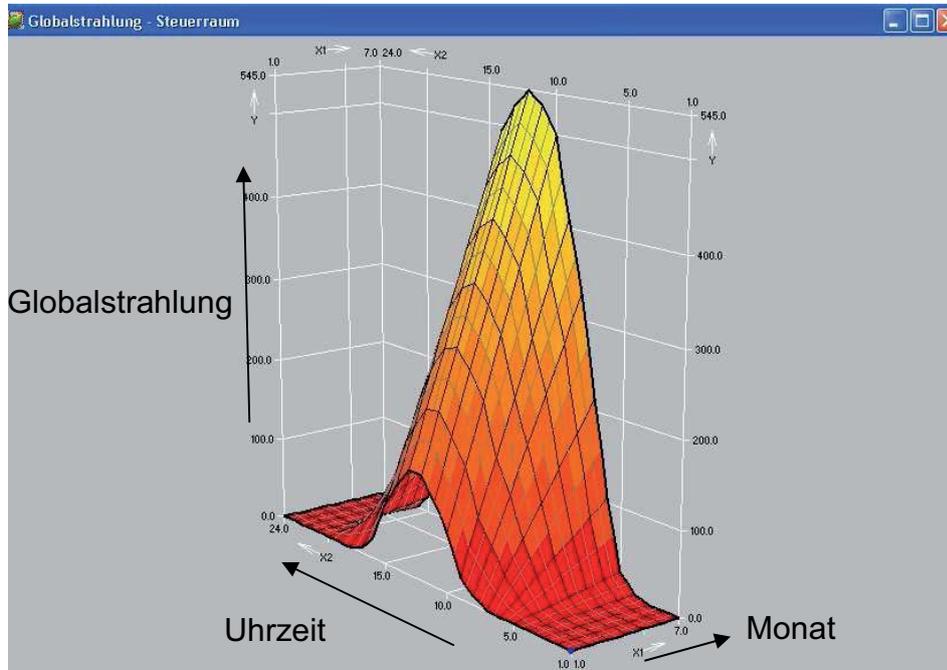


Abbildung 3-13: Globalstrahlungskennfeld

3.5 Prozesskennfelder der Wärmequellen

Die Erstellung des Prozessmodells der Verbundheizungsanlage in Kombination mit der Möglichkeit Wetterdaten in die Optimierung einzubeziehen und über eine leistungsfähige Simulationssoftware zu verfügen, erlauben eine detaillierte Darstellung und Bewertung der Energieströme.

Für die im Simulationssystem einzustellende Zykluszeit sind die Zeitkonstanten der Wärmeübertragung in den Wärmespeicher zu betrachten. Die Zykluszeit sollte höchstens dem 0,1-fachen des Wertes der kleinsten Zeitkonstante eines Modell-Bausteins entsprechen, da anderenfalls numerische Instabilitäten bei der Berechnung auftreten können. Die kleinsten Zeitkonstanten des modellierten Prozesses sind bei der Wärmeübertragung der Wärmeerzeuger zu finden. Diese begründen die Einschränkung in der zu wählenden Zykluszeit, welche durch den

Einsatz von Prozesskennfeldern für stationäre Zusammenhänge zwischen den Prozessgrößen des Wärmeerzeugers zu umgehen ist.

Die Kennfelder bilden das stationäre Wärmeübertragungsverhalten für eine Wärmequelle in Abhängigkeit der wirkenden Einflussvariablen ab. Als Eingangsgrößen der Kennfelder sind entsprechend jene Größen zu definieren, welche den Wärmestrom aus der Wärmequelle in den Speicher maßgeblich beeinflussen. Zusätzlich ist die Laufzeit des Wärmeerzeugers (Δt) als Eingangsgröße des Kennfeldes angelegt, um als Ausgangsgröße der Simulation die Wärmeenergie anstatt der Wärmeleistung ausgeben zu können. Dies ist nötig, um den direkten Kostenbezug herzustellen, welcher sich laut den Kostenfunktionen auf die Laufzeit des Wärmeerzeugers bezieht. Die Ein- und Ausgangsgrößen der erstellten Prozesskennfelder sind in Abbildung 3-14 zusammengefasst.



Abbildung 3-14: Prozesskennfelder der Wärmeerzeuger

Im Softwaresystem sind die Kennfelder in Form von Tabellen eingepflegt, welche als dreidimensionale Grafiken darzustellen sind. Das Kennfeld des Heizkessels ist in Abbildung 3-15 gezeigt. Dabei ist die durch den Heizkessel einzubringende Energie in Abhängigkeit der konstanten Laufzeit $\Delta t=20\text{min}$ (X1), dem konstanten Brennstoffmassenstrom $\dot{m}_{Br} = 0,00328\text{kg/s}$ (X2), sowie den variablen Größen Kesselstarttemperatur $\vartheta_{K,Start}$ (X3) und Speichertemperatur ϑ_{Sp} (X4) abgebildet.

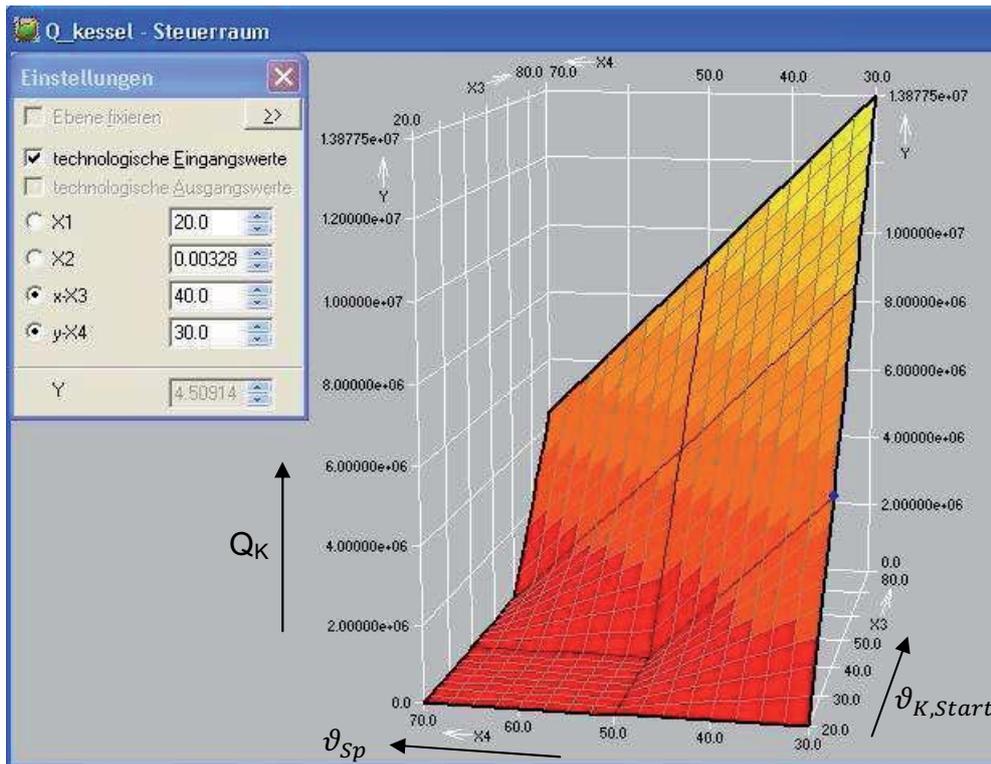


Abbildung 3-15: Kennfeld des Heizkessels

Die Software erlaubt es, erreichte reale Prozesszustände im Kennfeld zu adaptieren und als aktualisierte Werte in die Tabelle einzubetten. Damit ist die Modellgenauigkeit der Kennfelder zu gewährleisten.

3.6 Anforderungen an die Optimierungsmethode

Die dynamische Simulation des Prozesses ermöglicht die Darstellung der Prozesszustände in Abhängigkeit von den vorhandenen Einflussgrößen. Durch die Modellierung der Last mit Hilfe des Raummodells ist eine detaillierte Lastprognose unter Einbeziehung der Nutzeranforderungen, der Wetterprognose und der bauphysikalischen Besonderheiten realisierbar.

Das Wärmespeichermodell, in Kombination mit Lastprognose schafft die Voraussetzung, eine Aussage über den dynamischen Verlauf der Speicherladung zu treffen. Daraus ist die durch die Wärmeerzeuger aufzubringende Energie abzuleiten.

Die zeitabhängige Betrachtungsweise des Prozesses mit Hilfe des Modells führt auf ein dynamisches Zielfunktional, welches die auftretenden Kosten in Bezug zu der dem Wärmespeicher zuzuführenden Wärmeleistung in Abhängigkeit von der Zeit

bewertet. Die zu nutzende Lösungsmethode hat das Ziel, die kostenoptimale Zusammensetzung des Wärmeerzeugereinsatzes zu ermitteln. Dies hat durch die Berechnung der Betriebssollwerte in Abhängigkeit der dem Speicher zuzuführenden Energie zu erfolgen, welche an die zumeist autarken Leitgeräte der Wärmeerzeuger zu übergeben sind. Neben der Berücksichtigung der Dynamik des Prozesses muss die Lösungsmethode alle Einflussgrößen, welche die Verfügbarkeit (zum Beispiel Mindestschaltzeiten oder Sperrzeiten) und Kostenverursachung beeinflussen berücksichtigen.

Prädiktive Untersuchungen mittels Simulationsmodell sind ein wesentlicher Teil der zu entwickelnden Lösungsmethodik. Damit ist die Beeinflussung des Zielfunktionalis erklärt, sowohl von den Einflussgrößen (Abbildung 1-1: Zusammenwirken der Einflussgrößen des Prozesses) als auch von dem Zusammenhang zwischen den Systemkomponenten. Die durch die Rückführung der Speichertemperatur (Abbildung 3-16) verursachte wechselseitige Beeinflussungen der Wärmequellen untereinander stellt eine besondere Herausforderung an die zu nutzende Optimierungsmethodik dar. Diese verbietet die Aufstellung von dynamischen Verfügbarkeitsplänen für die einzelnen Wärmequellen, da diese zusätzlich in Abhängigkeit von der Speichertemperatur zu betrachten sind.

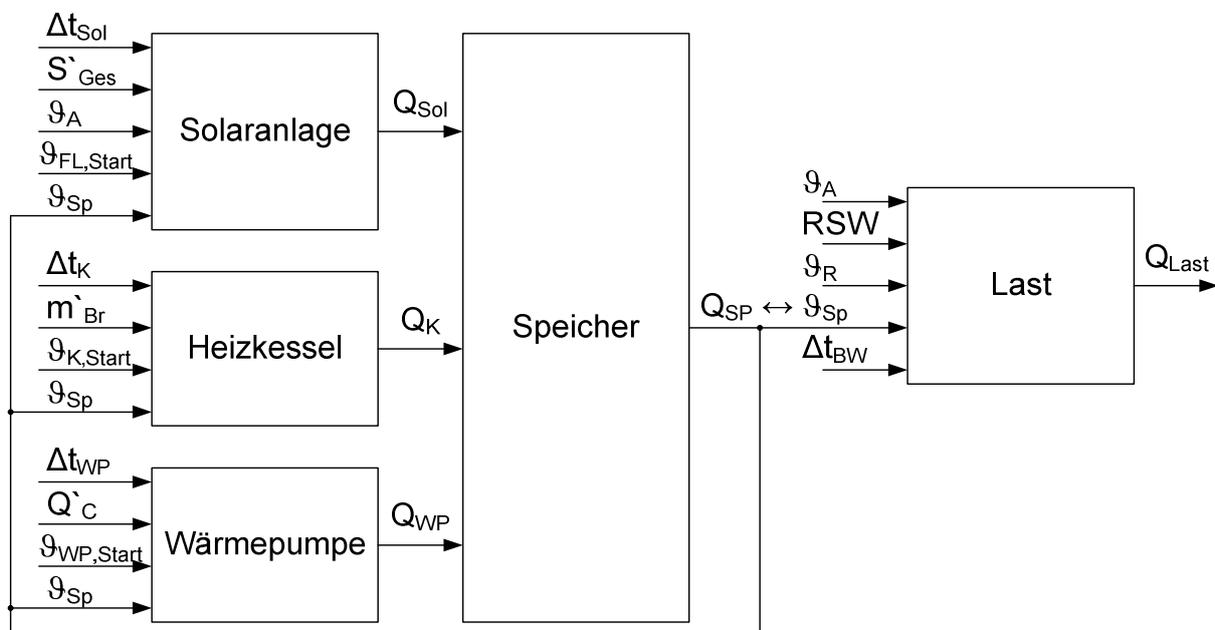


Abbildung 3-16: Wechselwirkungen der Komponenten der Verbundanlage

Es lässt sich zusammenfassen, dass zur Optimierung der Betriebsführung von Verbundheizungsanlagen eine prädiktive Lastprognose unter Zuhilfenahme eines dynamischen Prozessmodells zu erstellen ist. Dabei ist neben den Nutzeranforderungen und den bauphysikalischen Gebäudeeigenschaften auch die Wetterprognose in die Berechnung einzubeziehen.

Die dem Wärmespeicher zuzuführenden Energie ist unter Nutzung der Lastprognose und des Wärmespeichermodells zu berechnen. Damit ist gleichzeitig festgelegt, wie viel Energie durch die Wärmeerzeuger insgesamt aufzubringen ist. Diese Energiemenge dient als Optimierungsgrundlage für das zu lösende Zielfunktional. Für dessen Lösung und die dazugehörigen Restriktionen ist eine geeignete Lösungsmethode zu wählen. Im folgenden Abschnitt sind verschiedene Methoden vorgestellt.

4 Optimierungsmethoden

4.1 Allgemeines

Die Existenz des Prozessmodells der Verbundheizungsanlage erlaubt die Darstellung und kostenmäßige Bewertung der möglichen Betriebssollwerte für die Wärmeerzeuger. Diese sind zur Lösung des aufgestellten Zielfunktional zu nutzen und damit die kostenoptimalen Sollwerte zu ermitteln.

Die formalen Bedingungen, welche das Zielfunktional für eine analytische Lösung zu erfüllen hat, sind in [47] zusammengefasst. Für die Kostenoptimierung der Betriebsführung von Verbundanlagen ist diese Lösungsmethode aufgrund der Unterbestimmtheit des Gleichungssystems nicht möglich.

Eine Anforderung an die Lösungsmethode ist die Berücksichtigung von Mindestschaltzeiten der Wärmeerzeuger. Für die Vorausberechnung der kostenoptimalen Betriebssollwerte bedeutet dies eine starke Einschränkung im dynamischen Werteverlauf. Die Problemstellung ist aufgrund dessen als mehrstufiger Entscheidungsprozess zu betrachten.

Die Einteilung in Zeitstufen erfolgt durch die zeitliche Diskretisierung des dynamischen Prozesses. Dabei sind die dynamischen Prozesszustände $x(t)$ in diskrete Zustände $x(k\Delta t)$ zu überführen [48]. Die Zeitstufen sind dabei mit k bezeichnet und die Zeitschrittlänge mit Δt . Bei der Diskretisierung ist darauf zu achten, dass die Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit des dynamischen Prozesses gewährleistet bleibt [49]. Durch die Diskretisierung können die Betriebssollwerte nur noch zu definierten Zeitschritten variieren, was zu einer Begrenzung der möglichen Werte für das Optimierungsproblem führt [50].

Die Anzahl der Zeitschritte N richtet sich nach dem definierten Optimierungszeitraum (n) und der gewählten Zeitschrittlänge (Δt) nach Formel (4-1). Die Zeitstufen k sind damit nach Formel (4-2) definiert.

$$N = \frac{n}{\Delta t} \quad (4-1)$$

$$1 \leq k \leq N \quad (4-2)$$

Neben der Überführung des dynamischen Prozesses in einen zeitdiskreten Prozess, sind die zuzuführenden Wärmeleistungen und die Wärmeleistungen der Wärmeerzeuger anzupassen ($\dot{Q}_{zu}(t) \rightarrow Q_{zu}(k)$, $\dot{Q}_{WE}(t) \rightarrow Q_{WE}(k)$). Weiterhin hat die Angleichung des Zielfunktional zu erfolgen, wie in Formel (4-3) dargestellt.

$$K_{Opt}(Q_{zu}(k)) = \text{MIN} \sum_{j=1}^m [K_{WEj}(Q_{WEj}(k))] \quad (4-3)$$

Für die zu nutzende Lösungsmethode ergibt sich damit die Aufgabe, unter allen möglichen Betriebssollwerten für die Wärmeerzeuger jene Kombination auszugeben, welche die Betriebskosten für einen vorgegebenen Optimierungszeitraum minimiert.

4.2 Vollständige Enumeration

Durch die Diskretisierung des Prozesses erfolgt die Überführung der Problemstellung in einen mehrstufigen Entscheidungsprozess. Eine Lösungsmethode für die Berechnung der kostenoptimalen diskreten Einschaltssignale, beziehungsweise für die dazugehörige allgemeine Problemklasse, ist die vollständige Enumeration [51],[9].

Bei dieser Optimierungsmethode erfolgt die Berechnung der resultierenden Betriebskosten für alle möglichen Kombinationen, welche diese für einen vorgegebenen Optimierungszeitraum (n) annehmen können. Aus allen Lösungen ist abschließend diejenige auszuwählen, welche das Zielfunktional unter Beachtung aller Restriktionen minimiert.

Das Problem bei dieser Lösungsmethode ist die Anzahl der durchzuführenden Berechnungen. Diese ist abhängig von der Entscheidungsvarianz, das heißt von der Anzahl der möglichen Kombinationen in einem Zeitschritt. Für eine Verbundanlage mit 3 Wärmeerzeugern, welche der Beschränkung obliegen nicht gleichzeitig eingeschaltet zu sein, ergeben sich folgende vier Möglichkeiten: Alle Wärmeerzeuger aus-, oder jeweils ein Wärmeerzeuger zugeschaltet.

Die Anzahl der durchzuführenden Berechnungen ergibt sich durch die Entscheidungsvarianz und die Anzahl der Zeitschritte N nach Formel (4-4).

$$\text{Anzahl Berechnungen} = 4^N \quad (4-4)$$

Für einen Betrachtungszeitraum von 24h und einer Schrittweite von 20min ergeben sich ca. $2,23 \cdot 10^{43}$ Berechnungen. Unter der Annahme, dass eine Berechnung nur 1s dauert, benötigt man für die Problemlösung mit der vollständigen Enumeration $7 \cdot 10^{35}$ Jahre.

Der rechentechnische Aufwand für diese Methode lässt sich damit ableiten. Die vollständige Enumeration ist zusammenfassend zwar als zielführend zu betrachten, benötigt jedoch sehr große Rechenkapazitäten. Für eine große Zeitschrittzahl, durch lange Betrachtungszeiträumen und kleine Schrittweiten, ist diese Lösungsmethode ungeeignet.

4.3 Optimierungsmethoden zur Lösung des Zielfunktional

Optimierungsmethoden sind allgemein nach der Art der Problemstellung gegliedert. Für die Lösung zeitunabhängiger Problemstellungen ist ein statisches Optimierungsverfahren einzusetzen. Der zu optimierende Prozess ist durch Diskretisierung zwar in quasistationäre Prozesszustände zu überführen, diese ergeben sich jedoch in Abhängigkeit vom jeweiligen Zeitschritt. Es handelt sich bei der Optimierung der Betriebsführung daher um ein dynamisches Problem und ist mit einer dynamischen Optimierungsmethode zu lösen. Derartige Methoden sind weiter zu untergliedern, wie die in Abbildung 4-1 in Anlehnung an [52] dargestellte Klassifikation zeigt.

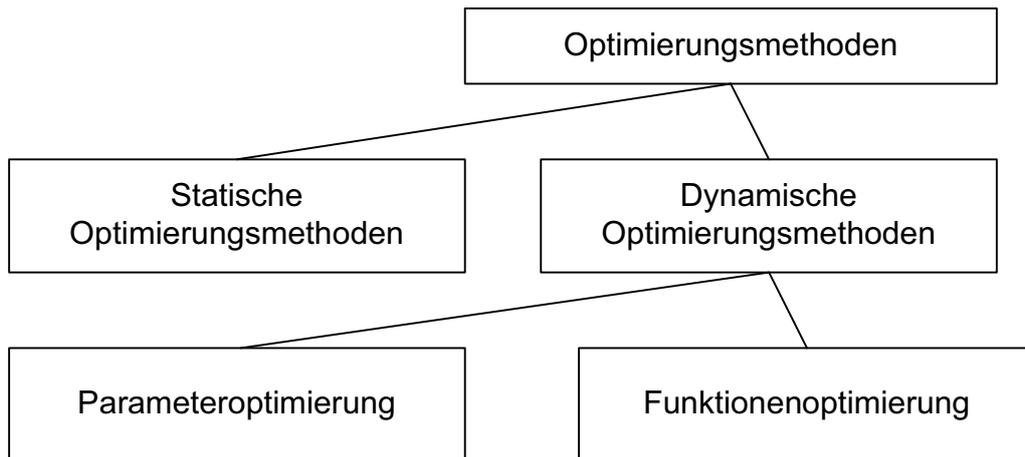


Abbildung 4-1: Klassifizierung von Optimierungsmethoden

Bei den dynamischen Optimierungsmethoden ist zwischen Parameteroptimierung und Funktionsoptimierung zu unterscheiden. Die Parameteroptimierung ist für Problemstellungen mit einer fest vorgegebenen Reglerstruktur zu nutzen, wobei lediglich die Reglerparameter für die fest vorgegebene Reglerstruktur zu optimieren sind [53]. Das Gütemaß ist bei dieser Methode als Funktion der Parameter zu minimieren beziehungsweise maximieren. Diese Vorgehensweise ist für die Berechnung der kostenoptimalen Betriebsparameter einer Verbundheizungsanlage nicht geeignet, da bei dieser Problemstellung keine feste Reglerstruktur vorgegeben ist.

Bei der Funktionsoptimierung ist das Gütekriterium zumeist ein Funktional, welches eine Zeitabhängigkeit beinhaltet. Die für eine Optimierungsaufgabe zu nutzende Methode richtet sich nach der mathematischen Struktur des Zielfunktional und dessen Restriktionen. Für die Funktionsoptimierung erfolgt daher eine weitere Untergliederung nach der mathematischen Form der Restriktionen, wie in Abbildung 4-2 dargestellt.

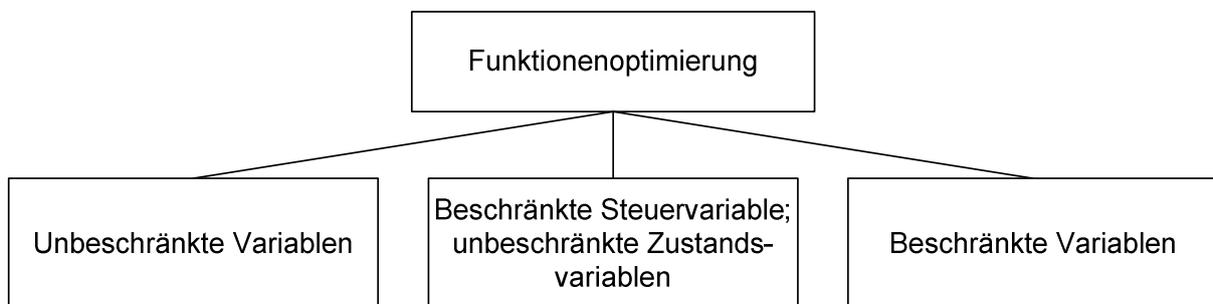


Abbildung 4-2: Untergliederung der Funktionsoptimierung

Restriktionen treten in Form von Gleichungs- und Ungleichungsbestimmungen auf und geben die Beschränkungen der Optimierungsvariablen vor. Für Prozesse mit unbeschränkten Variablen ist als Optimierungsmethode die Variationsrechnung zu nutzen. Zur Lösung von Zielfunktionalen mit beschränkten Steuervariablen und unbeschränkten Zustandsvariablen ist das Pontrjaginsche Maximumprinzip geeignet. Dynamische Problemstellungen mit Beschränkungen sowohl der Steuervariablen als auch der Zustandsvariablen sind durch Nutzung der Methode der dynamischen Programmierung zu lösen [54].

Für die Optimierung von Verbundheizungsanlagen sind die Betriebsparameter als Steuervektoren zu definieren. Sie sind aufgrund von technischen und technologischen Beschränkungen begrenzt. Unter Zustandsvariablen sind die quasistationären Prozesszustände des Wärmespeichers und der Wärmeerzeuger zu verstehen. Diese sind genau wie die Steuervariablen begrenzt.

Zur Lösung des definierten Zielfunktionalen ist aufgrund der Beschränkungen sowohl der Steuer- als auch der Zustandsvariablen nur die dynamische Programmierung geeignet.

4.4 Dynamische Programmierung

Die Methode der dynamischen Programmierung ist ein Verfahren zur Lösung mehrstufiger Entscheidungsprozesse [55]. Diese ist besonders für die softwaregestützte Berechnung von Zielfunktionalen mit beschränkten Steuer- und Zustandsvariablen geeignet [56]. Die Methode der dynamischen Programmierung beruht auf dem von Richard Bellman entwickelten Optimalitätsprinzip, welches wie folgt lautet:

Principle of Optimality: „An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decision must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision.” (Bellman, 1957) [57]

Dieses besagt, dass eine optimale Strategie nur vom Anfangszustand und den nachfolgenden bestmöglichen Entscheidungen abhängt. Innerhalb einer optimalen Entscheidungsstrategie (Politik) ist dementsprechend jede einzelne Entscheidung (Unterpolitik) optimal.

Ein Zustand (x_k) ist dabei definiert als der quasistationärer Prozesszustand in einer Stufe (k), der gesteuerte Übergang in diesen Zustand als Entscheidung (u_{k-1}) [58], [59]. Das Optimierungsziel ist durch die Ermittlung der optimalen Entscheidungen in den einzelnen Stufen und der dazugehörigen Zuständen zu erreichen.

Eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Methode ist, dass das Zielfunktional Markow-Charakter aufweist [60]. Das heißt, ein Zustand (x_k) darf nur von der getroffenen Entscheidung (u_{k-1}) und dem vorherigen Zustand (x_{k-1}) abhängen, jedoch nicht von der Entscheidung in einer vorherigen Stufe (u_{k-m}). Mathematisch ist dies wie in den Formeln (4-5) und (4-6) auszudrücken:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) \quad (4-5)$$

$$x_k \neq f(u_{k-m}); m > 1 \quad (4-6)$$

Die Lösung von Zielfunktionalen mit der Methode der dynamischen Programmierung erfolgt in drei Phasen - der Dekomposition, der Vorwärts- und der Rückwärtsrechnung. Die Vorwärts- und Rückwärtsrechnung (auch -rekursion genannt) können je nach Problemstellung auch vertauscht werden [51].

Dekomposition

Die Dekomposition dient der Gliederung eines mehrstufigen Entscheidungsprozesses, in endlich viele einstufige Teilprobleme. Erfüllt die zu lösende Zielfunktion den Markow-Charakter, ist es möglich diese Gliederung in Stufen ($k = 1 \dots N+1$) durchzuführen. Nur dann ist jedes Teilproblem, unter Beachtung der Restriktionen für die Zustandsvariablen und Steuervariablen, voneinander unabhängig zu lösen.

Die Dekomposition hat so zu erfolgen, dass in jeder Stufe eine Entscheidung (u_{k-1}) zu treffen ist. Alle getroffenen Entscheidungen geben zusammengesetzt direkt die Entscheidungsstrategie an. In Abbildung 4-3 ist die Dekomposition eines Prozesses mit dem Ausgangszustand (x_0) und dem Endzustand (x_{N+1}), sowie den dazugehörigen Entscheidungen ($u_0 \dots u_N$) grafisch dargestellt.

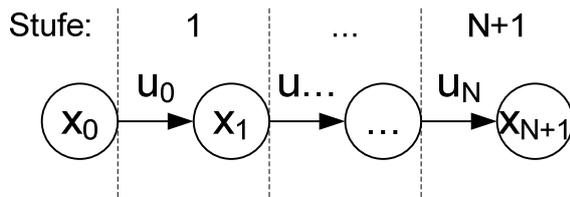


Abbildung 4-3: Dekomposition eines mehrstufigen Entscheidungsprozesses

Bei der Dekomposition eines Problems ist darauf zu achten, dass die Komplexität der anschließend durchzuführenden rekursiven Berechnung mit Erhöhung der Stufenanzahl stark wächst.

Vorwärtsrechnung

Das Ziel der Vorwärtsrechnung ist die Bestimmung der relativ optimalen⁸ Entscheidungs- und Zustandsvariablen für die einzelnen Stufen [61]. Dazu ist die rekursive Berechnung der Zielfunktionswerte der Stufen durchzuführen [62]. Diese erfolgt durch Nutzung der Bellmansche Rekursionsgleichung, welche für die beschriebene Definition von Zustand und Entscheidung allgemein wie folgt lautet:

$$Z_k^*(x_k) = \text{MIN}[z(x_{k-1}) + Z(x_k, u_{k-1})] \quad (4-7)$$

Der optimale Zielfunktionswert (Z^*) in einer Stufe (k) ist immer im Zusammenhang mit dem erreichten Zustand zu betrachten. Er ist als Minimum der Summe des Zielfunktionswertes der Vorstufe und dem Zielfunktionswert der aktuellen Stufe zu ermitteln.

Die Rekursionsgleichung ist beginnend mit dem Ausgangszustand (x_0) für jede Stufe ($k = 1 \dots N+1$) auszuführen. Alle relativ optimalen Lösungen mit den dazugehörigen Zuständen und Entscheidungen sind in einem Zwischenspeicher zu sichern, da diese für die Berechnung der endgültig optimalen Lösung benötigt werden.

⁸ Relativ optimal bezieht sich auf das Gütekriterium und ist in Abhängigkeit eines angenommenen Zustandes in der Vorstufe zu ermitteln. Bei der Vorwärtsrechnung können mehrere relativ optimale Entscheidungs- und Zustandsvariablen für eine Stufe ermittelt werden.

Rückwärtsrechnung

Ausgehend vom erreichten Endzustand ist durch die Rückwärtsrechnung der optimale Zielfunktionswert für das gegebene Zielfunktional zu ermitteln. Dazu sind die im Zwischenspeicher abgelegten relativ optimalen Zielfunktionsergebnisse der einzelnen Stufen, beginnend mit der Letzten ($k=N$) nach den dazugehörigen optimalen Entscheidungen und Zuständen zu durchsuchen. Damit kann der endgültig optimale Zielfunktionswert direkt angegeben werden. Weiterhin ist die Aussage über die optimale Entscheidungsstrategie und den dazugehörigen optimalen Prozesszustandsverlauf möglich.

Die Methode der dynamischen Programmierung ist für Problemstellungen zu nutzen, welche durch Dekomposition in eine begrenzte Anzahl Stufen mit endlich vielen Entscheidungen und Zuständen zerlegbar ist. Die Komplexität der auszuführenden rekursiven Berechnung wächst dabei mit steigender Stufenanzahl. Durch die Rekursionsgleichung erfolgt die Bewertung einer getroffenen Entscheidung nicht nur nach kurzfristigen Prozesswirkungen, sondern hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Gesamtprozess [63]. Eine Besonderheit der Methode ist die direkte Ausgabe der optimalen Lösung für das Zielfunktional mit den dazugehörigen Zustand- und Entscheidungsverläufen.

Bekanntes Anwendungsgebiete der dynamischen Programmierung lassen sich in der Biologie (Algorithmus zum Finden der wahrscheinlichsten Sekundärstruktur eines RNS Moleküls [64]), in der Mathematik (Optimierung von Matrizenmultiplikationen), in der Informatik (Prozesse optimal auf Prozessoren verteilen), in der Betriebswirtschaftslehre (Lager optimal füllen, LKW-Kapazität optimal nutzen [65]) sowie in der Energietechnik (Einsatzoptimierung thermischer Energiequellen [66]) finden.

Die bekannten Anwendungen der Methode haben die gemeinsame Eigenschaft, dass es sich um zu optimierende dynamische Systeme handelt. Diese sind von einem definierten Anfangszustand in einen gewünschten Endzustand zu überführen [67] und es ist jeweils die exakte und vollständige Lösung gesucht [68]. Die Nutzung der dynamischen Programmierung bietet sich für vielfältige Anwendungen an, da es sich nicht um einen universellen Algorithmus handelt, sondern eher um einen komplexen Lösungsweg für welchen die zielgerichtete Nutzung über eine prozessspezifische Analyse zu bestimmen ist [60].

Für das definierte Zielfunktional stellt die dynamische Programmierung eine geeignete Lösungsmethode dar, da sie alle Anforderungen an die Lösungsmethode erfüllt. Für den zu optimierenden Prozess ist sowohl der Anfangszustand (Temperatur des Wärmespeichers zu Beginn der Optimierung) als auch der zu erreichende Endzustand (definiert durch die mindestens zu erreichende Speichertemperatur) bekannt und durch die Existenz des Prozessmodells erfolgt die Bewertung der getroffenen Entscheidungen anhand von Kostenfunktionen. Die Beschreibung der Methodennutzung erfolgt im folgenden Abschnitt.

5 Optimierungsmethodik für Verbundheizungsanlagen

5.1 Aufbau und Gliederung der Methodik

Das Ziel der Optimierung ist es, den Einsatz der Wärmeerzeuger so zu koordinieren, dass die Betriebsführung kostenoptimal abläuft bei gleichzeitiger Deckung der Nutzeranforderungen. Durch das Prozessmodell der Wärmesenke ist eine detaillierte Lastprognose möglich, woraus der dynamische Sollwertverlauf der vorzuhaltenden Speichertemperatur zu bestimmen ist.

Mit Hilfe des Wärmespeichermodells lässt sich eine detaillierte Prognose über die Speichertemperatur aufstellen. Dabei gilt die Annahme, dass kein Wärmeerzeugereinsatz erfolgt. Durch den Vergleich aus dem Sollwert- und dem Istwertverlauf ist die dem Speicher mindestens zuzuführende Wärmemenge in Abhängigkeit von den diskreten Zeitstufen abzuleiten.

Durch die zeitliche Diskretisierung des Prozesses sind Aussagen zu treffen, zu welchen Zeitschritten dem Wärmespeicher bestimmte Energiemengen zuzuführen sind. Die Bestimmung der nutzerspezifischen Wärmebereitstellung erfolgt unter der Maßgabe das Speichertemperaturniveau möglichst gering zu halten. Dieser Teil der Optimierungsmethode ist als technologische Optimierung zu bezeichnen. Das real benötigte Temperaturniveau, welches zur Deckung der Nutzeranforderungen vorzuhalten ist, dient dabei als Optimierungsgrundlage für den koordinierten Wärmequelleneinsatz.

Im zweiten Teil der Optimierungsmethodik, welcher betriebswirtschaftliche Optimierung genannt wird, erfolgt die Optimierung der Betriebskosten durch die Vorausberechnung der kostenoptimalen Betriebssollwerte in Abhängigkeit der ermittelten zuzuführenden Wärmemenge. Die zeitabhängige Betrachtung führt bei der Einsatzplanung auf ein dynamisches Zielfunktional, welches mit Hilfe der dynamischen Programmierung gelöst werden kann. Das Ergebnis der Berechnung ist die koordinierte Einsatzplanung der einzelnen Wärmeerzeuger nach ihrer Verfügbarkeit und Kostenverursachung.

Die Darstellung der Optimierungsmethodik am Regelkreis erfolgt in Abbildung 5-1. Durch den Soll- Istwertvergleich erfolgt die Ausgabe der zuzuführenden Energie. Ist diese für einen Zeitschritt größer als Null greift die betriebswirtschaftliche Optimierung und gibt für diesen Fall die kostenoptimalen Betriebsparameter in Form des Steuervektors aus. Die Wirkung der veränderten Betriebsparameter wirkt sich wiederum mit einer Erhöhung der Speichertemperatur aus, welche einen veränderten Istwert darstellt.

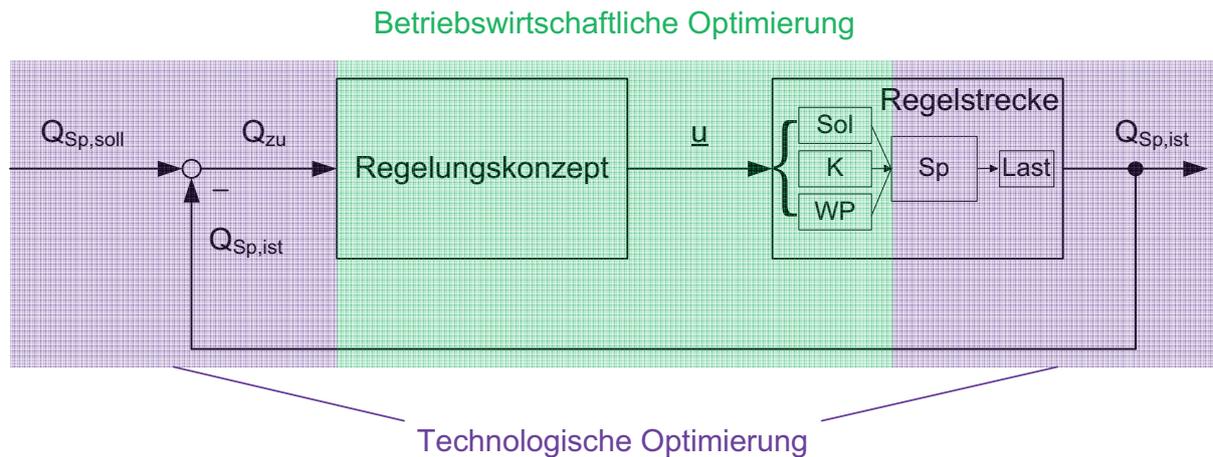


Abbildung 5-1: Darstellung der Optimierungsmethodik am Regelkreis

5.2 Technologische Optimierung

Da in diesem Teil der Optimierungsmethodik die Darstellung der Zusammenhänge zwischen Prozessgrößen und Zielgröße nur durch Simulationen erfolgen kann, ist die Bezeichnung Optimierung zu wählen.

Das Ziel der technologischen Optimierung ist es den Speicherladezustand so gering wie möglich, jedoch so hoch wie nötig zu halten. Eine niedrigere Speichertemperatur verbessert den Wirkungsgrad der Energieeinspeisung der Wärmeerzeuger und minimiert gleichzeitig die Speicherverluste.

Die technologische Optimierung ist in drei Teilen durchzuführen. Der erste Teil ist die Ermittlung des Sollwertverlaufes der Speichertemperatur (Speichersollwert), der zweite Teil die Bestimmung des Speicheristwertverlaufes und der dritte Teil die Berechnung der dem Wärmespeicher zuzuführende Energiemenge. Der erste und zweite Teil erfolgt durch die Nutzung von dynamischen Prozessmodellen und der dritte Teil durch Anwendung einer Berechnungsgleichung.

5.2.1 Bestimmung des Speichersollwertverlaufes

Der Speichersollwertverlauf gibt die mindestens im Wärmespeicher vorzuhaltende Temperatur an, welche zur Deckung der Nutzeranforderungen erforderlich ist. Sie resultiert aus den Heizkreis- und Trinkwarmwasser-Anforderungen und ist daher separat in Abhängigkeit dieser zu ermitteln.

5.2.1.1 Bestimmung des Speicherladezustandes in Abhängigkeit der Heizkreisanforderungen

Für die Berechnung des Speicherladezustandes ist das Modell der Heizkreisabnahme, welches im Abschnitt 3.2.2.1 beschrieben ist, zu verwenden. Die Nutzeranforderungen sind durch einen fest vorgegebenen Raumsollwert beschrieben. Die daraus resultierende Heizlast, welche durch den Wärmespeicher bereitzustellen ist, benötigt einen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur zu berechnenden Vorlauftemperaturwert ($\vartheta_{HK,VL}$). Dieser ist durch die Verwendung der Heizkurve nach Formel (5-1) in zu bestimmen [69].

$$\vartheta_{VL} = \left(\frac{\vartheta_{VLN} + \vartheta_{RLN}}{2} - \vartheta_i \right) \left(\frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{\vartheta_i - \vartheta_{aN}} \right)^{\frac{1}{1+m}} + \vartheta_i + \frac{(\vartheta_{VLN} - \vartheta_{RLN})(\vartheta_i - \vartheta_a)}{2 \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{aN})} \quad (5-1)$$

In der Simulationssoftware steht für die Berechnung des Vorlauftemperaturwertes der Modellbaustein „Heizkurve“ zur Verfügung. Dieser hat die Eingangsgrößen Außenlufttemperatur und Raumsollwert. Als Parameter sind die normierte Außenlufttemperatur, die Spreizung, die Krümmung sowie die Neigung anzugeben. Optimierungsfunktionen, wie das Erhöhen des Vorlauftemperatursollwertes zum Schnellaufheizen sind nicht berücksichtigt.

Für die Berechnung der minimalen Speichertemperatur ($\vartheta_{Sp,min,Hk}$) ist die in Abschnitt 3.2.2.1 enthaltene Formel (3-16) nach der Speichertemperatur (Formel (5-2)) umzustellen.

$$\vartheta_{Sp,min,Hk} = \frac{\vartheta_{HK,VL} - x_1^4 \cdot \vartheta_{HK,RL}}{x_1^3 \cdot x_2 + x_1^2 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 + x_2} \quad (5-2)$$

$$x_1 = \frac{\dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W}}{\dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} + 0,25 \cdot A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}$$

$$x_2 = \frac{0,25 \cdot A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}{\dot{m}_{W,HK} \cdot c_{p,W} + 0,25 \cdot A_{WT,HK} \cdot k_{WT,HK}}$$

5.2.1.2 Bestimmung des Speicherladezustandes verursacht durch die Trinkwarmwasser-Anforderungen

Auch die Trinkwarmwasser-Abnahme setzt einen gewissen Speicherladezustand voraus. Der Nutzer gibt dafür die gewünschte Nutzungsdauer sowie die Mindesttemperatur des Trinkwarmwassers ($\vartheta_{BW,Soll}$) an. Die Abnahme erfolgt direkt aus dem Speicher. Damit ist der Sollwert der Speichertemperatur, welcher sich durch die Trinkwarmwasser-Anforderungen ergibt direkt durch die Mindesttemperatur des Trinkwarmwassers bestimmt.

5.2.1.3 Resultierender Speichertemperatursollwertverlauf

Der resultierende Verlauf des minimalen Speicherladezustands ergibt sich aus dem Maximum der einzelnen Verläufe, verursacht durch die Heizanforderungen und die Trinkwarmwasser-Abnahme.

Diese bestimmen die minimale Speichertemperatur, welche mit der Wassermasse im Speicher und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser zur Berechnung des Speicherenergiesollwertes nach Formel (5-3) zu nutzen sind:

$$Q_{Sp,soll} = m_{W,Sp} \cdot c_{p,W} \cdot \vartheta_{Sp,min} \quad (5-3)$$

Der dynamische Verlauf des Speichersollwertes ist im Simulationssystem abzuspeichern und für die Berechnungen in der betriebswirtschaftlichen Optimierung vorzuhalten.

5.2.2 Bestimmung des Speicheristwertverlaufes

Der Istwertverlauf des Speicherladezustandes im Wärmespeicher ist durch Nutzung des Prozessmodells Wärmespeicher zu ermitteln, wobei die prognostizierte Last zu

berücksichtigen ist. Die Einspeisung durch die Wärmequellen ist bei der Simulation des Speichertemperaturverlaufs nicht einzubeziehen.

Der dynamische Istwertverlauf der Speicherenergie ist analog dem Sollwertverlauf abzuspeichern und vorzuhalten.

5.2.3 Bestimmung der dem Speicher zuzuführenden Energiemenge

Für die Ermittlung der dem Speicher zuzuführenden Wärmemengen sind neben dem Sollwert- und Istwertverlauf des Speicherladezustands auch die Speicherverluste zu berücksichtigen, wie in der folgenden Formel dargestellt:

$$Q_{zu} = Q_{Sp,soll} - Q_{Sp,ist} \quad (5-4)$$

Für die Berechnung des definierten Zielfunktional (Formel (4-3)) hat die zuzuführende Energie in Abhängigkeit von diskreten Zeitschritten vorzuliegen. Dazu ist der dynamische Verlauf zu diskretisieren, wodurch die Werte in Abhängigkeit von 1...N diskreten Zeitschritten (k) mit der Zeitschrittlänge (Δt) auszugeben sind.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass in der technologische Optimierung die modellbasierte Berechnung der dem Speicher zuzuführenden Energie ausgeführt ist. Die technologische Optimierung ist als erster Teil der entwickelten Methodik als Optimierung zu bezeichnen, da für die Berechnung der zuzuführenden Energie unter Berücksichtigung der wirkenden Einflussfaktoren keine analytische Lösung existiert. Die Lösung ist durch Simulation der erstellten Prozessmodelle zu ermitteln.

Das Ergebnis der technologischen Optimierung ist der erste diskrete Zeitschritt (ausgehend vom Anfangszustand der Optimierung), in welchem die zuzuführende Energie größer als Null ist. Dieser wird mit dem Index „zu“ versehen. Daraus ergibt sich die zuzuführende Energie für diesen Zeitschritt $Q_{zu}(k_{zu})$, für welchen die betriebswirtschaftliche Optimierung zu erfolgen hat.

5.3 Betriebswirtschaftliche Optimierung

5.3.1 Allgemeines

Das Ziel der betriebswirtschaftlichen Optimierung ist die Vorausberechnung des kostenoptimalen Wärmeerzeugereinsatzes durch Lösen des definierten Zielfunktional (Formel (4-3)). Für Verbundheizungsanlagen ergeben sich die resultierenden Betriebskosten in Abhängigkeit von der dem Wärmespeicher zuzuführenden Energie. Diese stehen wiederum in Abhängigkeit zu der Verfügbarkeit der Wärmequellen, welche unterschiedliche Wärmebereitstellungskosten aufweisen. Die durch den Wärmeerzeugereinsatz resultierenden Kosten setzen sich additiv zusammen, wie in Formel (5-5) gezeigt:

$$K(Q_{zu}(k_{zu})) = K_{Sol}(Q_{Sol}(k)) + K_{WP}(Q_{WP}(k)) + K_K(Q_K(k)) \quad (5-5)$$

Dies entspricht der Definition des allgemeinen additiven Zielfunktional:

$$Z(X) = z_1(x_1, u_0) + z_2(x_2, u_1) + z_3(x_3, u_2) \quad (5-6)$$

Um die dynamische Programmierung als Lösungsmethode für das Zielfunktional nutzen zu können, muss dieses Markow-Charakter besitzen. Für die allgemeine additive Zielfunktion lautet dies wie folgt:

$$x_2 = f(x_1, u_1); x_3 = f(x_2, u_2) \quad (5-7)$$

Zur Nutzung der dynamischen Programmierung für die Optimierung einer Verbundheizungsanlage ist in der Phase der Dekomposition die Erfüllung des Markow-Charakters umzusetzen. Dies hat durch die gezielte Definition von Stufe (k), Zustand (x) und Entscheidung (u) zu erfolgen.

5.3.2 Nutzung der Dynamischen Programmierung

5.3.2.1 Dekomposition

Durch die Dekomposition, ist das Optimierungsproblem in Teilprobleme aufzugliedern, welche nacheinander zu lösen sind.

Eine Untergliederung nach den diskreten Zeitschritten führt zwar zur Lösung des Problems, jedoch ist bei dieser Gliederung der Markow Charakter nicht erfüllt. Es würde sich der in Abbildung 5-2 dargestellte Entscheidungsbaum für die Zustände und Entscheidungen in den diskreten Zeitschritten $k=1 \dots N+1$ ergeben.

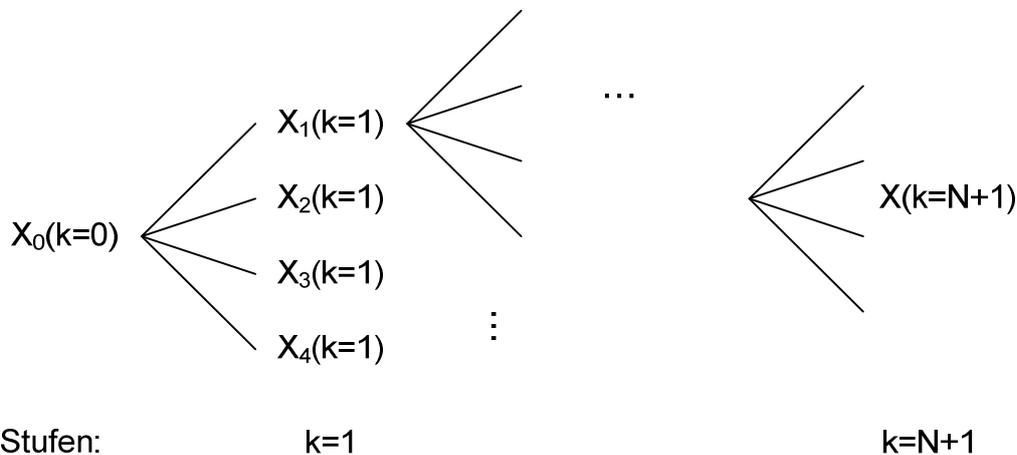


Abbildung 5-2: Dekomposition nach diskreten Zeitschritten

Im Gegensatz zur vollständigen Enumeration tritt keine Rechenzeiterparnis ein, da in jedem Zeitschritt die beschriebenen 4 Entscheidungen (kein Wärmeerzeugereinsatz oder Einsatz eines Wärmeerzeugers) möglich sind. Aus diesem Grund hat die Dekomposition für die Optimierung der Betriebsführung einer Verbundanlage mit einer anderen Definition von Stufe, Zustand und Entscheidung zu erfolgen.

Aufgrund der additiven Zusammensetzung der Gesamtkostenfunktion aus der Kostenverursachung der Wärmeerzeuger, ist die Dekomposition anhand der Anzahl der Wärmequellen durchzuführen. Die Stufenanzahl ($j=1 \dots m$) zur Lösungsermittlung entspricht demnach der Anzahl an Wärmequellen in der Verbundheizungsanlage. Damit ist die Lösungsmethode auch für Anlagen mit mehr oder weniger Wärmeerzeugern wie in der Beispielanlage zu nutzen, ohne dass der Rechenaufwand exponentiell steigt.

Die Definition von Zuständen erfolgt als die durch den Wärmeerzeuger eingebrachte Energiemenge in Abhängigkeit des diskreten Zeitschrittes k ($k=1 \dots k_{zu} - 1$). Entscheidungen sind durch die Einsatzzeit des Wärmeerzeugers bestimmt, welche im Bereich $\Delta t_{WE,j} = 0, 1, 2, \dots, k_{zu} - 1$ schwankt. Das heißt die Einsatzzeit von $\Delta t_{WE,j} = 1$ entspricht einem Zeitraum von k , die Einsatzzeit von $\Delta t_{WE,j} = 2$ entsprechend dem Zeitraum von $2k$. Der Wärmeerzeugereinsatz ist nur bis $k_{zu} - 1$

möglich, da die Wärme in k_{zu} bereitstehen muss.

Die Anpassung des allgemeinen additiven Zielfunktionalis erfolgt mit den vorgenommenen Begriffsbestimmungen wie folgt:

$$K(Q_{zu}(k_{zu})) = k_{WE1}(Q_{WE1}(k), \Delta t_{WE1}) + k_{WE2}(Q_{WE2}(k), \Delta t_{WE2}) + k_{WE3}(Q_{WE3}(k), \Delta t_{WE3}) \quad (5-8)$$

Um die Wärmeerzeuger den Stufen der dynamischen Programmierung zuzuordnen hat eine Kostenbewertung zu erfolgen. Dazu sind die Kostenfunktionen der Wärmeerzeuger für eine definierte Einsatzzeit zu berechnen, welche der bei der Diskretisierung festgelegten Zeitschrittlänge (Δt) entspricht. Die Größen Brennstoffmassenstrom (\dot{m}_{Br}), Pumpenleistung (P_P), sowie Verdichterleistung (P_{VD}) sind dabei über die gesamte Zeitschrittlänge als konstant zu betrachten.

$$K_K(\Delta t) = (k_{Br} \cdot \dot{m}_{Br} + k_{el} \cdot P_P) \cdot \Delta t \quad (5-9)$$

$$K_{Sol}(\Delta t) = k_{el} \cdot P_P \cdot \Delta t \quad (5-10)$$

$$K_{WP}(\Delta t) = k_{el} \cdot P_{VD} \cdot \Delta t \quad (5-11)$$

Das Ziel ist es, den Wärmeerzeuger welcher die geringsten Kosten verursacht vorrangig einzusetzen, d.h. der Stufe 1 (WE1) zuzuordnen. Der Wärmeerzeuger, welcher die nächst höheren Kosten verursacht der Stufe 2 (WE2) und der Wärmeerzeuger, welcher die höchsten Kosten für die definierte Zeitschrittlänge verursacht ist in Stufe 3 (WE3) zu berücksichtigen. Diese Vorgehensweise ist für eine beliebige Anzahl an Wärmeerzeuger erweiterbar.

Zusätzlich sind die Steuervariablen x und y zu definieren. Die Variable x gibt an, wieviele diskrete Zeitschritte der günstigste Wärmeerzeuger einzusetzen ist, bevor er die gleichen Kosten wie der nächst kostenintensivere verursacht. Analog dazu beschreibt die Steuervariable y wieviele Zeitschritte der Wärmeerzeuger in Stufe 2 zuzuschalten ist, bevor er die gleichen Kosten wie der Wärmeerzeuger in Stufe 3 verursacht. Dies ist wie in den Formeln (5-12) und (5-13) darzustellen.

$$x = \frac{K_{Min+1}(\Delta t)}{K_{Min}(\Delta t)} \quad (5-12)$$

$$y = \frac{K_{Max}(\Delta t)}{K_{Max-1}(\Delta t)} \quad (5-13)$$

Die Steuervariablen sind als Abbruchkriterium des Rekursionsalgorithmus zu nutzen, um unnötige Berechnungen zu vermeiden. Sie sind einzusetzen, sobald der alleinige Wärmeerzeugereinsatz in einer Stufe den vollständigen Bedarf der zuzuführenden Energie deckt.

In Abbildung 5-3 ist die Dekomposition der Problemstellung anhand der Anzahl an Wärmeerzeugern mit den dazugehörigen Beispielen für die definierten Begriffe Entscheidung und Zustand dargestellt.

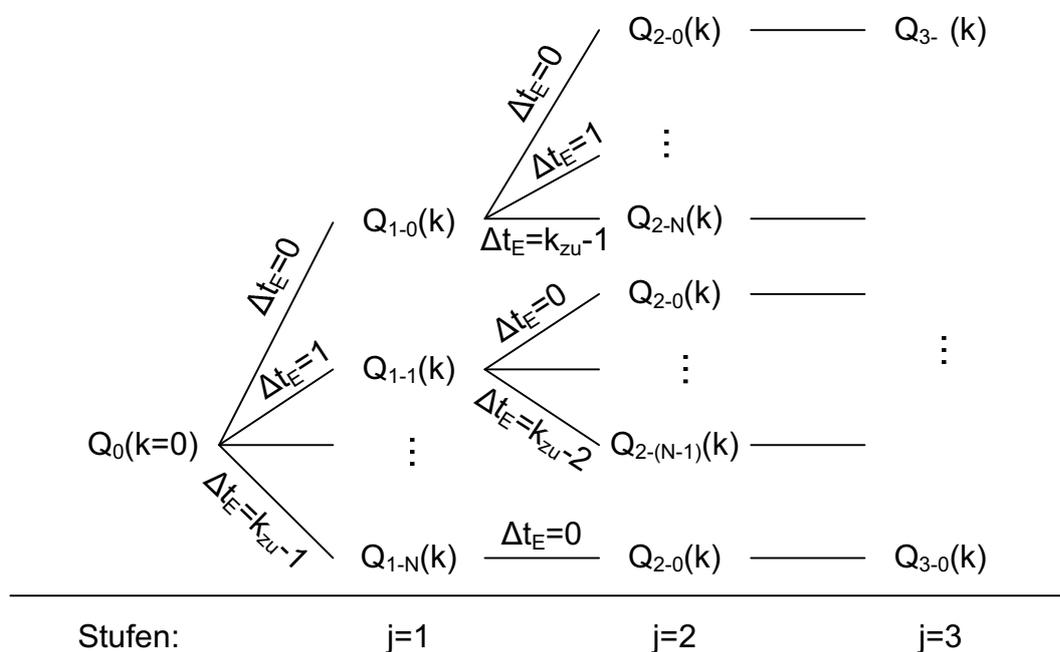


Abbildung 5-3: Dekomposition nach der Anzahl der Wärmequellen

Für die Erfüllung des Markow-Charakters ist ein zusätzliches Sperrkriterium für den Wärmeerzeugereinsatz vorzugeben. Dieses besagt, dass der Wärmeerzeugereinsatz nur nach dem Einsatz eines Wärmeerzeugers in einer Vorstufe zu erfolgen hat. Damit wird sichergestellt, dass eine getroffene Entscheidung keine Entscheidung getroffen in einer Vorstufe ungültig macht.

Weiterhin sind die Restriktionen zu beachten, dass ein Wärmeerzeuger für den gesamten Zeitschritt zu- oder abgeschaltet ist sowie dass der Nutzer die Möglichkeit hat, Zwangszuschaltungen beziehungsweise -abschaltungen für die Wärmeerzeuger vorzugeben, welche im Lösungsalgorithmus berücksichtigt sind.

Derartige Abschaltbedingungen können aus einer zu geringen Differenztemperatur Kollektor-Speicher der Solaranlage resultieren oder bei der Wärmepumpe aufgrund einer zu hohen Speichertemperatur auftreten. Weitere Bedingungen Sperrzeiten der Wärmepumpe sein, welche durch spezielle Tarifvereinbarungen mit dem Energieversorger verursacht werden. Da all diese Abschaltbedingungen einfach und mit großer Zuverlässigkeit vorherzusagen sind [41], ist es zweckmäßig diese in der Lösungsmethode zu berücksichtigen.

5.3.2.2 Vorwärtsrechnung

Für die Optimierung der Betriebsführung der Verbundheizungsanlage ist die Vorwärtsrechnung vor der Rückwärtsrechnung auszuführen, da der Endzustand in welchen der Prozess zu führen ist nicht definiert ist. Der Endzustand ist lediglich durch die mindestens zu erreichende Speichertemperatur vorgegeben. Durch den Wärmeerzeugereinsatz ist dieser Wert mindestens zu decken, aufgrund von technologischen Prozessbedingungen besteht jedoch auch die Möglichkeit ihn zu überschreiten.

Die Summe der eingespeisten Energie der Wärmeerzeuger ist damit größer oder gleich dem Sollwert der zuzuführenden Energie, wie in Formel (5-14) dargestellt.

$$\sum Q_{WE,j}(k_{zu}) \geq Q_{zu}(k_{zu}) \quad (5-14)$$

Die Vorwärtsrechnung beschreibt ausgehend vom Startpunkt der Optimierung ($Q_{zu}(k=0)$) die Entscheidungen, welche über relativ optimale Zwischenzustände zum Endzustand $Q_{zu}(k = k_{zu})$ führen. Dazu ist die Bellmansche Rekursionsgleichung für jede Stufe separat zu berechnen, welche für eine Stufe j angewendet auf die Berechnung des Zielfunktionalis wie folgt lautet:

$$K_j^*(Q_{zu,j}(k_{zu})) = \text{MIN}[k_{j-1}(Q_{we,j-1}(k)) + k_j(Q_{we,j}(k), \Delta t_{E,WE,j})] \quad (5-15)$$

Der optimale Zielfunktionswert setzt sich demnach aus dem Zielfunktionswert der Vorstufe und dem Zielfunktionswert, verursacht durch die getroffene Entscheidung in der aktuellen Stufe zusammen. Die berechneten relativ optimalen Zielfunktionswerte sind in einer Rekursionstabelle abzuspeichern, welche für die gegebene Problemstellung folgende Form aufweist.

| Stufe j | Zustand der Vorstufe $Q_{WE,j-1}(k)$ | Getroffene Entscheidung $\Delta t_{E,WE,j}$ | Zustandsänderung $Q_{WE,j}(k)$ | Erreichter Zustand $\Sigma Q_{WE,j}(k)$ | Zielfunktionswert der aktuellen Stufe K_j | Optimaler Zielfunktionswert K_j^* |
|---------|---|---|-----------------------------------|---|---|---|
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Tabelle 5-1: Rekursionstabelle

Berechnung der Rekursionsgleichung für Stufe 1

Bei dem Ausfüllen der Tabelle ist mit der Stufe 1 zu beginnen, wodurch sich der Zustand in der Vorstufe generell mit 0 angeben lässt. Anschließend ist die Spalte „getroffene Entscheidung“ mit den Werten $0 \dots k_{zu}$ zu füllen. Die Berechnung der Zustandsänderungen, welche in Stufe 1 auch gleichzeitig dem erreichten relativ optimalen Zustand entspricht, erfolgt durch die Nutzung der Prozesskennfelder der Wärmeerzeuger, wie nachfolgend beschrieben ist. Der Zielfunktionswert berechnet sich nach der Kostenfunktion des jeweiligen Wärmeerzeugers in Abhängigkeit von der getroffenen Entscheidung. Da in Stufe 1 die Zielfunktionswerte der Vorstufe mit dem Wert 0 belegt sind, entspricht der aktuelle Wert dem Zielfunktionswert.

In der Tabelle für die Berechnung der Zustandsänderung sind nur die relativ optimalen Werte abzuspeichern, weshalb diese für die jeweilige Entscheidung zu ermitteln sind. Die Optimalität ist dabei in Bezug auf die erreichte eingebrachte Energiemenge zu sehen. Für die definierte Einsatzzeit ist nur die maximal einzubringende Energiemenge abzuspeichern, was die Bezeichnung als relativ optimal begründet.

Die Entscheidungen sind mit den Werten $\Delta t_{E,WE,j} = 0 \dots k_{zu}$ festgelegt. Für jeden Wert ist demnach der relativ optimale, das heißt maximale Energieertrag zu speichern wie in der folgenden Formel dargestellt.

$$Q_{WEj}^* = \text{Max } Q_{WEj}(k, \Delta t_{E,WE,j}) \quad (5-16)$$

Dieser ist durch die Prozesskennfelder der Wärmeerzeuger zu ermitteln, in dem die Eingangsgrößen entsprechend den diskreten Zeitschritten zu variieren sind und der maximale Energiewert in die Tabelle einzutragen ist.

Durch den Wärmeerzeugereinsatz in Stufe 1 verändert sich der zeitdiskrete Verlauf der Speichertemperatur und ist in Abhängigkeit der getroffenen Entscheidung abzuspeichern. Dieser modifizierte Verlauf ist für die Berechnungen in den Folgestufen zu nutzen.

Die rekursive Berechnung in Stufe 1 ist abubrechen, sobald die mögliche einzubringende Energie größer oder gleich der zuzuführenden Energie ist. Erreicht die zuzuführende Energie für die Einsatzzeit von einem Zeitabschnitt den Wert Null ist kein potenzieller Energieeintrag durch diesen Wärmeerzeuger zu erwarten und die Berechnung ebenfalls abubrechen. Die dritte Abbruchbedingung ist erfüllt, sobald die zuzuführende potentielle Energie mit steigender Einsatzzeit Δt_E sinkt.

Ist für das Erreichen des Sollwertes der zuzuführenden Energie ein Wärmeerzeugereinsatz in Stufe 1 nötig, der kleiner als die Steuervariable x ist, so ist die Berechnung für die Folgestufen nicht auszuführen. Der Einsatz des Wärmeerzeugers für einen Zeitschritt in Stufe 2 ist demzufolge kostenintensiver als der Einsatz des Wärmeerzeugers in Stufe 1, womit das Optimierungsergebnis feststeht.

Berechnung der Rekursionsgleichung für Stufe 2

Das Ausfüllen der Tabelle für Stufe 2 hat ausgehend von den erreichten Zuständen in Stufe 1 analog zu erfolgen. Dabei ist die Einschränkung zu beachten, dass der Wärmeerzeugereinsatz nur nach dem Wärmeerzeugereinsatz in Stufe 1 stattfinden kann, um das Optimierungsergebnis aus der 1. Stufe nicht ungültig zu machen.

Analog zur Abbruchbedingung aufgrund der Steuervariable x ist in Stufe 2 die Abbruchbedingung für die Steuervariable y zu berechnen. Allerdings gilt diese nur unter der Voraussetzung, dass in Stufe 1 kein Wärmeerzeugereinsatz stattfindet. Falls diese Vorbedingung nicht erfüllt ist, sind die weiteren Berechnungen für Stufe 3 auszuführen und durch die Rückwärtsrechnung das Gesamtergebnis zu ermitteln.

Berechnung der Rekursionsgleichung für Stufe 3

Für die Stufe 3 und damit letzte Stufe ist in gleicher Art und Weise vorzugehen, wobei sich für jeden Zustand in der Vorstufe nur eine mögliche Entscheidung ergibt. Diese entspricht der Überführung in den möglichen Endzustand.

Ist die Deckung der dem Speicher zuzuführenden Energie durch die zeitliche Beschränkung beim Wärmeerzeugereinsatz in den Stufen nicht gewährleistet, erfolgt die erneute Vorwärtsrechnung mit einer Korrektur. Diese ist dahingehend auszuführen, dass nicht mehr das Maximum des möglichen Energieeintrages durch den Wärmeerzeuger abzuspeichern ist, sondern der nächst geringere Wert.

5.3.2.3 Rückwärtsrechnung

Das Ziel der Rückwärtsrekursion ist es den kostenoptimalen Wärmeerzeugereinsatz zu bestimmen, sowie die zugehörigen Zustands- und Entscheidungsverläufe zu selektieren.

Dazu ist aus den relativ optimalen Entscheidungen, abgespeichert in der Rekursionstabelle, das Minimum der Zielgröße in Stufe 3 zu filtern. Diese gibt die minimalen Kosten der Optimierung der Betriebsführung für den Optimierungszeitraum n an. Anschließend ist in der entsprechenden Zeile der Tabelle der abgespeicherte Zustandswert der Vorstufe zu ermitteln. Dieser dient zum Auffinden des optimalen Ergebnisses in Stufe 2, woraus durch den dazugehörigen Vorstufenzustand das optimale Ergebnis in Stufe 1 zu ermitteln ist.

Durch die Ausführung der Rückwärtsrechnung ist der optimale Zielfunktionswert mit dem dazugehörigen Zustands- und Entscheidungsverlauf in den einzelnen Stufen direkt anzugeben.

Das Ergebnis der betriebswirtschaftlichen Optimierung ist die Lösung des Zielfunktional, für die in der technologischen Optimierung festgelegte zuzuführende Energie. Die stufenweise Lösung ermittelt die optimalen Betriebsparameter der Wärmeerzeuger für die Deckung der Energie im entsprechenden Zeitschritt.

5.4 Zusammenwirken der technologischen und betriebswirtschaftlichen Optimierung

Die Berechnung des Zielfunktionalis ist für jeden Zeitabschnitt, in dem die zuzuführende Wärmemenge größer Null ist mit Hilfe der dynamischen Programmierung auszuführen. Mit den errechneten optimalen Entscheidungen zur kostenoptimalen Deckung der Energie durch den koordinierenden Wärmequelleneinsatz ergibt sich ein veränderter Verlauf der Speichertemperatur. Dieser ist anschließend als Ausgangszustand für die erneuter Durchführung der technologischen Optimierung zu nutzen.

Dieses Wechselspiel zwischen technologischer und betriebswirtschaftlicher Optimierung ist so lange auszuführen, bis für jeden Zeitschritt des Optimierungszeitraumes der Sollwert der Speichertemperatur erreicht ist. Nach Abschluss der Optimierung, ist der Optimierungszeitraum in Anlehnung der Arbeitsweise eines Schieberegisters einen Zeitschritt weiter zu schieben. Diese Verfahrensweise ist auch als „rollierende Planung“ zu bezeichnen [70].

Die beschriebenen Zusammenhänge sowie die Vorgehensweise bei der betriebswirtschaftlichen und technologischen Optimierung sind in einem Programmablaufplan (PAP) in Anhang B dargestellt.

Die Optimierung der Betriebsführung auf der Basis der Lastprognose ist als strategische Optimierung zu Bezeichnen. Für einen definierten Optimierungszeitraum ist der kostenoptimale Wärmeerzeugereinsatz anhand der Ressourcenverfügbarkeit zu planen. Das Ziel der Optimierung der Betriebsführung von Verbundheizungsanlagen ist es jedoch auch, auf operative Veränderung in der Prozessführung reagieren zu können. Dies ist durch die Nutzung der vorgestellten Optimierungsmethodik möglich, indem zu dem Zeitschritt in welchem eine Abweichung zwischen dem prognostizierten und dem realen Prozessverhalten auftritt die Optimierung erneut durchzuführen ist.

In der möglichen Berücksichtigung von operativen Abweichungen des Prozessverhaltens ist der Vorteil der Nutzung der vorgestellten Methode im Vergleich zu der Möglichkeit der vollständigen Enumeration hervorzuheben. Bei der vollständigen Enumeration sind im Fall der Abweichung die kompletten Berechnungen zu wiederholen und damit erneut alle Berechnungen auszuführen.

Die Anzahl der Rechenaufrufe (R) ergibt sich aus der durchzuführenden betriebswirtschaftlichen Optimierung durch die Nutzung der dynamischen Programmierung mit maximal $N^{j=m}$ aufzuführenden Berechnungen, welche für maximal jeden der Zeitschritte ($k=1\dots N$) in der technologischen Optimierung auszuführen ist nach Formel (5-17):

$$R = N \cdot N^{j=m} \quad (5-17)$$

Damit sind für eine Verbundanlage mit drei Wärmeerzeugern ($m=3$) und die Zeitschrittzahl von $N=72$ maximal 26873856 Berechnungen auszuführen.

6 Anwendung und Bewertung der Methodik

6.1 Beschreibung der Beispielanlage

Für die Beschreibung der vorgestellten Optimierungsmethodik ist als Beispielanlage eine Verbundheizungsanlage ausgewählt, welche aus den Wärmeerzeugern Solaranlage, Erdwärmepumpe und Heizkessel besteht. Zusätzlich gehören zu der Anlage ein Wasserwärmespeicher sowie eine Wärmesenke, bestehend aus einem Referenzraum mit dazugehöriger Hydraulik. Die Parameter der Beispielanlage sind in Anhang C tabellarisch aufgelistet.

Für die Darstellung der Lösungsmethodik ist der Ausgangszustand des Prozesses in Form von technologischen Startwerten festzulegen. In der praktischen Anwendung sind diese anhand des statischen Prozesszustandes in Form von Messwerten aufzunehmen, wodurch weiterer Konfigurationsaufwand zu vermeiden ist. Die technologischen Startwerte der Beispielanlage sind in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

| Bezeichnung | Wert | Einheit |
|------------------------------------|----------|---------|
| Speichertemperatur | 75 | °C |
| Temperatur des Heizraumes | 25 | °C |
| Raumtemperatur | 20 | °C |
| Heizkörpertemperatur | 25 | °C |
| Temperatur Außenwand | 9 | °C |
| Vorlauftemperatur Heizkessel | 45 | °C |
| Temperatur des Wärmepumpenvorlaufs | 45 | °C |
| Vorlauftemperatur Solaranlage | 45 | °C |
| Datum | 01. März | |
| Uhrzeit | 0 | Uhr |

Tabelle 6-1: Technologische Startwerte der Optimierung

Neben den technologischen Startwerten sind auch allgemeine sowie betriebswirtschaftliche Optimierungswerte vorzugeben. Die technologischen Startwerte dienen lediglich der Definition des stationären Ausgangszustandes der Optimierung. Im Gegensatz dazu ist es möglich die allgemeinen und betriebswirtschaftlichen Optimierungswerte, welche in Tabelle 6-2 zusammengefasst sind, innerhalb der Anwendung der Methodik zu variieren. Dabei ist zu beachten,

dass der Trinkwarmwassersollwert $\vartheta_{BW,Soll}$ von 0°C nicht dem real existierenden Sollwert entspricht. Dieser Wert ist mit einer Trinkwarmwasserabnahme von Null gleichzusetzen.

| Bezeichnung | Wert | Einheit |
|--------------------------------------|------|---------|
| Optimierungszeitraum n | 24 | h |
| Zeitschrittlänge | 20 | min |
| Brennstoffkosten | 0,5 | €/kg |
| Stromkosten Normaltarif | 0,19 | €/kWh |
| Stromkosten Sondertarif „Wärmepumpe“ | 0,11 | €/kWh |
| ϑ_{RSW} 6.00-22.00Uhr | 20 | °C |
| ϑ_{RSW} 22.00-6.00Uhr | 18 | °C |
| $\vartheta_{BW,Soll}$ 12.00-12.20Uhr | 65 | °C |
| $\vartheta_{BW,Soll}$ 12.20-12.00Uhr | 0 | °C |

Tabelle 6-2: Allgemeinen und betriebswirtschaftlichen Optimierungswerte

Für die Wärmeerzeuger Heizkessel und Wärmepumpe gelten weiterhin technologisch bedingte Mindestzuschaltzeiten beziehungsweise -abschaltzeiten sowie Sperrzeiten der Wärmepumpe verursacht durch die Nutzung eines Sondertarifes des Energieversorgungsunternehmens (EVU), welche in Tabelle 6-3 zusammengefasst sind. Für die Solaranlage liegen keine Beschränkungen vor.

| Wärmeerzeuger | Ursache der Sperrung | Wert |
|---------------|----------------------|---------------------------------|
| Heizkessel | Mindestzuschaltzeit | 5 min |
| | Mindestabschaltzeit | 5 min |
| Wärmepumpe | Mindestzuschaltzeit | 15 min |
| | Mindestabschaltzeit | 15 min |
| | Sperrzeiten des EVU | 6.00-8.00Uhr und 17.00-20.00Uhr |

Tabelle 6-3: Mindestschaltzeiten und Sperrzeiten der Wärmeerzeuger

6.2 Anwendung der Optimierungsmethodik

Durch die Ausführung der technologischen Optimierung sind die zeitdiskreten Werte der dem Speicher zuzuführenden Energie zu ermitteln. Dazu ist im ersten Schritt der

Speichersollwert in Abhängigkeit der Heizkreis- und Brauchwasseranforderungen zu bestimmen.

Die Berechnung des Speichertemperatursollwertverlaufes in Bezug zu den Heizkreisanforderungen erfolgt nach Formel (5-2) in Abhängigkeit von dem durch die Heizkurve bestimmten Vorlauftemperatursollwert (VLTSW). Dieser ergibt sich in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (ϑ_a), dem vom Nutzer vorgegebenen Raumsollwert (RSW) sowie den Parametern Steigung, Krümmung, Neigung. Unter Nutzung der festgelegten Parameter, der Optimierungswerte sowie des prognostizierten Außenlufttemperaturverlaufes ergibt sich der dynamische Verlauf des Vorlauftemperatur-Sollwertes wie in Abbildung 6-1 dargestellt. Weiterhin ist in der Abbildung die erreichte Raumtemperatur (ϑ_R) gezeigt.

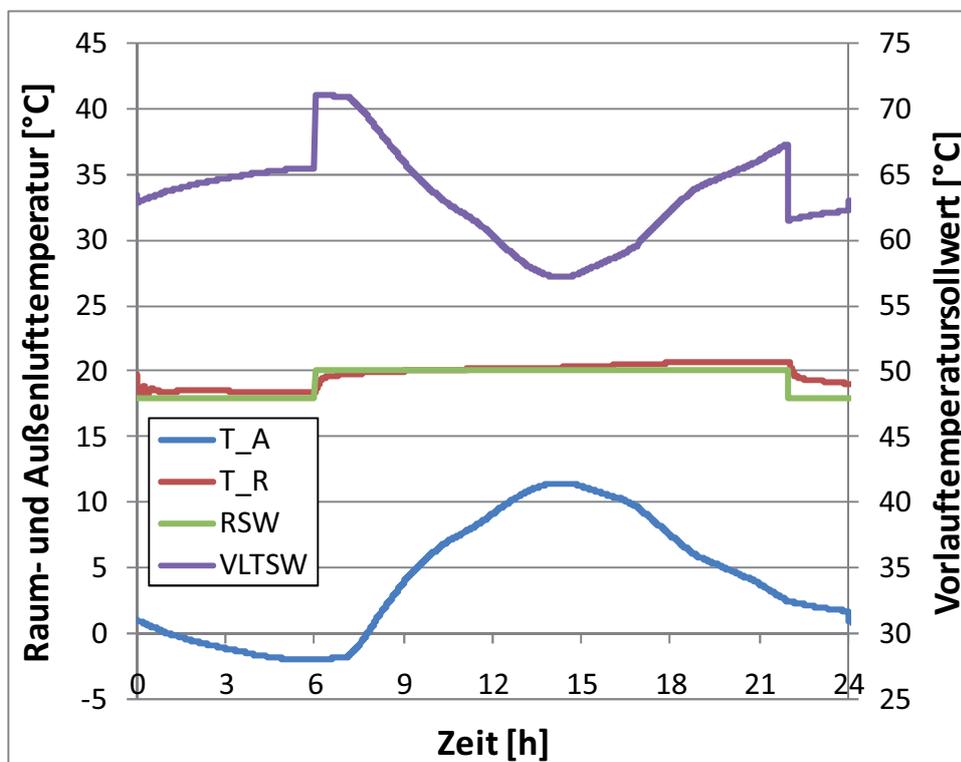


Abbildung 6-1: Dynamischer Verlauf des Vorlauftemperatursollwertes

Zur Berechnung der minimalen Speichertemperatur in Abhängigkeit der Heizkreisanforderungen ($\vartheta_{Sp,min,HK}$) ist der dynamische Verlauf Rücklauftemperatur des Heizkreises ($\vartheta_{RL,HK}$) sowie des Heizkreismassenstromes (\dot{m}_{HK}) nötig. Diese sind durch die Nutzung des Prozessmodells der Wärmesenke unter Gebrauch der technologischen Startwerte sowie des prognostizierten Vorlauftemperatur-Sollwertverlaufes zu ermitteln wie in Abbildung 6-2 dargestellt.

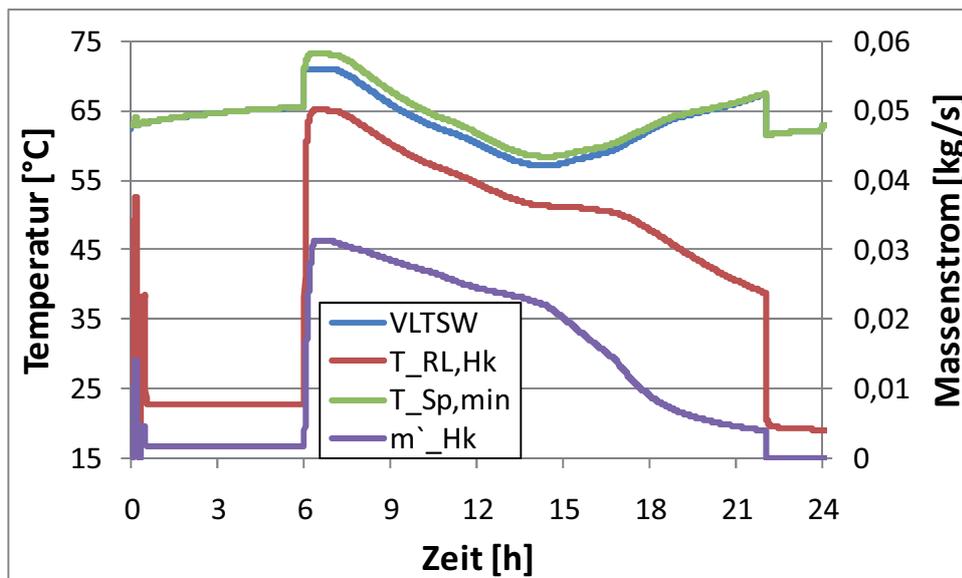


Abbildung 6-2: Verlauf durch die Heizkreisanforderungen

Die Speicherentzugsleistung für den Betrachtungszeitraum ist in Abbildung 6-3 dargestellt.

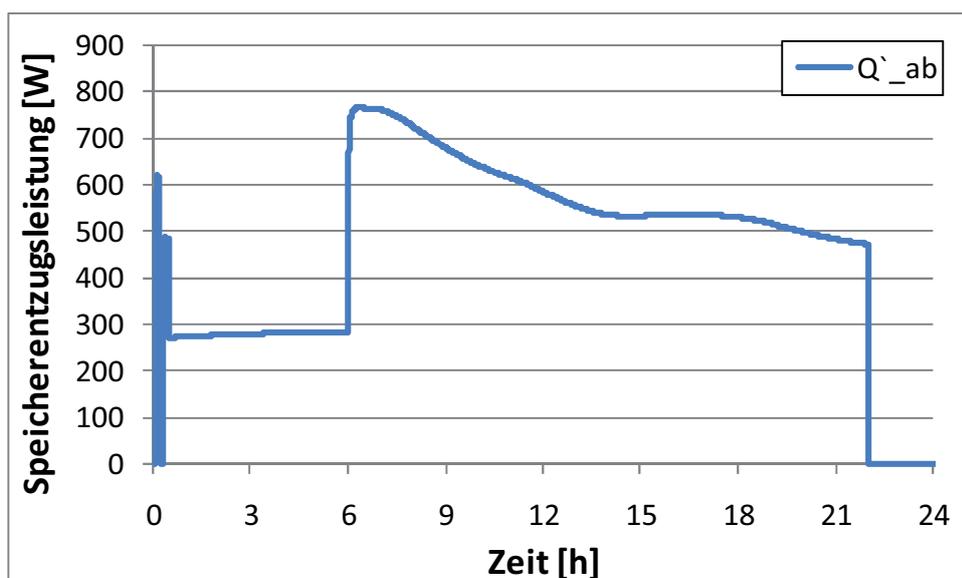


Abbildung 6-3: Speicherentzugsleistung im Betrachtungszeitraum

Für die Bestimmung des Speichersollwertes verursacht durch die Trinkwarmwasser-Anforderungen sind durch den Nutzer gewünschte Nutzungszeiten und die Mindesttemperatur vorzugeben. Für die Anforderung 65°C Mindesttemperatur zwischen 12Uhr bis 12.20Uhr und einen Massenstrom ($\dot{m}_{BW} = 0,005 kg/s$) ergibt sich für diesen Zeitraum eine Trinkwarmwasserabnahme von $\dot{Q}_{BW} = 1045W$.

Der Verlauf der minimalen Speichertemperatur (T_{Sp,min}) bestimmt sich aus dem Maximum der Verläufe resultierend aus Heizkreis- und Trinkwarmwasser-

Anforderungen. Der vorzuhaltende Speicherladezustand ergibt sich über eine Formel unter Nutzung der Parameter Wassermasse im Speicher und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser. Dies führt zu den in Abbildung 6-4 dargestellten Verläufen der minimalen Speichertemperatur ($T_{Sp,min}$) und des minimalen Speicherladezustandes ($Q_{Sp,min}$).

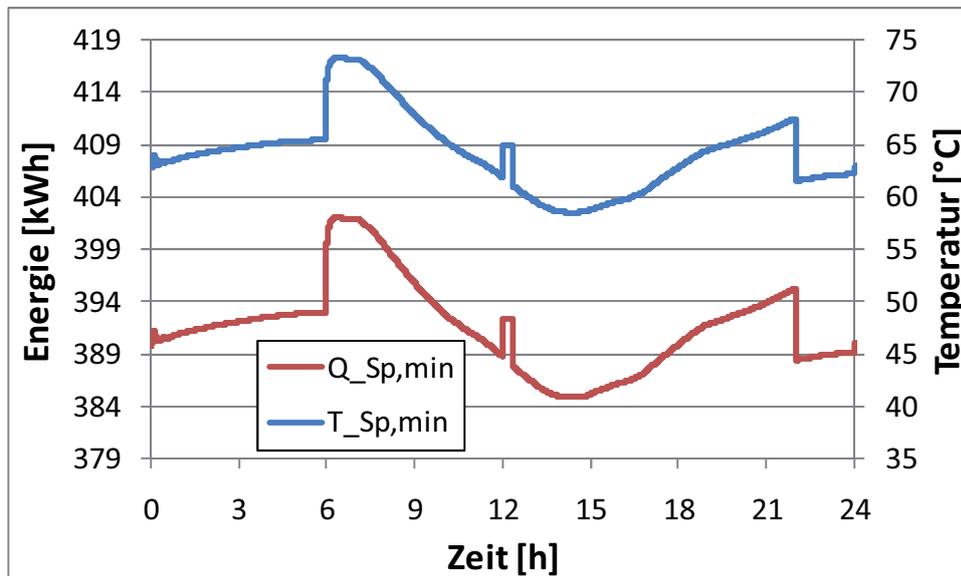


Abbildung 6-4: Dynamischer Speichersollwertverlauf

Das Ergebnis der technologischen Optimierung ist die Bestimmung der zeitdiskreten Werte der zuzuführenden Energie. Dazu erfolgt die Berechnung des dynamischen Verlaufes der zuzuführenden Energie in Abhängigkeit von dem Speichersollwert, den Speicherverlusten und des Speicherladezustandes. Die Bestimmung des Speicherladezustandes ist anhand des Prozessmodells des Wärmespeichers, unter Nutzung der Optimierungsstartwerte auszuführen. Diese sind entsprechend der gewählten Zeitschrittlänge und dem gewählten Optimierungszeitraum in diskrete Zeitschritte zu untergliedern.

Im Beispiel sind die Zeitschrittlänge mit $\Delta t=20$ min und der Optimierungszeitraum mit $n=24$ h festgelegt, womit sich der in Abbildung 6-5 dargestellte dynamische Verlauf für den Speichersollwert ($Q_{Sp,soll}$) und den Speicherladezustand (Q_{Sp}) sowie der zeitdiskrete Verlauf der dem Speicher zuzuführenden Energie (Q_{zu}) ergibt.

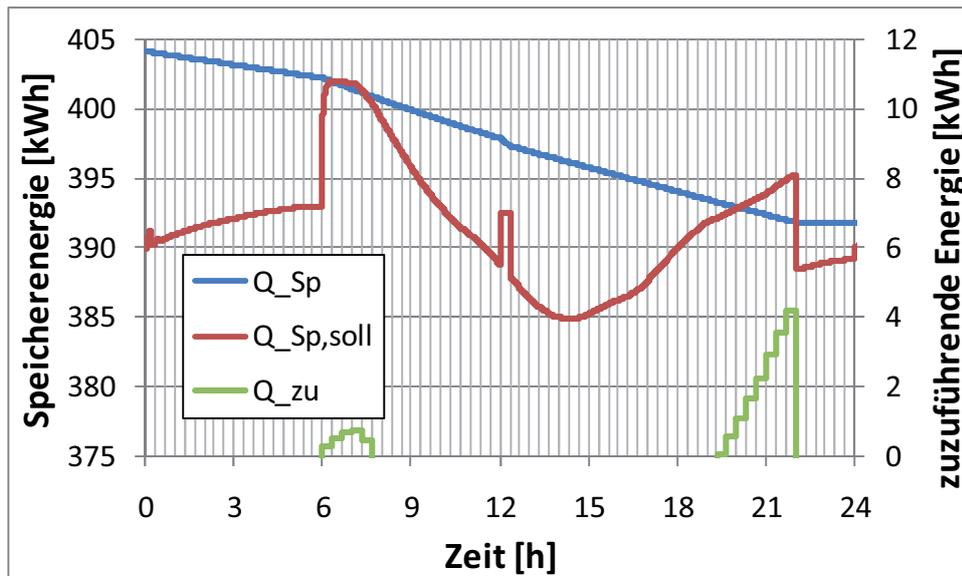


Abbildung 6-5: Verlauf der zuzuführenden Energie

Im Zeitfortschritt ergibt sich für den Zeitraum zwischen 6.00-6.20Uhr eine zuzuführende Energie von 0,3kWh. Dieser Zeitraum entspricht dem diskreten Zeitschritt $k=19$, weshalb das Zielfunktional in der betriebswirtschaftliche Optimierung erstmals für $K(0,3kWh(k_{zu}=19))$ zu berechnen ist. Dieses ergibt sich wie in Formel (6-1) beschrieben:

$$K(Q_{zu} = 0,3kWh(19)) = K_{Sol}(Q_{Sol}(k), \Delta t_{E,Sol}) + K_{WP}(Q_{WP}(k), \Delta t_{E,WP}) + K_K(Q_K(k), \Delta t_{E,K}) \quad (6-1)$$

Die durchzuführende Dekomposition erfolgt entsprechend der Anzahl der Wärmeerzeuger (Solaranlage, Wärmepumpe und Heizkessel) in drei Stufen. Durch die Kostenbewertung sind die einzelnen Wärmeerzeuger den Stufen zuzuordnen. Dazu sind in die Kostenfunktionen die festgelegte Zeitschrittlänge sowie die betriebswirtschaftlichen Optimierungswerte einzutragen.

$$K_K(\Delta t = 20min) = \left(0,5 \text{ €/kg} \cdot 0,1973 \text{ kg/min} + 0,19 \text{ €/kWh} \cdot 0,1kW \right) \cdot 20min \quad (6-2)$$

$$K_K(\Delta t = 20min) = 1,98\text{€}$$

$$K_{Sol}(\Delta t = 20min) = 0,19 \text{ €/kWh} \cdot 0,25kW \cdot 20min \quad (6-3)$$

$$K_{Sol}(\Delta t = 20min) = 0,02\text{€}$$

$$K_{WP}(\Delta t = 20\text{min}) = 0,11 \text{ €/kWh} \cdot 4,025\text{kW} \cdot 20\text{min} \quad (6-4)$$

$$K_{WP}(\Delta t = 20\text{min}) = 0,15\text{€}$$

Der Wärmeerzeuger, welcher für die vorgegebene Zeitschrittlänge die geringsten Kosten aufweist ist der Stufe 1 ($j=1$) zuzuordnen. Der nächst teurere der Stufe 2 ($j=2$) und der Wärmeerzeuger, welcher die höchsten Kosten verursacht der Stufe 3 ($j=3$).

Die Zuordnung der Wärmeerzeuger erfolgt dementsprechend:

$$j = 1 \Rightarrow \text{Solaranlage (Sol)}$$

$$j = 2 \Rightarrow \text{Wärmepumpe (WP)} \quad (6-5)$$

$$j = 3 \Rightarrow \text{Heizkessel (K)}$$

Die Berechnung der Steuervariablen x und y ergibt sich entsprechend den Formeln (6-6) und (6-7):

$$x = \frac{K_{WP}(\Delta t)}{K_{Sol}(\Delta t)} = \frac{0,1476\text{€}}{0,01583\text{€}} = 9,3 \quad (6-6)$$

$$y = \frac{K_K(\Delta t)}{K_{WP}(\Delta t)} = \frac{1,9793\text{€}}{0,1476\text{€}} = 13,4 \quad (6-7)$$

In Stufe 1 ist die Entscheidung über den Einsatz der Solaranlage zu treffen. Dabei ist zwischen keinem Einsatz ($\Delta t_{E,Sol}=0$) bis hin zu dem maximalen Einsatz ($\Delta t_{E,Sol}=18$) zu entscheiden.

Der zeitdiskrete Einsatz des Wärmeerzeugers ergibt sich aus dem aktuellen Zeitschritt ($k=1$) und dem Zeitschritt, in welchem die zugeführte Energie bereitgestellt sein muss ($k_{zu}=19$). Dementsprechend kann in den Zeitschritten ($k=1\dots 18$) der Wärmeerzeugereinsatz erfolgen.

Der erreichte Zustand, ist als die durch die Solaranlage eingebrachte Energiemenge definiert. Die Zustände in Stufe 2 ergeben sich aus der Summe der eingebrachten Energien durch die Solaranlage und der Wärmepumpe. Analog dazu ergibt sich der Zustand in Stufe 3 aus der Summe der eingebrachten Energien aller drei Wärmeerzeuger.

Zu treffende Entscheidungen in Stufe 2 variieren in Abhängigkeit vom Einsatz der Solaranlage in Stufe 1 und der dadurch verursachten Anhebung der Speichertemperatur. Durch das festgelegte Sperrkriterium ist kein Wärmepumpeneinsatz zu berücksichtigen, welcher zeitlich vor oder während dem Solaranlageneinsatz erfolgt. Die zu treffenden Entscheidungen in Stufe 3 ergeben sich durch das Sperrkriterium ebenfalls in Abhängigkeit vom zeitdiskreten Zustand in Stufe 2.

Für das Auffüllen der Rekursionstabelle und damit die Umsetzung der Vorwärtsrechnung sind die Prozesskennfelder, entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 3.5, zu nutzen. In Stufe 1 ist nach der getroffenen Zuordnung das Prozesskennfeld „Solaranlage“ zu verwenden, welches die Eingangsgrößen Zeitschrittlänge, Globalstrahlung, Außenlufttemperatur, Startwert der Fluidtemperatur und Speichertemperatur aufweist.

Die Eingangsvariablen sind entsprechend den zugehörigen Werten in den diskreten Zeitschritten zu variieren. Für die Zeitschrittlänge ist der Wert entsprechend den Optimierungsparametern ($\Delta t = 20 \text{ min}$) vorzugeben. Die dynamischen Verläufe der Globalstrahlung, der Außenlufttemperatur und der Speichertemperatur sind über die Zeitschrittlänge zu Mitteln. Der Startwert der Fluidtemperatur ergibt sich in Abhängigkeit von der Zu- oder Abschaltung im vorherigen Zeitschritt.

Durch die Variation der Eingangsvariablen entsprechend der prognostizierten Werte in den einzelnen Zeitschritten ist der maximal mögliche Energieeintrag für die definierte Einsatzzeit zu ermitteln.

In Stufe 2 ist das Prozesskennfeld „Wärmepumpe“ zu nutzen, welches als Eingangsgrößen die Zeitschrittlänge, die Kondensationsleistung, die Speichertemperatur und den Wärmepumpenvorlauf-Startwert besitzt. Der dynamische Verlauf der Speichertemperatur, welcher in Abhängigkeit der getroffenen Entscheidung in Stufe 1 im Vergleich zum Ausgangszustand variieren kann, ist über die Zeitschrittlänge erneut zu Mitteln. Der Wärmepumpenvorlauf-Startwert ergibt sich analog dem Startwert der Fluidtemperatur in Abhängigkeit von der Zu- oder Abschaltung im vorherigen Zeitschritt. Die Kondensationsleistung nimmt aufgrund des festgelegten modellierten Arbeitsbereiches der Wärmepumpe den konstanten Wert von $\dot{Q}_c = 24152.7 \text{ W}$. Diese steht jedoch nur zu Zeitschritten zur Verfügung in denen keine Sperrbedingung durch das EVU vorliegt. Die Mindestschaltzeiten von

Wärmepumpe und Heizkessel kommen für die gewählte Zeitschrittlänge von 20min nicht zum Wirken, da ein Wärmeerzeuger nur für einen gesamten Zeitschritt beziehungsweise abzuschalten ist.

Die Berechnungen in Stufe 3, Einsatz des Heizkessels, sind aufgrund der wirkenden Abbruchbedingung, dass der Wärmeenergieeintrag bereits in den vorherigen Stufen zu decken ist, nicht auszuführen.

Die ausgefüllte Rekursionstabelle für die gegebenen Optimierungswerte und die ermittelten Zustände und Entscheidungen in den einzelnen Stufen ergeben sich wie in Tabelle 6-4 dargestellt.

| Stufe j | Zustand der Vorstufe $Q_{WE,j-1}(k)$ [kWh] | Getroffene Entscheidung $\Delta t_{E,WE,j}$ | Zustandsänderung $Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Erreichter Zustand $\Sigma Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Zielfunktionswert der aktuellen Stufe K_j [€] | Optimaler Zielfunktionswert K_j^* [€] |
|--------------|--|---|--------------------------------------|---|---|---|
| 1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | - | 1 | 0 | 0¹⁾ | 0,02 | 0,02 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 0 (18) | 0 (18) | 0,15 | 0,15 |
| 2 | 0 | 2 | 0,0016 (17;18) | 0,0016 (17;18) | 0,30 | 0,30 |
| 2 | 0 | 3 | 1,58(16;17;18) | 1,58(16;17;18) | 0,44 | 0,44 |

Tabelle 6-4: Rekursionstabelle für Zeitschritt 19

In Stufe 1 ergibt der Einsatz der Solaranlage für einen Zeitschritt eine erreichte Zustandsänderung von 0kWh, was mit ¹⁾ gekennzeichnet ist. Damit ist kein Energieeintrag durch die Solaranlage für den Zeitraum (k=1...18) zu erwarten und die Zeile für den Einsatz der Solaranlage für einen Zeitschritt zu streichen.

Für die Stufe 2 ergibt sich die zu berechnende Rekursionsgleichung nur für den Vorzustand $\Sigma Q_{WE,j}(k) = 0$. Die Berechnung ist nach dem Einsatz der Wärmepumpe für drei Zeitschritte abzurechnen, da damit die gesamte zuzuführende Energie gedeckt ist.

Die Berechnung der Rekursionsgleichung in Stufe 3 erfolgt nicht, aufgrund der Abbruchbedingung durch die Steuervariable y . Deren Berechnung (Formel (6-7)) ergibt, dass der Einsatz der Wärmepumpe für mindestens 13 Zeitschritte günstiger ist als der Einsatz des Heizkessels für einen Zeitschritt. Demzufolge ist der Einsatz der

Wärmepumpe für 3 Zeitschritte, welcher zur Deckung der mindestens einzubringenden Energie benötigt wird, günstiger als der Einsatz des Heizkessels.

Die auszuführende Rückwärtsrechnung ermittelt den endgültig optimalen Einsatz der Wärmeerzeuger anhand der Rekursionstabelle. Da die Berechnung für Stufe 3 nicht ausgeführt wurde, ist der Einsatz in Stufe 3 mit 0 Zeitschritten festgelegt. In Stufe 2 führt nur der Einsatz der Wärmepumpe für drei Zeitschritte zur benötigten einzubringenden Energiemenge. Der Zustand in der Vorstufe ergibt sich mit $\sum Q_{WE,j} = 0$, womit der Einsatz der Solaranlage mit 0 Zeitschritten zu berücksichtigen ist.

Nach der durchgeführten rekursiven Berechnung ist der optimale Zielfunktionswert für die zuzuführende Energie von mindestens 0,3kWh mit 0,44€ ermittelt. Damit wird durch die Wärmeerzeuger eine Energie von 1,58kWh eingebracht (Formel (6-8)). Der dazugehörige Steuervektor \underline{u} ergibt sich, wie in Formel (6-9) dargestellt.

$$K(Q_{zu} = 1,58\text{kWh}) = 0,44\text{€} \quad (6-8)$$

$$\underline{u} = \left\{ \begin{array}{l} j = 1 \quad \Delta t_E = 0 \\ j = 2 \quad \Delta t_E = 3 \\ j = 3 \quad \Delta t_E = 0 \end{array} \quad k = 16; 17; 18 \right\} \quad (6-9)$$

Der optimale Entscheidungs- und Zustandsverlauf führt zu einer Veränderung des dynamischen Verlaufes des Speicherladezustandes sowie der zuzuführenden Energie, wie in Abbildung 6-6 gezeigt. Mit dieser Veränderung, welche aus dem Einspeisen der Wärmepumpe resultiert, entspricht der Ladezustand für Zeitschritt 19 dem erforderlichen Sollwertverlauf.

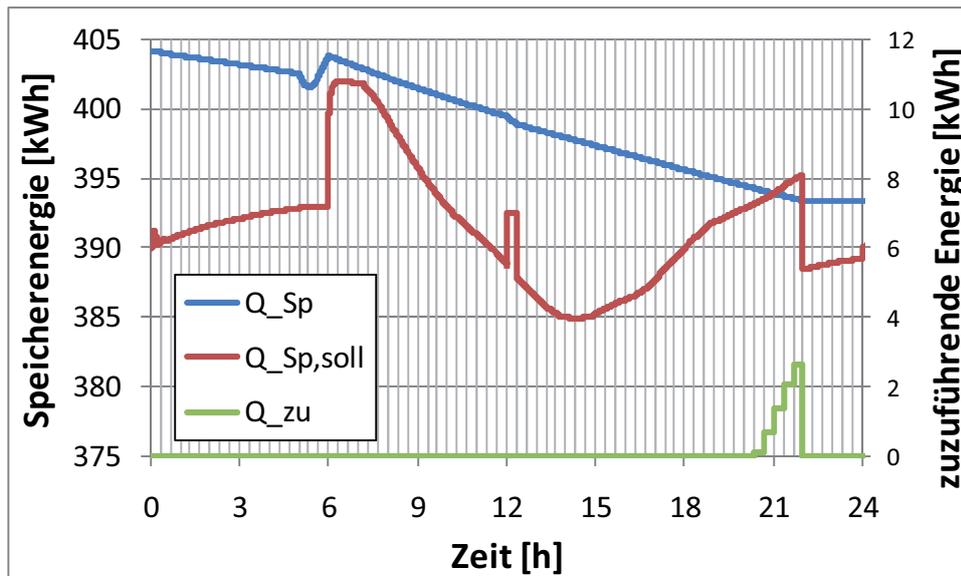


Abbildung 6-6: Verlauf nach betriebswirtschaftlicher Optimierung (k=19)

Bei der erneuten Durchführung der technologischen Optimierung ergibt sich eine zuzuführende Energie von $Q_{zu} = 0,12$ kWh in Zeitschritt ($k_{zu}=62$). Das Zielfunktional ist in der betriebswirtschaftlichen Optimierung für diesen Wert zu berechnen.

Da die Kostenparameter unverändert vorliegen, ist die Dekomposition nicht erneut durchzuführen. Die ausgefüllte Rekursionstabelle ergibt sich wie folgt:

| Stufe j | Zustand der Vorstufe $Q_{we,j-1}(k)$ [kWh] | Getroffene Entscheidung $\Delta t_{E,WE,j}$ | Zustandsänderung $Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Erreichter Zustand $\Sigma Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Zielfunktionswert der aktuellen Stufe K_j [€] | Optimaler Zielfunktionswert K_j^* [€] |
|---------|--|---|--------------------------------------|---|---|---|
| 1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | - | 1 | 1,068 (37) | 1,068 (37) ¹⁾ | 0,02 | 0,02 |

Tabelle 6-5: Rekursionstabelle für Zeitschritt 62

In Stufe 1 ist durch den Einsatz der Solaranlage für einen Zeitschritt die komplette zuzuführende Energie für den betrachteten Zeitschritt zu decken. Die Berechnung ist aus diesem Grund an dieser Stelle abubrechen, was mit ¹⁾ gekennzeichnet ist. Weiterhin erfüllt der Einsatz der Solaranlage die Steuervariable x, sodass keine weiteren Berechnungen in den folgenden Stufen durchzuführen sind. Der optimale Zielfunktionswert und der Steuervektor ergeben sich wie nachfolgend gezeigt:

$$K(Q_{zu} = 1,07\text{kWh}) = 0,02\text{€} \quad (6-10)$$

$$\underline{u} = \left. \begin{array}{l} j = 1 \quad \Delta t_E = 1 \quad k = 37 \\ j = 2 \quad \Delta t_E = 0 \\ j = 3 \quad \Delta t_E = 0 \end{array} \right\} \quad (6-11)$$

Mit der Anpassung der Wärmeenergiezufuhr durch die Solaranlage in Zeitschritt 37, ergibt sich der dynamische Verlauf für den Speicherladezustand, den Speichersollwert sowie die zuzuführende Energie nach Abbildung 6-7.

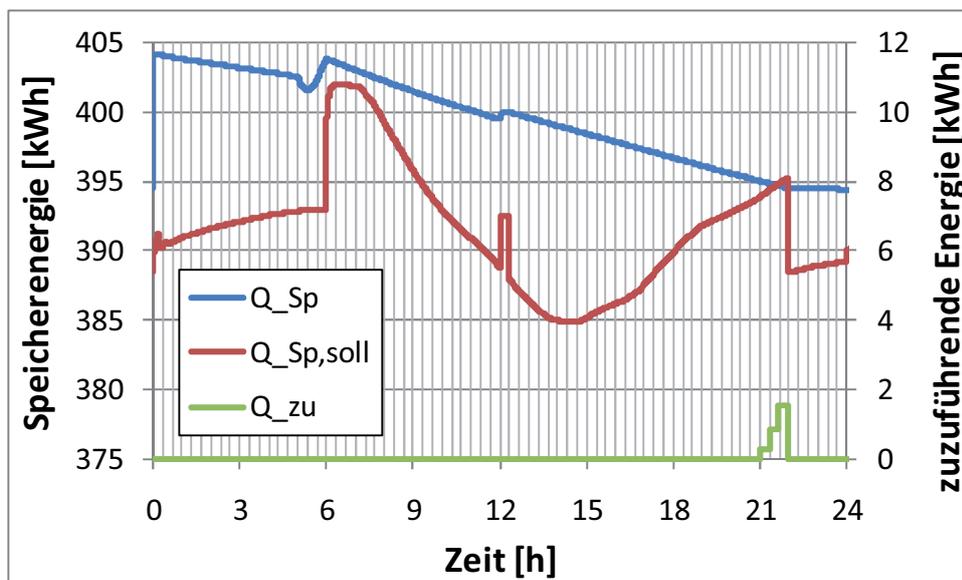


Abbildung 6-7: Verlauf nach betriebswirtschaftlicher Optimierung (k=62)

Da es im Betrachtungszeitraum noch Zeitschritte gibt, in denen die zuzuführende Energie größer als Null ist, ist die technologische Optimierung erneut auszuführen. Diese ergibt in Zeitschritt ($k_{zu}=64$) eine zuzuführende Energie von $Q_{zu} = 0,29\text{kWh}$. Durch die betriebswirtschaftliche Optimierung für diesen Zeitschritt lässt sich die in Tabelle 6-6 dargestellte Rekursionstabelle aufzustellen:

| Stufe j | Zustand der Vorstufe $Q_{WE,j-1}(k)$ [kWh] | Getroffene Entscheidung $\Delta t_{E,WE,j}$ | Zustandsänderung $Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Erreichter Zustand $\Sigma Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Zielfunktionswert der aktuellen Stufe K_j [€] | Optimaler Zielfunktionswert K_j^* [€] |
|---------|--|---|--------------------------------------|---|---|---|
| 1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | - | 1 | 0,42 (38) | 0,42 (38) ¹⁾ | 0,02 | 0,02 |

Tabelle 6-6: Rekursionstabelle für Zeitschritt 64

Durch den Einsatz der Solaranlage für einen Zeitschritt ist die komplette zuzuführende Energie für Zeitschritt 64 zu decken. Die Berechnung ist an dieser Stelle abzubrechen, da die Bedingung für den Einsatz der Steuervariable x erfüllt ist (gekennzeichnet mit ¹⁾). Der optimale Zielfunktionswert und der Steuervektor ergeben sich wie nachfolgend gezeigt:

$$K(Q_{zu} = 0,42\text{kWh}) = 0,02\text{€} \quad (6-12)$$

$$\underline{u} = \left\{ \begin{array}{l} j = 1 \quad \Delta t_E = 1 \quad k = 38 \\ j = 2 \quad \Delta t_E = 0 \\ j = 3 \quad \Delta t_E = 0 \end{array} \right\} \quad (6-13)$$

Mit dem ermittelten Wärmeerzeugereinsatz ergibt sich der nachfolgend gezeigte Verlauf des Speicherladezustandes, dessen Sollwertes sowie der zuzuführenden Energie.

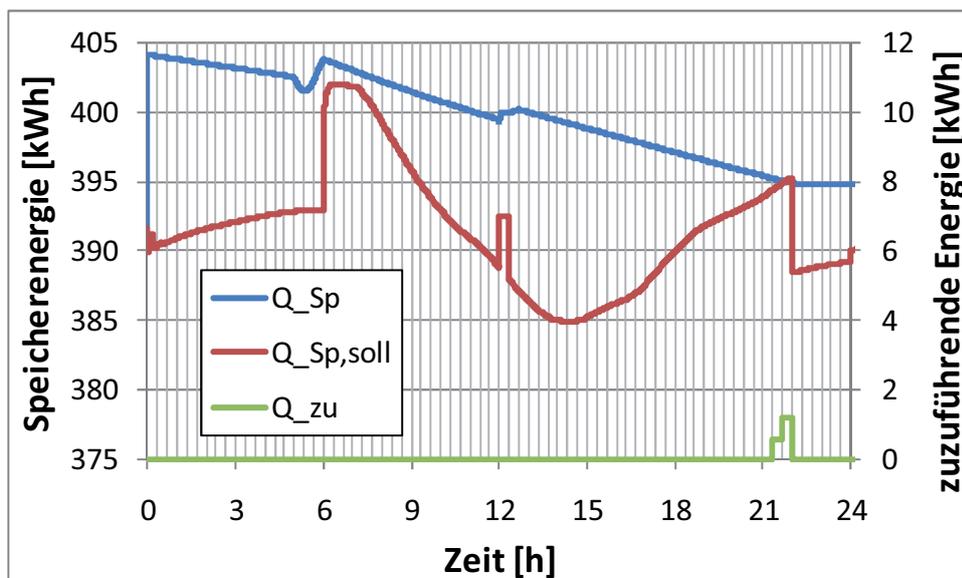


Abbildung 6-8: Verlauf nach betriebswirtschaftlicher Optimierung (k=64)

Die erneute Anwendung der technologischen Optimierung ergibt eine zuzuführende Energie von $Q_{zu} = 0,58\text{kWh}$ in Zeitschritt ($k_{zu}=65$). Durch Nutzung der betriebswirtschaftlichen Optimierung ist die in Tabelle 6-7 dargestellte Rekursionstabelle aufzustellen:

| Stufe j | Zustand der Vorstufe $Q_{WE,j-1}(k)$ [kWh] | Getroffene Entscheidung $\Delta t_{E,WE,j}$ | Zustandsänderung $Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Erreichter Zustand $\Sigma Q_{WE,j}(k)$ [kWh] | Zielfunktionswert der aktuellen Stufe K_j [€] | Optimaler Zielfunktionswert K_j^* [€] |
|---------|--|--|--|---|---|---|
| 1 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | - | 1 | 0,41 (39) | 0,41 (39) | 0,02 | 0,02 |
| 1 | | 2 | 0,82 (39,40) | 0,82 (39,40) ¹⁾ | 0,03 | 0,03 |

Tabelle 6-7: Rekursionstabelle für Zeitschritt 65

In Stufe 1 ist durch den Einsatz der Solaranlage für zwei Zeitschritte die komplette zuzuführende Energie zu decken. Da damit der Energiebedarf für Zeitschritt 65 zu decken ist und die Steuervariable x zur Anwendung kommt, ist die Berechnung an dieser Stelle abzurechnen. Der Zielfunktionswert und der dazugehörige Steuervektor sind nachfolgend gezeigt:

$$K(Q_{zu} = 0,82\text{kWh}) = 0,03\text{€} \quad (6-14)$$

$$\underline{u} = \left\{ \begin{array}{l} j = 1 \quad \Delta t_E = 2 \quad k = 39; 40 \\ j = 2 \quad \Delta t_E = 0 \\ j = 3 \quad \Delta t_E = 0 \end{array} \right\} \quad (6-15)$$

Beim erneuten durchführend der technologischen Optimierung ist zu erkennen, dass kein weiterer Wärmeerzeugereinsatz zur Deckung des Speichersollwertes nötig ist. Für den Betrachtungszeitraum von 72 Zeitschritten, was 24h entspricht, ergeben sich der Speicherladezustand sowie dessen Sollwert, wie in Abbildung 6-9 gezeigt ist.

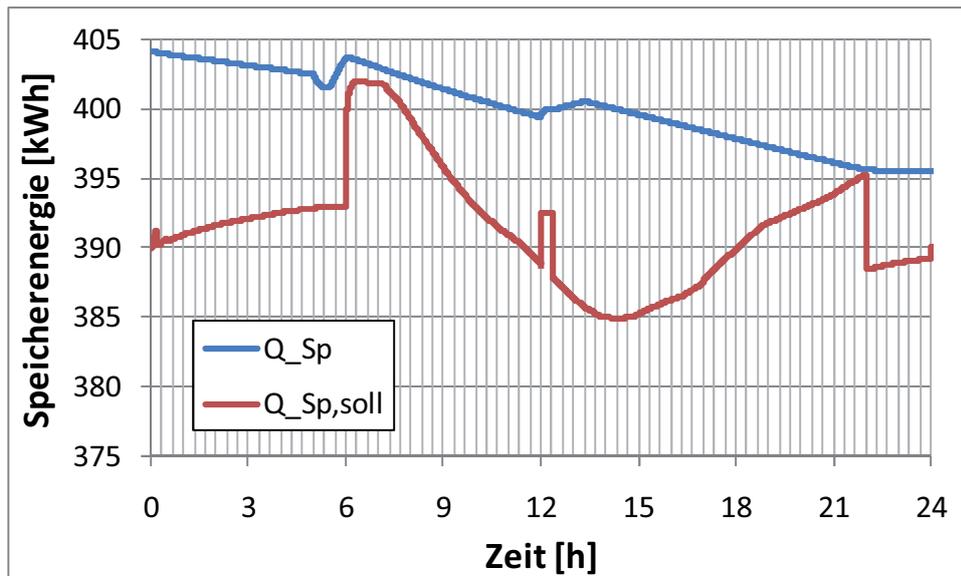


Abbildung 6-9: Verlauf der Speicherenergie nach der Optimierung für 24h

Der Zielfunktionswert ergibt sich für den gesamten Optimierungszeitraum nach Formel (6-16) mit $K=0,50\text{€}$.

Der Steuervektor beschreibt den kostenoptimalen Einsatz der Solaranlage für insgesamt 4 Zeitschritte zwischen 12Uhr und 13.20Uhr ($k=37; 38; 39; 40$). Für die Wärmepumpe ist der kostenoptimale Einsatz zwischen 5Uhr und 6Uhr ($k=16; 17; 18$) vorausberechnet. Der Steuervektor ist für den Optimierungszeitraum in seiner Gesamtheit in (6-17) dargestellt.

$$K_{Opt}(k = 1 \dots n) = \sum K_{WEj} = 0,06\text{€} + 0,44\text{€} \quad (6-16)$$

$$K_{Opt}(k = 1 \dots n) = 0,50\text{€}$$

$$\underline{u} = \begin{cases} j = 1 & \Delta t_E = 4 & k = 37; 38; 39; 40 \\ j = 2 & \Delta t_E = 3 & k = 16; 17; 18 \\ j = 3 & \Delta t_E = 0 \end{cases} \quad (6-17)$$

Nachdem der Wärmebedarf kostenoptimal für den Optimierungszeitraum von 24h am 1.März bestimmt ist, ist der Optimierungszeitraum in Anlehnung an die Arbeitsweise eines Schieberegisters um einen Zeitschritt zu verrücken. Für den sich ergebenden „neuen“ Optimierungszeitraum sind die technologische sowie die betriebswirtschaftliche Optimierung auszuführen.

Ist im Optimierungszeitraum kein Zeitschritt zu ermitteln, in welchem die zuzuführende Energie größer Null ist, wird dieser um einen weiteren Zeitschritt

verschoben. Für das Beispiel ist der Optimierungszeitraum um 19 Zeitschritte zu verschieben, ohne das die zuzuführende Energie für den sich ergebenden Optimierungszeitraum größer als Null ist.

In dem nächsten Optimierungszeitraum, welcher sich zwischen dem 1.März 6.20Uhr und dem 2.März 6.20Uhr erstreckt, ergeben sich die weiteren Verläufe für den Ladezustand des Speichers sowie dessen Sollwert wie in Abbildung 6-10 gezeigt. Die zuzuführende Energie im Zeitschritt 72 (entspricht 2.März 6Uhr-6.20Uhr) beträgt $Q_{zu}(k_{zu}=72) = 6,12\text{kWh}$.

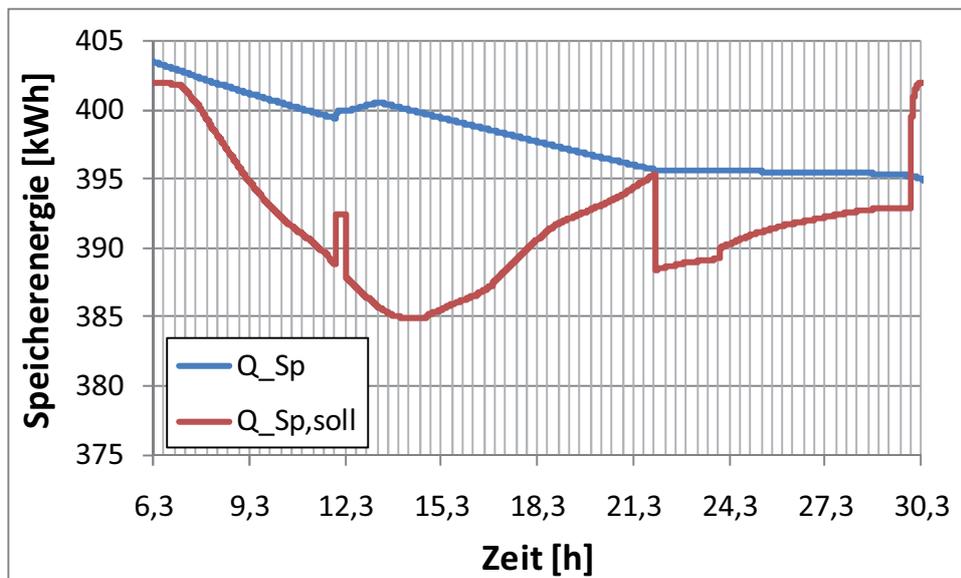


Abbildung 6-10: Speichertemperaturverlauf für die nächsten Zeitschritte

Bei der Ausführung der Vorwärtsrechnung für diesen Zeitbereich ist zu beachten, dass aufgrund der Sperrbedingung der Wärmeerzeugereinsatz vor oder zu 13.20Uhr nicht gestattet ist. Nachdem die Vorwärts- und Rückwärtsrechnung ausgeführt ist ergeben sich die minimal verursachten Betriebskosten nach (6-18), der dazugehörige Steuervektor nach (6-19):

$$K_{Sol} = 0,17\text{€}$$

$$K_{WP} = 0,59\text{€} \quad (6-18)$$

$$K(k = 1 \dots 72) = 0,76\text{€}$$

$$\underline{u} = \left\{ \begin{array}{lll} j = 1 & \Delta t_E = 11 & t = 22 - 32 \\ j = 2 & \Delta t_E = 4 & t = 68 - 71 \\ j = 3 & \Delta t_E = 0 & \end{array} \right\} \quad (6-19)$$

Die ermittelten optimalen Betriebsparameter, welche in Form des Steuervektors dargestellt sind, gelten unter der Voraussetzung, dass keine Abweichung zwischen den aufgenommenen Anlagenmesswerten und den prognostizierten Werten vorliegt. Bei auftretenden Abweichungen ist die Optimierungsmethodik erneut anzuwenden und in Abhängigkeit der Korrektur zu berechnen.

6.3 Gegenüberstellung der entwickelten Methodik und des praktizierten Konzeptes

Um eine Bewertung der entwickelten Methodik durchführen zu können, erfolgt die Gegenüberstellung mit einem in der Praxis genutzten Regelungskonzept für Verbundheizungsanlagen. Der zu beurteilende Zeitraum setzt sich aus 5 aufeinanderfolgenden Tagen im März (1.-5.März) zusammen. Der Vergleich ist auf der Grundlage der beschriebenen Beispielanlage sowie den definierten Optimierungswerten durchzuführen.

Das konventionelle Regelungskonzept ist darauf ausgelegt, die Speichertemperatur auf einem konstanten Wert von 75°C zu halten. Die Solaranlage ist einzusetzen, sobald die Kollektortemperatur größer als die Speichertemperatur ist. Der Einsatz der Wärmepumpe und des Heizkessel hat in Abhängigkeit der einzuhaltenden Speichertemperatur zu erfolgen, wobei die Nutzung der Wärmepumpe bevorzugt erfolgt. Da die gleichen Optimierungsstartwerte zu nutzen sind, ist der Wärmepumpen- und Heizkesselseinsatz durch die beschriebenen Mindestschaltzeiten sowie Sperrzeiten durch das EVU eingeschränkt.

Unter den getroffenen Annahmen ergeben sich die Verläufe des Speicherladezustandes sowie des Sollwertverlaufes, wie in den Abbildung 6-11 dargestellt. In Abbildung 6-12 sind die dabei durch die Wärmeerzeuger eingebrachten Energiemengen gezeigt.

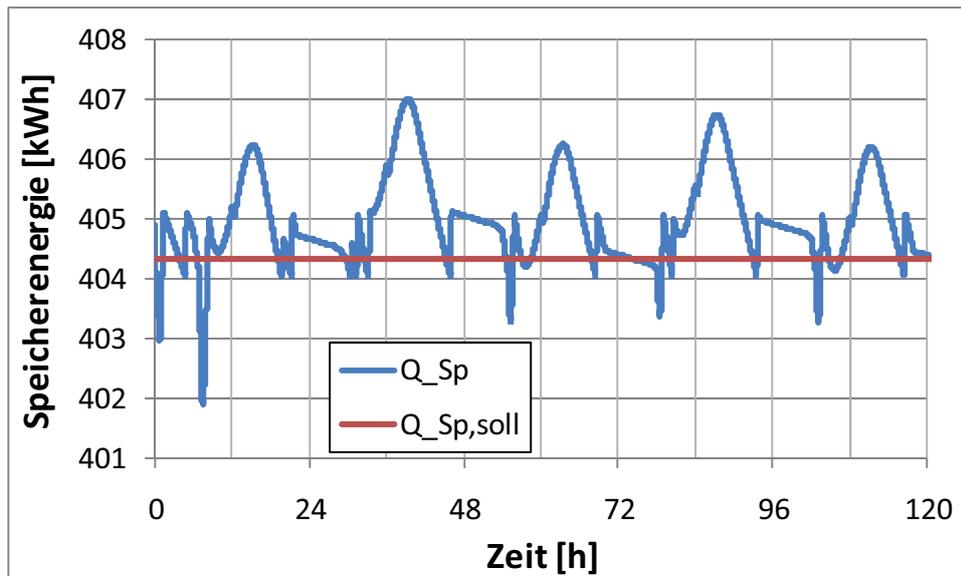


Abbildung 6-11: Speicherladezustand verursacht durch konventionelles Regelungskonzept

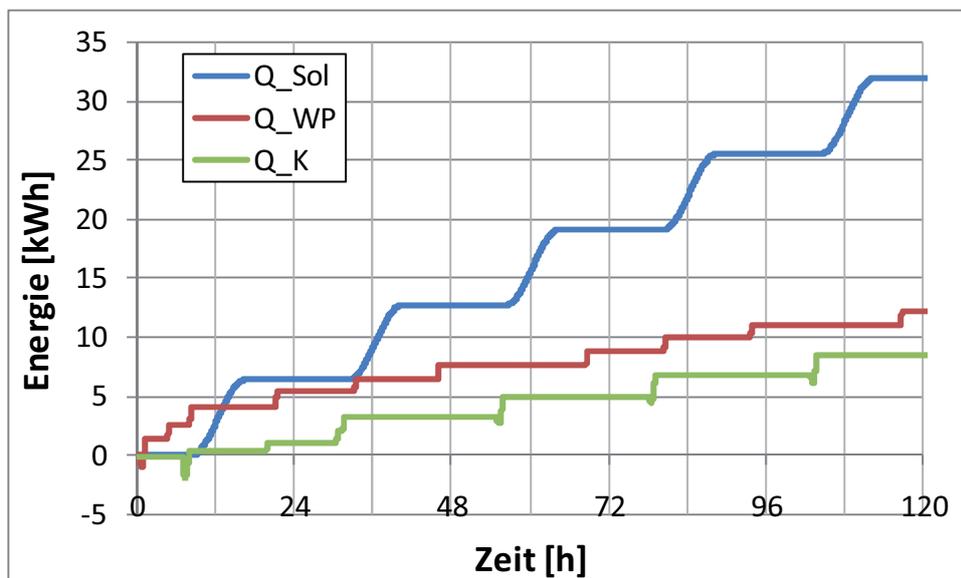


Abbildung 6-12: Eingebrachte Energiemengen durch konventionelle Regelung

Aus Abbildung 6-12 ist zu erkennen, dass die Solaranlage ihre Energie täglich zu fast gleichen Zeiten in den Wärmespeicher einbringt. Dies liegt an den gleichen Wetterbedingungen, insbesondere dem Globalstrahlungsverlauf im betrachteten Zeitraum. Die Wärmepumpenenergie wird je nach Verlauf des Ladezustandes in den Speicher eingespeist. Dabei unterliegt sie der Einschränkung durch das EVU zwischen 6Uhr-8Uhr sowie zwischen 17Uhr-20Uhr. Zu diesen Sperrzeiten der Wärmepumpe kommt bei einem vorliegenden Energiebedarf der Heizkessel zu Einsatz. Da dieser schnell nach seinem Einsatz auskühlt und eine gewisse Aufheizzeit benötigt, entnimmt dieser in den Aufheizzeiten Energie aus dem Speicher. Das ist in der Abbildung mit einem negativen Energieeintrag zu erkennen.

Die Betriebskosten ergeben sich nach (6-20).

$$K_{Sol} = 1,91\text{€} \quad (6-20)$$

$$K_{WP} = 1,48\text{€}$$

$$K_K = 28,70\text{€}$$

$$K(5 \text{ Tage}) = 32,09\text{€}$$

Mit den dazugehörigen Einsatzzeiten und Einsatzdauern nach Tabelle 6-8-

| Wärmeerzeuger | Einsatzdauer insgesamt Δt_E | Einsatzzeit Tag 1 | Einsatzzeit Tag 2 | Einsatzzeit Tag 3 | Einsatzzeit Tag 4 | Einsatzzeit Tag 5 |
|---------------|--|--|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| Solaranlage | 144600s | 08:43 – 16:43 | 8:41-16:44 | 8:41-16:44 | 8:41-16:42 | 8:39-16:42 |
| Wärmepumpe | 12060s | 00:20 – 1:20; 4:39-4:54; 8:00-8:21; 21:10-21:25 | 9:11-9:26; 21:51- 22:06 | 20:29- 20:44 | 8:23-8:38; 21:33- 21:48 | 20:26- 20:41 |
| Heizkessel | 17400s | 6:54-8:00; 19:37-20:00 | 6:18-6:40; 7:22-7:37 | 6:56-7:51 | 6:09-7:02 | 6:48-7:44 |

Tabelle 6-8: Einsatz der Wärmeerzeuger nach konventionellem Regelungskonzept

Es ist zu erkennen, dass in kurzen Zeitbereichen der Sollwert nicht eingehalten ist, was in der Praxis zur Nichterfüllung der Nutzeranforderung führen kann. Die Unterschreitung ist mit dem unkoordinierten Wärmeerzeugereinsatz zu begründen. Bei der konventionellen Regelung erfolgt die Wärmeanforderung an die Leitgeräte ausgelöst durch die Annäherung des Istwertes an den Sollwert. Damit können die Leitgeräte lediglich auf bereits wirkende Störeinflüsse reagieren, nicht jedoch auf zu prognostizierende Last- oder Wetteränderungen. Weiterhin ist bei der konventionellen Regelung der Sollwert des Speicherladezustands auf einem konstanten Wert, was dazu führt, dass im Speicher ein höheres Niveau vorgehalten wird, als zur Erfüllung der Nutzeranforderungen tatsächlich notwendig.

Für die entwickelte Methodik ist die Speichertemperatur entsprechend dem prognostizierten Lastverlauf zu führen, um unter anderem die Speicherverluste zu mindern. Trotzdem sind dabei die Nutzeranforderungen in jedem Zeitpunkt gedeckt. Da die Anwendung der Methodik an der bereits beschriebenen Beispielanlage mit den definierten Kostenparametern der Wärmeerzeuger genutzt wird, ist das Ergebnis der Dekomposition aus dem vorherigen Abschnitt zu nutzen. Die technologische und betriebswirtschaftlichen Optimierung ist für einen Optimierungszeitraum von 24h ausgeführt, welcher in Anlehnung an ein Schieberegister so lange zu verschieben ist, bis das Ergebnis für einen Zeitraum von 5 Tagen ermittelt ist. Es ergeben sich für den Speicherladezustand und den dazu berechneten kostenoptimalen Wärmeerzeugereinsatz die Verläufe, wie in Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 gezeigt.

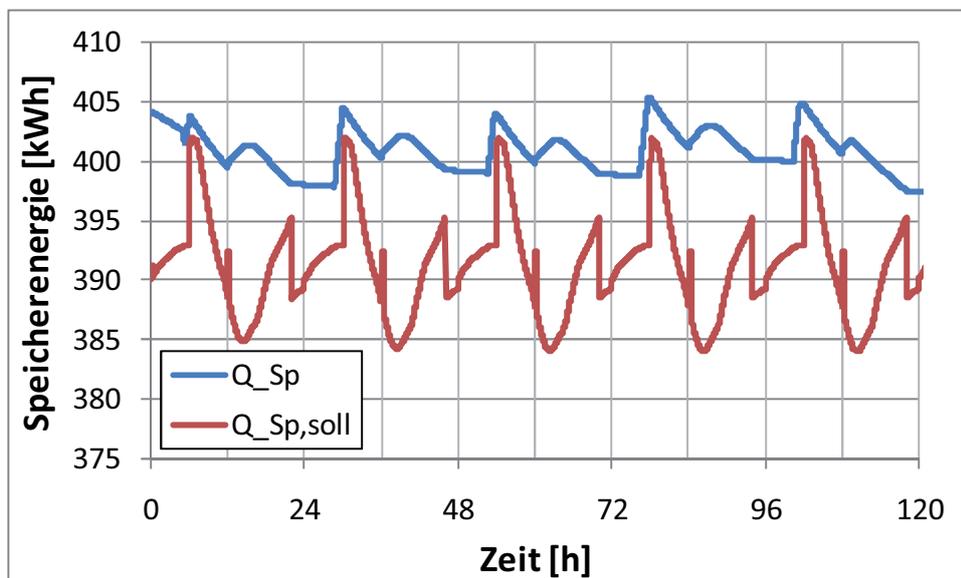


Abbildung 6-13: Speicherladezustand durch Anwendung der entwickelten Methodik

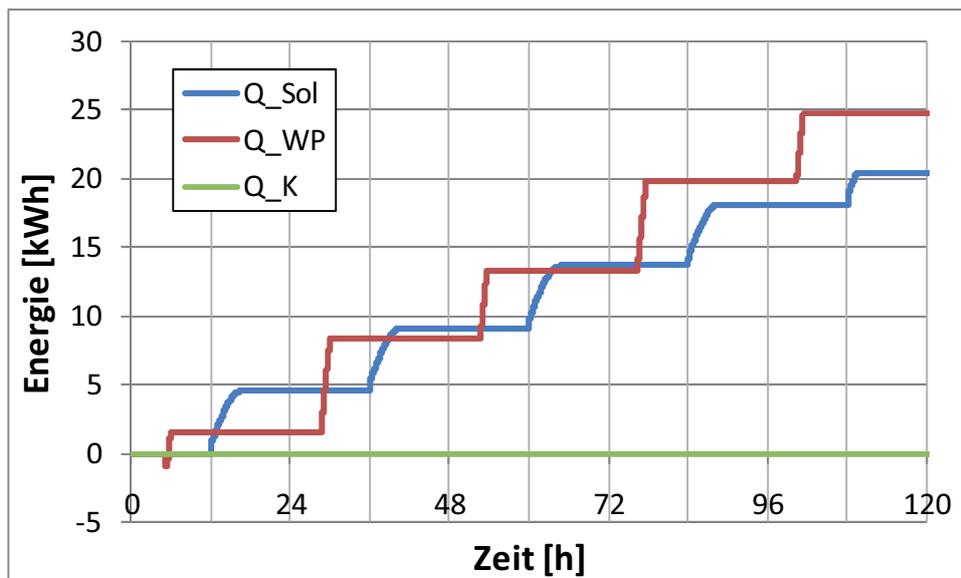


Abbildung 6-14: Eingebrachte Energiemengen durch Nutzung der entwickelten Methodik

Die resultierenden Betriebskosten für den vorgegebenen Optimierungszeitraum von 5 Tagen sind (6-21) zusammengefasst. Der Steuervektor ergibt sich nach (6-22).

$$K_{Sol} = 1,01\text{€}$$

$$K_{WP} = 2,51\text{€}$$

$$K_K = 0,00\text{€}$$

$$K(5 \text{ Tage}) = 3,52\text{€}$$

(6-21)

$$\underline{u} = \left\{ \begin{array}{lll} j = 1 & \Delta t_E = 64 & t = 37 - 51; 109 - 123; 181 - 195; 252 - 266; 324 - 327 \\ j = 2 & \Delta t_E = 6 & t = 16 - 18; 87 - 90; 160 - 162; 231 - 234; 304 - 306 \\ j = 3 & \Delta t_E = 0 & \end{array} \right\} \quad (6-22)$$

Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass der Speicherladezustand im Vergleich zum konventionellen Regelungskonzept wesentlich abgesenkt ist. Damit einher geht die Minderung der Speicherenergieverluste. Die Nutzeranforderungen sind bei beiden Konzepten in jedem Zeitpunkt gedeckt. Durch die Absenkung des Speicherladezustandes kann erreicht werden, dass in einer kürzeren Zeit mehr Energie durch die Wärmeerzeuger in den Wärmespeicher eingebracht werden kann, was mit einer Verbesserung der Einspeise-Wirkungsgrade der Wärmeerzeuger zu begründen ist.

6.4 Bewertung der Methodik

Mit der entwickelten Methodik zur Optimierung der Betriebskosten von Verbundheizungsanlagen sind die Nutzeranforderungen zu jedem Zeitpunkt zu decken. Gleichzeitig ist es möglich, durch das Einbeziehen der Last- und Wetterprognose den Speicherladezustand erheblich abzusenken. Damit kann zum einen im Vergleich zum konventionellen Regelungskonzept, der Wirkungsgrad der Energieeinspeisung durch die Wärmeerzeuger angehoben werden. Zum anderen ist es möglich die Verlustleistung des Wärmespeichers zu mindern.

Das konventionelle Regelungskonzept kann nur auf bereits wirkende Störungen und Anforderungen reagieren. Die entwickelte Methodik kann diesen vorausschauend begegnen und die benötigte Wärmeleistung zu jedem Zeitpunkt bereitstellen.

Die Betriebskosten beim konventionellen Regelungskonzept betragen aufgrund der intensiven Nutzung des Heizkessel und der Wärmepumpe zur Einhaltung des Speichersollwertes 32,09€. Bei der Regelung nach der entwickelten Methodik erfolgt der Einsatz der Wärmepumpe in geringem Maße, der Einsatz des Heizkessels ist durch die vorausschauende Koordination der Wärmeerzeuger nicht notwendig. Die Betriebskosten betragen für den Zeitraum von 5 Märztagen 3,52€, was lediglich 11% der Betriebskosten nach konventionellem Regelungskonzept entspricht. Damit ist die Aussage zu treffen, dass die Betriebskosten durch den Einsatz der entwickelten Methodik erheblich zu senken sind.

Die entwickelte Methodik ist als automatische Informationsverarbeitungsstrategie, umgesetzt in einem Leitgerät zu nutzen. Dieses Leitgerät ist aufgrund seiner koordinierenden Funktion als Energiemanager zu bezeichnen und in einer hierarchischen Prozessrechnerstruktur den Leitgeräten der Wärmeerzeuger überzuordnen.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Generalisierung der Methodennutzung

Die vorgestellte Methodik, besteht aus den Teilen technologische und betriebswirtschaftliche Optimierung. In der technologischen Optimierung erfolgt auf Basis der Lastprognose, die Ermittlung der zeitdiskreten Werte für die dem Speicher zuzuführende Energie.

In der betriebswirtschaftlichen Optimierung ist durch Nutzung der Methode der dynamischen Programmierung die Berechnung des Zielfunktional auf Basis der in der technologischen Optimierung bestimmten Werte auszuführen. Dessen Ergebnis gibt den kostenoptimalen Wärmeerzeugereinsatz vor.

Diese zweiphasige Vorgehensweise ist aufgrund ihrer Struktur sehr gut auf andere Bereiche anzuwenden. Ein Beispiel dafür ist die Einsatzplanung. Durch den Wandel zur kundenorientierten Auftragsplanung sowie den steigenden Komplexitätsgrad ergeben sich geänderte Anforderungen [71].

In modernen Produktionsprozessen wirken mehrere gleichartige Anlagen parallel. Diese sind als die Systemkomponenten des Prozesses zu bezeichnen. Das Ziel der optimalen Betriebsführung derartiger Prozesse ist es, einen vorgegebenen Output (Sollwert) mit den verfügbaren Systemkomponenten durch einen koordinierenden Einsatz zu erreichen [72]. Bei Abweichung zwischen dem Sollwert und dem real erzeugten Output (Istwert) hat eine Anpassung in dem Konzept der Einsatzplanung zu erfolgen. Die einzelnen Kapazitätseinheiten sind so zu verlagern, dass der dynamische Verlauf der geplanten Einsätze den erforderlichen Sollwert erreichen kann. Zusätzlich erschweren Umweltzustände in Form von Störungen den Prozessablauf. So können Systemkomponenten defekt, oder für andere Arbeiten belegt sein. Die Prozesszusammenhänge sind in ihrer Gesamtheit in Abbildung 7-1 dargestellt.

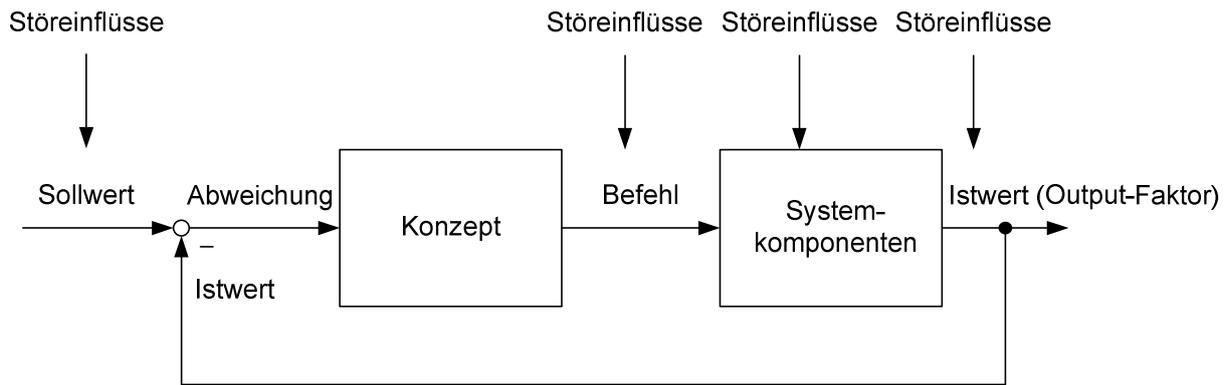


Abbildung 7-1: Prozesszusammenhänge

Das Ziel der Optimierung des Prozesses kann die Minimierung des Aufwandes sein. Dazu ist es notwendig eine detaillierte Prognose über den zeitlichen Verlauf der benötigten Produkte aufzustellen, um die kostenoptimale Einsatzplanung für die einzelnen Anlagen auszuführen. Die Nutzung der technologischen Optimierung ermöglicht die Lösung der Problematik unter Beachtung aller technisch und technologisch bedingten Randbedingungen. Um die kostenoptimalen Betriebsparameter der Anlagen voraus zu berechnen ist die betriebswirtschaftliche Optimierung zu verwenden. In [73] ist beschrieben wie die dynamische Programmierung in der Fertigungstechnik einzusetzen ist, um die Verlustfunktion zu minimieren.

Weitere mögliche Anwendungen der Methodik sind in der Kraftwerkseinsatzplanung und der Koordinierung dezentrale Energieversorgungsanlagen zu finden [66].

7.2 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit fand die Entwicklung einer Methodik für die Optimierung der Betriebsführung von Verbundheizungsanlagen statt, welche das Ziel verfolgt die Betriebskosten zu minimieren. Mit der Methodik ist es möglich die einzelnen Wärmeerzeuger einer Verbundanlage unter Beachtung der Nutzeranforderungen kostenoptimal zu koordinieren. Weiterhin ist es möglich, mit der entwickelten Methodik den Einsatz von kostenintensiven, zumeist fossilen, Primärenergieträgern zu mindern und den Einsatz von kostengünstigen, zumeist regenerativen, Energiequellen zu verstärken.

Die Optimierungsmethodik besteht aus zwei Teilen, der technologischen und der betriebswirtschaftlichen Optimierung. In der technologischen Optimierung ist der zukünftige Lastverlauf in Abhängigkeit der Heizkreisanforderungen und der Trinkwarmwasser-Bereitstellung zu simulieren. Dabei sind die Nutzeranforderungen sowie die aktuellen Wetterprognosen einzubeziehen. Weiterhin erfolgt in diesem Optimierungsteil die Simulation des Speichersollwertes auf Basis der erstellten Lastprognose. Der dritte Teil der technologischen Optimierung besteht aus der Simulation des Speicheristwertes in Abhängigkeit der prognostizierten Last und der Speicherverluste. Die Nutzung der Simulationsergebnisse führt zur Ermittlung der dem Speicher zuzuführenden zeitdiskreten Wärmemengen. Für deren Bestimmung ist die Vorhersage über sich einstellende Prozesszustände und innere Zusammenhänge zwingend notwendig. Da es außer durch Nutzung der Simulationen nicht möglich ist, diese durch eine analytische Funktion in Zusammenhang mit den Wärmemengen darzustellen, ist auch der erste Teil der entwickelten Methodik als Optimierung zu bezeichnen.

Im zweiten Teil der Optimierungsmethodik sind die Betriebskosten, verursacht durch den Einsatz der einzelnen Wärmeerzeuger, in Form eines gegebenen Zielfunktionalis zu berechnen. Diese Berechnung erfolgt durch Nutzung der Methode der dynamischen Programmierung, welche in den Teilen Dekomposition, Vorwärtsrechnung und Rückwärtsrechnung auszuführen ist. Die Besonderheit dabei liegt in der Dekomposition des Problems in die Anzahl der Wärmeerzeuger. Durch eine Kostenbewertung erfolgt die Zuordnung der Wärmeerzeuger zu den Stufen der dynamischen Programmierung, welche nacheinander zu lösen sind. Dazu ist in der Vorwärtsrechnung durch Nutzung der Rekursionsgleichung die Rekursionstabelle auszufüllen. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme der stationären Prozesskennfelder der Wärmeerzeuger, welche durch Simulation erstellt sind. Damit ist die durch den Wärmeerzeuger einzubringende Energiemenge in Abhängigkeit von inneren und äußeren Einflussgrößen zu bestimmen. In der Rückwärtsrechnung erfolgt die Ermittlung des kostenoptimalen Wärmeerzeugereinsatzes durch filtern der Rekursionstabelle. Damit sind sowohl die minimalen Betriebskosten als auch der optimale Wärmeerzeugereinsatz zu bestimmen. Die Erklärten Zusammenhänge sind in Abbildung 7-2 dargestellt.

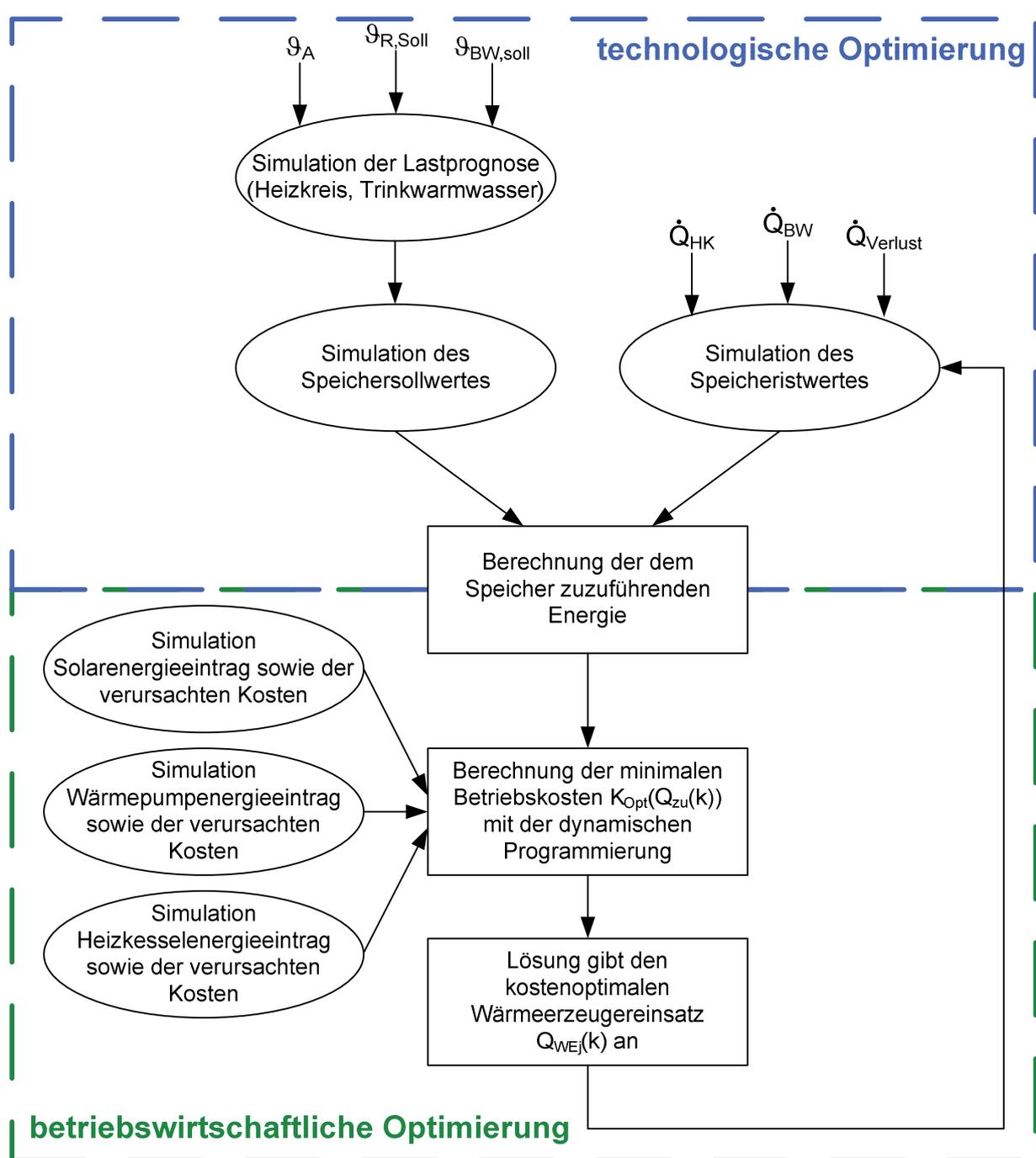


Abbildung 7-2: Grafische Zusammenfassung der entwickelten Methodik

Durch die technologische Optimierung ist es möglich den vorgehaltenen Speicherladezustand abzusenken ohne Einbußen bei den Nutzeranforderungen zu riskieren. Dies bringt erhebliche Einsparungen bei den Speicherverlusten und verbessert den Wirkungsgrad der Wärmeerzeugereinspeisung.

Der koordinierte Wärmeerzeugereinsatz, welcher durch die betriebswirtschaftliche Optimierung zu ermitteln ist, ermöglicht die Berücksichtigung von technisch und technologisch bedingten Restriktionen der Betriebsführung. Damit ist es

beispielsweise möglich Sondertarife der Energieversorger für den Wärmepumpeneinsatz gezielter auszunutzen. Weiterhin sind technologisch unerwünschte permanente Taktungen der Wärmeerzeuger, im speziellen des Heizkessels, zu vermeiden. Dies führt zu einer Minderung des Anlagenverschleißes und damit zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Betriebsführung.

Für die Umsetzung in einem hierarchischen Prozessrechensystem ist der entwickelte Optimierungsalgorithmus in ein leistungsfähiges Leitgerät zu implementieren. Weiterhin sind die erforderlichen Schnittstellen zu der Datenerfassung des Prozesses, zu den Leitgeräten der einzelnen Wärmeerzeugern der Verbundanlage sowie einem externen Wetterprognose-Programm zu schaffen. Durch die Errichtung der hardwaretechnischen Voraussetzungen ist es möglich, die entwickelte automatische Informationsverarbeitungsstrategie in einem den Leitgeräten der Wärmeerzeuger übergeordneten Leitgerät abzuarbeiten.

Die entwickelte Methodik bringt für einen Betrachtungszeitraum von 5 aufeinanderfolgenden Märztagen im Vergleich zu dem aktuell praktizierten Regelungskonzept eine erhebliche Betriebskostensparnis. Weitere Einsparungen sind durch Erweiterungen in der technologischen Optimierung, im Sinne einer verbesserten Lastprognose, zu erreichen. Der weitere Forschungsbedarf in diesem Bereich bezieht sich auf Berechnungen, welche auf Basis des dynamischen Wärmeverbrauchs zu erfolgen haben. Die Berechnung der Last anhand der Heizkurve birgt bei schlecht eingestellten Parametern die Gefahr zu viel Wärmeleistung bereitzustellen.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit liegt in der Ermittlung einer optimierten Wärmeerzeugerzusammenstellung. Dazu sind die optimalen Betriebskosten für verschiedene Lastsituationen (Sommer entspricht Schwachlast; Herbst, Frühling entspricht Teillast; Winter entspricht Volllast) mit variierenden Wärmeerzeugerzusammenstellungen zu berechnen. So ist beispielsweise die Solaranlagenfläche oder die Wärmeleistung der Wärmepumpe zu verändern und die Auswirkungen auf die Betriebskosten in den verschiedenen Lastbereichen zu analysieren. Damit ist eine optimierte Zusammenstellung von regenerativen und konventionellen Wärmeerzeugern für den speziellen Standort auszugeben.

Literaturverzeichnis

- [1] **Deutsche Energie-Agentur GmbH.** Energieverbrauch im Haushalt. *Projekt "Zukunft Haus"*. s.l. : dena/VDEW, 18.08.2003. Emnid Umfrage.
- [2] **Umweltbundesamt.** *Nachhaltige Entwicklung Sachstandsbericht*. FG I 4.2 "Nachhaltige Energieversorgung". Dessau : Umweltbundesamt, 03/2007. ISSN 1862-4359.
- [3] **Quaschnig, V.** *Regenerative Energiesysteme*. 5. Auflage. München : Hanser Verlag, 2006. S. 23. ISBN 978-3-446-40973-6.
- [4] **Goy, G.** *Erneuerbare Energiequellen Abschätzung des Potentials in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jah 2000*. München : Oldenbourg Verlag GmbH, 1987. S. 27f. ISBN 3-486-26306-4.
- [5] **Fett, F.N. und Bradtke, H.** Betriebsoptimierung reduziert Energiekosten. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Wärmeversorgung von Gebäuden mit multivalenten Heizsystemen. 1992, Bd. Nr. 3, *Haustechnik* 43, S. 141-148.
- [6] **Oerzen, J.** *Energetische Sanierung von Gebäuden im Bestand - Wirtschaftlichkeit und Maßnahmen am Beispiel eines Mehrfamilienhauses*. Norderstedt : GRIN Verlag, 2008. S. 56ff. ISBN 978-3-640-25068-4.
- [7] **Krimmling, J.** *Facility Management - Strukturen und methodische Instrumente*. 2. Auflage. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2008. ISBN 978-3-8167-7498-3.
- [8] **Koschack, A.** *Untersuchungen zur Kopplung von erdgasbetriebenen Wärmeerzeugern mit thermischen Solarsystemen*. Aachen : Shaker Verlag, 2001. S. 106. ISBN 3-8265-9100-3.
- [9] **Grundmann, W.** *Operations Research Formeln und Methoden*. Zwickau : B:G:Teubner GmbH, 2002. S. 64, 21f. ISBN 3-519-00421-6.
- [10] **Li, P.** *Prozessoptimierung unter Unsicherheiten*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2007. S. 4. ISBN 978-3-486-58194-2.
- [11] **Kraft, A.** *Einsparpotentiale bei der Energieversorgung von Wohngebäuden durch Informationstechnologien*. Jülich : Forschungszentrum Jülich GmbH, 2002. S. 2. ISBN 3-89336-315-7.

- [12] **Gröger, A.** Energiemanagement mit Gebäudeautomationssystemen. Renningen : expert Verlag, 2004. S. 45f. ISBN 3-8169-2277-5.
- [13] **Bendel, U.** *Optimale automatische Steuerung kontinuierlicher Prozesse*. Berlin : VEB Verlag Technik, 1974. S. 9.
- [14] **VDI 3633, Blatt1.** Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. *Grundlagen*. Dezember 1993. S. 3.
- [15] **DIN EN ISO 9000.** Qualitätsmanagementsysteme. *Grundlagen und Begriffe*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2005. S. 22.
- [16] **Scherf, Ronny.** Dipl.-Ing. (FH), Produktmanager, Honeywell GmbH Schönaich. *Energiemanagementsysteme*. Zittau, 29. Juli 2009.
- [17] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.** Energie effizient Nutzen. [Online] November 2007. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_energieeffizienz.pdf.
- [18] **Schmidt, M.** *Regenerative Energien in der Praxis*. Berlin : Verlag Bauwesen, 2002. S. 17.
- [19] **Bine Informationsdienst.** *Wärmespeicher*. Köln : Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1991. S. 6-8.
- [20] **Heinrich, Najork und Nestler.** *Wärmepumpenanwendung in Industrie, Landwirtschaft, Gesellschafts- und Wohnungsbau*. 1. Auflage. Berlin : VEB Verlag Technik Berlin, 1982. S. 140-144.
- [21] **Müller, J.-U.** *Eine neue Methodik zur Integration von qualitativem und quantitativem Prozesswissen für den Entwurf von komplexen Steuerungs- und Regelungsalgorithmen*. Düsseldorf : VDI Verlag, 2001. S. 13ff.
- [22] **Dittmar, R. und Pfeiffer, B.-M.** *Modellbasierte prädiktive Regelung, Eine Einführung für Ingenieure*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004. S. 2ff. ISBN: 3-486-27523-2.
- [23] **Schütt, E., Nietsch, T. und Rogowsk, A.** *Prozessmodelle Bilanzgleichungen in der Verfahrenstechnik und Energietechnik*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1990. S. 16-35.

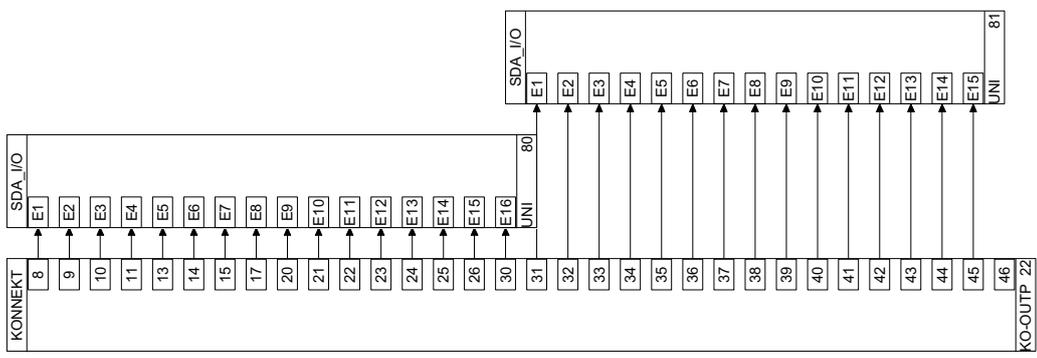
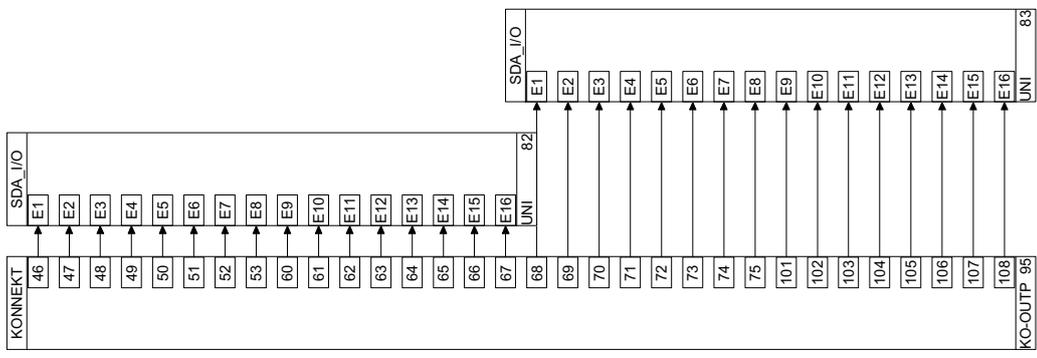
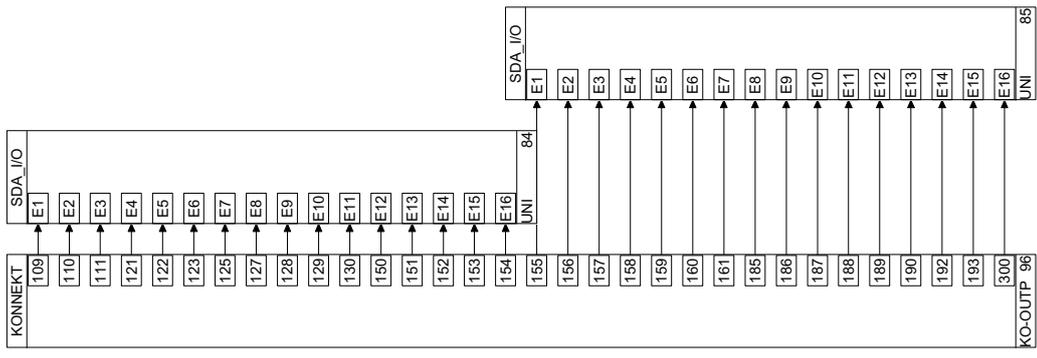
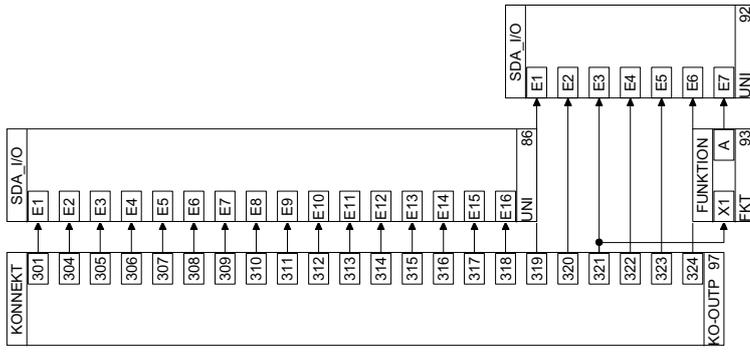
- [24] **Recknagel, Sprenger und Schramek.** *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik.* München : Oldenbourg Industrieverlag, 2007. S. 11; 138-189. ISBN 10:3-8356-3104-7.
- [25] **VDI-Gesellschaft, Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, [Hrsg.].** *VDI-Wärmeatlas.* s.l. : Springer-Verlag, 2002. Bd. 9. Auflage. ISBN: 3-540-41200-X geb..
- [26] **Polifke, W. und Kopitz, J.** *Wärmeübertragung Grundlagen, analytische und numerische Methoden.* München : Pearson Studium, 2009. Bd. 2. Auflage. ISBN 987-3-8273-7349-6.
- [27] **Pelz, G.** *Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme.* s.l. : Hüthig Verlag, 2001. S. 27f.
- [28] **Kahlert, J.** *Simulation technischer Systeme.* Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2004. S. 8.
- [29] **W&M Wartungs- und Montageservice.** Speichertechnik. [Online] 2008. [Zitat vom: 22. Juli 2009.] <http://heizung-wm.de>.
- [30] **Roos, H.** *Hydraulik der Wasserheizung.* 2. Auflage. München : Oldenbourg Verlag, 1994. S. 14f.
- [31] **Lehmann, St.** *Entwicklung eines Testsystems für die Funktionsweise von Steuerungs- und Regelungsalgorithmen im gebäudetechnischen Leitsystem EXCEL am Beispiel eines Modells für das dynamische Verhalten von Heizungsanlagen.* Zittau : Hochschule Zittau, 2007. S. 32-64, Diplomarbeit.
- [32] **Iwer, D.** *Entwicklung eines Heizkreissimulationsmodells und Entwurf einer bedarfsgerechten Vorlauftemperaturanpassung.* Zittau : Hochschule Zittau, 2004. S. 44.
- [33] **Ochsner, K.** *Wärmepumpen in der Heizungstechnik.* Heidelberg : C. F. Müller Verlag, 2000. S. 17ff.
- [34] **Buderus.** Projektierungs- und Installationshandbuch Wärmepumpen. [Online] 8/2008. [Zitat vom: 23. März 2009.] <http://www.buderus.de>.
- [35] **Baehr und Tilner-Roth.** *Thermodynamische Eigenschaften umweltverträglicher Kältemittel.* Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1995.
- [36] **Hainbach, Krug und andere.** *Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik.* Heidelberg : C. F. Müller Verlag, 2005. S. 128. Bd. 18. Auflage. ISBN 3-7880-7544-9.

- [37] **Solvay Fluor GmbH.** [Online] [Zitat vom: 17. November 2008.] Quelle: http://www.solvay-fluor.com/docroot/fluor/static_files/attachments/download.htm.
- [38] **Sichmund, C.** *Entwicklung eines Simulationsmodells für das statische und dynamische Verhalten von Verdampfersystemen in Luft-Wärmepumpen und Kälteanlagen.* Zittau : Hochschule Zittau, 2009.
- [39] **Brechmann, et al.** *Elektrotechnik Tabellen Energieelektronik.* Braunschweig : Westermann, 2004. Bd. 5. Auflage.
- [40] **Arbeitsgruppe MaxXControl.** *Handbuch MaxXControl.* Zittau : Hochschule Zittau/ Görlitz, 1991.
- [41] **Wimmer, R. W.** Regelung einer Wärmepumpenanlage mit Model Predictive Control. [Online] 2008. [Zitat vom: 16. September 2008.] Seite 37ff, 16. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch>.
- [42] **Deutscher Wetterdienst.** [Online] [Zitat vom: 12. Juni 2009.] <http://www.dwd.de>.
- [43] **Lorenz, Hurka, Heinemann, u.a.** Weiterentwicklung von Verfahren zur Solarleistungsvorhersage - Prognose von Verbundleistungen und deren Vertrauensbereiche. <http://www.energiemeteorologie.de/>. [Online] 2008. [Zitat vom: 23. Juli 2009.] <http://www.energiemeteorologie.de/>.
- [44] **Branicki, O.** *Das Klima von Potsdam.* Berlin : Meteorologische Abhandlungen, 1963. Bd. XXXII.
- [45] **ILKA Berechnungskatalog.** *Wärme- und Stofflast, Daten der Meteorologie.* Dresden : s.n., 1974. Abschnitt 3.1.1 Außenlufttemperatur.
- [46] **Esdorn, Horst, [Hrsg.].** *Rietschel Raumklimatechnik Band 1 Grundlagen.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1994. S. 37f. ISBN 978-3-540-54466-6.
- [47] **Gerdes, I., Klawonn, F. und Kruse, R.** *Evolutionäre Algorithmen Genetische Algorithmen- Strategien und Optimierungsverfahren- Beispielanwendungen.* Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/ GWV Fachverlage GmbH, 2004. S. 15f. ISBN 3-528-05570-7.
- [48] **Lutz, H. und Wendt, W.** Taschenbuch der Regelungstechnik. Frankfurt am Main : Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2003. 5., S. 466. ISBN 3-8171-1705-1.

- [49] **Burger, A.** Universität Kassel. *Zum Erhalt der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit bei Diskretisierung dynamischer Systeme.* [Online] 2008. [Zitat vom: 24. Juli 2009.] <http://www.upress.uni-kassel.de>. ISBN 978-3-89958-452-3.
- [50] **Geering, H.P., et al.** *Optimierungsverfahren zur Lösung deterministischer regelungstechnischer Probleme.* [Übers.] 140f. Bern, Stuttgart : Schriftenreihe des Instituts für Operations Research der ETH-Zürich, 1982. Bd. 5. ISBN 3-258-03196-7.
- [51] **Zimmermann, W. und Stache, U.** *Operations Research Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung.* München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2001. S. 148ff; 184ff. Bd. 10. Auflage. ISBN 3-486-25816-8.
- [52] **Krug, W. und S., Schönfeld.** *Rechnergestützte Optimierung für Ingenieure.* Berlin : VEB Verlag Technik, 1981. S. 40.
- [53] **Föllinger, O.** *Optimale Regelung und Steuerung Methoden der Regelungs- und Automatisierungstechnik.* München : R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1994. S. 24. ISBN 3-486-23116-2.
- [54] —. *Optimierung dynamischer Systeme Eine Einführung für Ingenieure.* München : R. Oldenbourg Verlag, 1988. S. 237. ISBN 3-486-20703-2.
- [55] **Nemhauser, G.** *Einführung in die Praxis der dynamischen Programmierung.* München : R. Oldenbourg Verlag, 1969. S. 21ff.
- [56] **Frank, W.** *Mathematische Grundlagen der Optimierung Variationsrechnung-dynamische Programmierung- Maximumprinzip.* München : R. Oldenbourg Verlag, 1969. S. 77-84.
- [57] **Bellman, Richard.** *Dynamic Programming.* Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 1957. S. 83.
- [58] **Domschke, W. und Drexl, A.** *Einführung in Operations Research.* 5. Auflage. Heidelberg : Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2002. S. 149f. ISBN 3-540-42950-6.
- [59] **Papageorgiou, M.** *Optimierung Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung.* 2. Auflage. München : R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1996. S. 369f. ISBN 3-486-23775-6.
- [60] **Iwainsky, A.** *Dynamische Optimierung Gegenstand-Methoden-Möglichkeiten.* Berlin : VEB Verlag Technik, 1984. S. 43ff; 88f.

- [61] **Erfurth, H. und Bieß, G.** *Optimierungsmethoden*. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1975. S. 111f.
- [62] **Künzi, H.P., Müller, O. und Nievergelt, E.** *Einführungskursus in die dynamische Programmierung*. Heidelberg : Springer Verlag Berlin, 1968. S. 12f.
- [63] **Nettekoven, M.** Wirtschaftsuniversität Wien. *Dynamische Optimierung*. [Online] 21. Januar 2005. [Zitat vom: 16. September 2008.] <http://www.wu.ac.at>.
- [64] **Kewitz, S.** Freie Universität Berlin. *Anwendungen dynamischer Programmierung in der Biologie*. [Online] [Zitat vom: 16. September 2008.] <http://page.mi.fu-berlin.de>.
- [65] **Gallenbacher, J.** Technische Universität Darmstadt. *Dynamische Programmierung*. [Online] 2006. [Zitat vom: 16. September 2008.] <http://www.deeds.informatik.tu-darmstadt.de/>.
- [66] **Bräu, R.** Einsatzoptimierung thermischer Energiequellen mit dem Verfahren der Dynamischen Programmierung. [Anwendungsaufsatz]. Stuttgart : Regelungstechnik, 1977. Heft 6.
- [67] **Wentzel, J.S.** *Elemente der dynamischen Optimierung*. Leipzig : B.G.Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1966. S. 39.
- [68] **Pun, L.** *Abriss der Optimierungspraxis*. Berlin : Akademie-Verlag, 1974. S. 137.
- [69] **Knabe, Gottfried.** *Gebäudeautomation*. Berlin, München : Verlag für Bauwesen, 2000. S. 267f.
- [70] **Jung, H.** *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2006. S. 179. ISBN 3-486-58049-3.
- [71] **Adam, D.** *Fertigungssteuerung - Grundlagen und Systeme*. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, 1992. S. 12f. Bd. I. ISBN 3-409-17916-X.
- [72] **Nhan, N. T.** Statisch optimale Prozesssteuerung mit Hilfe eines hierarchischen Entscheidungsprinzips. Magdeburg : msr 21, 1978. Heft 8, S. 445-448.
- [73] **Stanek, W.** *Rechnergestützte Fertigungssteuerung: mathematische Methoden*. Berlin : Verlag Technik, 1987. S. 151f. ISBN 3-341-00266-9.

Anhang A



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
Echtzeitdisabled
Endzeitkeine Endzeit
Abarbeitungsreihenfolgespaltenweise

BAUSTEINE

SPALTE - 0

KO-OUTP-22 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl32
Ausgänge
8T HR 8 (T HR)
9m` KW 9 (m` KW)
10T KW 10 (T KW)
11T Sp,m 11 (T Sp,m)
13Q Sp 13 (Q Sp)
14Q` Verlust 14 (Q` Verlust)
15T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)
17Q zu 17 (Q zu)
20m` K 20 (m` K)
21m` Br 21 (m` Br)
22T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)
23T K,RL 23 (T K,RL)
24T K,VL 24 (T K,VL)
25Q` Kessel 25 (Q` Kessel)
26Q K 26 (Q K)
30m` Fl 30 (m` Fl)
31T A 31 (T RL)
32S` Ges 32 (S` Ges)
33T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
34T Sol,RL 34 (T Sol,RL)
35Monat 35 (Monat)
36Uhrzeit 36 (Uhrzeit)
37T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)
38Q` Solar 38 (Q` Solar)
39Q Sol 39 (Q Sol)
40T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)
41T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
42T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)
43m` WP 43 (m` WP)
44T Sole 44 (T Sole)
45T Sole,RL 45 (T Sole,RL)
46m` Sole 46 (m` Sole)

SPALTE - 1

UNI-80 (SDA I/O)

Eingänge
E1T HR 8 (T HR)
E2m` KW 9 (m` KW)
E3T KW 10 (T KW)
E4T Sp,m 11 (T Sp,m)
E5Q Sp 13 (Q Sp)
E6Q` Verlust 14 (Q` Verlust)
E7T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)
E8Q zu 17 (Q zu)
E9m` K 20 (m` K)
E10m` Br 21 (m` Br)
E11T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)
E12T K,RL 23 (T K,RL)
E13T K,VL 24 (T K,VL)
E14Q` Kessel 25 (Q` Kessel)
E15Q K 26 (Q K)
E16m` Fl 30 (m` Fl)

SPALTE - 2

UNI-81 (SDA I/O)

Eingänge
E1T A 31 (T RL)
E2S` Ges 32 (S` Ges)
E3T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
E4T Sol,RL 34 (T Sol,RL)
E5Monat 35 (Monat)
E6Uhrzeit 36 (Uhrzeit)
E7T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)
E8Q` Solar 38 (Q` Solar)
E9Q Sol 39 (Q Sol)
E10T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)
E11T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
E12T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)
E13m` WP 43 (m` WP)
E14T Sole 44 (T Sole)
E15T Sole,RL 45 (T Sole,RL)

SPALTE - 4

KO-OUTP-95 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl32
Ausgänge
46m` Sole 46 (m` Sole)
47Q` 0 47 (Q` 0)
48Q` C 48 (Q` C)
49Leistungszahl 49 (Leistungszahl)
50P 50 (P)
51I 51 (I)
52Q` WP 52 (Q` WP)
53Q WP 53 (Q WP)
60T HK,RL 60 (T HK,RL)
61T WT,HK,1-2 61 (T WT,HK,1-2)
62T WT,HK,2-3 62 (T WT,HK,2-3)
63T WT,HK,3-4 63 (T WT,HK,3-4)
64T WT,HK,VL 64 (T WT,HK,VL)
65m` HK 65 (m` HK)
66Rho 66 (Rho)
67g 67 (g)
68h 68 (h)
69RSW 69 (RSW)
70T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)

71Q Bedarf 71 (Q Bedarf HK)
72T Raum 72 (T Raum)
73T BW,Soll 73 (VLTminSp)
74Q` BW 74 (RLTminSp)
75Q` HK 75 (Q` HK)
101m Fluid 101 (m Fluid)
102c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
103Wirkungsgrad Abs 103 (Wirkungsgrad Abs)
104m Abs 104 (m Abs)
105A Abs 105 (A Abs)
106c p,Abs 106 (c p,Abs)
107A Kol 107 (A Kol)
108k Fluid 108 (k Fluid)

SPALTE - 5

UNI-82 (SDA I/O)

Eingänge
E1m` Sole 46 (m` Sole)
E2Q` 0 47 (Q` 0)
E3Q` C 48 (Q` C)
E4Leistungszahl 49 (Leistungszahl)
E5P 50 (P)
E6I 51 (I)
E7Q` WP 52 (Q` WP)
E8Q WP 53 (Q WP)
E9T HK,RL 60 (T HK,RL)
E10T WT,HK,1-2 61 (T WT,HK,1-2)
E11T WT,HK,2-3 62 (T WT,HK,2-3)
E12T WT,HK,3-4 63 (T WT,HK,3-4)
E13T WT,HK,VL 64 (T WT,HK,VL)
E14m` HK 65 (m` HK)
E15Rho 66 (Rho)
E16g 67 (g)

SPALTE - 6

UNI-83 (SDA I/O)

Eingänge
E1h 68 (h)
E2RSW 69 (RSW)
E3T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)
E4Q Bedarf 71 (Q Bedarf HK)
E5T Raum 72 (T Raum)
E6T BW,Soll 73 (VLTminSp)
E7Q` BW 74 (RLTminSp)
E8Q` HK 75 (Q` HK)
E9m Fluid 101 (m Fluid)
E10c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
E11Wirkungsgrad Abs 103 (Wirkungsgrad Abs)
E12m Abs 104 (m Abs)
E13A Abs 105 (A Abs)
E14c p,Abs 106 (c p,Abs)
E15A Kol 107 (A Kol)
E16k Fluid 108 (k Fluid)

SPALTE - 8

KO-OUTP-96 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl32
Ausgänge
109k Abs 109 (k Abs)
110A WT,Sol 110 (A WT,Sol)
111k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
121h Sp 121 (h sp)
122Lambda St 122 (Lambda St)
123A Sp 123 (A Sp)
125m Sp,W 125 (m Sp,W)
127Lambda D 127 (Lambda D)
128d Sp 128 (d Sp)
129d D 129 (d D)
130Lambda Wasser 130 (Lambda Wasser)
150m K 150 (m K)
151c p,W 151 (c p,W)
152c p,St 152 (c p,St)
153C K-W 153 (C K-W)
154C K-HR 154 (C K-HR)
155m K,W 155 (m K,W)
156H u 156 (H u)
157Wirkungsgrad K 157 (Wirkungsgrad K)
158A WT,K 158 (A WT,K)
159k WT,K 159 (k WT,K)
160k WT,HK 160 (k WT,HK)
161A WT,HK 161 (A WT,HK)
185h1 185 (h1)
186h2 186 (h2)
187h3 187 (h3)
188m Sole 188 (m Sole)
189c p,Sole 189 (c p,Sole)
190U 190 (U)
192a 192 (a)
193m WT,WP,W 193 (m WT,WP,W)
300Toleranzband 300 (Tol)

SPALTE - 9

UNI-84 (SDA I/O)

Eingänge
E1k Abs 109 (k Abs)
E2A WT,Sol 110 (A WT,Sol)
E3k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
E4h Sp 121 (h sp)
E5Lambda St 122 (Lambda St)
E6A Sp 123 (A Sp)
E7m Sp,W 125 (m Sp,W)
E8Lambda D 127 (Lambda D)
E9d Sp 128 (d Sp)
E10d D 129 (d D)
E11Lambda Wasser 130 (Lambda Wasser)
E12m K 150 (m K)
E13c p,W 151 (c p,W)
E14c p,St 152 (c p,St)
E15C K-W 153 (C K-W)
E16C K-HR 154 (C K-HR)

S P A L T E - 10

UNI-85 (SDA_I/O)

Eingänge

E1.....m K,W 155 (m K,W)
 E2.....H u 156 (H u)
 E3.....Wirkungsgrad K 157 (Wirkungsgrad K)
 E4.....A WT,K 158 (A WT,K)
 E5.....k WT,K 159 (k WT,K)
 E6.....k WT,HK 160 (k WT,HK)
 E7.....A WT,HK 161 (A WT,HK)
 E8.....h1 185 (h1)
 E9.....h2 186 (h2)
 E10.....h3 187 (h3)
 E11.....m Sole 188 (m Sole)
 E12.....c p,Sole 189 (c p,Sole)
 E13.....U 190 (U)
 E14.....a 192 (a)
 E15.....m WT,WP,W 193 (m WT,WP,W)
 E16.....Toleranzband 300 (To1)

S P A L T E - 12

KO-OUTP-97 (KONNEKT)

Parametrierung

Ausgangsanzahl.....22

Ausgänge

301Speicherbedarf ja nein 301 (Speicherbedarf ja nein)
 304.....delta t 304 (delta t)
 305.....T K,Start 305 (T K,Start)
 306.....T Fl,Start 306 (T Fl,Start)
 307.....T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
 308.....t i 308 (t i)
 309.....Q zu,ti 309 (Q zu,ti)
 310.....Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)
 311.....T Sp,mitt 311 (T sp,mitt)
 312.....S` Ges,mitt 312 (S` Ges,mitt)
 313.....T A,mitt 313 (T A,mitt)
 314.....K Sol 314 (K Sol)
 315.....K WP 315 (K WP)
 316.....K K 316 (K K)
 317.....K max 317 (K max)
 318.....K min 318 (K min)
 319.....x 319 (x)
 320.....y 320 (y)
 321.....Zs 321 (Zs)
 322.....Q Sol,max 322 (Q Sol,max)
 323.....Q WP,max 323 (Q WP,max)
 324.....Q K,max 324 (Q K,max)

S P A L T E - 13

UNI-86 (SDA_I/O)

Eingänge

E1Speicherbedarf ja nein 301 (Speicherbedarf ja nein)
 E2.....delta t 304 (delta t)
 E3.....T K,Start 305 (T K,Start)
 E4.....T Fl,Start 306 (T Fl,Start)
 E5.....T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
 E6.....t i 308 (t i)
 E7.....Q zu,ti 309 (Q zu,ti)
 E8.....Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)
 E9.....T Sp,mitt 311 (T sp,mitt)
 E10.....S` Ges,mitt 312 (S` Ges,mitt)
 E11.....T A,mitt 313 (T A,mitt)
 E12.....K Sol 314 (K Sol)
 E13.....K WP 315 (K WP)
 E14.....K K 316 (K K)
 E15.....K max 317 (K max)
 E16.....K min 318 (K min)

FKT-93 (FUNKTION)

Parametrierung

Formel.....x1+1

Eingänge

X1.....Zs 321 (Zs)

Ausgänge

A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 14

UNI-92 (SDA_I/O)

Eingänge

E1.....x 319 (x)
 E2.....y 320 (y)
 E3.....Zs 321 (Zs)
 E4.....Q Sol,max 322 (Q Sol,max)
 E5.....Q WP,max 323 (Q WP,max)
 E6.....Q K,max 324 (Q K,max)
 E7.....FKT-93 (A)

EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
 Echtzeitdisabled
 Endzeitkeine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolgespaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

SOL-9 (1)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert1
 Ausgänge
 Akein Bezeichner

FKT-10 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formelx1>=24
 Eingänge
 X1Uhrzeit 36 (Uhrzeit)
 Ausgänge
 Akein Bezeichner

S P A L T E - 1

SOL-2 (T Sp,Start)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert56
 Ausgänge
 AT Sp,Start 330 (T Sp,Start)

SOL-3 (T HR)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert25
 Ausgänge
 AT HR 8 (T HR)

SOL-4 (T K,Start)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert45
 Ausgänge
 AT K,Start 305 (T K,Start)

SOL-5 (T Wp,Start)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert45
 Ausgänge
 AT Fl,Start 306 (T Fl,Start)

SOL-6 (T Sol,Start)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert45
 Ausgänge
 AT Wp,Start 307 (T Wp,Start)

SOL-7 (Monat)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert3
 Ausgänge
 AMonat 35 (Monat)

INT-8 (INT)
 Parametrierung
 SW0
 Tn3600 sec
 Hndals Eingang
 Abg0
 Eingänge
 ESOL-9 (A)
 HndFKT-10 (A)
 Ausgänge
 AUhrzeit 36 (Uhrzeit)
 Gwkein Bezeichner

S P A L T E - 3

KO-INP-1 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Eingangszahl7
 Eingänge
 330T Sp,Start 330 (T Sp,Start)
 8T HR 8 (T HR)
 305T K,Start 305 (T K,Start)
 306T Fl,Start 306 (T Fl,Start)
 307T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
 35Monat 35 (Monat)
 36Uhrzeit 36 (Uhrzeit)

S P A L T E - 5

KO-OUTP-18 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangszahl2
 Ausgänge
 332Optimierungszeitraum 332 (n)
 304delta t 304 (delta t)

S P A L T E - 6

SOL-19 (Optimierungszeitraum)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert1440
 Ausgänge

AOptimierungszeitraum 332 (n)

SOL-20 (Zeitschrittlänge)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert20
 Ausgänge
 Adelta t 304 (delta t)

FKT-17 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formelx1/x2
 Eingänge
 X1Optimierungszeitraum 332 (n)
 X2delta t 304 (delta t)
 Ausgänge
 AN 331 (N)

SOL-21 (k Br)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0.5
 Ausgänge
 Ak Br 198 (k Br)

SOL-22 (k el,K,Sol)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0.19
 Ausgänge
 Ak el,K,Sol 194 (k el,K,Sol)

SOL-23 (k el,WP)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0.11
 Ausgänge
 Ak el,WP 195 (k el,WP)

S P A L T E - 8

KO-INP-15 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Eingangszahl6
 Eingänge
 332Optimierungszeitraum 332 (n)
 304delta t 304 (delta t)
 331N 331 (N)
 198k Br 198 (k Br)
 194k el,K,Sol 194 (k el,K,Sol)
 195k el,WP 195 (k el,WP)

S P A L T E - 10

SOL-24 (RSW)
 Parametrierung
 TypFolge
 VerlaufSprünge
 Dauer 02.16e+04 sec
 Wert 018
 Dauer 15.76e+04 sec
 Wert 120
 Dauer 27200 sec
 Wert 218
 Ausgänge
 ARSW 69 (RSW)

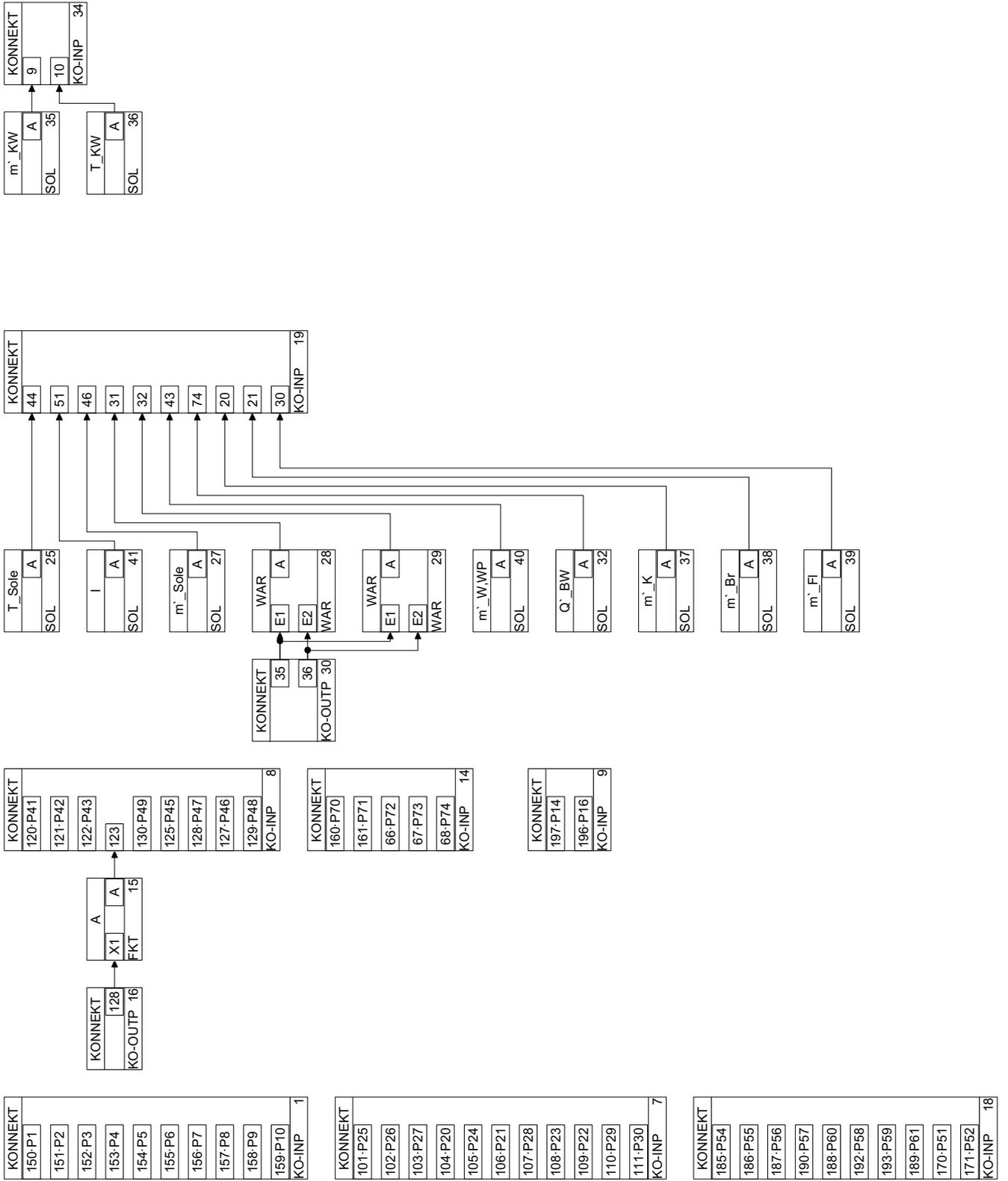
SOL-13 (T BW,Soll)
 Parametrierung
 TypFolge
 VerlaufSprünge
 Dauer 04.32e+04 sec
 Wert 00
 Dauer 11200 sec
 Wert 155
 Dauer 24.2e+04 sec
 Wert 20
 Ausgänge
 AT BW,Soll 73 (VLTminSp)

SOL-14 (Q` BW)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0
 Ausgänge
 AQ` BW 74 (RLTminSp)

SOL-16 (Toleranzwert)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0
 Ausgänge
 AToleranzband 300 (Tol)

S P A L T E - 12

KO-INP-11 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Eingangszahl4
 Eingänge
 69RSW 69 (RSW)
 73T BW,Soll 73 (VLTminSp)
 74Q` BW 74 (RLTminSp)
 300Toleranzband 300 (Tol)



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
 Echtzeitdisabled
 Endzeitkeine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolgespaltenweise

PARAMETER

P1 (m, K)3460 kg
 P2 (c, p, W)4180 J/kgK
 P3 (c, p, St)532 J/kgK
 P4 (C, K-W)6700 J/K
 P5 (C, K-HR)50 J/K
 P6 (m, W)753 kg
 P7 (H, u)3.28e+07 J/kg
 P8 (Wirkungsgrad, K)0.93
 P9 (A, WT, K)1.33333 m²
 P10 (K, WT, K)1000 W/m² K
 P14 (P, Solar)0.25 kW
 P16 (P, K)0.1 kW
 P20 (Masse, Abs)5 kg
 P21 (spez. Wärmekapazität, c_p, Abs)4000 J/kgK
 P22 (k, Abs)1.2 W/m²K
 P23 (k, Fluid)100 W/m²K
 P24 (Absorberfläche)10 m²
 P25 (Masse, Fluid)5 kg
 P26 (spez. Wärmekapazität, c_p, Fluid)2960 J/kgK
 P27 (Wirkungsgrad)0.8
 P28 (A, Fl)9.8 m²
 P29 (A, WT, Sol)1.3333 m²
 P30 (k, WT, Sol)1000 W/m² K
 P41 (n)7
 P42 (h)2 m
 P43 (Lambda, St)10 W/mK
 P45 (m, Sp, W)1000 kg
 P46 (Lambda, D)0.005 W/mK
 P47 (d, Sp)0.92 m
 P48 (d, D)1 m
 P49 (Lambda, Wasser)2 W/m K
 P51 (k, WT, WP)1000 W/mK
 P52 (A, WT, WP)0.8 m²
 P54 (h1)420000 J/kg
 P55 (h2)460000 J/kg
 P56 (h3)220000 J/kg
 P57 (U)400 V
 P58 (a)0.9
 P59 (m, WT, WP, W)50 kg
 P60 (m, Sole)10 kg
 P61 (c, p, Sole)6000 J/kgK
 P70 (k, WT, HK)200 W/m K
 P71 (A, WT, HK)1 m²
 P72 (Dichte, Wasser)1000 kg/m³
 P73 (Erdbeschleunigung)9.81 m/s²
 P74 (Förderhöhe, Pumpe)2 m

BAUSTEINE

S P A L T E - 1

KO-INP-1 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl10
Eingänge
 150P1 (m, K)
 151P2 (c, p, W)
 152P3 (c, p, St)
 153P4 (C, K-W)
 154P5 (C, K-HR)
 155P6 (m, W)
 156P7 (H, u)
 157P8 (Wirkungsgrad, K)
 158P9 (A, WT, K)
 159P10 (k, WT, K)

KO-INP-7 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl11
Eingänge
 101P25 (Masse, Fluid)
 102P26 (spez. Wärmekapazität, c_p, Fluid)
 103P27 (Wirkungsgrad)
 104P20 (Masse, Abs)
 105P24 (Absorberfläche)
 106P21 (spez. Wärmekapazität, c_p, Abs)
 107P28 (A, Fl)
 108P23 (k, Fluid)
 109P22 (k, Abs)
 110P29 (A, WT, Sol)
 111P30 (k, WT, Sol)

KO-INP-18 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl10
Eingänge
 185P54 (h1)
 186P55 (h2)
 187P56 (h3)
 190P57 (U)
 188P60 (m, Sole)
 192P58 (a)
 193P59 (m, WT, WP, W)
 189P61 (c, p, Sole)
 170P51 (k, WT, WP)
 171P52 (A, WT, WP)

S P A L T E - 2

KO-OUTP-16 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl1
Ausgänge
 128d Sp 128 (d Sp)

S P A L T E - 3

FKT-15 (A)

Parametrierung
 Formel0.7854*x1*x1
Eingänge
 X1d Sp 128 (d Sp)
Ausgänge
 AA Sp 123 (A Sp)

S P A L T E - 4

KO-INP-8 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl9
Eingänge
 120P41 (n)
 121P42 (h)
 122P43 (Lambda, St)
 123A Sp 123 (A Sp)
 130P49 (Lambda, Wasser)
 125P45 (m, Sp, W)
 128P47 (d, Sp)
 127P46 (Lambda, D)
 129P48 (d, D)

KO-INP-14 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl5
Eingänge
 160P70 (k, WT, HK)
 161P71 (A, WT, HK)
 66P72 (Dichte, Wasser)
 67P73 (Erdbeschleunigung)
 68P74 (Förderhöhe, Pumpe)

KO-INP-9 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl2
Eingänge
 197P14 (P, Solar)
 196P16 (P, K)

S P A L T E - 5

KO-OUTP-30 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl2
Ausgänge
 35Monat 35 (Monat)
 36Uhrzeit 36 (Uhrzeit)

S P A L T E - 6

SOL-25 (T Sole)

Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert10
Ausgänge
 AT Sole 44 (T Sole)

SOL-41 (I)

Parametrierung
 TypFolge
 VerlaufSprünge
 Dauer 01.92e+04 sec
 Wert 00
 Dauer 12400 sec
 Wert 15.81
 Dauer 28.64e+04 sec
 Wert 20
Ausgänge
 AI 51 (I)

SOL-27 (m` Sole)

Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0.1
Ausgänge
 Am` Sole 46 (m` Sole)

WAR-28 (WAR)

Parametrierung
 WAR-ModulAußentemperaturverlauf
 SteuerraumfunktionMultilinear (default)
Eingänge
 E1Monat 35 (Monat)
 E2Uhrzeit 36 (Uhrzeit)
Ausgänge
 AT A 31 (T RL)

WAR-29 (WAR)

Parametrierung
 WAR-ModulGlobalstrahlung
 SteuerraumfunktionMultilinear (default)
Eingänge
 E1Monat 35 (Monat)
 E2Uhrzeit 36 (Uhrzeit)
Ausgänge
 AS` Ges 32 (S` Ges)

SOL-40 (m` W, WP)

Parametrierung
 TypFolge
 VerlaufSprünge
 Dauer 01.92e+04 sec
 Wert 00
 Dauer 12400 sec
 Wert 10.05
 Dauer 28.64e+04 sec
 Wert 20
Ausgänge
 Am` WP 43 (m` WP)

SOL-32 (Q` BW)

Parametrierung

```

Typ.....Absolutwert
Wert.....0
Ausgänge
A.....Q` BW 74 (RLTminSp)

SOL-37 (m` K)
Parametrierung
Typ.....Absolutwert
Wert.....0
Ausgänge
A.....m` K 20 (m` K)

SOL-38 (m` Br)
Parametrierung
Typ.....Absolutwert
Wert.....0
Ausgänge
A.....m` Br 21 (m` Br)

SOL-39 (m` Fl)
Parametrierung
Typ.....Folge
Verlauf.....Sprünge
Dauer 0.....3.96e+04 sec
Wert 0.....0
Dauer 1.....3600 sec
Wert 1.....0.068
Dauer 2.....8.64e+04 sec
Wert 2.....0
Ausgänge
A.....m` Fl 30 (m` Fl)

```

S P A L T E - 8

```

KO-INP-19 (KONNEKT)
Parametrierung
Eingangszahl.....10
Eingänge
44.....T Sole 44 (T Sole)
51.....I 51 (I)
46.....m` Sole 46 (m` Sole)
31.....T A 31 (T RL)
32.....S` Ges 32 (S` Ges)
43.....m` WP 43 (m` WP)
74.....Q` BW 74 (RLTminSp)
20.....m` K 20 (m` K)
21.....m` Br 21 (m` Br)
30.....m` Fl 30 (m` Fl)

```

S P A L T E - 10

```

SOL-35 (m` KW)
Parametrierung
Typ.....Absolutwert
Wert.....0
Ausgänge
A.....m` KW 9 (m` KW)

SOL-36 (T KW)
Parametrierung
Typ.....Absolutwert
Wert.....15
Ausgänge
A.....T KW 10 (T KW)

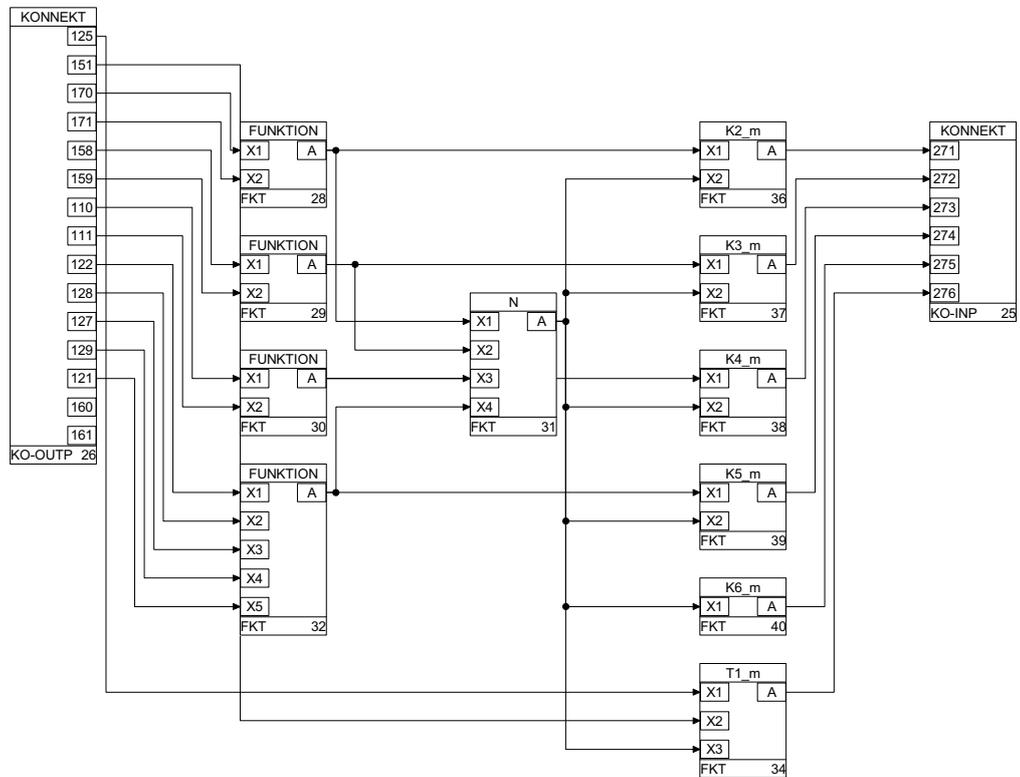
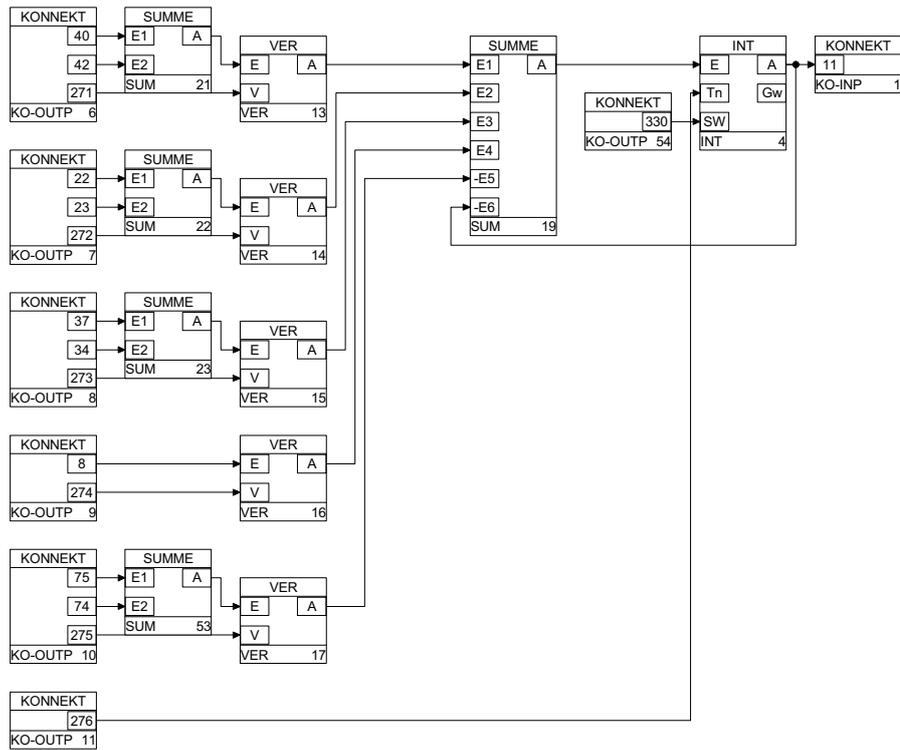
```

S P A L T E - 11

```

KO-INP-34 (KONNEKT)
Parametrierung
Eingangszahl.....2
Eingänge
9.....m` KW 9 (m` KW)
10.....T KW 10 (T KW)

```



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit.....1000 msec
 Echtzeit.....disabled
 Endzeit.....keine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolge.....spaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

KO-OUTP-6 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....3
Ausgänge
 40.....T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)
 42.....T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)
 271.....kein Bezeichner

KO-OUTP-7 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....3
Ausgänge
 22.....T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)
 23.....T K,RL 23 (T K,RL)
 272.....kein Bezeichner

KO-OUTP-8 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....3
Ausgänge
 37.....T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)
 34.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)
 273.....kein Bezeichner

KO-OUTP-9 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....2
Ausgänge
 8.....T HR 8 (T HR)
 274.....kein Bezeichner

KO-OUTP-10 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....3
Ausgänge
 75.....Q` HK 75 (Q` HK)
 74.....Q` BW 74 (RLTminSp)
 275.....kein Bezeichner

KO-OUTP-11 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....1
Ausgänge
 276.....kein Bezeichner

KO-OUTP-26 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....15
Ausgänge
 125.....m Sp,W 125 (m Sp,W)
 151.....c p,W 151 (c p,W)
 170.....k WT,WP 170 (k WT,WP)
 171.....A WT,WP 171 (A WT,WP)
 158.....A WT,K 158 (A WT,K)
 159.....k WT,K 159 (k WT,K)
 110.....A WT,Sol 110 (A WT,Sol)
 111.....k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
 122.....Lambda St 122 (Lambda St)
 128.....d Sp 128 (d Sp)
 127.....Lambda D 127 (Lambda D)
 129.....d D 129 (d D)
 121.....h Sp 121 (h sp)
 160.....k WT,HK 160 (k WT,HK)
 161.....A WT,HK 161 (A WT,HK)

S P A L T E - 1

SUM-21 (SUMME)
 Parametrierung.....
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)
 E2.....T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-22 (SUMME)
 Parametrierung.....
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)
 E2.....T K,RL 23 (T K,RL)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-23 (SUMME)
 Parametrierung.....
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)
 E2.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-53 (SUMME)
 Parametrierung.....
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....Q` HK 75 (Q` HK)
 E2.....Q` BW 74 (RLTminSp)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 2

VER-13 (VER)
 Parametrierung.....
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-21 (A)
 V.....KO-OUTP-6 (271)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-14 (VER)
 Parametrierung.....
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-22 (A)
 V.....KO-OUTP-7 (272)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-15 (VER)
 Parametrierung.....
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-23 (A)
 V.....KO-OUTP-8 (273)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-16 (VER)
 Parametrierung.....
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....T HR 8 (T HR)
 V.....KO-OUTP-9 (274)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-17 (VER)
 Parametrierung.....
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-53 (A)
 V.....KO-OUTP-10 (275)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-28 (FUNKTION)
 Parametrierung.....
 Formel.....x1*x2
Eingänge
 X1.....k WT,WP 170 (k WT,WP)
 X2.....A WT,WP 171 (A WT,WP)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-29 (FUNKTION)
 Parametrierung.....
 Formel.....x1*x2
Eingänge
 X1.....A WT,K 158 (A WT,K)
 X2.....k WT,K 159 (k WT,K)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-30 (FUNKTION)
 Parametrierung.....
 Formel.....x1*x2
Eingänge
 X1.....A WT,Sol 110 (A WT,Sol)
 X2.....k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-32 (FUNKTION)
 Parametrierung.....
 Formel..... $(6.2832 * x5) / (((1/x1) * (LN(x2 / (x2 - 0.005)))) + ((1/x$
Eingänge
 X1.....Lambda St 122 (Lambda St)
 X2.....d Sp 128 (d Sp)
 X3.....Lambda D 127 (Lambda D)
 X4.....d D 129 (d D)
 X5.....h Sp 121 (h sp)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 4

SUM-19 (SUMME)
 Parametrierung.....
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....VER-13 (A)
 E2.....VER-14 (A)
 E3.....VER-15 (A)
 E4.....VER-16 (A)
 -E5.....VER-17 (A)
 -E6.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-31 (N)
 Parametrierung.....
 Formel.....x1+x2+x3+x4
Eingänge
 X1.....FKT-28 (A)
 X2.....FKT-29 (A)
 X3.....FKT-30 (A)
 X4.....FKT-32 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 5

KO-OUTP-54 (KONNEKT)
 Parametrierung.....
 Ausgangszahl.....1
Ausgänge
 330.....T Sp,Start 330 (T Sp,Start)

S P A L T E - 6

INT-4 (INT)

Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-19 (A)
 Tn.....KO-OUTP-11 (276)
 SW.....T Sp,Start 330 (T Sp,Start)
Ausgänge
 A.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 Gw.....kein Bezeichner

FKT-36 (K2 m)

Parametrierung
 Formel.....x1/(2*x2)
Eingänge
 X1.....FKT-28 (A)
 X2.....FKT-31 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-37 (K3 m)

Parametrierung
 Formel.....x1/(2*x2)
Eingänge
 X1.....FKT-29 (A)
 X2.....FKT-31 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-38 (K4 m)

Parametrierung
 Formel.....x1/(2*x2)
Eingänge
 X1.....FKT-30 (A)
 X2.....FKT-31 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-39 (K5 m)

Parametrierung
 Formel.....x1/x2
Eingänge
 X1.....FKT-32 (A)
 X2.....FKT-31 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-40 (K6 m)

Parametrierung
 Formel.....1/x1
Eingänge
 X1.....FKT-31 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-34 (T1 m)

Parametrierung
 Formel.....(x1*x2)/x3
Eingänge
 X1.....m Sp,W 125 (m Sp,W)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....FKT-31 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 7

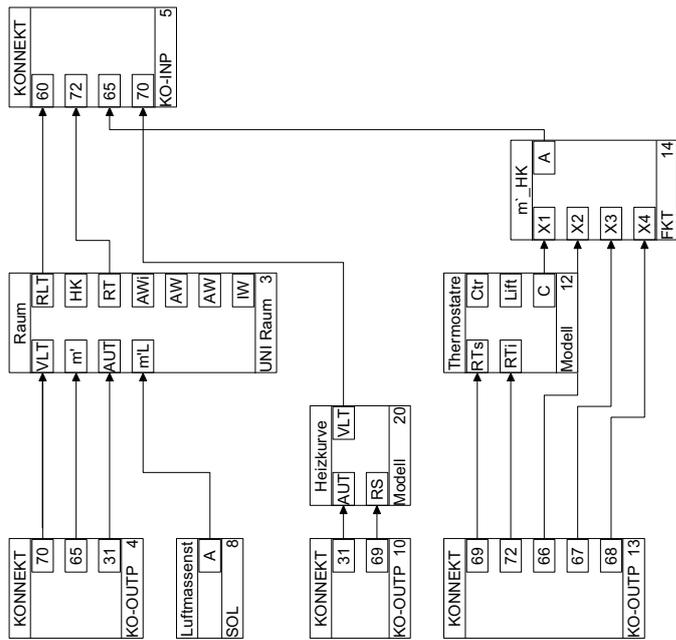
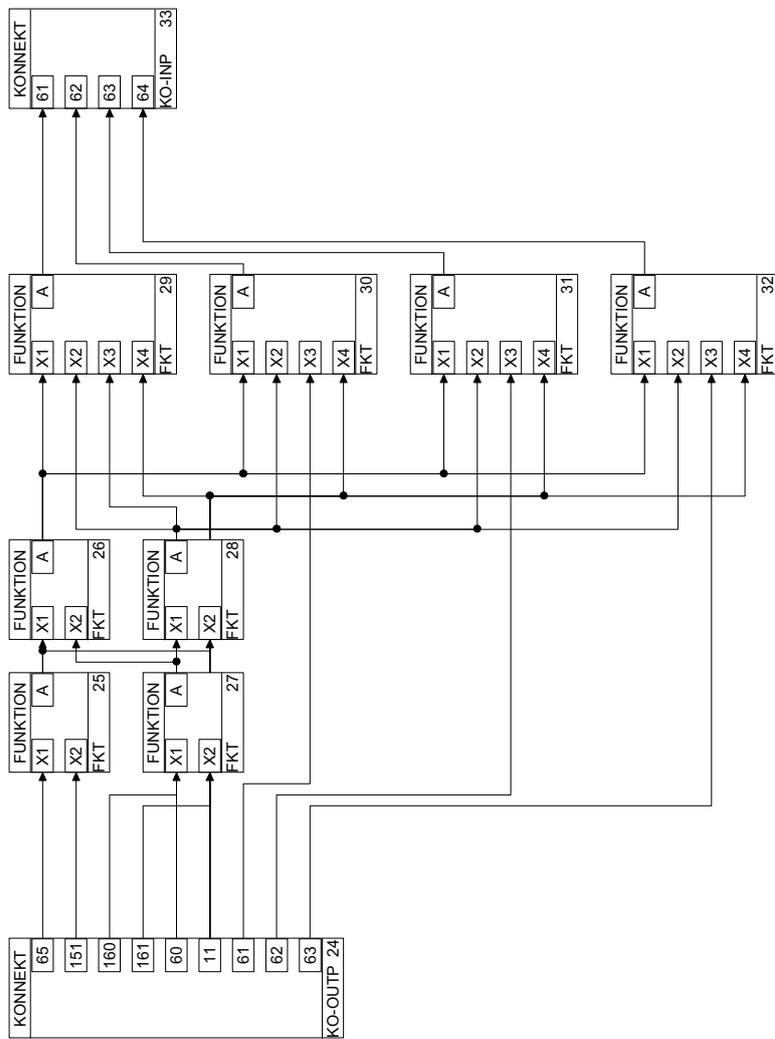
KO-INP-1 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl.....1
Eingänge
 I1.....T Sp,m 11 (T Sp,m)

S P A L T E - 8

KO-INP-25 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl.....6
Eingänge
 271.....FKT-36 (A)
 272.....FKT-37 (A)
 273.....FKT-38 (A)
 274.....FKT-39 (A)
 275.....FKT-40 (A)
 276.....FKT-34 (A)



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
 Echtzeitdisabled
 Endzeitkeine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolge.....spaltenweise

60.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
 11.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 61.....T WT,HK,1-2 61 (T WT,HK,1-2)
 62.....T WT,HK,2-3 62 (T WT,HK,2-3)
 63.....T WT,HK,3-4 63 (T WT,HK,3-4)

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

KO-OUTP-4 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangszahl3
Ausgänge
 70.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)
 65.....m` HK 65 (m` HK)
 31.....T A 31 (T RL)

SOL-8 (Luftmassenstrom)
 Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

KO-OUTP-10 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangszahl2
Ausgänge
 31.....T A 31 (T RL)
 69.....RSW 69 (RSW)

KO-OUTP-13 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangszahl5
Ausgänge
 69.....RSW 69 (RSW)
 72.....T Raum 72 (T Raum)
 66.....Rho 66 (Rho)
 67.....q 67 (q)
 68.....h 68 (h)

S P A L T E - 1

Modell-20 (Heizkurve)
Eingänge
 AUT.....T A 31 (T RL)
 RSW.....RSW 69 (RSW)
Ausgänge
 VLT.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)

S P A L T E - 2

UNI Raum-3 (Raum)
Eingänge
 VLT.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)
 m`.....m` HK 65 (m` HK)
 AUT.....T A 31 (T RL)
 m`L.....SOL-8 (A)
Ausgänge
 RLt.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
 HK.....kein Bezeichner
 RT.....T Raum 72 (T Raum)
 AWi.....kein Bezeichner
 AWa.....kein Bezeichner
 IW.....kein Bezeichner

Modell-12 (Thermostatregelventil)
Eingänge
 RTs.....RSW 69 (RSW)
 RTi.....T Raum 72 (T Raum)
Ausgänge
 CTr.....kein Bezeichner
 Lift.....kein Bezeichner
 C.....kein Bezeichner

S P A L T E - 3

FKT-14 (m` HK)
 Parametrierung
 Formel.....(SQRT(x2*x3*x4/x1))*x2/3600
Eingänge
 X1.....Modell-12 (C)
 X2.....Rho 66 (Rho)
 X3.....g 67 (g)
 X4.....h 68 (h)
Ausgänge
 A.....m` HK 65 (m` HK)

S P A L T E - 4

KO-INP-5 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Eingangszahl4
Eingänge
 60.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
 72.....T Raum 72 (T Raum)
 65.....m` HK 65 (m` HK)
 70.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)

S P A L T E - 6

KO-OUTP-24 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangszahl9
Ausgänge
 65.....m` HK 65 (m` HK)
 151.....c p,W 151 (c p,W)
 160.....k WT,HK 160 (k WT,HK)
 161.....A WT,HK 161 (A WT,HK)

S P A L T E - 8

FKT-25 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....x1*x2
Eingänge
 X1.....m` HK 65 (m` HK)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-27 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....0.25*x1*x2
Eingänge
 X1.....k WT,HK 160 (k WT,HK)
 X2.....A WT,HK 161 (A WT,HK)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 9

FKT-26 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....x1/(x1+x2)
Eingänge
 X1.....FKT-25 (A)
 X2.....FKT-27 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-28 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....x1/(x1+x2)
Eingänge
 X1.....FKT-27 (A)
 X2.....FKT-25 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 11

FKT-29 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....(x1*x3)+(x2*x4)
Eingänge
 X1.....FKT-26 (A)
 X2.....FKT-28 (A)
 X3.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
 X4.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,HK,1-2 61 (T WT,HK,1-2)

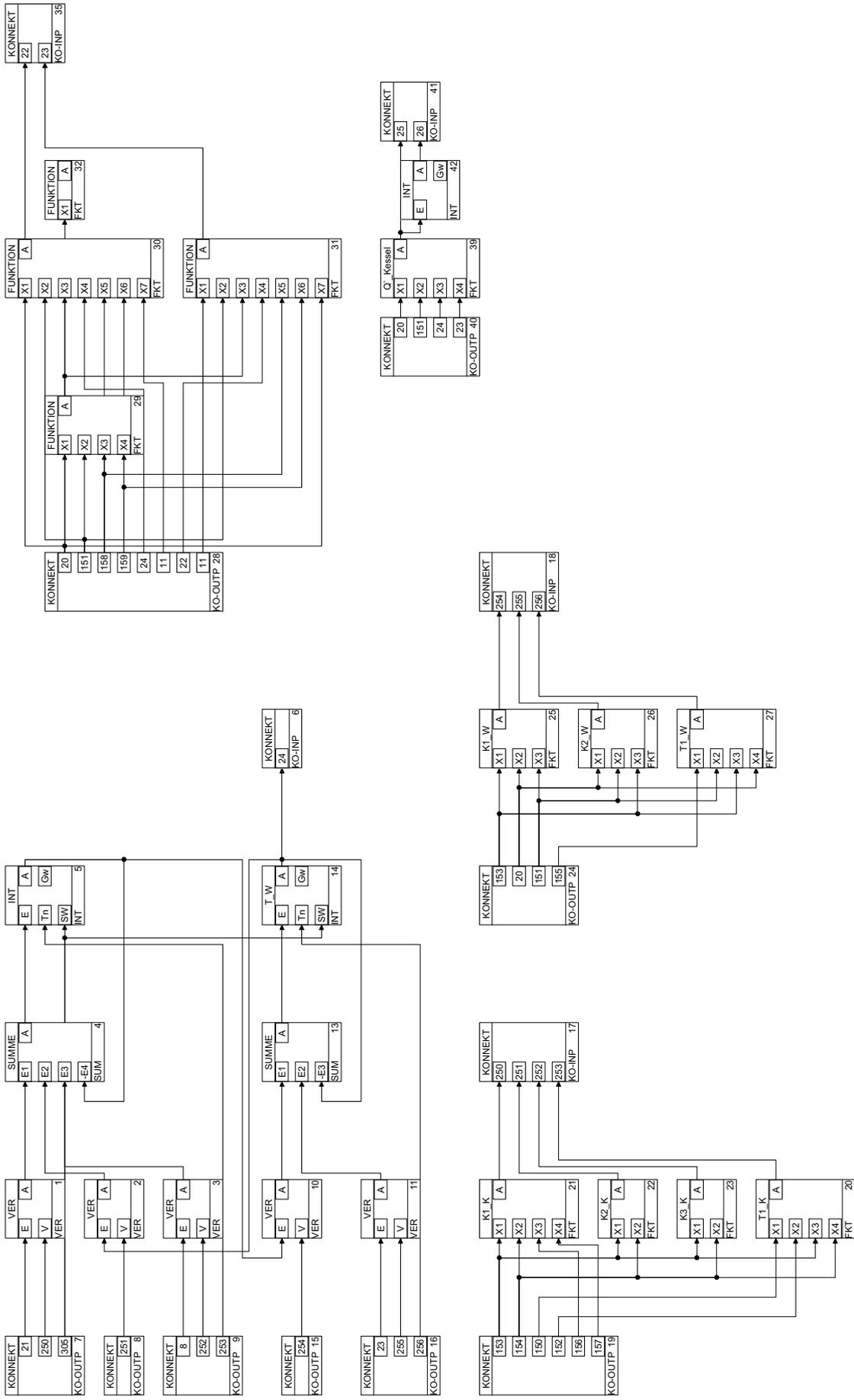
FKT-30 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....(x1*x3)+(x2*x4)
Eingänge
 X1.....FKT-26 (A)
 X2.....FKT-28 (A)
 X3.....T WT,HK,1-2 61 (T WT,HK,1-2)
 X4.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,HK,2-3 62 (T WT,HK,2-3)

FKT-31 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....(x1*x3)+(x2*x4)
Eingänge
 X1.....FKT-26 (A)
 X2.....FKT-28 (A)
 X3.....T WT,HK,2-3 62 (T WT,HK,2-3)
 X4.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,HK,3-4 63 (T WT,HK,3-4)

FKT-32 (FUNKTION)
 Parametrierung
 Formel.....(x1*x3)+(x2*x4)
Eingänge
 X1.....FKT-26 (A)
 X2.....FKT-28 (A)
 X3.....T WT,HK,3-4 63 (T WT,HK,3-4)
 X4.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,HK,VL 64 (T WT,HK,VL)

S P A L T E - 13

KO-INP-33 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Eingangszahl4
Eingänge
 61.....T WT,HK,1-2 61 (T WT,HK,1-2)
 62.....T WT,HK,2-3 62 (T WT,HK,2-3)
 63.....T WT,HK,3-4 63 (T WT,HK,3-4)
 64.....T WT,HK,VL 64 (T WT,HK,VL)



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
Echtzeitdisabled
Endzeitkeine Endzeit
Abarbeitungsreihenfolgespaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

KO-OUTP-7 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl3
Ausgänge
21m` Br 21 (m` Br)
250kein Bezeichner
305T K,Start 305 (T K,Start)

KO-OUTP-8 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl1
Ausgänge
251kein Bezeichner

KO-OUTP-9 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl3
Ausgänge
8T HR 8 (T HR)
252kein Bezeichner
253kein Bezeichner

KO-OUTP-15 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl1
Ausgänge
254kein Bezeichner

KO-OUTP-16 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl3
Ausgänge
23T K,RL 23 (T K,RL)
255kein Bezeichner
256kein Bezeichner

KO-OUTP-19 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl6
Ausgänge
153C K-W 153 (C K-W)
154C K-HR 154 (C K-HR)
150m K 150 (m K)
152c p,St 152 (c p,St)
156H u 156 (H u)
157Wirkungsgrad K 157 (Wirkungsgrad K)

S P A L T E - 2

VER-1 (VER)

Parametrierungals Eingang
V
Eingänge
Em` Br 21 (m` Br)
VKO-OUTP-7 (250)
Ausgänge
Akein Bezeichner

VER-2 (VER)

Parametrierungals Eingang
V
Eingänge
ET K,VL 24 (T K,VL)
VKO-OUTP-8 (251)
Ausgänge
Akein Bezeichner

VER-3 (VER)

Parametrierungals Eingang
V
Eingänge
ET HR 8 (T HR)
VKO-OUTP-9 (252)
Ausgänge
Akein Bezeichner

VER-10 (VER)

Parametrierungals Eingang
V
Eingänge
EINT-5 (A)
VKO-OUTP-15 (254)
Ausgänge
Akein Bezeichner

VER-11 (VER)

Parametrierungals Eingang
V
Eingänge
ET K,RL 23 (T K,RL)
VKO-OUTP-16 (255)
Ausgänge
Akein Bezeichner

FKT-21 (K1 K)

Parametrierung
Formelx3*x4/(x1+x2)
Eingänge
X1C K-W 153 (C K-W)
X2C K-HR 154 (C K-HR)
X3H u 156 (H u)
X4Wirkungsgrad K 157 (Wirkungsgrad K)
Ausgänge
Akein Bezeichner

FKT-22 (K2 K)

Parametrierung
Formelx1/(x1+x2)
Eingänge
X1C K-W 153 (C K-W)
X2C K-HR 154 (C K-HR)
Ausgänge
Akein Bezeichner

FKT-23 (K3 K)

Parametrierung
Formelx2/(x1+x2)
Eingänge
X1C K-W 153 (C K-W)
X2C K-HR 154 (C K-HR)
Ausgänge
Akein Bezeichner

FKT-20 (T1 K)

Parametrierung
Formelx1*x2/(x3+x4)
Eingänge
X1m K 150 (m K)
X2c p,St 152 (c p,St)
X3C K-W 153 (C K-W)
X4C K-HR 154 (C K-HR)
Ausgänge
Akein Bezeichner

S P A L T E - 4

SUM-4 (SUMME)

Parametrierung
Offset0
Eingänge
E1VER-1 (A)
E2VER-2 (A)
E3VER-3 (A)
-E4INT-5 (A)
Ausgänge
Akein Bezeichner

SUM-13 (SUMME)

Parametrierung
Offset0
Eingänge
E1VER-10 (A)
E2VER-11 (A)
-E3T K,VL 24 (T K,VL)
Ausgänge
Akein Bezeichner

KO-INP-17 (KONNEKT)

Parametrierung
Eingangsanzahl4
Eingänge
250FKT-21 (A)
251FKT-22 (A)
252FKT-23 (A)
253FKT-20 (A)

S P A L T E - 6

INT-5 (INT)

Parametrierung
SWals Eingang
Tnals Eingang
Eingänge
ESUM-4 (A)
TnKO-OUTP-9 (253)
SWT K,Start 305 (T K,Start)
Ausgänge
Akein Bezeichner
Gwkein Bezeichner

INT-14 (T W)

Parametrierung
SWals Eingang
Tnals Eingang
OG100
Eingänge
ESUM-13 (A)
TnKO-OUTP-16 (256)
SWT K,Start 305 (T K,Start)
Ausgänge
AT K,VL 24 (T K,VL)
Gwkein Bezeichner

KO-OUTP-24 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl4
Ausgänge
153C K-W 153 (C K-W)
20m` K 20 (m` K)
151c p,W 151 (c p,W)
155m K,W 155 (m K,W)

S P A L T E - 8

KO-INP-6 (KONNEKT)

Parametrierung
Eingangsanzahl1
Eingänge
24T K,VL 24 (T K,VL)

FKT-25 (K1 W)

Parametrierung
Formelx1/(x1+(x2*x3))
Eingänge
X1C K-W 153 (C K-W)
X2m` K 20 (m` K)
X3c p,W 151 (c p,W)
Ausgänge
Akein Bezeichner

FKT-26 (K2 W)

Parametrierung

Formel..... $x1*x2/(x3+(x1*x2))$
Eingänge
 X1.....m` K 20 (m` K)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....C K-W 153 (C K-W)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-27 (T1 W)

Parametrierung
 Formel..... $x1*x2/(x3+(x4*x2))$
Eingänge
 X1.....m` K,W 155 (m` K,W)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....C K-W 153 (C K-W)
 X4.....m` K 20 (m` K)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 10

KO-OUTP-28 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangszahl.....8
Ausgänge
 20.....m` K 20 (m` K)
 151.....c p,W 151 (c p,W)
 158.....A WT,K 158 (A WT,K)
 159.....k WT,K 159 (k WT,K)
 24.....T K,VL 24 (T K,VL)
 11.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 22.....T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)
 11.....T Sp,m 11 (T Sp,m)

KO-INP-18 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl.....3
Eingänge
 254.....FKT-25 (A)
 255.....FKT-26 (A)
 256.....FKT-27 (A)

S P A L T E - 12

FKT-29 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel..... $(x1*x2)+(x3*x4/2)$
Eingänge
 X1.....m` K 20 (m` K)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....A WT,K 158 (A WT,K)
 X4.....k WT,K 159 (k WT,K)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 13

KO-OUTP-40 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangszahl.....4
Ausgänge
 20.....m` K 20 (m` K)
 151.....c p,W 151 (c p,W)
 24.....T K,VL 24 (T K,VL)
 23.....T K,RL 23 (T K,RL)

S P A L T E - 14

FKT-30 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel..... $(x1*x2/x3)*x4+(x5*x6/(2*x3))*x7$
Eingänge
 X1.....m` K 20 (m` K)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....FKT-29 (A)
 X4.....T K,VL 24 (T K,VL)
 X5.....A WT,K 158 (A WT,K)
 X6.....k WT,K 159 (k WT,K)
 X7.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)

FKT-31 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel..... $(x1*x2/x3)*x4+(x5*x6/(2*x3))*x7$
Eingänge
 X1.....m` K 20 (m` K)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....FKT-29 (A)
 X4.....T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)
 X5.....A WT,K 158 (A WT,K)
 X6.....k WT,K 159 (k WT,K)
 X7.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T K,RL 23 (T K,RL)

FKT-39 (Q` Kessel)

Parametrierung
 Formel..... $x1*x2*(x3-x4)$
Eingänge
 X1.....m` K 20 (m` K)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....T K,VL 24 (T K,VL)
 X4.....T K,RL 23 (T K,RL)
Ausgänge
 A.....Q` Kessel 25 (Q` Kessel)

S P A L T E - 15

FKT-32 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel..... $x1<0.0001$
Eingänge
 X1.....m` K 20 (m` K)
Ausgänge

A.....kein Bezeichner

INT-42 (INT)

Parametrierung
 SW.....0
 Tn.....1 sec
Eingänge
 E.....Q` Kessel 25 (Q` Kessel)
Ausgänge
 A.....Q K 26 (Q K)
 Gw.....kein Bezeichner

S P A L T E - 16

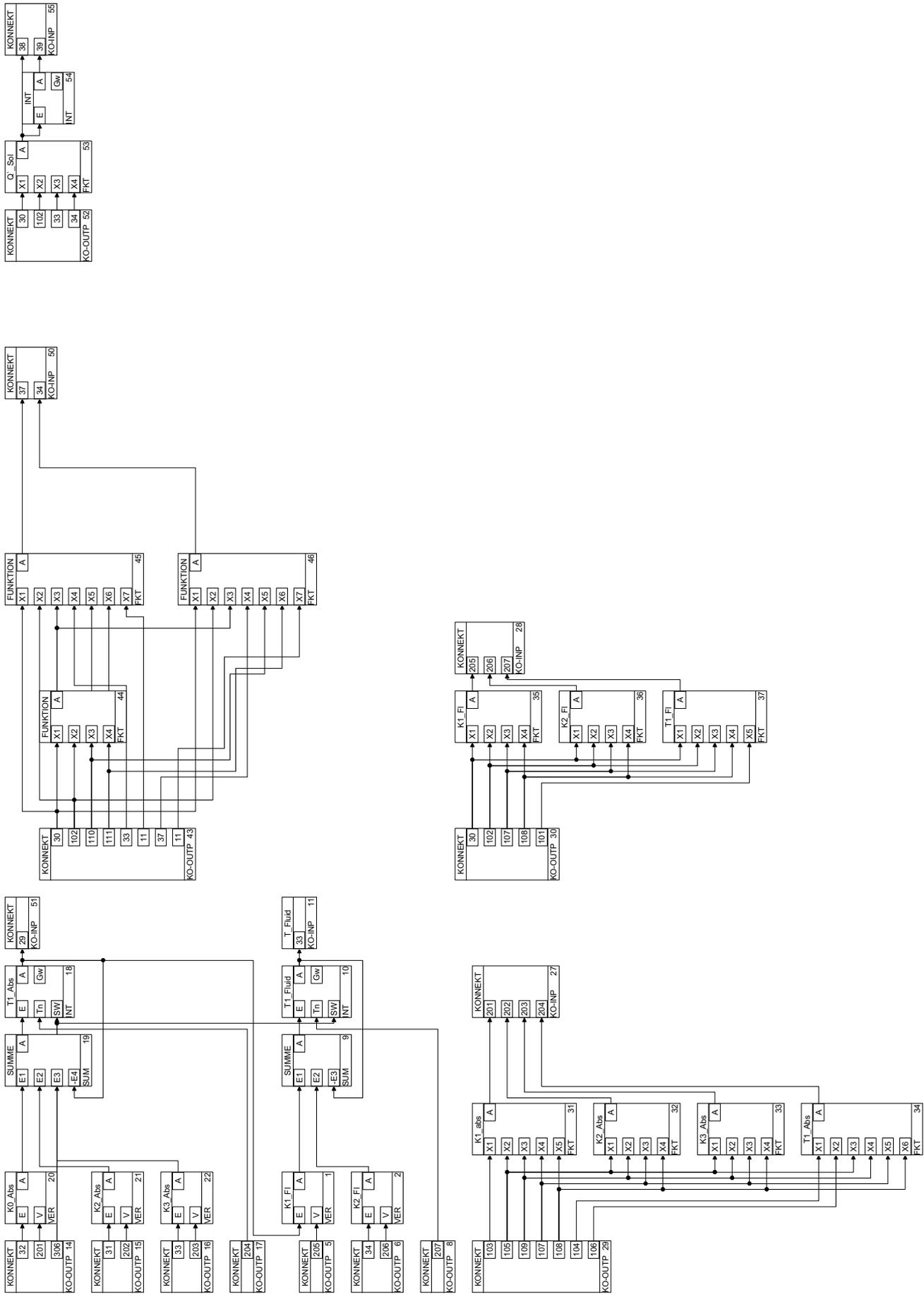
KO-INP-41 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl.....2
Eingänge
 25.....Q` Kessel 25 (Q` Kessel)
 26.....Q K 26 (Q K)

S P A L T E - 17

KO-INP-35 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl.....2
Eingänge
 22.....T WT,K,1-2 22 (T WT,K,1-2)
 23.....T K,RL 23 (T K,RL)



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit.....1000 msec
 Echtzeit.....disabled
 Endzeit.....keine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolge.....spaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

KO-OUTP-14 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....3
Ausgänge
 32.....S` Ges 32 (S` Ges)
 201.....kein Bezeichner
 306.....T Fl,Start 306 (T Fl,Start)

KO-OUTP-15 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....2
Ausgänge
 31.....T A 31 (T RL)
 202.....kein Bezeichner

KO-OUTP-16 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....2
Ausgänge
 33.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
 203.....kein Bezeichner

KO-OUTP-17 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....1
Ausgänge
 204.....kein Bezeichner

KO-OUTP-5 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....1
Ausgänge
 205.....kein Bezeichner

KO-OUTP-6 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....2
Ausgänge
 34.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)
 206.....kein Bezeichner

KO-OUTP-8 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....1
Ausgänge
 207.....kein Bezeichner

KO-OUTP-29 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....7
Ausgänge
 103.....Wirkungsgrad Abs 103 (Wirkungsgrad Abs)
 105.....A Abs 105 (A Abs)
 109.....k Abs 109 (k Abs)
 107.....A Kol 107 (A Kol)
 108.....k Fluid 108 (k Fluid)
 104.....m Abs 104 (m Abs)
 106.....c p,Abs 106 (c p,Abs)

S P A L T E - 1

VER-20 (K0 Abs)
 Parametrierung
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....S` Ges 32 (S` Ges)
 V.....KO-OUTP-14 (201)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-21 (K2 Abs)
 Parametrierung
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....T A 31 (T RL)
 V.....KO-OUTP-15 (202)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-22 (K3 Abs)
 Parametrierung
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
 V.....KO-OUTP-16 (203)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-1 (K1 Fl)
 Parametrierung
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....T Abs 29 (T Abs)
 V.....KO-OUTP-5 (205)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

VER-2 (K2 Fl)
 Parametrierung
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)
 V.....KO-OUTP-6 (206)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 2

FKT-31 (K1 abs)
 Parametrierung
 Formel..... $x1*x2/((x2*x3)+(x4*x5))$
Eingänge
 X1.....Wirkungsgrad Abs 103 (Wirkungsgrad Abs)
 X2.....A Abs 105 (A Abs)
 X3.....k Abs 109 (k Abs)
 X4.....A Kol 107 (A Kol)
 X5.....k Fluid 108 (k Fluid)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-32 (K2 Abs)
 Parametrierung
 Formel..... $x1*x2/((x1*x2)+(x3*x4))$
Eingänge
 X1.....A Abs 105 (A Abs)
 X2.....k Abs 109 (k Abs)
 X3.....A Kol 107 (A Kol)
 X4.....k Fluid 108 (k Fluid)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-33 (K3 Abs)
 Parametrierung
 Formel..... $x3*x4/((x1*x2)+(x3*x4))$
Eingänge
 X1.....A Abs 105 (A Abs)
 X2.....k Abs 109 (k Abs)
 X3.....A Kol 107 (A Kol)
 X4.....k Fluid 108 (k Fluid)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-34 (T1 Abs)
 Parametrierung
 Formel..... $x1*x2/((x3*x4)+(x5*x6))$
Eingänge
 X1.....m Abs 104 (m Abs)
 X2.....c p,Abs 106 (c p,Abs)
 X3.....A Abs 105 (A Abs)
 X4.....k Abs 109 (k Abs)
 X5.....A Kol 107 (A Kol)
 X6.....k Fluid 108 (k Fluid)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 3

SUM-19 (SUMME)
 Parametrierung
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....VER-20 (A)
 E2.....VER-21 (A)
 E3.....VER-22 (A)
 -E4.....T Abs 29 (T Abs)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-9 (SUMME)
 Parametrierung
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....VER-1 (A)
 E2.....VER-2 (A)
 -E3.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 4

INT-18 (T1 Abs)
 Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
 UG.....-100
Eingänge
 E.....SUM-19 (A)
 Tn.....KO-OUTP-17 (204)
 SW.....T Fl,Start 306 (T Fl,Start)
Ausgänge
 A.....T Abs 29 (T Abs)
 Gw.....kein Bezeichner

INT-10 (T1 Fluid)
 Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
 UG.....-100
 OG.....-150
Eingänge
 E.....SUM-9 (A)
 Tn.....KO-OUTP-8 (207)
 SW.....T Fl,Start 306 (T Fl,Start)
Ausgänge
 A.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
 Gw.....kein Bezeichner

KO-INP-27 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Eingangsanzahl.....4
Eingänge
 201.....FKT-31 (A)
 202.....FKT-32 (A)
 203.....FKT-33 (A)
 204.....FKT-34 (A)

S P A L T E - 5

KO-INP-51 (KONNEKT)
 Parametrierung
 Eingangsanzahl.....1

Eingänge
 29.....T Abs 29 (T Abs)

KO-INP-11 (T Fluid)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....1
Eingänge
 33.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)

S P A L T E - 6

KO-OUTP-43 (KONNEKT)
Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....8
Ausgänge
 30.....m` F1 30 (m` F1)
 102.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 110.....A WT,Sol 110 (A WT,Sol)
 111.....k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
 33.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
 11.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 37.....T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)
 11.....T Sp,m 11 (T Sp,m)

KO-OUTP-30 (KONNEKT)
Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....5
Ausgänge
 30.....m` F1 30 (m` F1)
 102.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 107.....A Kol 107 (A Kol)
 108.....k Fluid 108 (k Fluid)
 101.....m Fluid 101 (m Fluid)

S P A L T E - 8

FKT-44 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....(x1*x2)+(x3*x4/2)
Eingänge
 X1.....m` F1 30 (m` F1)
 X2.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 X3.....A WT,Sol 110 (A WT,Sol)
 X4.....k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-35 (K1 F1)
Parametrierung
 Formel.....(x3*x4)/((x1*x2)+(x3*x4))
Eingänge
 X1.....m` F1 30 (m` F1)
 X2.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 X3.....A Kol 107 (A Kol)
 X4.....k Fluid 108 (k Fluid)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-36 (K2 F1)
Parametrierung
 Formel.....x1*x2/((x1*x2)+(x3*x4))
Eingänge
 X1.....m` F1 30 (m` F1)
 X2.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 X3.....A Kol 107 (A Kol)
 X4.....k Fluid 108 (k Fluid)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-37 (T1 F1)
Parametrierung
 Formel.....x5*x2/((x1*x2)+(x3*x4))
Eingänge
 X1.....m` F1 30 (m` F1)
 X2.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 X3.....A Kol 107 (A Kol)
 X4.....k Fluid 108 (k Fluid)
 X5.....m Fluid 101 (m Fluid)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 9

KO-INP-28 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....3
Eingänge
 205.....FKT-35 (A)
 206.....FKT-36 (A)
 207.....FKT-37 (A)

S P A L T E - 10

FKT-45 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....(x1*x2/x3)*x4+(x5*x6/(2*x3))*x7
Eingänge
 X1.....m` F1 30 (m` F1)
 X2.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 X3.....FKT-44 (A)
 X4.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
 X5.....A WT,Sol 110 (A WT,Sol)
 X6.....k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
 X7.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)

FKT-46 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....(x1*x2/x3)*x4+(x5*x6/(2*x3))*x7
Eingänge
 X1.....m` F1 30 (m` F1)
 X2.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 X3.....FKT-44 (A)
 X4.....T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)
 X5.....A WT,Sol 110 (A WT,Sol)

X6.....k WT,Sol 111 (k WT,Sol)
 X7.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)

S P A L T E - 13

KO-INP-50 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....2
Eingänge
 37.....T WT,Sol,1-2 37 (T WT,Sol,1-2)
 34.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)

S P A L T E - 15

KO-OUTP-52 (KONNEKT)
Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....4
Ausgänge
 30.....m` F1 30 (m` F1)
 102.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 33.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
 34.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)

S P A L T E - 16

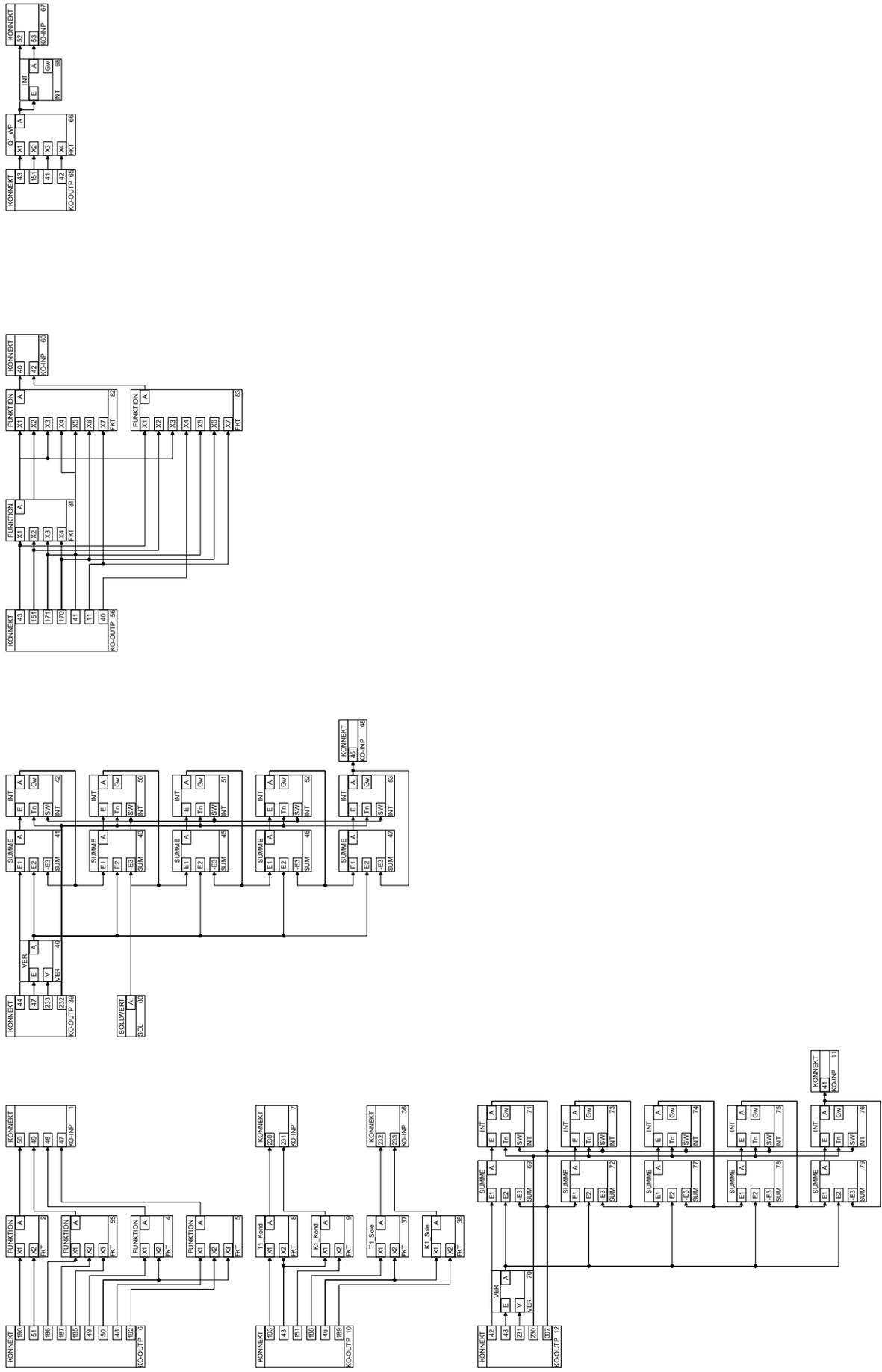
FKT-53 (Q` Sol)
Parametrierung
 Formel.....x1*x2*(x3-x4)
Eingänge
 X1.....m` F1 30 (m` F1)
 X2.....c p,Fluid 102 (c p,Fluid)
 X3.....T Sol,VL 33 (T Sol,VL)
 X4.....T Sol,RL 34 (T Sol,RL)
Ausgänge
 A.....Q` Solar 38 (Q` Solar)

S P A L T E - 17

INT-54 (INT)
Parametrierung
 SW.....0
 Tn.....1 sec
Eingänge
 E.....Q` Solar 38 (Q` Solar)
Ausgänge
 A.....Q Sol 39 (Q Sol)
 Gw.....kein Bezeichner

S P A L T E - 18

KO-INP-55 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....2
Eingänge
 38.....Q` Solar 38 (Q` Solar)
 39.....Q Sol 39 (Q Sol)



Datum

23.09.2009

Bearbeiter

Stange

Simulationsmodell Verbundheizungsanlage

FUNKTIONSPPLAN - WPmodell

Seite 1

Total 4

EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
 Echtzeitdisabled
 Endzeitkeine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolgespaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

KO-OUTP-6 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangszahl9
Ausgänge
 190U 190 (U)
 51I 51 (I)
 186h2 186 (h2)
 187h3 187 (h3)
 185h1 185 (h1)
 49Leistungszahl 49 (Leistungszahl)
 50P 50 (P)
 48Q` C 48 (Q` C)
 192a 192 (a)

KO-OUTP-10 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangszahl6
Ausgänge
 193m WT,WP,W 193 (m WT,WP,W)
 43m` WP 43 (m` WP)
 151c p,W 151 (c p,W)
 188m Sole 188 (m Sole)
 46m` Sole 46 (m` Sole)
 189c p,Sole 189 (c p,Sole)

KO-OUTP-12 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangszahl5
Ausgänge
 42T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)
 48Q` C 48 (Q` C)
 231kein Bezeichner
 230kein Bezeichner
 307T Wp,Start 307 (T Wp,Start)

S P A L T E - 1

VER-70 (VER)

Parametrierungals Eingang
Eingänge
 EQ` C 48 (Q` C)
 VKO-OUTP-12 (231)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

S P A L T E - 2

FKT-2 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formelx1*x2*1.73205
Eingänge
 X1U 190 (U)
 X2I 51 (I)
Ausgänge
 AP 50 (P)

FKT-55 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel(x1-x2)/(x1-x3)
Eingänge
 X1h2 186 (h2)
 X2h3 187 (h3)
 X3h1 185 (h1)
Ausgänge
 ALeistungszahl 49 (Leistungszahl)

FKT-4 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formelx1*x2
Eingänge
 X1Leistungszahl 49 (Leistungszahl)
 X2P 50 (P)
Ausgänge
 AQ` C 48 (Q` C)

FKT-5 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formelx1-(x2*x3)
Eingänge
 X1Q` C 48 (Q` C)
 X2a 192 (a)
 X3P 50 (P)
Ausgänge
 AQ` 0 47 (Q` 0)

FKT-8 (T1 Kond)

Parametrierung
 Formelx1/x2
Eingänge
 X1m WT,WP,W 193 (m WT,WP,W)
 X2m` WP 43 (m` WP)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

FKT-9 (K1 Kond)

Parametrierung
 Formel0.2/(x1*x2)
Eingänge
 X1m` WP 43 (m` WP)
 X2c p,W 151 (c p,W)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

FKT-37 (T1 Sole)

Parametrierung
 Formelx1/x2
Eingänge
 X1m Sole 188 (m Sole)
 X2m` Sole 46 (m` Sole)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

FKT-38 (K1 Sole)

Parametrierung
 Formel0.2/(x1*x2)
Eingänge
 X1m` Sole 46 (m` Sole)
 X2c p,Sole 189 (c p,Sole)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

S P A L T E - 3

SUM-69 (SUMME)

Parametrierung
 Offset0
Eingänge
 E1T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)
 E2VER-70 (A)
 -E3INT-71 (A)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SUM-72 (SUMME)

Parametrierung
 Offset0
Eingänge
 E1INT-71 (A)
 E2VER-70 (A)
 -E3INT-73 (A)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SUM-77 (SUMME)

Parametrierung
 Offset0
Eingänge
 E1INT-73 (A)
 E2VER-70 (A)
 -E3INT-74 (A)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SUM-78 (SUMME)

Parametrierung
 Offset0
Eingänge
 E1INT-74 (A)
 E2VER-70 (A)
 -E3INT-75 (A)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SUM-79 (SUMME)

Parametrierung
 Offset0
Eingänge
 E1INT-75 (A)
 E2VER-70 (A)
 -E3T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

S P A L T E - 4

KO-INP-1 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl4
Eingänge
 50P 50 (P)
 49Leistungszahl 49 (Leistungszahl)
 48Q` C 48 (Q` C)
 47Q` 0 47 (Q` 0)

KO-INP-7 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl2
Eingänge
 230FKT-8 (A)
 231FKT-9 (A)

KO-INP-36 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl2
Eingänge
 232FKT-37 (A)
 233FKT-38 (A)

INT-71 (INT)

Parametrierungals Eingang
 SWals Eingang
Eingänge
 ESUM-69 (A)
 TnKO-OUTP-12 (230)
 SWT Wp,Start 307 (T Wp,Start)
Ausgänge
 Akein Bezeichner
 Gwkein Bezeichner

INT-73 (INT)

Parametrierungals Eingang
 SWals Eingang
Eingänge
 ESUM-72 (A)
 TnKO-OUTP-12 (230)
 SWT Wp,Start 307 (T Wp,Start)
Ausgänge
 Akein Bezeichner
 Gwkein Bezeichner

INT-74 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-77 (A)
 Tn.....KO-OUTP-12 (230)
 SW.....T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner
 Gw.....kein Bezeichner

INT-75 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-78 (A)
 Tn.....KO-OUTP-12 (230)
 SW.....T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner
 Gw.....kein Bezeichner

INT-76 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-79 (A)
 Tn.....KO-OUTP-12 (230)
 SW.....T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
Ausgänge
 A.....T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
 Gw.....kein Bezeichner

S P A L T E - 5

KO-INP-11 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....1
Eingänge
 41.....T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)

S P A L T E - 6

KO-OUTP-39 (KONNEKT)
Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....4
Ausgänge
 44.....T Sole 44 (T Sole)
 47.....Q` 0 47 (Q` 0)
 233.....kein Bezeichner
 232.....kein Bezeichner

SOL-80 (SOLLWERT)
Parametrierung
 Typ.....Absolutwert
 Wert.....0
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 7

VER-40 (VER)
Parametrierung
 V.....als Eingang
Eingänge
 E.....Q` 0 47 (Q` 0)
 V.....KO-OUTP-39 (233)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 9

SUM-41 (SUMME)
Parametrierung
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....T Sole 44 (T Sole)
 E2.....VER-40 (A)
 -E3.....INT-42 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-43 (SUMME)
Parametrierung
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....INT-42 (A)
 E2.....VER-40 (A)
 -E3.....INT-50 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-45 (SUMME)
Parametrierung
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....INT-50 (A)
 E2.....VER-40 (A)
 -E3.....INT-51 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-46 (SUMME)
Parametrierung
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....INT-51 (A)
 E2.....VER-40 (A)
 -E3.....INT-52 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SUM-47 (SUMME)
Parametrierung
 Offset.....0
Eingänge
 E1.....INT-52 (A)
 E2.....VER-40 (A)
 -E3.....T Sole,RL 45 (T Sole,RL)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 10

INT-42 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-41 (A)
 Tn.....KO-OUTP-39 (232)
 SW.....SOL-80 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner
 Gw.....kein Bezeichner

INT-50 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-43 (A)
 Tn.....KO-OUTP-39 (232)
 SW.....SOL-80 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner
 Gw.....kein Bezeichner

INT-51 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-45 (A)
 Tn.....KO-OUTP-39 (232)
 SW.....SOL-80 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner
 Gw.....kein Bezeichner

INT-52 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-46 (A)
 Tn.....KO-OUTP-39 (232)
 SW.....SOL-80 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner
 Gw.....kein Bezeichner

INT-53 (INT)
Parametrierung
 SW.....als Eingang
 Tn.....als Eingang
Eingänge
 E.....SUM-47 (A)
 Tn.....KO-OUTP-39 (232)
 SW.....SOL-80 (A)
Ausgänge
 A.....T Sole,RL 45 (T Sole,RL)
 Gw.....kein Bezeichner

S P A L T E - 11

KO-INP-48 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....1
Eingänge
 45.....T Sole,RL 45 (T Sole,RL)

S P A L T E - 13

KO-OUTP-56 (KONNEKT)
Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....7
Ausgänge
 43.....m` WP 43 (m` WP)
 151.....c p,W 151 (c p,W)
 171.....A WT,WP 171 (A WT,WP)
 170.....k WT,WP 170 (k WT,WP)
 41.....T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
 11.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 40.....T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)

S P A L T E - 15

FKT-81 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....(x1*x2)+(x3*x4/2)
Eingänge
 X1.....m` WP 43 (m` WP)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....A WT,WP 171 (A WT,WP)
 X4.....k WT,WP 170 (k WT,WP)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 17

FKT-82 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....(x1*x2/x3)*x4+(x5*x6/(2*x3))*x7
Eingänge
 X1.....m` WP 43 (m` WP)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)

X3.....FKT-81 (A)
 X4.....T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
 X5.....A WT,WP 171 (A WT,WP)
 X6.....k WT,WP 170 (k WT,WP)
 X7.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)

FKT-83 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....(x1*x2/x3)*x4+(x5*x6/(2*x3))*x7
Eingänge
 X1.....m` WP 43 (m` WP)
 X2.....c P,W 151 (c P,W)
 X3.....FKT-81 (A)
 X4.....T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)
 X5.....A WT,WP 171 (A WT,WP)
 X6.....k WT,WP 170 (k WT,WP)
 X7.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
Ausgänge
 A.....T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)

S P A L T E - 18

KO-INP-60 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl.....2
Eingänge
 40.....T WT,WP,1-2 40 (T WT,WP,1-2)
 42.....T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)

S P A L T E - 21

KO-OUTP-65 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....4
Ausgänge
 43.....m` WP 43 (m` WP)
 151.....c P,W 151 (c P,W)
 41.....T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
 42.....T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)

S P A L T E - 22

FKT-66 (Q` WP)

Parametrierung
 Formel.....x1*x2*(x3-x4)
Eingänge
 X1.....m` WP 43 (m` WP)
 X2.....c P,W 151 (c P,W)
 X3.....T WT,WP,VL 41 (T WT,WP,VL)
 X4.....T WT,WP,RL 42 (T WT,WP,RL)
Ausgänge
 A.....Q` WP 52 (Q` WP)

S P A L T E - 23

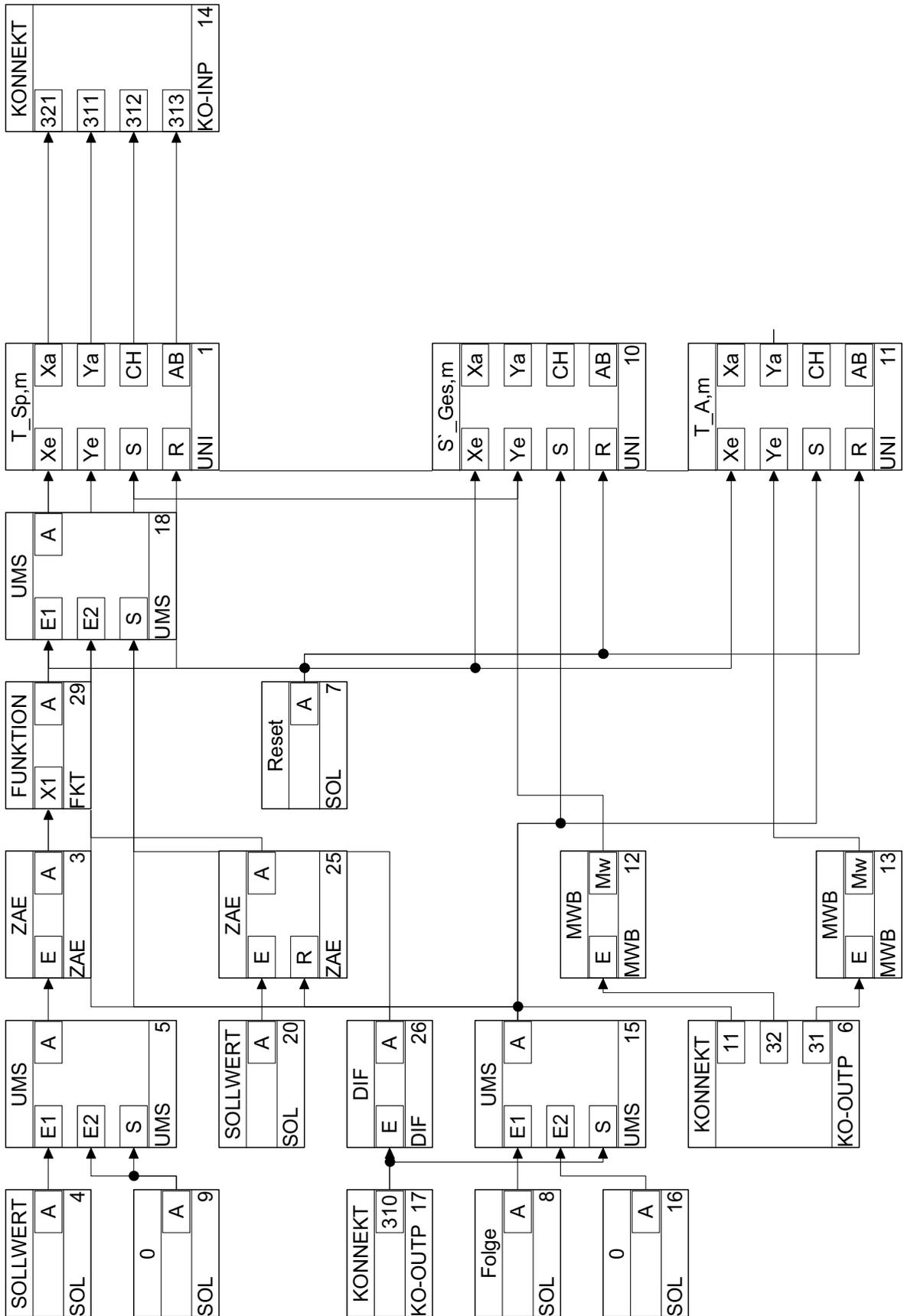
INT-68 (INT)

Parametrierung
 SW.....0
 Tn.....1 sec
Eingänge
 E.....Q` WP 52 (Q` WP)
Ausgänge
 A.....Q` WP 53 (Q` WP)
 Gw.....kein Bezeichner

S P A L T E - 24

KO-INP-67 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangsanzahl.....2
Eingänge
 52.....Q` WP 52 (Q` WP)
 53.....Q` WP 53 (Q` WP)



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
 Echtzeitdisabled
 Endzeitkeine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolgespaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

SOL-4 (SOLLWERT)

Parametrierung
 TypFolge
 VerlaufSprünge
 Dauer 01198 sec
 Wert 00
 Dauer 12 sec
 Wert 11
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SOL-9 (0)

Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0
Ausgänge
 Akein Bezeichner

KO-OUTP-17 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangszahl1
Ausgänge
 310Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)

SOL-8 (Folge)

Parametrierung
 TypFolge
 VerlaufSprünge
 Dauer 01198 sec
 Wert 00
 Dauer 11 sec
 Wert 11
 Dauer 21 sec
 Wert 20
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SOL-16 (0)

Parametrierung
 TypAbsolutwert
 Wert0
Ausgänge
 Akein Bezeichner

S P A L T E - 1

UMS-5 (UMS)

Parametrierung
 Modestatisch
Eingänge
 E1SOL-4 (A)
 E2SOL-9 (A)
 SSOL-9 (A)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SOL-20 (SOLLWERT)

Parametrierung
 TypRechteck
 T110 sec
 T210 sec
 Amplitude10
 Amplitude21
 Phase0
Ausgänge
 Akein Bezeichner

DIF-26 (DIP)

Parametrierung
 SW0
 Td1
 T10
 UGdeaktiviert
 OGdeaktiviert
Eingänge
 EStop WB Berechnung 310 (Stop WB)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

UMS-15 (UMS)

Parametrierung
 Modestatisch
Eingänge
 E1SOL-8 (A)
 E2SOL-16 (A)
 SStop WB Berechnung 310 (Stop WB)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

KO-OUTP-6 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangszahl3
Ausgänge
 11T Sp,m 11 (T Sp,m)
 32S` Ges 32 (S` Ges)
 31T A 31 (T RL)

S P A L T E - 2

ZAE-3 (ZAE)

Eingänge
 EUMS-5 (A)
Ausgänge
 AZs 321 (Zs)

ZAE-25 (ZAE)

Eingänge
 ESOL-20 (A)
 RDIF-26 (A)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

MWB-12 (MWB)

Eingänge
 ES` Ges 32 (S` Ges)
Ausgänge
 Mwkein Bezeichner

MWB-13 (MWB)

Eingänge
 ET A 31 (T RL)
Ausgänge
 Mwkein Bezeichner

S P A L T E - 3

FKT-29 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formelx1+1
Eingänge
 X1Zs 321 (Zs)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

SOL-7 (Reset)

Parametrierung
 TypFolge
 VerlaufSprünge
 Dauer 010 sec
 Wert 00
 Dauer 11 sec
 Wert 11
 Dauer 28.64e+04 sec
 Wert 20
Ausgänge
 Akein Bezeichner

S P A L T E - 4

UMS-18 (UMS)

Parametrierung
 Modestatisch
Eingänge
 E1FKT-29 (A)
 E2ZAE-25 (A)
 SStop WB Berechnung 310 (Stop WB)
Ausgänge
 Akein Bezeichner

S P A L T E - 5

UNI-1 (T Sp,m)

Eingänge
 XeUMS-18 (A)
 YeT Sp,m 11 (T Sp,m)
 SUMS-15 (A)
 RSOL-7 (A)
Ausgänge
 XaZs 321 (Zs)
 YaT Sp,mitt 311 (T sp,mitt)
 CHkein Bezeichner
 ABkein Bezeichner

UNI-10 (S` Ges,m)

Eingänge
 XeUMS-18 (A)
 YeMWB-12 (Mw)
 SUMS-15 (A)
 RSOL-7 (A)
Ausgänge
 Xakein Bezeichner
 YaS` Ges,mitt 312 (S` Ges,mitt)
 CHkein Bezeichner
 ABkein Bezeichner

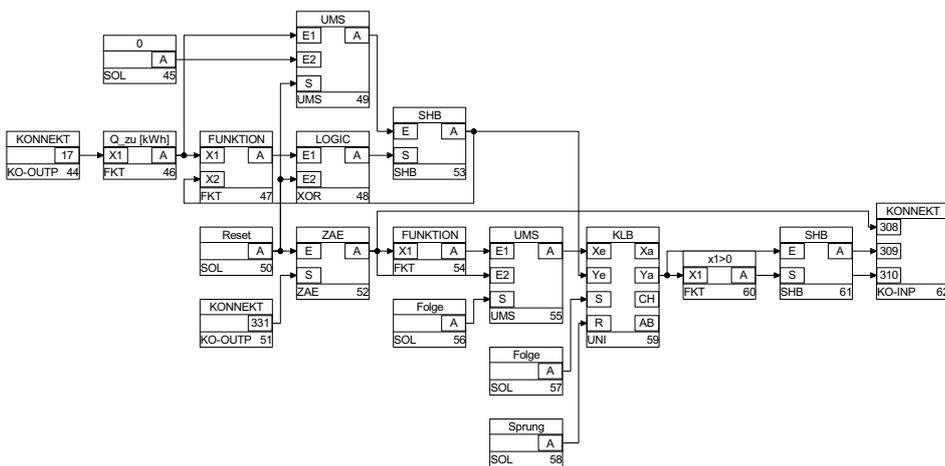
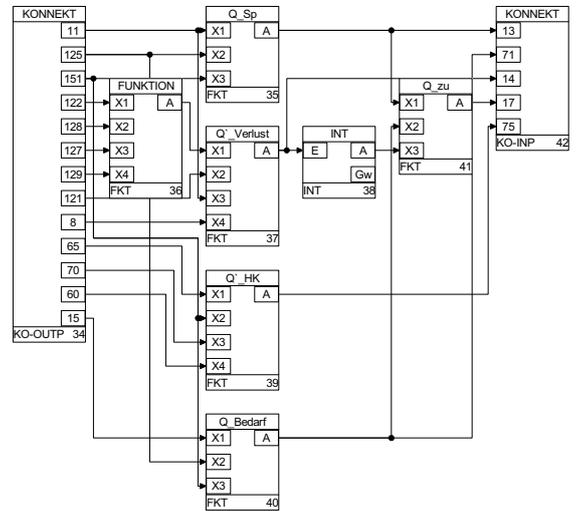
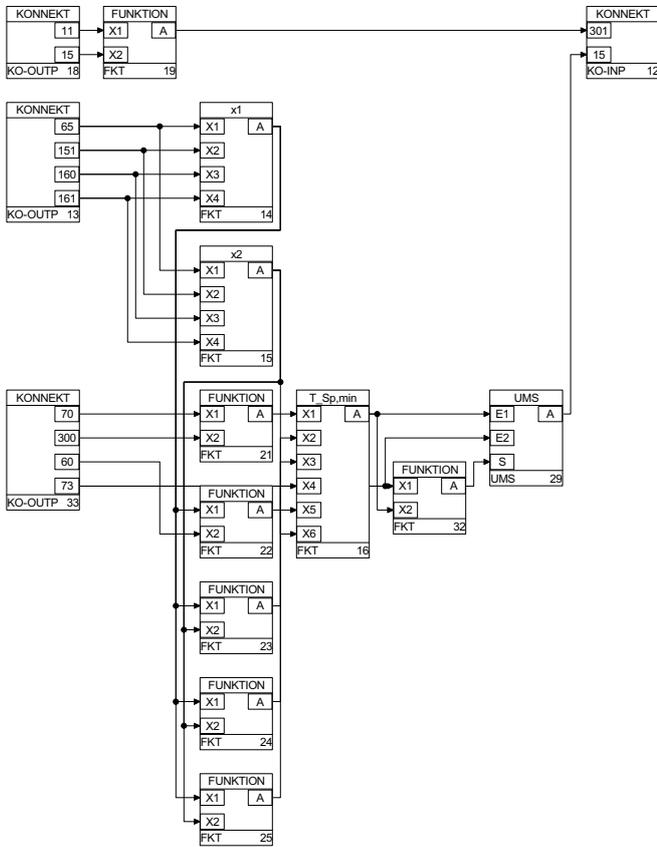
UNI-11 (T A,m)

Eingänge
 XeUMS-18 (A)
 YeMWB-13 (Mw)
 SUMS-15 (A)
 RSOL-7 (A)
Ausgänge
 XaT A,mitt 313 (T A,mitt)
 YaT A,mitt 313 (T A,mitt)
 CHkein Bezeichner
 ABkein Bezeichner

S P A L T E - 7

KO-INP-14 (KONNEKT)

Parametrierung
 Eingangszahl4
Eingänge
 321Zs 321 (Zs)
 311T Sp,mitt 311 (T sp,mitt)
 312S` Ges,mitt 312 (S` Ges,mitt)
 313T A,mitt 313 (T A,mitt)



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit.....1000 msec
 Echtzeit.....disabled
 Endzeit.....keine Endzeit
 Abarbeitungsreihenfolge.....spaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

KO-OUTP-18 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....2
 Ausgänge
 I1.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 I5.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)

KO-OUTP-13 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....4
 Ausgänge
 65.....m` HK 65 (m` HK)
 151.....c p,W 151 (c p,W)
 160.....k WT,HK 160 (k WT,HK)
 161.....A WT,HK 161 (A WT,HK)

KO-OUTP-33 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....4
 Ausgänge
 70.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)
 300.....Toleranzband 300 (To1)
 60.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
 73.....T BW,So11 73 (VLTminSp)

KO-OUTP-44 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....1
 Ausgänge
 17.....Q zu 17 (Q zu)

S P A L T E - 1

FKT-19 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1<x2
 Eingänge
 X1.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 X2.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)
 Ausgänge
 A:Speicherbedarf ja nein 301 (Speicherbedarf ja nein)

SOL-45 (0)

Parametrierung
 Typ.....Absolutwert
 Wert.....0
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-46 (Q zu [kWh])

Parametrierung
 Formel.....x1/3600000
 Eingänge
 X1.....Q zu 17 (Q zu)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 2

FKT-14 (x1)

Parametrierung
 Formel.....(x1*x2)/((x1*x2)+(0.25*x3*x4))
 Eingänge
 X1.....m` HK 65 (m` HK)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....k WT,HK 160 (k WT,HK)
 X4.....A WT,HK 161 (A WT,HK)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-15 (x2)

Parametrierung
 Formel.....(0.25*x3*x4)/((x1*x2)+(0.25*x3*x4))
 Eingänge
 X1.....m` HK 65 (m` HK)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....k WT,HK 160 (k WT,HK)
 X4.....A WT,HK 161 (A WT,HK)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-21 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1-x2
 Eingänge
 X1.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)
 X2.....Toleranzband 300 (To1)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-22 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1^4*x2
 Eingänge
 X1.....FKT-14 (A)
 X2.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-23 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1^3*x2
 Eingänge
 X1.....FKT-14 (A)

X2.....FKT-15 (A)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-24 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1^2*x2
 Eingänge
 X1.....FKT-14 (A)
 X2.....FKT-15 (A)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-25 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1*x2
 Eingänge
 X1.....FKT-14 (A)
 X2.....FKT-15 (A)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-47 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1<x2
 Eingänge
 X1.....FKT-46 (A)
 X2.....SHB-53 (A)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SOL-50 (Reset)

Parametrierung
 Typ.....Rechteck
 T1.....1199 sec
 T2.....1 sec
 Amplitude1.....0
 Amplitude2.....1
 Phase.....0
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

KO-OUTP-51 (KONNEKT)

Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....1
 Ausgänge
 331.....N 331 (N)

S P A L T E - 3

FKT-16 (T Sp,min)

Parametrierung
 Formel.....(x1-x2)/(x3+x4+x5+x6)
 Eingänge
 X1.....FKT-21 (A)
 X2.....FKT-22 (A)
 X3.....FKT-23 (A)
 X4.....FKT-24 (A)
 X5.....FKT-25 (A)
 X6.....FKT-15 (A)
 Ausgänge
 A.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)

UMS-49 (UMS)

Parametrierung
 Mode.....statisch
 Eingänge
 E1.....FKT-46 (A)
 E2.....SOL-45 (A)
 S.....SOL-50 (A)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

XOR-48 (LOGIC)

Parametrierung
 Typ.....XOR
 Eingänge
 E1.....FKT-47 (A)
 E2.....SOL-50 (A)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

ZAE-52 (ZAE)

Eingänge
 E.....SOL-50 (A)
 S.....N 331 (N)
 Ausgänge
 A.....t i 308 (t i)

S P A L T E - 4

FKT-32 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1>x2
 Eingänge
 X1.....T BW,So11 73 (VLTminSp)
 X2.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SHB-53 (SHB)

Eingänge
 E.....UMS-49 (A)
 S.....XOR-48 (A)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-54 (FUNKTION)

Parametrierung
 Formel.....x1+1
 Eingänge
 X1.....t i 308 (t i)
 Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SOL-56 (Folge)

Parametrierung
 Typ.....Folge

Verlauf.....Sprünge
 Dauer 0.....20 sec
 Wert 0.....0
 Dauer 1.....50 sec
 Wert 1.....1
 Dauer 2.....1130 sec
 Wert 2.....0
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 5

UMS-29 (UMS)
Parametrierung
 Mode.....statisch
Eingänge
 E1.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)
 E2.....T BW,Soll 73 (VLTminSp)
 S.....FKT-32 (A)
Ausgänge
 A.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)

UMS-55 (UMS)
Parametrierung
 Mode.....statisch
Eingänge
 E1.....FKT-54 (A)
 E2.....t i 308 (t i)
 S.....SOL-56 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SOL-57 (Folge)
Parametrierung
 Typ.....Folge
 Verlauf.....Sprünge
 Dauer 0.....1198 sec
 Wert 0.....0
 Dauer 1.....1 sec
 Wert 1.....1
 Dauer 2.....1 sec
 Wert 2.....0
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

SOL-58 (Sprung)
Parametrierung
 Typ.....Folge
 Verlauf.....Sprünge
 Dauer 0.....10 sec
 Wert 0.....0
 Dauer 1.....1 sec
 Wert 1.....1
 Dauer 2.....8.635e+04 sec
 Wert 2.....0
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 6

KO-INP-12 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....2
Eingänge
 301Speicherbedarf ja nein 301 (Speicherbedarf ja nein
 15.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)

UNI-59 (KLB)
Eingänge
 Xe.....UMS-55 (A)
 Ye.....SHB-53 (A)
 S.....SOL-57 (A)
 R.....SOL-58 (A)
Ausgänge
 Xa.....kein Bezeichner
 Ya.....kein Bezeichner
 CH.....kein Bezeichner
 AB.....kein Bezeichner

S P A L T E - 7

FKT-60 (x1>0)
Parametrierung
 Formel.....x1>0
Eingänge
 X1.....UNI-59 (Ya)
Ausgänge
 A.....Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)

S P A L T E - 8

KO-OUTP-34 (KONNEKT)
Parametrierung
 Ausgangsanzahl.....13
Ausgänge
 11.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 125.....m Sp,W 125 (m Sp,W)
 151.....c p,W 151 (c p,W)
 122.....Lambda St 122 (Lambda St)
 128.....d Sp 128 (d Sp)
 127.....Lambda D 127 (Lambda D)
 129.....d D 129 (d D)
 121.....h Sp 121 (h sp)
 8.....T HR 8 (T HR)
 65.....m` HK 65 (m` HK)
 70.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)
 60.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
 15.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)

SHB-61 (SHB)
Eingänge
 E.....UNI-59 (Ya)
 S.....Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)
Ausgänge
 A.....Q zu,ti 309 (Q zu,ti)

S P A L T E - 9

FKT-36 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel..... $((1/x1) * (LN(x2/(x2-0.005)))) + ((1/x3) * LN(x4/x2))$
Eingänge
 X1.....Lambda St 122 (Lambda St)
 X2.....d Sp 128 (d Sp)
 X3.....Lambda D 127 (Lambda D)
 X4.....d D 129 (d D)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

KO-INP-62 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....3
Eingänge
 308.....t i 308 (t i)
 309.....Q zu,ti 309 (Q zu,ti)
 310.....Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)

S P A L T E - 10

FKT-35 (Q Sp)
Parametrierung
 Formel..... $(x1+273) * x2 * x3$
Eingänge
 X1.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 X2.....m Sp,W 125 (m Sp,W)
 X3.....c p,W 151 (c p,W)
Ausgänge
 A.....Q Sp 13 (Q Sp)

FKT-37 (Q` Verlust)
Parametrierung
 Formel..... $(6.2832 * x2 / x1) * (x3 - x4)$
Eingänge
 X1.....FKT-36 (A)
 X2.....h Sp 121 (h sp)
 X3.....T Sp,m 11 (T Sp,m)
 X4.....T HR 8 (T HR)
Ausgänge
 A.....Q` Verlust 14 (Q` Verlust)

FKT-39 (Q` HK)
Parametrierung
 Formel..... $(x1 * x2 * (x3 - x4))$
Eingänge
 X1.....m` HK 65 (m` HK)
 X2.....c p,W 151 (c p,W)
 X3.....T WT,HK,VLSW 70 (T WT,HK,VLSW)
 X4.....T HK,RL 60 (T HK,RL)
Ausgänge
 A.....Q` HK 75 (Q` HK)

FKT-40 (Q Bedarf)
Parametrierung
 Formel..... $(x1+273) * x2 * x3$
Eingänge
 X1.....T Sp,6,min 15 (T Sp,6,min)
 X2.....m Sp,W 125 (m Sp,W)
 X3.....c p,W 151 (c p,W)
Ausgänge
 A.....Q Bedarf 71 (Q Bedarf HK)

S P A L T E - 11

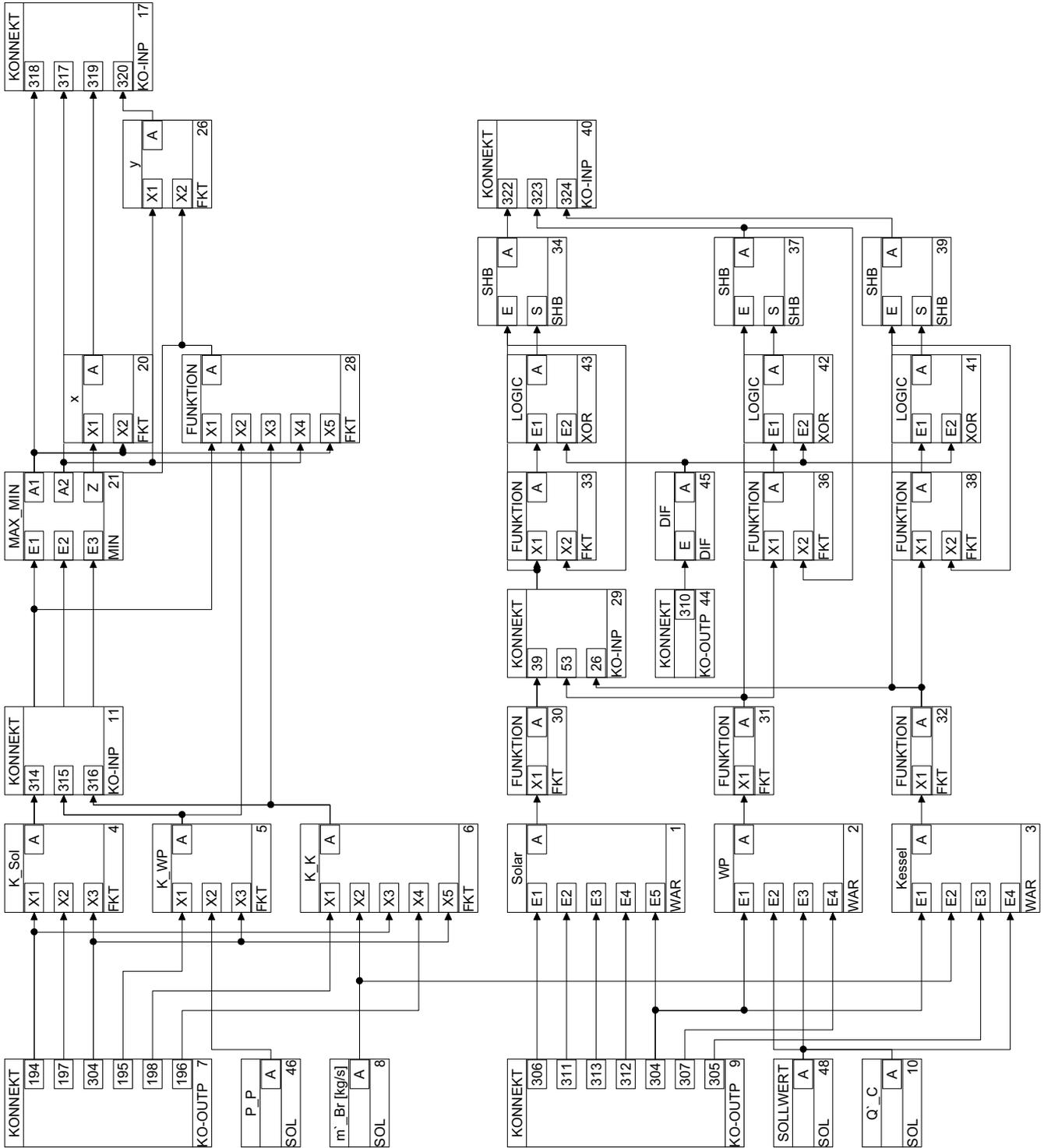
INT-38 (INT)
Parametrierung
 SW.....0
 Tn.....1 sec
Eingänge
 E.....Q` Verlust 14 (Q` Verlust)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner
 Gw.....kein Bezeichner

S P A L T E - 12

FKT-41 (Q zu)
Parametrierung
 Formel..... $x2 + x3 - x1$
Eingänge
 X1.....Q Sp 13 (Q Sp)
 X2.....Q Bedarf 71 (Q Bedarf HK)
 X3.....INT-38 (A)
Ausgänge
 A.....Q zu 17 (Q zu)

S P A L T E - 13

KO-INP-42 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....5
Eingänge
 13.....Q Sp 13 (Q Sp)
 71.....Q Bedarf 71 (Q Bedarf HK)
 14.....Q` Verlust 14 (Q` Verlust)
 17.....Q zu 17 (Q zu)
 75.....Q` HK 75 (Q` HK)



EINSTELLUNGEN

Zykluszeit1000 msec
Echtzeitdisabled
Endzeitkeine Endzeit
Abarbeitungsreihenfolgespaltenweise

BAUSTEINE

S P A L T E - 0

KO-OUTP-7 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl6
Ausgänge
194k el,K,Sol 194 (k el,K,Sol)
197P P,Sol 197 (P P,Sol)
304delta t 304 (delta t)
195k el,WP 195 (k el,WP)
198K Br 198 (K Br)
196P P,K 196 (P P,K)

SOL-46 (P P)

Parametrierung
TypAbsolutwert
Wert4.025
Ausgänge
Akein Bezeichner

SOL-8 (m` Br [kg/sl])

Parametrierung
TypAbsolutwert
Wert0.003288
Ausgänge
Am` Br 21 (m` Br)

KO-OUTP-9 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl7
Ausgänge
306T Fl,Start 306 (T Fl,Start)
311T Sp,mitt 311 (T sp,mitt)
313T A,mitt 313 (T A,mitt)
312S` Ges,mitt 312 (S` Ges,mitt)
304delta t 304 (delta t)
307T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
305T K,Start 305 (T K,Start)

SOL-48 (SOLLWERT)

Parametrierung
TypFolge
VerlaufSprünge
Dauer 060 sec
Wert 056
Dauer 160 sec
Wert 155.9
Dauer 260 sec
Wert 255.79
Dauer 360 sec
Wert 355.69
Dauer 460 sec
Wert 455.59
Dauer 560 sec
Wert 555.49
Dauer 660 sec
Wert 655.39
Dauer 760 sec
Wert 755.29
Dauer 860 sec
Wert 855.19
Dauer 960 sec
Wert 955.09
Dauer 1060 sec
Wert 1054.99
Dauer 1160 sec
Wert 1154.89
Dauer 1260 sec
Wert 1254.78
Dauer 1360 sec
Wert 1354.68
Dauer 1460 sec
Wert 1454.58
Dauer 1560 sec
Wert 1554.48
Dauer 1660 sec
Wert 1654.38
Dauer 1760 sec
Wert 1754.28
Ausgänge
Akein Bezeichner

SOL-10 (Q` C)

Parametrierung
TypAbsolutwert
Wert2.415e+04
Ausgänge
AQ` C 48 (Q` C)

S P A L T E - 2

FKT-4 (K Sol)

Parametrierung
Formelx1*x2*(x3/60)
Eingänge
X1k el,K,Sol 194 (k el,K,Sol)
X2P P,Sol 197 (P P,Sol)
X3delta t 304 (delta t)
Ausgänge
AK Sol 314 (K Sol)

FKT-5 (K WP)

Parametrierung
Formelx1*x2*(x3/60)
Eingänge
X1k el,WP 195 (k el,WP)
X2SOL-46 (A)

X3delta t 304 (delta t)
Ausgänge
AK WP 315 (K WP)

FKT-6 (K K)

Parametrierung
Formel(x1*x2+x3*x4)*x5
Eingänge
X1k Br 198 (k Br)
X2m` Br 21 (m` Br)
X3k el,K,Sol 194 (k el,K,Sol)
X4P P,K 196 (P P,K)
X5delta t 304 (delta t)
Ausgänge
AK K 316 (K K)

WAR-1 (Solar)

Parametrierung
WAR-ModulQ solar
SteuerraumfunktionMultilinear (default)
Eingänge
E1T Fl,Start 306 (T Fl,Start)
E2T Sp,mitt 311 (T sp,mitt)
E3T A,mitt 313 (T A,mitt)
E4S` Ges,mitt 312 (S` Ges,mitt)
E5delta t 304 (delta t)
Ausgänge
Akein Bezeichner

WAR-2 (WP)

Parametrierung
WAR-ModulQ wp
SteuerraumfunktionMultilinear (default)
Eingänge
E1delta t 304 (delta t)
E2Q` C 48 (Q` C)
E3SOL-48 (A)
E4T Wp,Start 307 (T Wp,Start)
Ausgänge
Akein Bezeichner

WAR-3 (Kessel)

Parametrierung
WAR-ModulQ kessel
SteuerraumfunktionMultilinear (default)
Eingänge
E1delta t 304 (delta t)
E2m` Br 21 (m` Br)
E3T K,Start 305 (T K,Start)
E4SOL-48 (A)
Ausgänge
Akein Bezeichner

S P A L T E - 3

KO-INP-11 (KONNEKT)

Parametrierung
Eingangsanzahl3
Eingänge
314K Sol 314 (K Sol)
315K WP 315 (K WP)
316K K 316 (K K)

FKT-30 (FUNKTION)

Parametrierung
Formelx1/3600000
Eingänge
X1WAR-1 (A)
Ausgänge
AQ Sol 39 (Q Sol)

FKT-31 (FUNKTION)

Parametrierung
Formelx1/3600000
Eingänge
X1WAR-2 (A)
Ausgänge
AQ WP 53 (Q WP)

FKT-32 (FUNKTION)

Parametrierung
Formelx1/3600000
Eingänge
X1WAR-3 (A)
Ausgänge
AQ K 26 (Q K)

S P A L T E - 4

KO-INP-29 (KONNEKT)

Parametrierung
Eingangsanzahl3
Eingänge
39Q Sol 39 (Q Sol)
53Q WP 53 (Q WP)
26Q K 26 (Q K)

KO-OUTP-44 (KONNEKT)

Parametrierung
Ausgangsanzahl1
Ausgänge
310Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)

S P A L T E - 5

MIN-21 (MAX MIN)

Parametrierung
ZMinimum
Eingänge
E1K Sol 314 (K Sol)
E2K WP 315 (K WP)
E3K K 316 (K K)
Ausgänge
A1K min 318 (K min)
A2K max 317 (K max)
Zkein Bezeichner

FKT-33 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....x1<x2
Eingänge
 X1.....Q Sol 39 (Q Sol)
 X2.....Q Sol,max 322 (Q Sol,max)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

DIF-45 (DIF)
Parametrierung
 SW.....0
 TG.....1
 TL.....0
 UG.....deaktiviert
 OG.....deaktiviert
Eingänge
 E.....Stop WB Berechnung 310 (Stop WB)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-36 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....x1<x2
Eingänge
 X1.....Q WP 53 (Q WP)
 X2.....Q WP,max 323 (Q WP,max)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

FKT-38 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....x1<x2
Eingänge
 X1.....Q K 26 (Q K)
 X2.....Q K,max 324 (Q K,max)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 6

FKT-20 (x)
Parametrierung
 Formel.....x1/x2
Eingänge
 X1.....FKT-28 (A)
 X2.....K min 318 (K min)
Ausgänge
 A.....x 319 (x)

FKT-28 (FUNKTION)
Parametrierung
 Formel.....x1*x2*x3/(x4*x5)
Eingänge
 X1.....K Sol 314 (K Sol)
 X2.....K WP 315 (K WP)
 X3.....K K 316 (K K)
 X4.....K max 317 (K max)
 X5.....K min 318 (K min)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

XOR-43 (LOGIC)
Parametrierung
 Typ.....XOR
Eingänge
 E1.....FKT-33 (A)
 E2.....DIF-45 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

XOR-42 (LOGIC)
Parametrierung
 Typ.....XOR
Eingänge
 E1.....FKT-36 (A)
 E2.....DIF-45 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

XOR-41 (LOGIC)
Parametrierung
 Typ.....XOR
Eingänge
 E1.....FKT-38 (A)
 E2.....DIF-45 (A)
Ausgänge
 A.....kein Bezeichner

S P A L T E - 7

SHB-34 (SHB)
Eingänge
 E.....Q Sol 39 (Q Sol)
 S.....XOR-43 (A)
Ausgänge
 A.....Q Sol,max 322 (Q Sol,max)

SHB-37 (SHB)
Eingänge
 E.....Q WP 53 (Q WP)
 S.....XOR-42 (A)
Ausgänge
 A.....Q WP,max 323 (Q WP,max)

SHB-39 (SHB)
Eingänge
 E.....Q K 26 (Q K)
 S.....XOR-41 (A)
Ausgänge
 A.....Q K,max 324 (Q K,max)

S P A L T E - 8

FKT-26 (y)
Parametrierung
 Formel.....x1/x2

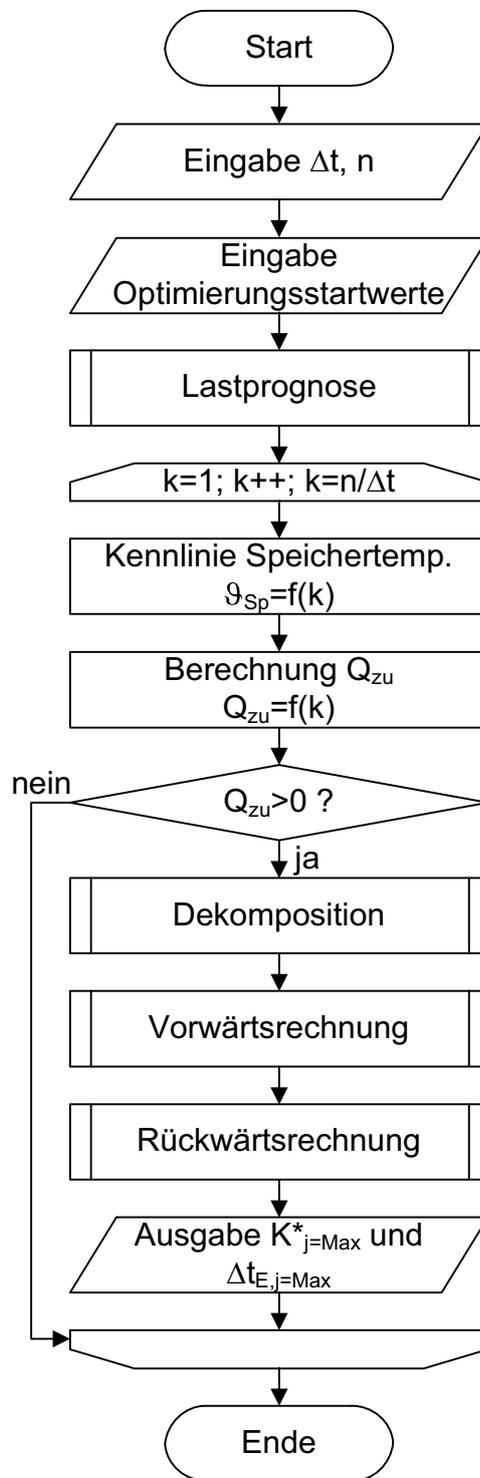
Eingänge
 X1.....K max 317 (K max)
 X2.....FKT-28 (A)
Ausgänge
 A.....y 320 (y)

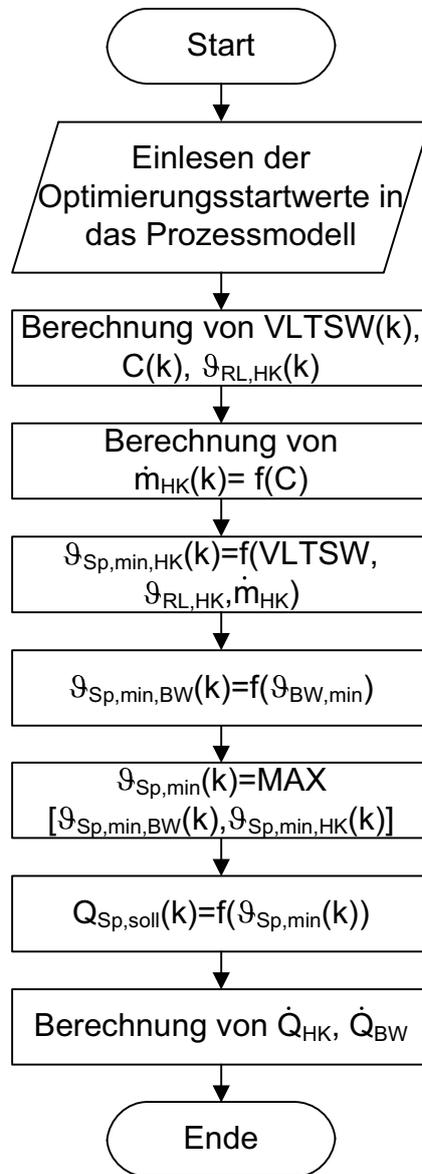
KO-INP-40 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....3
Eingänge
 322.....Q Sol,max 322 (Q Sol,max)
 323.....Q WP,max 323 (Q WP,max)
 324.....Q K,max 324 (Q K,max)

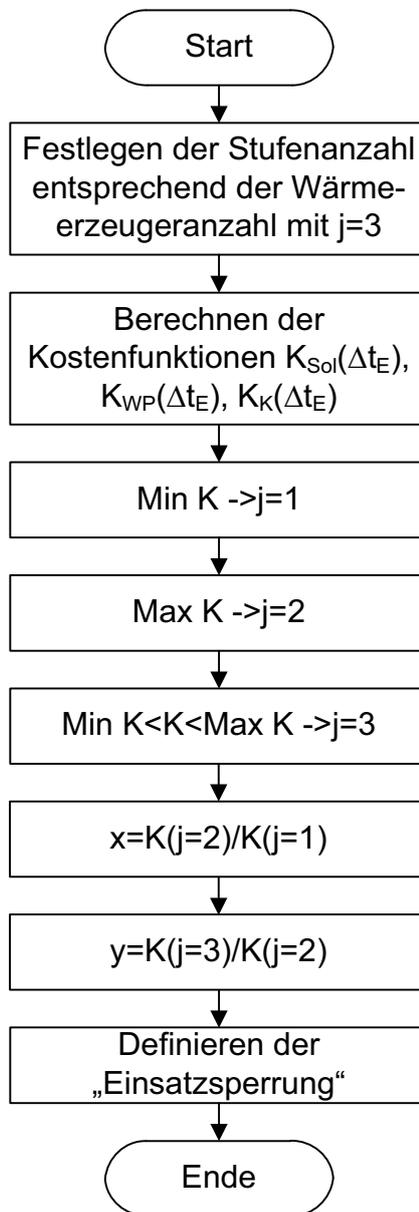
S P A L T E - 9

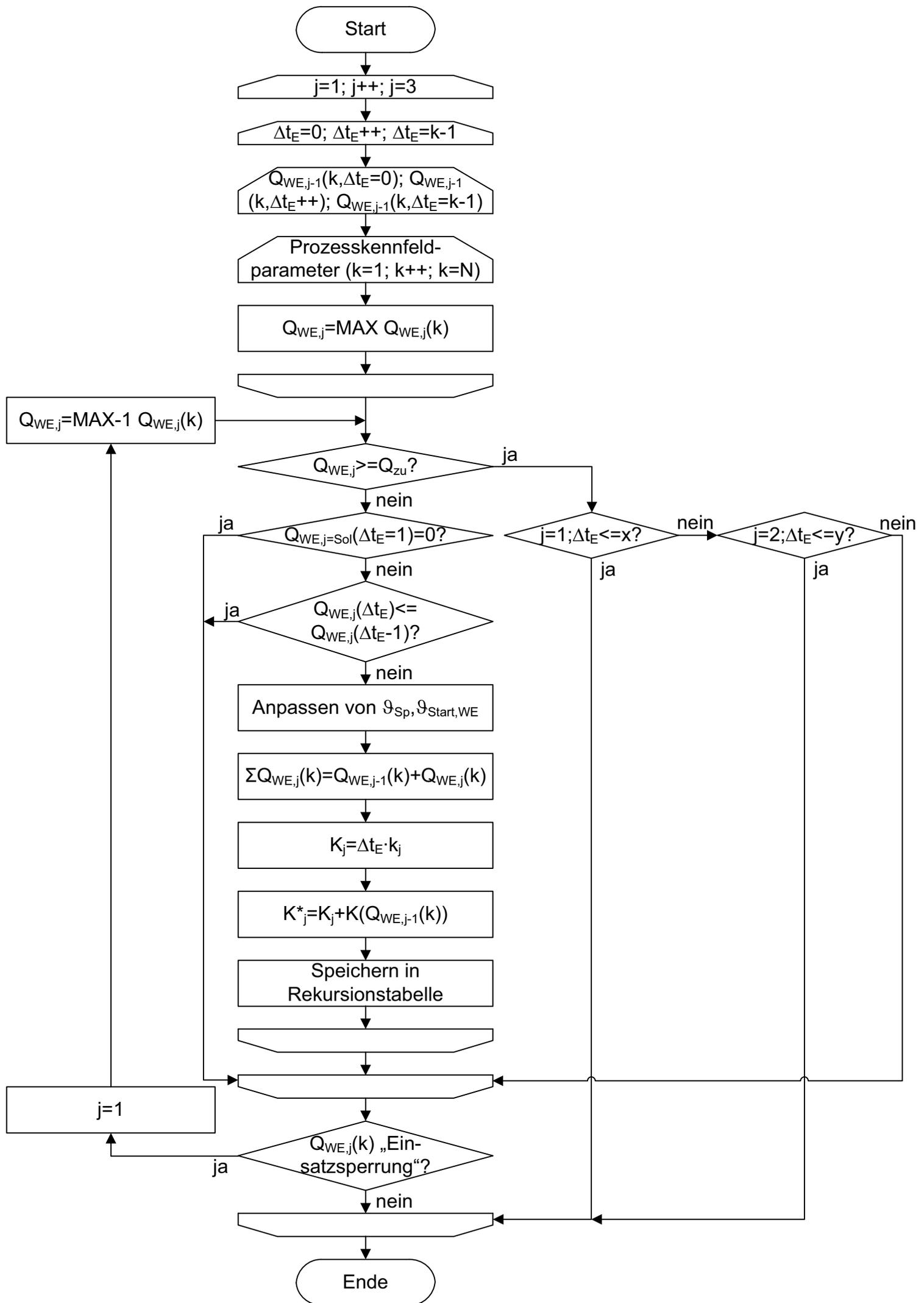
KO-INP-17 (KONNEKT)
Parametrierung
 Eingangsanzahl.....4
Eingänge
 318.....K min 318 (K min)
 319.....K max 317 (K max)
 319.....x 319 (x)
 320.....y 320 (y)

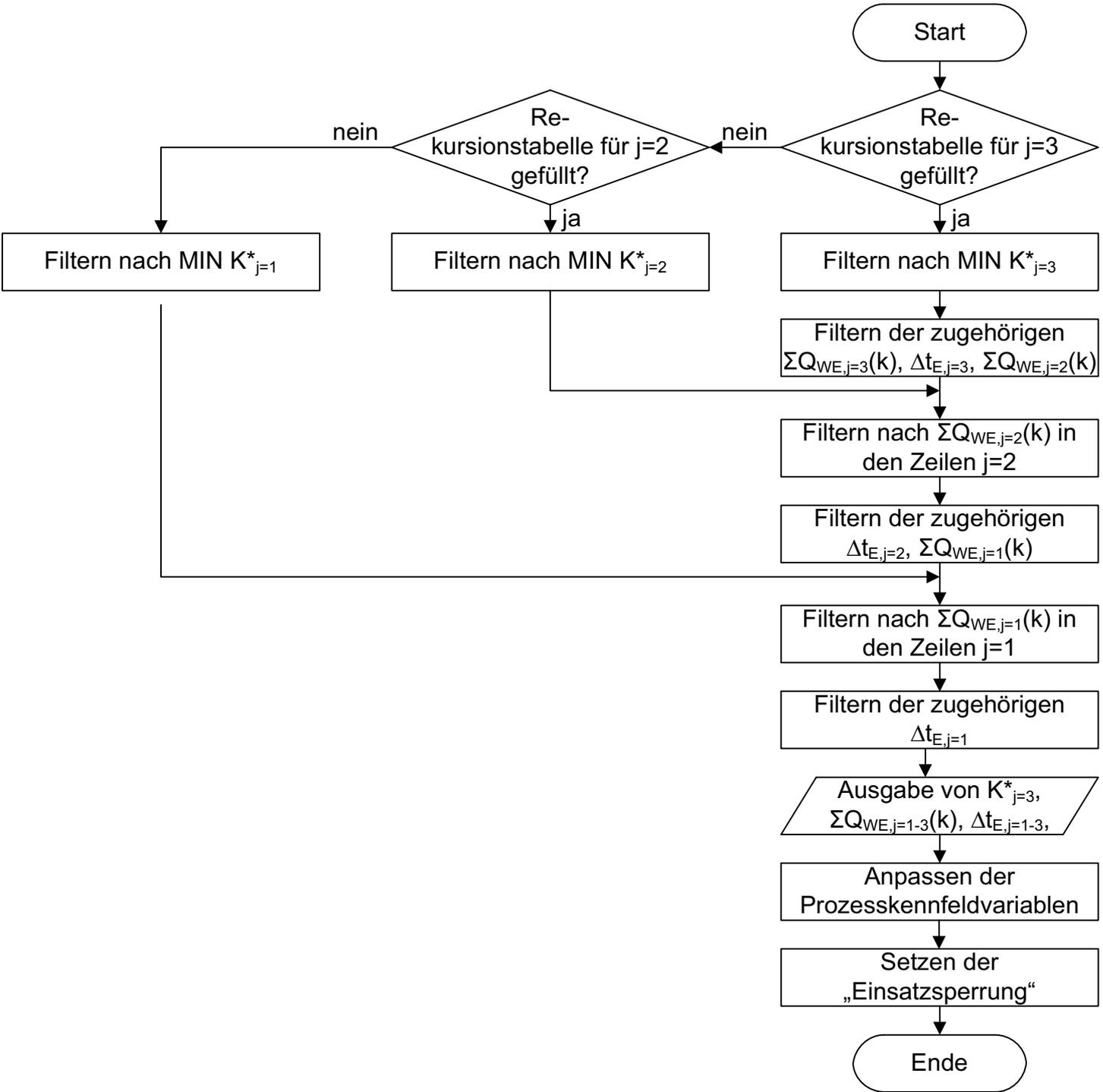
Anhang B











Anhang C

| Teilanlage | Bezeichnung | Wert | Einheit |
|-------------|-------------|----------------------|--------------------|
| Kessel | m_K | 3460 | kg |
| | c_p,W | 4180 | J/kg K |
| | c_p,St | 532 | J/kg K |
| | C_K-W | 6700 | J/K |
| | C_K-HR | 50 | J/K |
| | m_W | 753 | kg |
| | H_u | 3,28*10 ⁷ | J/m ³ |
| | h_K | 0,93 | |
| | A_WT,K | 1,333 | m ² |
| | k_WT,K | 1000 | W/m ² K |
| | | | |
| Solaranlage | m_Abs | 5 | kg |
| | c_p,Abs | 4000 | J/kg K |
| | k_Abs | 1,2 | W/m ² K |
| | k_Fluid | 100 | W/m ² K |
| | A_Abs | 10 | m ² |
| | m_Fl | 5 | kg |
| | c_p,Fl | 2960 | J/kg K |
| | h | 0,8 | |
| | A_Fl | 9,8 | m ² |
| | A_WT,Sol | 1,333 | m ² |
| | k_WT,Sol | 1000 | W/m ² K |
| | | | |
| Wärmepumpe | k_WT,WP | 1000 | W/m ² K |
| | A_WT,WP | 0,8 | m ² |
| | c_p,W | 4180 | J/kg K |
| | h1 | 420000 | J/kg |
| | h2 | 460000 | J/kg |
| | h3 | 220000 | J/kg |
| | U | 400 | V |
| | cos phi | 1 | |
| | a | 0,9 | m ² |
| | m_WT,WP,W | 50 | kg |
| | m_Sole | 10 | kg |
| c_p,Sole | 6000 | J/kg K | |
| | | | |
| Speicher | h_Sp | 1,5 | m |
| | I_Stahl | 10 | W/m K |
| | A_Sp,M | 20 | m ² |
| | m_Sp,W | 1000 | kg |
| | I_D | 0,005 | W/m K |
| | d_i | 0,919 | m |
| | d | 0,92 | m |
| | d_D | 1 | m |
| I_W | 2 | W/m K | |

| | | | |
|-----------------------|----------------------|------|--------------------|
| Heizkreis | A_WT,Hk | 1 | m ² |
| | k_WT,Hk | 200 | W/m ² K |
| | r_W | 1000 | kg/m ³ |
| | g | 9,81 | m/s ² |
| | h_Pumpe | 3 | m |
| | | | |
| Thermostatregelventil | Proportionalbereich | 1 | K |
| | Hysterese | 0,5 | K |
| | k_v,s | 0,18 | m ³ /h |
| | Stellgeschwindigkeit | 1200 | s |
| | | | |
| Heizkurve | Norm-AT | -16 | °C |
| | Spreizung | 10 | |
| | Krümmung | 0,33 | |
| | Neigung | 1,5 | |
| | | | |
| Raummodell | Breite | 3,5 | m |
| | Länge | 3 | m |
| | Höhe | 3 | m |
| | Masse HK | 10 | kg |
| | Heizfläche | 3,36 | m ² |
| | k_HK | 4,73 | W/m ² K |
| | Fensterfläche | 3 | m ² |
| | k_F | 2 | W/m ² K |
| | Wanddicke innen | 0,2 | m |
| | Wanddicke aussen | 0,3 | m |
| | α_i | 7,7 | W/m ² K |
| | λ_W | 0,24 | W/m K |
| | α_a | 25 | W/m ² K |

