

Masterarbeit

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES MASTER OF ENGINEERING
- M. ENG. -

Entwicklung eines Verfahrens zur Steuerung konventioneller und regenerativer Wärmeerzeuger zur Deckung eines prognostizierten Bedarfes verschiedener Verbraucher

vorgelegt von: Tino Walther
geb. am 29.07.1989 in Halle(Saale)
MIKS12
Prozessautomatisierung

Hochschulbetreuer: Prof. Dr. habil. Frank H. Sokollik

Firmenbetreuer: Dipl.-Ing. (FH) Andreas Richter
Gesellschaft für Regelungstechnik und
Energieeinsparung mbH

Bearbeitungszeitraum: 11.11.14 – 11.02.15

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit bisher noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Ort, Datum

Tino Walther

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Professor und Betreuer Herr Prof. Sokollik bedanken. Während meines gesamten Studiums hat er mich immer wieder gefördert und mein Interesse und meine Freunde am Studium der Automatisierung geweckt. Seine Tür stand mir immer offen.

Weiterhin gilt mein Dank der Firma GFR-Gesellschaft für Regelungstechnik und Energieeinsparungs mbH für ein spannendes und forderndes Thema für meine Masterarbeit und für eine nunmehr langjährige gute Zusammenarbeit. Insbesondere möchte ich mich bei Herr Richter und Herr Klein, beide Mitarbeiter der Firma GFR, für ihre Unterstützung bedanken, die mir jederzeit sicher war.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Freunden und bei meiner Familie bedanken, die nicht nur innerhalb der Masterarbeit an meiner Seite standen und mir geholfen haben, sondern auch über meine gesamte Studiendauer. Vielen Dank.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|-----------|
| DANKSAGUNG | 3 |
| INHALTSVERZEICHNIS | 4 |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 5 |
| QUELLENVERZEICHNIS | 6 |
| 1 EINLEITUNG | 7 |
| 2 AUFGABENSTELLUNG | 8 |
| 3 PROGRAMM | 9 |
| 4 DIE WÄRMEERZEUGER | 12 |
| 4.1 KESSELANLAGE | 12 |
| 4.2 BLOCKHEIZKRAFTWERK..... | 15 |
| 4.3 SOLARKOLLEKTOR..... | 23 |
| 4.4 WARMWASSERSPEICHER..... | 32 |
| 4.5 VERIFIKATION DES KOLLEKTOR-SPEICHER MODELLS | 42 |
| 5 STEUERUNG UND SIMULATION | 44 |
| 5.1 ENTWICKLUNG DER STEUERUNG | 44 |
| 5.2 ENTWICKLUNG DER SIMULATION | 49 |
| 5.3 VERIFIKATION DER SIMULATION UND STEUERUNG AN HAND EINES REALEN LASTGANGS | 61 |
| 6 AUSBLICK | 69 |
| 7 ANHANG | 70 |
| A1 WÄRMEERZEUGER GESAMT | 70 |
| A2 SCHICHTTEMPERATUR..... | 73 |
| A3 SCHICHTSPEICHER ODE | 74 |
| A4 NÜRTINGEN WÄRMEERZEUGER GESAMT..... | 75 |
| A5 WORKSPACEDEKLARATIONEN MEHRSCICHTSPEICHER..... | 78 |
| A6 STEUERUNGSFUNKTION WÄRMEERZEUGER..... | 79 |
| A7 SIMULATIONSMODELL | 84 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 4.1-1: Brennwertkessel Wirkungsgrad | 14 |
| Abbildung 4.2-1: thermischer Wirkungsgrad BHKW | 16 |
| Abbildung 4.2-2: elektrischer Wirkungsgrad BHKW | 17 |
| Abbildung 4.2-3: Kostenströme 1. Fall | 19 |
| Abbildung 4.2-4: Kostenströme 2. Fall | 21 |
| Abbildung 4.2-5: Kostenströme 3. Fall | 22 |
| Abbildung 4.3-1: Kollektor Funktionsprinzip | 24 |
| Abbildung 4.3-2: Kollektorwirkungsgrad | 26 |
| Abbildung 4.3-3: Kollektormodell ohne Speicher | 28 |
| Abbildung 4.4-1: offenes System | 32 |
| Abbildung 4.4-2: Einkapazitätenmodell | 35 |
| Abbildung 4.4-3: Schichtspeicher | 38 |
| Abbildung 4.4-4: Kollektor-Speicher Modell | 41 |
| Abbildung 5.1-1: Kostenstrom Nürtingen | 45 |
| Abbildung 5.1-2: Ablaufplan Sequenz | 47 |
| Abbildung 5.2-1: Solarkollektor | 49 |
| Abbildung 5.2-2: Temperaturverlauf | 50 |
| Abbildung 5.2-3: Strahlungsverlauf | 50 |
| Abbildung 5.2-4: Temp. Graph | 50 |
| Abbildung 5.2-5: Strahlung Graph | 51 |
| Abbildung 5.2-6: Solarkollektor System | 52 |
| Abbildung 5.2-7: Wärmetauscher | 53 |
| Abbildung 5.2-8: Wärmetauscher System | 54 |
| Abbildung 5.2-9: Mehrschichtspeicher | 55 |
| Abbildung 5.2-10: Mehrschichtspeicher System | 57 |
| Abbildung 5.2-11: Steuerungsfunktion | 59 |
| Abbildung 5.2-12: Lastprognose | 60 |
| Abbildung 5.3-1: Lastgang Nürtingen | 61 |
| Abbildung 5.3-2: Temperatur Nürtingen | 62 |
| Abbildung 5.3-3: Strahlungsverlauf 24.10.14 | 63 |
| Abbildung 5.3-4: Kollektor Scope | 64 |
| Abbildung 5.3-5: Wärmetauscher Scope | 65 |
| Abbildung 5.3-6: Leistungen Scope | 67 |
| Abbildung 5.3-7: Speicher Scope | 68 |

QUELLENVERZEICHNIS

- [1] Katalog Heiztechnik 2003/1 – Teil 1, abgerufen am 03.06.2014 (http://www.buderus.de/sixcms/media.php/1086/k5_70kw.pdf)
- [2] Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg – BHWK-Check, Handbuch zur Ermittlung von Einsparpotenzialen durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken (2. Auflage, HGC Hamburg Gas Consult GmbH, Januar 2011)
- [3] Elmar Bollin (Hrsg.) – Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden (1. Auflage 2009, Vieweg+Teubner)
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie – Thermische Bauteilaktivierung. Entwicklung eines Rechenkerns (Projektbericht - Wien, Oktober 2013)
- [5] VDI-Wärmeatlas – Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen(GVG) (10. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006)
- [6] <http://de.mathworks.com/products/matlab/>, abgerufen am 25.11.2014
- [7] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=de&map=europe>, abgerufen am 26.11.2014

1 Einleitung

Die weiterhin fortschreitende Technik der heutigen Zeit wirft immer wieder neue Probleme auf, die es zu lösen gilt. So liegt die Aufgabe der Ingenieure darin, die durch die Wissenschaft gewonnenen Fakten in praktisch nutzbare Dinge zu konvertieren. Dies geschieht auf vielen Ebenen der Naturwissenschaften, doch eines der größten Themengebiete der heutigen Zeit ist und bleibt die intelligente und schonende Nutzung von den uns auf der Erde gegebenen Ressourcen. Lässt man das letzte Jahrhundert aus technischer Sicht Revue passieren, so wird einem schnell klar, dass die Energieerzeuger von gestern nicht zwangsläufig auch die von heute sind. Für die Erzeugung von Wärme stehen nach heutigem Stand der Technik oft mehrere mögliche Optionen zur Verfügung. Wichtig bei dieser Differenzierung von Wärmeerzeugern ist, dass viele von ihnen mit unterschiedlichen Brennstoffen oder aber auch gänzlich aus regenerativer Energie ihre Wärme beziehen. Damit sind die Wärmeerzeuger keinesfalls gleichzusetzen. Aus den unterschiedlichen Brennstoffen entstehen auch unterschiedliche Energiepreise für den Strom oder die Wärme, die mit diesen Erzeugern gewonnen werden kann. Weiterhin ist ein solcher Energiepreis oftmals zusätzlich an die Tageszeit gebunden. Eine solche Abhängigkeit resultiert zum einen aus speziellen Verträgen zwischen den Energieversorgern, zum anderen jedoch aus stark schwankenden Wirkungsgraden der Wärmeerzeuger. In Gebäuden mit sehr hohem Wärme- oder Strombedarf, zum Beispiel Krankenhäusern und Einkaufszentren, werden unterschiedliche Wärmeerzeuger gekoppelt und dezentral gesteuert um die benötigte Wärmeleistung zu erzeugen. Durch die dezentrale Steuerung und die ungenaue Betrachtung der Aggregate und deren laufender Preis, ist ein neues Problem entstanden, welches durch ein genaueres „Engineering“ gelöst werden muss. Hierfür entsteht ein neues Gedankenkonzept von der „Energiezentrale der Zukunft“, die es ermöglichen soll, unterschiedlichste Erzeuger gesammelt zu steuern und zu regeln, um die geringsten Kosten und die schonende Nutzung von Brennstoffen zu gewährleisten.

2 Aufgabenstellung

Die Aufgabe innerhalb dieser Arbeit ist es, das Projekt Energiezentrale der Zukunft näher zu erfassen. Dabei soll spezifischer auf die unterschiedlichen Verbraucher und deren Kosten für den Betrieb eingegangen werden, um eine möglichst genaue Ressourcenplanung für die einzelnen Aggregate zur Wärmeerzeugung aufstellen zu können. Hierfür ist es notwendig, Kennlinien für die Wirkungsgrade der Aggregate zu entwickeln, die mit Hilfe von höherer Programmierung, innerhalb einer möglichen Steuerung verarbeitet werden können. Dabei sollen nicht nur konventionelle, sondern auch regenerative Wärmeerzeuger, mit speziellem Augenmerk auf einen Solarkollektor betrachtet werden.

Als Test für die gewonnenen Kosten der Erzeuger und eine damit verbundene Ressourcenplanung soll eine Simulation erzeugt werden, die den Sachverhalt unter hinreichend genauen Umständen testet.

3 Programm

Sämtliche Simulationen und Programme, die im Zuge dieser Arbeit entstanden sind, wurden mit Hilfe des Programms MatLab® geschrieben. Für Simulationen wurde das von Mathworks eigene Simulationsmodul SimuLink verwendet.

[MATLAB® ist eine höhere Programmiersprache und interaktive Umgebung für numerische Berechnungen, Visualisierung und Programmierung. MATLAB dient zur Datenanalyse, Algorithmen-Entwicklung und zur Erstellung von Modellen und Anwendungen. Mit der Programmiersprache, den Tools und den integrierten mathematischen Funktionen können Sie verschiedene Ansätze ausprobieren und schneller zu einer Lösung gelangen als mit Tabellenkalkulationen oder herkömmlichen Programmiersprachen wie C/C++ oder Java™.]⁶

Im Folgenden sind die Versionsnummern der einzelnen MatLab Module aufgelistet:

MATLAB Version: 8.1.0.604 (R2013a)

Operating System: Microsoft Windows 7 Version 6.1 (Build 7601: Service Pack 1)

Java Version: Java 1.6.0_17-b04 with Sun Microsystems Inc. Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM mixed mode

| | | |
|--------------------------------|----------------|----------|
| MATLAB | Version 8.1 | (R2013a) |
| Simulink | Version 8.1 | (R2013a) |
| Aerospace Blockset | Version 3.11 | (R2013a) |
| Aerospace Toolbox | Version 2.11 | (R2013a) |
| Bioinformatics Toolbox | Version 4.3 | (R2013a) |
| Communications System Toolbox | Version 5.4 | (R2013a) |
| Computer Vision System Toolbox | Version 5.2 | (R2013a) |
| Control System Toolbox | Version 9.5 | (R2013a) |
| Curve Fitting Toolbox | Version 3.3.1 | (R2013a) |
| DO Qualification Kit | Version 2.1 | (R2013a) |
| DSP System Toolbox | Version 8.4 | (R2013a) |
| Data Acquisition Toolbox | Version 3.3 | (R2013a) |
| Database Toolbox | Version 4.1 | (R2013a) |
| Datafeed Toolbox | Version 4.5 | (R2013a) |
| Econometrics Toolbox | Version 2.3 | (R2013a) |
| Embedded Coder | Version 6.4 | (R2013a) |
| Filter Design HDL Coder | Version 2.9.3 | (R2013a) |
| Financial Instruments Toolbox | Version 1.1 | (R2013a) |
| Financial Toolbox | Version 5.1 | (R2013a) |
| Fixed-Point Designer | Version 4.0 | (R2013a) |
| Fuzzy Logic Toolbox | Version 2.2.17 | (R2013a) |
| Global Optimization Toolbox | Version 3.2.3 | (R2013a) |
| HDL Coder | Version 3.2 | (R2013a) |
| HDL Verifier | Version 4.2 | (R2013a) |
| IEC Certification Kit | Version 3.1 | (R2013a) |

Programm

| | | |
|---------------------------------------|----------------|----------|
| Image Acquisition Toolbox | Version 4.5 | (R2013a) |
| Image Processing Toolbox | Version 8.2 | (R2013a) |
| Instrument Control Toolbox | Version 3.3 | (R2013a) |
| MATLAB Builder EX | Version 2.3.1 | (R2013a) |
| MATLAB Builder JA | Version 2.2.6 | (R2013a) |
| MATLAB Builder NE | Version 4.1.3 | (R2013a) |
| MATLAB Coder | Version 2.4 | (R2013a) |
| MATLAB Compiler | Version 4.18.1 | (R2013a) |
| MATLAB Distributed Computing Server | Version 6.2 | (R2013a) |
| MATLAB Report Generator | Version 3.14 | (R2013a) |
| Mapping Toolbox | Version 3.7 | (R2013a) |
| Model Predictive Control Toolbox | Version 4.1.2 | (R2013a) |
| Model-Based Calibration Toolbox | Version 4.6 | (R2013a) |
| Neural Network Toolbox | Version 8.0.1 | (R2013a) |
| OPC Toolbox | Version 3.2 | (R2013a) |
| Optimization Toolbox | Version 6.3 | (R2013a) |
| Parallel Computing Toolbox | Version 6.2 | (R2013a) |
| Partial Differential Equation Toolbox | Version 1.2 | (R2013a) |
| Phased Array System Toolbox | Version 2.0 | (R2013a) |
| RF Toolbox | Version 2.12 | (R2013a) |
| Real-Time Windows Target | Version 4.2 | (R2013a) |
| Robust Control Toolbox | Version 4.3 | (R2013a) |
| Signal Processing Toolbox | Version 6.19 | (R2013a) |
| SimBiology | Version 4.3 | (R2013a) |
| SimDriveline | Version 2.4 | (R2013a) |
| SimElectronics | Version 2.3 | (R2013a) |
| SimEvents | Version 4.3 | (R2013a) |
| SimHydraulics | Version 1.12 | (R2013a) |
| SimMechanics | Version 4.2 | (R2013a) |
| SimPowerSystems | Version 5.8 | (R2013a) |
| SimRF | Version 4.0 | (R2013a) |
| Simscape | Version 3.9 | (R2013a) |
| Simulink 3D Animation | Version 6.3 | (R2013a) |
| Simulink Code Inspector | Version 1.3 | (R2013a) |
| Simulink Coder | Version 8.4 | (R2013a) |
| Simulink Control Design | Version 3.7 | (R2013a) |
| Simulink Design Optimization | Version 2.3 | (R2013a) |
| Simulink Design Verifier | Version 2.4 | (R2013a) |
| Simulink PLC Coder | Version 1.5 | (R2013a) |
| Simulink Report Generator | Version 3.14 | (R2013a) |
| Simulink Verification and Validation | Version 3.5 | (R2013a) |
| Spreadsheet Link EX | Version 3.1.7 | (R2013a) |
| Stateflow | Version 8.1 | (R2013a) |
| Statistics Toolbox | Version 8.2 | (R2013a) |
| Symbolic Math Toolbox | Version 5.10 | (R2013a) |
| System Identification Toolbox | Version 8.2 | (R2013a) |
| SystemTest | Version 2.6.5 | (R2013a) |
| Trading Toolbox | Version 1.0 | (R2013a) |
| Vehicle Network Toolbox | Version 2.0 | (R2013a) |
| Wavelet Toolbox | Version 4.11 | (R2013a) |

Programm

xPC Target

Version 5.4 (R2013a)

xPC Target Embedded Option

Version 5.4 (R2013a)

4 Die Wärmeerzeuger

Die Betrachtung und die Auslegung der Wärmeerzeuger erfolgt anhand eines real existierenden Gebäudes. Die Liegenschaft Nürtingen dient als Vorlage für die Betrachtungen innerhalb dieser Arbeit. Die Firma GFR hat die Gebäudeautomatisierung an dieser Liegenschaft vorgenommen und stellt die notwendigen RI-Schemata zur Verfügung. Es handelt sich bei der Liegenschaft Nürtingen um ein Krankenhaus. Ein solches Gebäude eignet sich gut für eine intelligenteren und effizienteren Steuerung und Regelung der Energieerzeuger, da der Energiebedarf vergleichbar hoch ist. In Folge dessen ist jede Einsparung an Kosten und Energie wünschenswert.

In diesem Kapitel werden die vorhandenen Wärmeerzeuger beschrieben und deren Kosten berechnet.

4.1 Kesselanlage

In der folgenden Ausführung wird die Kesselanlage als eine Brennwertkesselanlage behandelt. Der Brennwert, oder auch oberer Heizwert, genannt gibt an, wie viel Energie in Form von Wärme bei der Verbrennung pro Kilogramm des Stoffs gewonnen werden kann. Anders als beim üblichen Heizwert oder auch unterer Heizwert wird hierbei angenommen, dass die entstehenden Verbrennungsgase abgekühlt werden und der enthaltene Wasserdampf vollständig kondensiert. Durch die Kondensation erhält man zusätzlich die sogenannte Kondensationswärme, die der Verdampfungsenthalpie von Wasser entspricht. Durch Verwendung dieser Energie ist der Brennwert eines Stoffes um bis zu 10% höher als der Heizwert und ist somit direkt proportional zur enthaltenen Wassermenge im jeweiligen Brennstoff. In Folge dessen, können die Wirkungsgrade eines Brennwertkessels die 100% übersteigen.

Die Leistung eines Brennwertkessels wird mit der folgenden Gleichung beschrieben.

$$P = \dot{V}_N * H_S * \eta \quad (Gl. 4-1)$$

\dot{V}_N m³/s Volumenstrom des Heizmediums

Die Wärmeerzeuger

H_s kW/m³ Brennwert (auch oberer Heizwert)

η % Wirkungsgrad

x ist in unserem Fall eine normierte Leistung bezogen auf die Maximalleistung P_{max} und wird in % angegeben. Sie wird aus der Leistung P und der Maximalleistung P_{max} gewonnen.

$$P = x * P_{max} \quad (Gl. 4-2)$$

Wird die Gleichung (Gl. 4.2) umgestellt, so wird deutlich, dass x sich auf die aktuelle Leistung des Aggregates in Hinsicht auf die Maximalleistung bezieht. Dies ermöglicht eine Betrachtung der Leistung auch ohne exakte Werte für die Leistung der einzelnen Aggregate und kann zu späteren Betrachtungen nach Belieben in einen exakten Leistungswert umgerechnet werden.

$$x = \frac{P}{P_{max}} \quad (Gl. 4-3)$$

Stellt man die Gleichung (Gl. 4.1) um, so erhält man das Verhältnis von der Leistung zum Wirkungsgrad.

$$\frac{P}{\eta} = \dot{V}_N * H_s \quad (Gl. 4-4)$$

Der Kostenstrom ergibt sich aus einem Kostenfaktor k und der normierten Leistung über die Zeit $x(t)$. Setzt man diese nun in ein Verhältnis, erhält man den Kostenstrom \dot{K} .

$$\dot{K}_K = k * \dot{V}_N * H_s \quad (Gl. 4-5)$$

\dot{K}_K €/s Kostenstrom des Kessels

k €/kWs Kostenfaktor für das jeweilige Medium (zB. Erdgas)

Setzt man die Gleichung (Gl. 4.4) in den Kostenstrom ein so erhält man Gleichung (Gl. 4.6).

Die Wärmeerzeuger

$$\dot{K}_K = k * \frac{P}{\eta} \quad (Gl. 4-6)$$

Ersetzt man nun die Leistung P mit der oben beschriebenen normierten Leistung x dann erhält man den normierten Kostenstrom:

$$\dot{K}_{nK} = k * \frac{x}{\eta(x)} \quad (Gl. 4-7)$$

Als nächster Schritt muss eine Wirkungsgradfunktion aufgestellt werden. In der Praxis sind die Kennlinien von Wirkungsgraden, bzw. von Brennwertkesseln, von empirischer Natur. Als Vorlage für die Wirkungsgradfunktion innerhalb dieser Arbeit, wird eine solche Kennlinie verwendet. Entnommen wurde die Kennlinie dem [1]. Im nächsten Schritt werden mehrere markante Punkte aus der Kennlinie verwendet, um eine Annäherungsfunktion zu erzeugen, welche alle diese markanten Punkte verbindet. Es werden 10 Punkte verwendet, ein Punkt je 10% Anstieg der normierten Leistung. Damit lässt sich eine ausreichend hohe Auflösung erzeugen. Mit einem Polynom 5. Ordnung kann die Brennwertkesselkennlinie relativ genau dargestellt werden (siehe Abbildung 4.1-1).

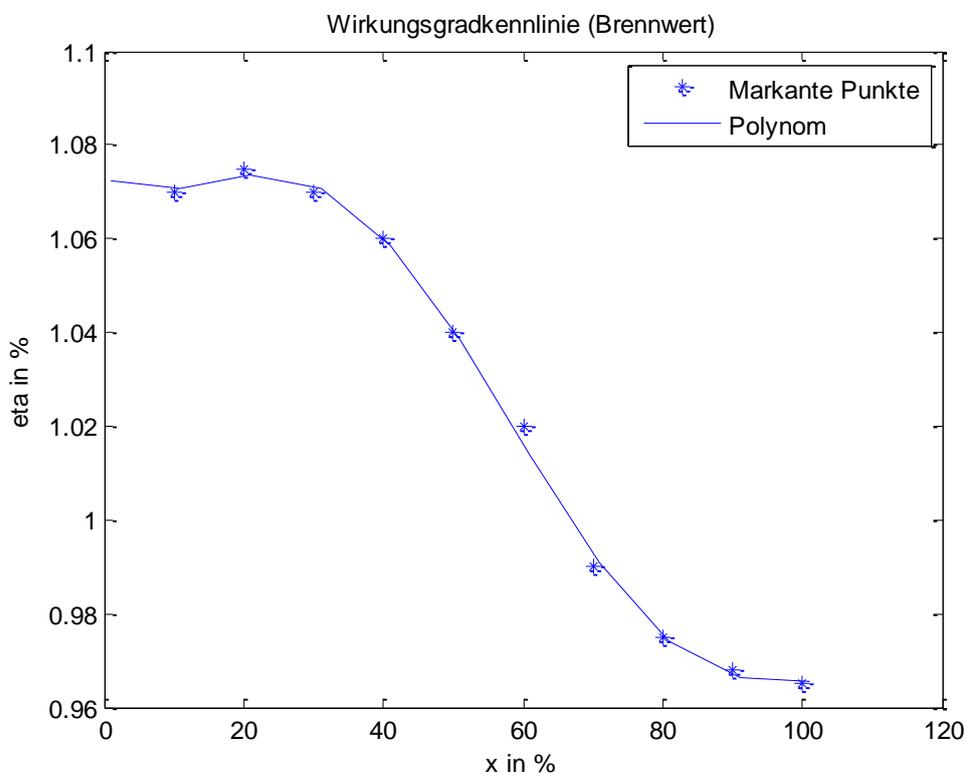


Abbildung 4.1-1: Brennwertkessel Wirkungsgrad

Die Wärmeerzeuger

In der Abbildung ist gut zu erkennen, dass das Polynom ohne große Abweichungen fast alle Punkte perfekt verbindet, sowohl für konkrete Daten, als auch für das genaue Polynom (siehe Anhang A1). Damit lässt sich der bezogene und normierte Kostenstrom für die Kesselanlage bestimmen und abbilden. Die Kostenstromfunktion für die Kesselanlage ist für eine bessere Anschaulichkeit im direkten Vergleich mit dem Blockheizkraftwerk dargestellt (siehe Kapitel 4.2).

4.2 Blockheizkraftwerk

Bei einem Blockheizkraftwerk, im Folgenden nur noch BHKW genannt, gibt es zwei Arten der Einsatzmöglichkeiten. Die erste ist die Wärme geführte Betriebsart. Diese wird eingesetzt, wenn die geforderte Leistung auf das ganze Spektrum der Nutzwärme eines BHKW's zurückgreift, um damit Warmwasser für Heizung, Klima und andere sanitäre Gebräuche zu erzeugen. Die damit erzeugbare Vorlauftemperatur für etwaige Heizkreise liegt bei 90°C. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Strom geführte Betriebsart. Dabei wird die geforderte Leistung nur über den erzeugten Strom und somit über die elektrische Leistung definiert, um damit das Gewerk mit Strom zu versorgen. Die dabei erzeugte Abwärme, die nicht unerheblich sein kann, darf laut der neuesten Gesetzgebung nicht in die Umgebung abgegeben werden. Sie muss stattdessen vom Betreiber abgeführt, gespeichert oder direkt verwendet werden.

In der folgenden Betrachtung wird davon ausgegangen, dass das BHKW wärmegeführt arbeitet.

Der Wirkungsgrad eines BHKW's setzt sich wie folgt zusammen:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{br}} \quad (\text{Gl. 4-8})^2$$

\dot{Q}_{br} kJ Brennstoffeinsatz

Da das BHKW sowohl Strom als auch Wärme in unterschiedlicher Effektivität produziert, muss man sowohl den Wirkungsgrad für Strom als auch für die Wärme separat betrachten. Und auch hier gilt die Formel $P = x * P_{max}$ der normierten Leistung.

Die Wärmeerzeuger

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{nutz}}{\dot{Q}_{br}} \quad (\text{Gl. 4-9})^2$$

Dabei stellt der thermische Wirkungsgrad η_{th} das Verhältnis von Nutzwärme \dot{Q}_{nutz} zu Brennstoffeinsatz \dot{Q}_{br} dar und der elektrische Wirkungsgrad η_{el} das Verhältnis von elektrischer Leistung zu Brennstoffeinsatz \dot{Q}_{br} .

Wie unter 4.1 beschrieben werden die Wirkungsgradkennlinien mit Hilfe von zwei Polynomen, jeweils eines für den thermischen und eines für den elektrischen Wirkungsgrad, angenähert. In den Abbildungen 4.2-1 und 4.2-2 sind der thermische und der elektrische Wirkungsgrad unter der Verwendung der errechneten Polynome dargestellt.

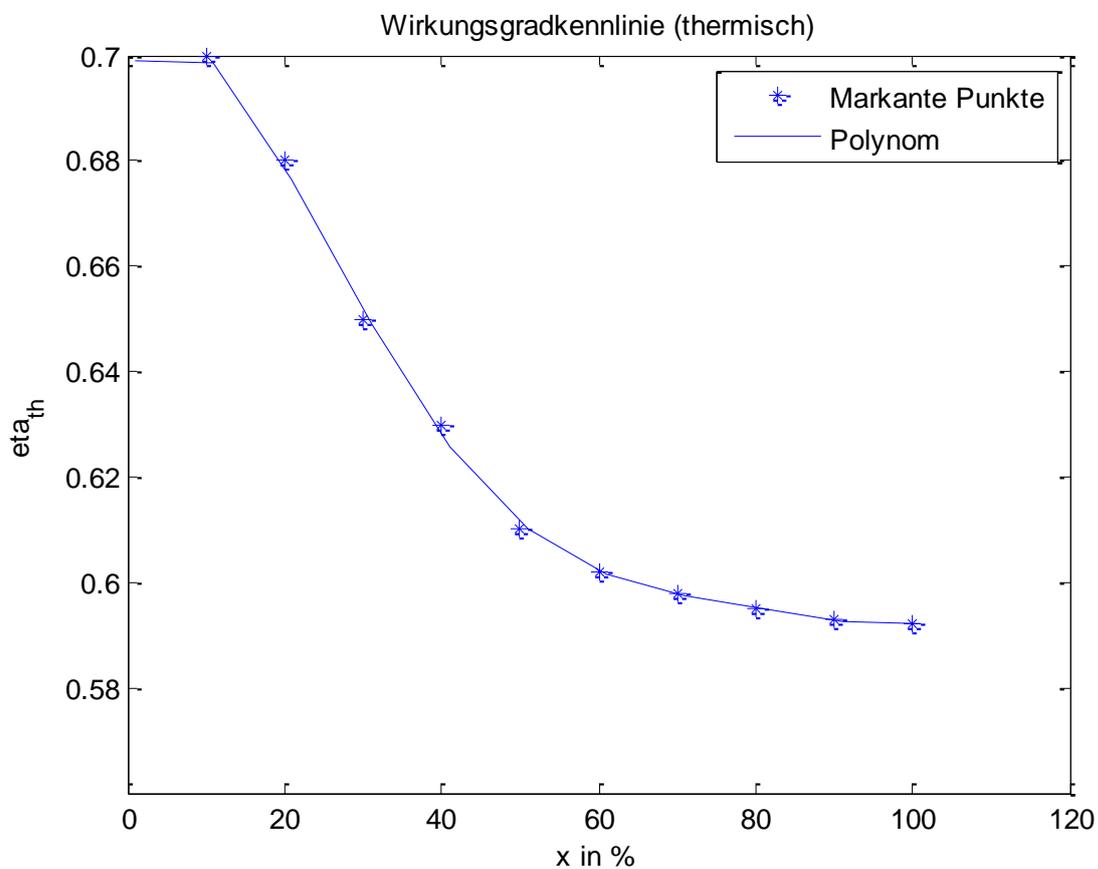


Abbildung 4.2-1: thermischer Wirkungsgrad BHKW

In der Abbildung 4.2-1 ist zu sehen, dass der thermische Wirkungsgrad mit steigender Bedarfsanforderung sinkt. Die maximale Umsetzung an thermischer Energie aus dem verbrannten Erdgas wird bei zirka 0 bis 20% Leistung erreicht. Ist das BHKW in Hinsicht auf seine thermische Nutzenergieerzeugung am Limit, so werden dennoch Wirkungsgrade von zirka 60% erreicht. Somit beläuft sich die Wirkungsgraddifferenz im ganzen

Die Wärmeerzeuger

Ansteuerungsspektrum auf nur 10%.

In der folgenden Abbildung 4.2-2 wird der elektrische Wirkungsgrad mit seinem Polynom dargestellt. Es ist zu erkennen, dass anders als beim thermischen Wirkungsgrad, der elektrische Wirkungsgrad mit steigendem Verbrauch bzw. mit steigender Erzeugung von Elektroenergie auch steigt. Das Maximum von 30% elektrischem Wirkungsgrad wird bei 100%, d.h. bei voller Auslastung erreicht.

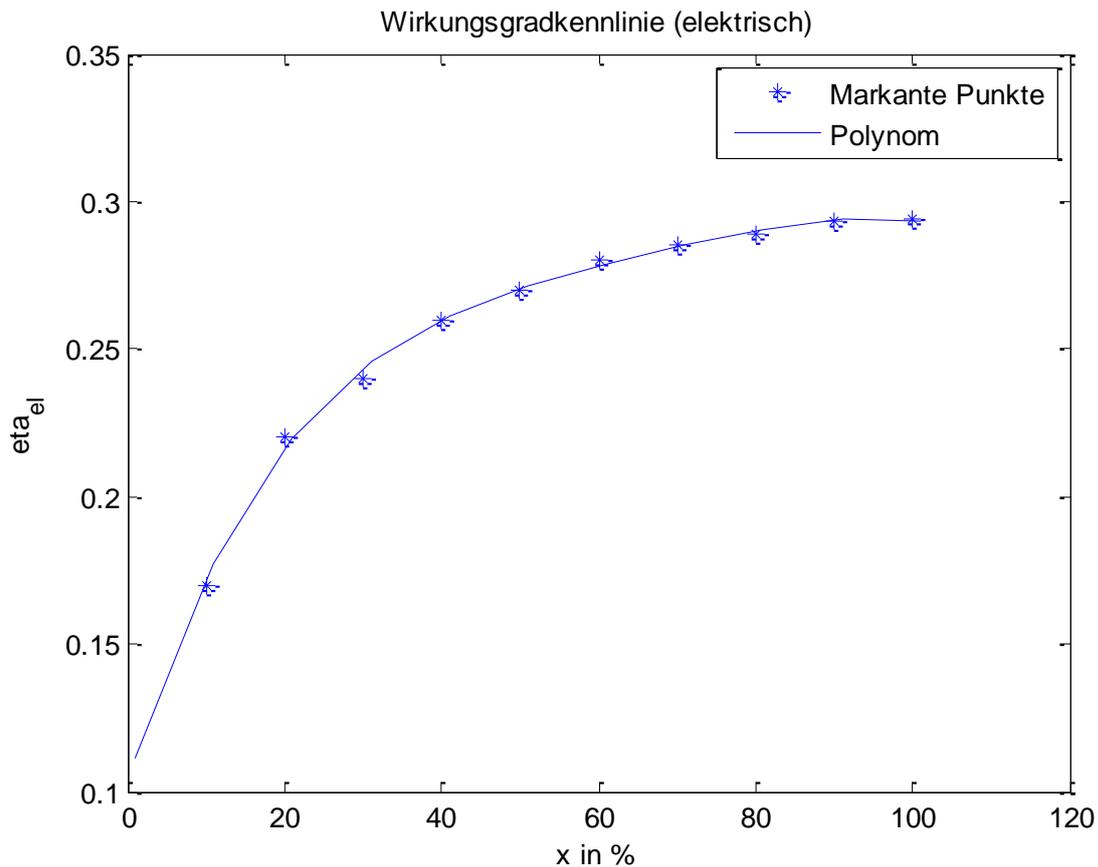


Abbildung 4.2-2: elektrischer Wirkungsgrad BHKW

Summiert man nun diese beiden Wirkungsgrade, dann erhält man den Gesamtwirkungsgrad. Der Gesamtwirkungsgrad kann um einiges höher sein als die beiden einzelnen, thermischen und elektrischen Wirkungsgrade.

$$\eta_{ges} = \frac{(P_{el} + \dot{Q}_{nutz})}{\dot{Q}_{br}} \quad (Gl. 4-10)^2$$

Um eine Abbildung des thermischen Wirkungsgrades bezogen auf die Nutzleistung zu erhalten, die wir für den wärmegeführten Einsatz benötigen, muss als erstes der

Die Wärmeerzeuger

Brennstoffeinsatz \dot{Q}_{br} aus der Gleichung (Gl. 4-8) ermittelt werden.

$$\dot{Q}_{br} = \frac{P_{el}}{\eta_{el}(x)} \quad (Gl. 4-11)$$

Mit dem gewonnenen Brennstoffeinsatz \dot{Q}_{br} folgt die Berechnung der Nutzwärme \dot{Q}_{nutz} aus der Gleichung (Gl. 4-9).

$$\dot{Q}_{nutz} = \eta_{th}(x) * \dot{Q}_{br} \quad (Gl. 4-12)$$

Die durchgeführten Berechnungen sind nun ausreichend, um den normierten Kostenstrom zu ermitteln.

$$\dot{K}_{nBHKW} = k * \eta_{th}(x) * \dot{Q}_{br} \quad (Gl. 4-13)$$

Die Gleichung (Gl. 4-13) spiegelt aber nur die Hälfte der Wahrheit wieder. Es muss darauf geachtet werden, dass ein BHKW auch bei einer wärmegeführten Ansteuerung eine gewisse Menge an Strom produziert. Dieser Strom oder elektrische Energie die erzeugt wird, muss nicht extra von Energiekonzernen erkaufte werden, sondern kann als direkter Ersatz oder als Zusatzeinnahmequelle angesehen werden. Bei der wärmegeführten Ansteuerung gibt es drei mögliche Fälle, wie der produzierte Strom genutzt wird.

1. Die durch den Wärmebedarf erzeugte Stromenergie ist vollkommen überflüssig angesichts des aktuellen Stromverbrauches.
2. Die durch den Wärmebedarf erzeugte Stromenergie wird zum Teil benötigt und der andere Teil wird in das Stromerzeugernetz gespeist.
3. Die durch den Wärmebedarf erzeugte Stromenergie wird vollkommen benötigt und wird restlos zum Eigenbedarf verbraucht.

Beachtet man alle drei Fälle dann muss die vorherige Gleichung für den Kostenstrom erweitert werden. Durch die Erzeugung von zusätzlicher Elektroenergie muss ein zweiter Kostenstrom für die Stromerzeugung von dem Kostenstrom für die thermische Energieerzeugung subtrahiert werden. Der Kostenfaktor ist dabei abhängig davon, welcher der oben aufgeführten Fälle des aktuellen Elektroenergiebedarfs zutreffend ist.

Die Wärmeerzeuger

Trifft der *erste Fall* zu, dann wird die erzeugte Strommenge zum aktuellen Strompreis, der sich nach der Leipziger Strombörse richtet, verkauft. Die zugehörige Gleichung sieht wie folgt aus.

$$\dot{K}_{nBHKW} = k * \eta_{th}(x) * \dot{Q}_{br} - k_{strom} * \eta_{el}(x) * \dot{Q}_{br} \quad (\text{Gl. 4-14})$$

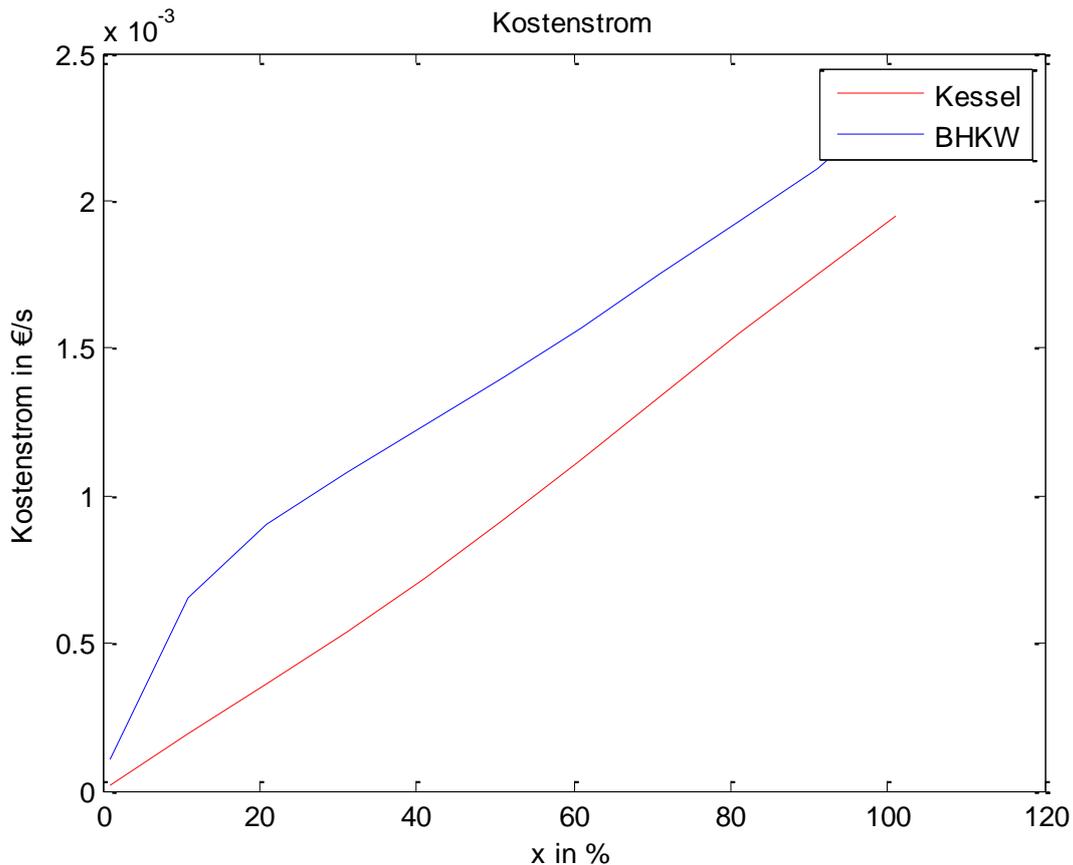


Abbildung 4.2-3: Kostenströme 1. Fall

In der Abbildung 4.2-3 sind die Kostenströme für die Kesselanlage und dem ersten Fall abgebildet. Es ist zu erkennen, dass die Kesselanlage unterhalb der BHKW Kennlinie liegt und somit in diesem Fall weniger Kosten als das BHKW bei der Wärmeerzeugung verursacht.

Betrachtet man den *zweiten Fall*, dann muss der Subtrahend in Gleichung (Gl. 4-14) noch weiter aufgespalten werden. Der Teil, der durch Eigenverbrauch nicht in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird, muss mit einem Kostenfaktor belegt werden, der so groß ist, wie der aktuelle Strompreis der öffentlichen Stromerzeuger. Der Grund hierfür ist, dass man zwar

Die Wärmeerzeuger

nicht direkt diesen Strom verkauft, aber Kosten einspart. Der auf diese Weise verwendete Strom muss also nicht vom öffentlichen Netz bezogen werden und damit auch nicht mit dem relativ hohen allgemeinen Strompreis bezahlt werden. Der andere Teil, welcher nicht als Eigenbedarf verwendet wird und somit überflüssig ist, wird wie im *ersten Fall* in das öffentliche Stromnetz eingespeist und wird nach dem aktuellen Preis an der Strombörse bemessen. Aus diesem Grund hat die resultierende Gleichung zwei Unterscheidungsfälle.

Der Kostenstrom wird bis zum benötigten Eigenbedarf x_{eigen} mit dem Strompreis von 2013 von über 20 ct/kWh faktorisiert. Nach dem Erreichen der Grenze von $x \geq x_{eigen}$, wird der Kostenfaktor prozentual berechnet. Ausgehend vom aktuellen Verbrauch wird der Anteil an Eigenbedarf und an Verkauf prozentual bestimmt und mit dem jeweiligen Kostenfaktor belegt. Der Verkaufspreis ist deutlich kleiner und ist ab diesem Zeitpunkt nach dem aktuellen Stromverkaufspreis an der Börse zu bemessen.

$$\dot{K}_{nBHKW} = \begin{cases} k * \eta_{th}(x) * \dot{Q}_{br} - k_{sparen} * \eta_{el}(x) * \dot{Q}_{br}, & x < x_{eigen} \\ k * \eta_{th}(x) * \dot{Q}_{br} - \left((k_{sparen} * \eta_{el}(x) * \dot{Q}_{br}) * \left(\frac{\frac{x_{eigen}}{x}}{\frac{100}{100}} \right) \right) \\ + \left((k_{strom} * \eta_{el}(x) * \dot{Q}_{br}) * \left(1 - \left(\frac{\frac{x_{eigen}}{x}}{\frac{100}{100}} \right) \right) \right), & x \geq x_{eigen} \end{cases}$$

(Gl. 4-15)

In der folgenden Abbildung 4.2-4 ist der *zweite Fall* für den Kostenstrom des BHKW abgebildet. Es wurde an einem sehr einfachen Beispiel des Eigenbedarfes für Strom x_{eigen} von 50% getestet. Man sieht deutlich, wie nach kurzer Anlaufphase des BHKW durch den enorm nach oben abweichenden Kostenfaktor für die Stromersparnis ein anfänglich negativer Kostenstrom entsteht. Dies bedeutet, dass das BHKW innerhalb dieser Phase tatsächlich Geld „erzeugt“. Das Paradoxon des BHKW in dieser Phase ist, dass nun also die tatsächlichen Kosten für den Betrieb deutlich geringer sind, als die Einsparung an Primärstrom. Somit wird zwar nicht direkt Geld „verdient“ aber eine gewaltige Summe eingespart, die an anderer Stelle bei Bedarf verwendet werden kann. Nachdem der Eigenbedarf von 50% gedeckt ist, ist ein

Die Wärmeerzeuger

erneuter Anstieg im Graphen zu erkennen. Dieser Anstieg resultiert daraus, dass sich ab diesem Zeitpunkt das Verhältnis von einsparbarem Strom zu verkaufbarem Strom zu Gunsten des verkaufbaren Stromes verschiebt. Da der Verkauf von Strom jedoch nicht annähernd so lukrativ ist, wie die Einsparung von Strom, steigt der Kostenstrom erneut an, je mehr Strom verkauft werden muss (siehe Abbildung 4.2-4).

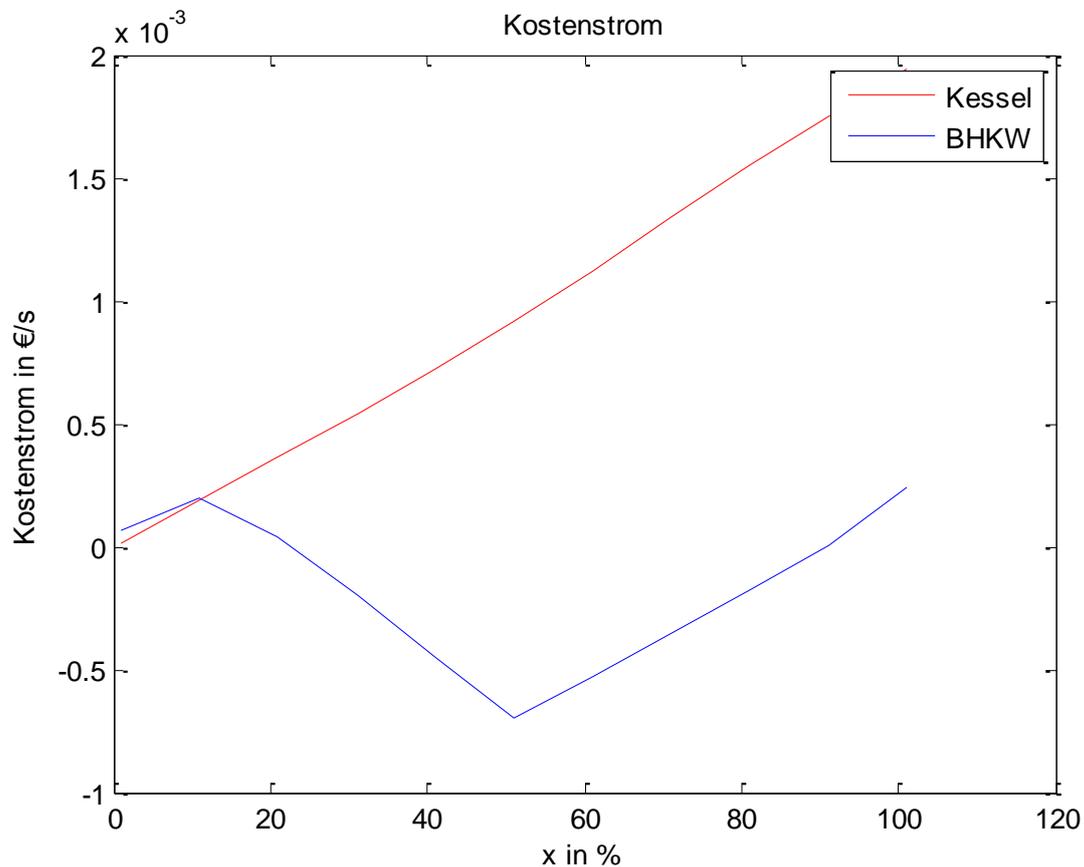


Abbildung 4.2-4: Kostenströme 2. Fall

Als letztes muss der *dritte Fall* betrachtet werden. Er ist ein Sonderfall für eine wärmegeführte Ansteuerung des BHKW's. Es wird die komplette Menge an erzeugter Elektroenergie zum Eigenbedarf verbraucht. Tritt dieser Fall ein, dann ist dies gleichzusetzen mit der Anforderung einer Strom geführten Ansteuerung des Blockheizkraftwerkes, zugleich wird aber auch die erzeugte Wärmeenergie gänzlich benötigt. Aus diesem Grund ist es ein Sonderfall.

Die entstehende Gleichung für den *dritten Fall* unterscheidet sich kaum von der Gleichung (Gl. 4-14). Der hier benötigte Kostenfaktor wird lediglich durch den Kostenfaktor ersetzt, der sich nach dem aktuellen Strompreis der Stromerzeugerkonzerne richtet. So wird auch wie im *zweiten Fall* die Einsparung an Strom so behandelt, als ob er direkt zum Stromerzeugerpreis

Die Wärmeerzeuger

verkauft werden würde. Die daraus resultierende Gleichung sieht wie folgt aus.

$$\dot{K}_{nBHKW} = k * \eta_{th}(x) * \dot{Q}_{br} - k_{sparen} * \eta_{el}(x) * \dot{Q}_{br} \quad (\text{Gl. 4-16})$$

Das Ergebnis der Gleichung (Gl. 4-16) wird in der folgenden Abbildung 4.2-5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ein negativer Kostenstrom wie auch schon im *zweiten Fall* erzeugt wird. Der Kostenstrom bleibt nun aber über den ganzen Definitionsbereich negativ, außer zu Beginn des Graphen, beim Anlauf des BHKW (siehe Abbildung 4.2-5).

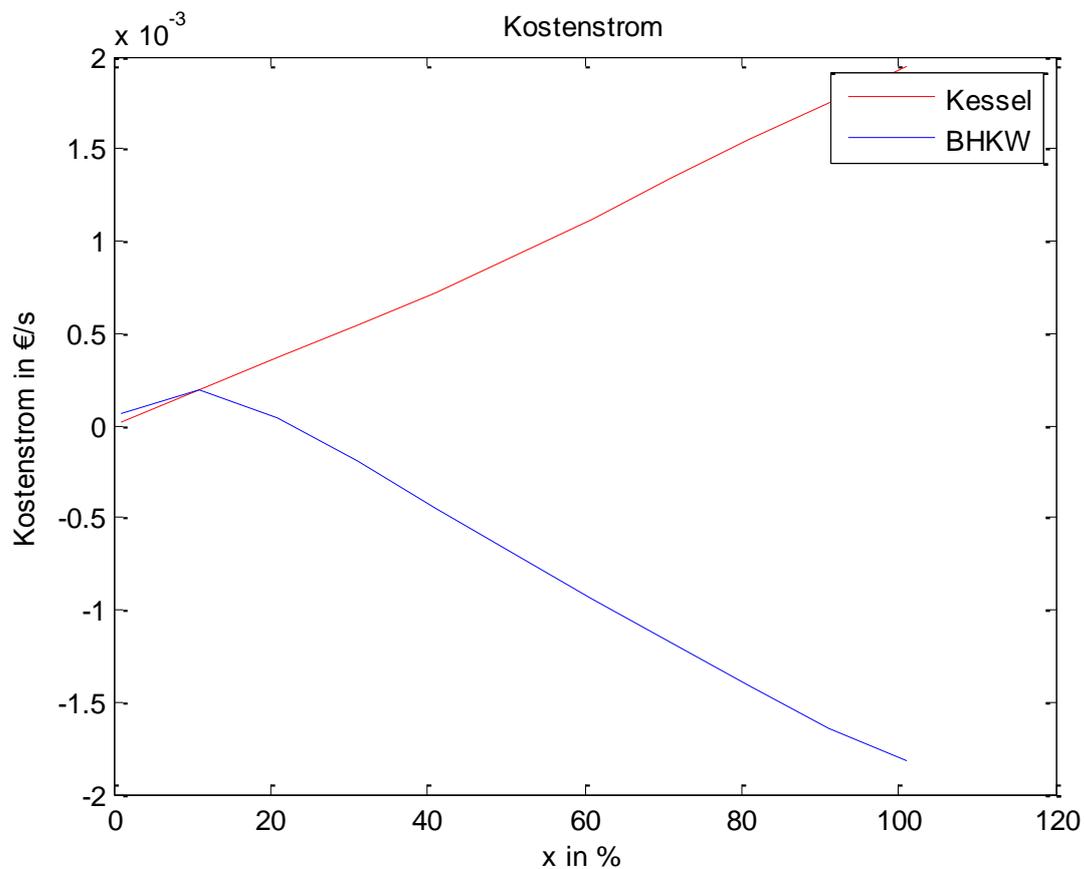


Abbildung 4.2-5: Kostenströme 3. Fall

4.3 Solarkollektor

[Der Solarkollektor oder auch Sonnenkollektor ist eine modulare Vorrichtung zur Erzeugung bzw. Wandlung von solarthermischer Energie in nutzbare Wärmeenergie. Diese Art der Energiegewinnung nutzt die vorhandenen Ressourcen der Sonne und zählt damit zu den Arten der regenerativen Energien. Solarthermische Wandler sind in der Lage, die kurzwellige solare Strahlung im gesamten Strahlungsbereich zwischen $0,2 \mu\text{m}$ bis $3 \mu\text{m}$ in Wärmeenergie umzuwandeln.]³ Es gibt einige verschiedene Arten von Kollektoren, zum Beispiel: Röhrenkollektoren, Flachkollektoren oder CPC-Spiegelkollektoren. Doch jeder dieser Kollektoren arbeitet mit dem gleichem Prinzip und hat in etwa den gleichen Aufbau. Jeder Solarkollektor besteht aus einem Absorberblech, das die Sonnenstrahlung einfängt und einem Absorberrohr, in dem eine Flüssigkeit erwärmt wird. In den meisten Fällen handelt es sich hierbei um ein Gemisch aus Wasser und Glykol. Bei einem Röhrenkollektor befindet sich der Absorber in einem Glasrohr, in dem ein Vakuum erzeugt wird. Durch das Vakuum wird eine besonders hohe Wärmedämmung erzeugt, sodass nur wenige Wärmeverluste vorhanden sind und somit der Wirkungsgrad maximiert wird. Es werden mehrere solcher Röhren zusammengeschaltet, die zusammen den Kollektor bilden. In den folgenden Ausführungen wird der Solarkollektor als CPC-Vakuumröhrenkollektor beschrieben und alle vorhandenen Kennwerte beziehen sich auf eine solche Bauart. Der CPC-Kollektor (**C**ompound **P**arabolic **C**oncentrator) zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass er auch bei einem ungünstigen Winkel zur Sonne oder auch bei diffuser Strahlung die solare Wärmestrahlung gut absorbieren kann. Den Grund hierfür liefert der Name des CPC-Kollektors, er besteht aus zwei konzentrisch angeordneten Glasröhren. Auf die innere der beiden Röhren ist die Absorberschicht aufgetragen. Beide Röhren befinden sich zudem noch vor einem Parabolspiegel, der das Licht bündelt. Durch eine solche Anordnung können durch die Röhrenkollektoren Wirkungsgrade erzeugt werden, die bis zu 30% über denen anderer Kollektoren liegen. Die Anschaffungskosten sind natürlich durch die erheblich komplexere Herstellung einer solchen Apparatur auch höher, dennoch wird selbst im Winter durch die effizientere Energiegewinnung ein ordentlicher Ertrag erzielt.

In der Abbildung 4.3-1 ist der funktionelle Aufbau eines Kollektors dargestellt. Die Sonnenstrahlen treffen hierbei auf das Kollektorglas, wobei ein Teil des emittierten Lichtes durch Reflektion an der Glasoberfläche zurückgeworfen wird. Der restliche Teil des Lichts passiert das Glas, trifft auf die Absorberschicht und wird in einem gewissen Maß absorbiert.

Die Wärmeerzeuger

Auch hier wird der Rest der Strahlung erneut reflektiert. Die absorbierte solare Energie befindet sich nun in der Absorberschicht und wird an das Wärmeträgerfluid abgegeben. Im sogenannten Stillstand wird der Kollektor nicht durchströmt und ist somit nur den Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Verharrt der Kollektor im Stillstand, so wird sich im Laufe der Zeit die sogenannte Stillstandtemperatur einstellen, die bei den unterschiedlichen Bauarten zwischen 50°C bis 300°C betragen kann. Durch eine immer größer werdende Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Kollektor steigt auch der Verlust an Wärme durch Wärmestrahlung des Mediums an die Umgebung. Einer solchen Verlustwärmestrahlung wird mit einer Wärmedämmung vorgebeugt.

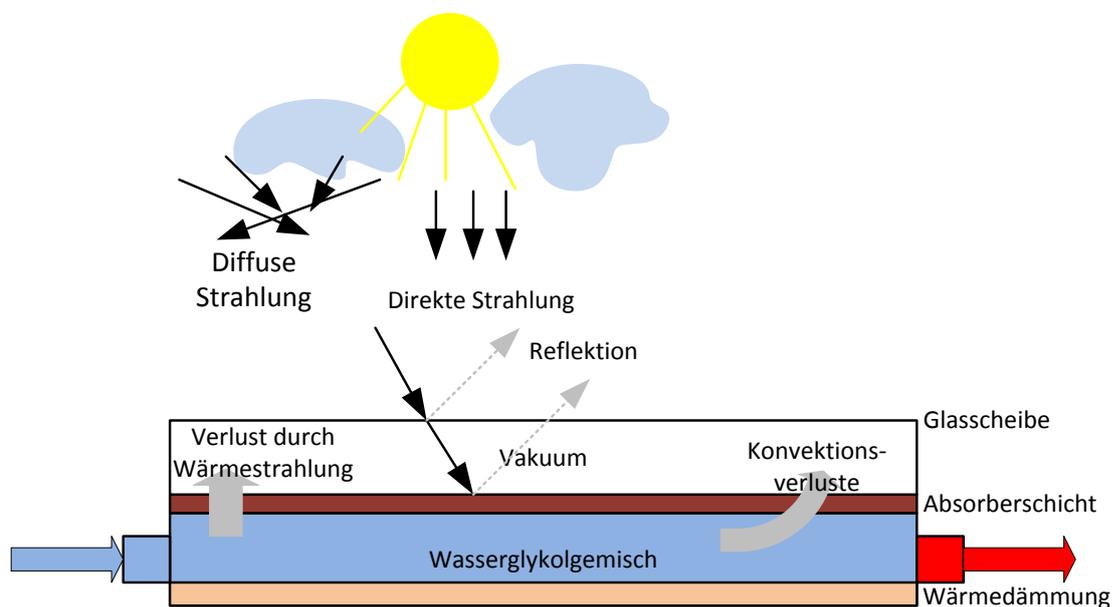


Abbildung 4.3-1: Kollektor Funktionsprinzip

Einen zusätzlichen Verlust an Wärme erzeugen die Konvektionsströme im Wärmeträgerfluid. Durch die teils unterschiedlich schnelle Erwärmung des Mediums entstehen Wärmekonvektionsströme, die nochmals einen thermischen Verlust an Energie erzeugen.

Des Weiteren ist die Fähigkeit eines Solarkollektors, die solare Strahlung in Wärme umzuwandeln, davon abhängig, wie stark eine solche Apparatur Licht absorbiert, transmittiert und es reflektiert. Wenn alle diese Größen der optischen Physik zusammen betrachtet werden, spricht man von dem so genannten optischen Wirkungsgrad oder auch Konversionsfaktor η_0 (eta_0). Dieser Konversionsfaktor setzt sich allerdings ausschließlich aus den beiden Größen Absorption und Transmission zusammen. Eine schwarze Platte, die mit Sonnenlicht beschienen wird, würde das Sonnenlicht nahezu vollständig absorbieren, aber gleichzeitig

Die Wärmeerzeuger

sehr viel Energie in Form von Wärmestrahlung wieder an die Umgebung abgeben. Dahingegen würde ein Spiegel oder eine spiegelartige Oberfläche das auftreffende Licht fast komplett reflektieren und somit kalt bleiben. Um solche Wärmeverluste zu minimieren, wurden spezielle Absorber entwickelt, die einen hohen Absorbptionsgrad bei gleichzeitig sehr gering bleibenden Emissionen aufweisen. Somit ergibt sich ein Absorbtionskoeffizient α , der ein Maß für die Umwandlung des Lichts in Wärme am Absorber ist. Betrachtet man nun die Apperatur genau, erkennt man, dass der Absorber vor äußeren naturalen Einflüssen geschützt werden muss. Um den Kollektor vor Regen, Schnee, Wind oder anderen Einflüssen zu schützen, wird daher ein Glas gewählt, dass den Witterungsbedingungen standhält und gleichzeitig so viele Sonnenstrahlen wie möglich zum Absorber hindurch lässt. Hierbei entstehen Reflektionen an der Oberfläche des Glases und somit erreicht nicht der gesamte Anteil der Strahlung den Absorber. Der Anteil des noch auf den Absorber auftreffenden Lichtes wird mit Hilfe des Transmissionskoeffizienten τ angegeben. Da aus der Betrachtung heraus der Anteil des Lichtes, der reflektiert wird, keine Rolle spielt, wird dieser für die Berechnung des Konversionsfaktors nicht mit einbezogen. Aus den beiden Werten, dem Absorbptionsgrad α und dem Transmissionsgrad τ , ergibt sich durch Multiplikation der beiden Koeffizienten die Formel zur Berechnung des Konversionsfaktors η_0 :

$$\eta_0 = \alpha * \tau \quad (\text{Gl. 4-17})$$

Btreibt man den Kollektor nun, muss Rücksicht auf die Arbeitsphasen genommen werden. Im Allgemeinen wird das dynamische Verhalten eines Solarkollektors mit Hilfe von drei Phasen unterschieden:

1. Aufheizphase
2. Betriebsphase
3. Abkühlphase

In der ersten Phase steigt die Kollektortemperatur langsam an und lässt sich am besten mit einem PT1-Verhalten darstellen. In der zweiten Phase ist die maximale Kollektortemperatur erreicht und ändert sich nur noch durch Umwelteinflüsse oder durch Änderung der Durchströmung. Am Abend, wenn keine Sonne mehr scheint, tritt Phase drei ein und die Kollektortemperatur nimmt langsam ab.

Um die Leistung zu bestimmen, die an einem Kollektor umgesetzt werden kann, betrachtet man die Phase zwei. Es wird in den folgenden Ausführungen nicht näher auf die anderen

Die Wärmeerzeuger

beiden Phasen eingegangen, da diese nur eine Zeitkonstante mit sich führen, die für den jeweiligen Aufbau zu bestimmen ist.

Anders als bei anderen Wärmegegewinnungsaggregaten, ist der Wirkungsgrad bei einem Solarkollektor nicht über die erzeugte bzw. abgenommene Leistung abgebildet. Bei einem Kollektor wird der Wirkungsgrad über eine Temperaturdifferenz abgetragen (siehe Abbildung 4.3-2).

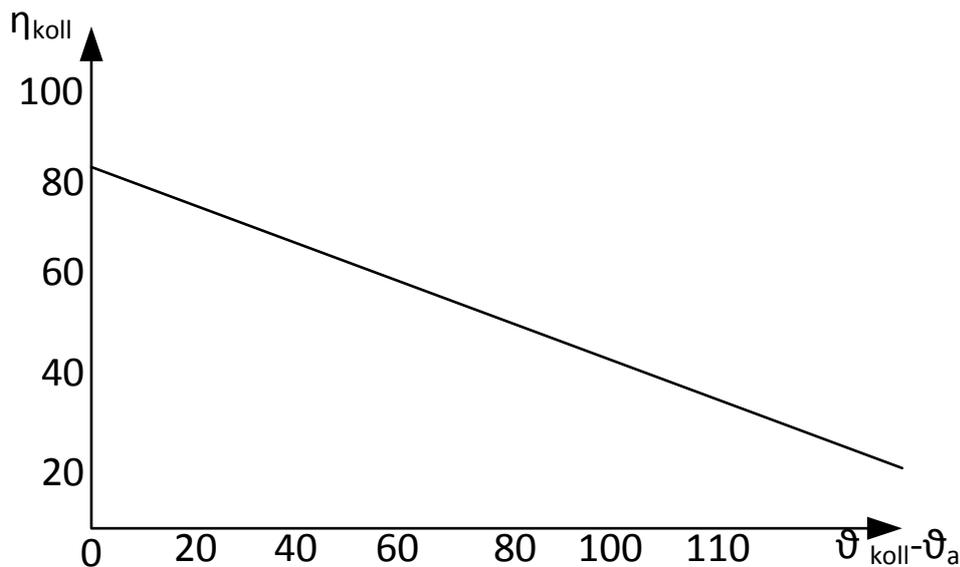


Abbildung 4.3-2: Kollektorwirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist davon abhängig, wie die beiden Temperaturen Kollektortemperatur θ_{koll} und Umgebungstemperatur oder Aussenlufttemperatur θ_a sich zueinander verhalten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die höchsten Wirkungsgrade erreicht werden, wenn eine relativ geringe Differenz der beiden Temperaturen vorliegt. Im realen Betrieb des Kollektors werden aber auch niedrigere Wirkungsgrade durch die unterschiedlichen Anforderungen an Temperaturniveaus in Kauf genommen. Zum Beispiel arbeitet der Kollektor bei einer Außentemperatur von 30°C und der Anforderung, einen Warmwasserspeicher im unteren Bereich zu beladen, dessen untere Speichertemperatur sich bei zirka $30\text{-}40^\circ\text{C}$ befindet, bei nahezu maximalem Wirkungsgrad. Hingegen muss eine höhere Temperatur erzeugt werden, um zum Beispiel das Brauchwasser ($50\text{-}60^\circ\text{C}$) zu versorgen. Demzufolge wird der Arbeitspunkt des Kollektors sich im unteren Bereich der Kennlinie befinden, und somit ein deutlich niedriger Wirkungsgrad erreicht. Eine solche Kollektorwirkungsgradkennlinie wird für jede Bauart in der Regel empirisch ermittelt. Sie ist in erster Linie davon abhängig, wie sich die Temperaturdifferenz ändert und wie stark die solare Strahlung ist. Die

Die Wärmeerzeuger

Kollektorkennlinie kann mit folgender Gleichung angenähert werden:

$$\eta_{koll} = \eta_0 - k_1 * \frac{\vartheta_{koll} - \vartheta_a}{q_s} - k_2 * \frac{(\vartheta_{koll} - \vartheta_a)^2}{q_s} \quad (\text{Gl. 4-18})^3$$

| | | |
|--------------------|---------------------------------|--|
| ϑ_{koll} | °C | Kollektortemperatur |
| ϑ_a | °C | Umgebungstemperatur |
| k_1 | W/Km ² | Koeffizient (Entspricht in etwa Wärmeverlustkoeffizient U_{tot}) |
| k_2 | W/K ² m ² | Koeffizient |
| q_s | W/m ² | Strahlungsleistung pro Fläche |

Durch das Polynom 2. Ordnung kann die Kennlinie angenähert werden. Die beiden Koeffizienten k_1 , k_2 und der optische Wirkungsgrad sind dabei je nach Apparatur zu verändern.

Da durch die theoretische Betrachtung des Kollektors eine solche Kennlinie nicht zur Verfügung steht und durch die Anforderung an die Allgemeingültigkeit dieser Arbeit, muss ein anderer Weg gewählt werden.

In der Abbildung 4.3-3 ist der Kollektor als physikalisches Modell dargestellt. Eine Pumpe liefert einen konstanten Massenstrom des Wärmeträgermediums durch den Kollektor. Bei Eintritt des Mediums in den Kollektor hat das Wasser-Glykol-Gemisch eine geringere Temperatur als beim Austritt. Die Eintrittstemperatur ist in etwa gleichzusetzen mit der Speichertemperatur des Warmwasserspeichers, der durch den Kollektor beladen wird. Durch die Anhebung des Temperaturniveaus durch den Kollektor erzeugt dieser eine Wärmestromzufuhr, die in der Abbildung 4.3-3 dargestellt ist. Betrachtet man noch die spezifische Wärmekapazität des Mediums, lässt sich die Gleichung für den Wärmestrom an einem wasserdurchflossenen Wärmetauscher anwenden. Zur Vereinfachung wird das Medium folgend als Wasser angesehen.

$$\dot{Q}_{koll} = c_w * \dot{m}_w * (\vartheta_{ein} - \vartheta_{aus}) \quad (\text{Gl. 4-19})$$

| | | |
|-------------------|---------------------|--|
| ϑ_{ein} | °C | Eintrittstemperatur |
| ϑ_{aus} | °C | Austrittstemperatur |
| c_w | J/(kgK) | spezifische Wärmekapazität (Wasser bei 20°C ~4,182 kJ/kgK) |
| \dot{m}_w | kg/m ² s | Massenstrom |

Die Wärmeerzeuger

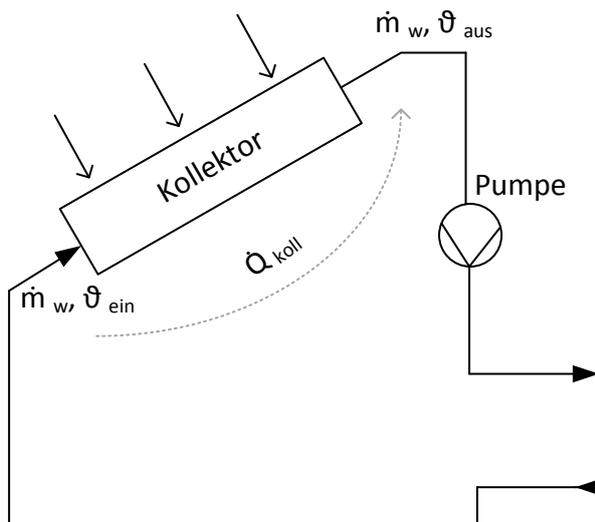


Abbildung 4.3-3: Kollektormodell ohne Speicher

Wendet man die Gleichung (Gl.4-19) auf das in Abbildung 4.3-3 gezeigte Modell an, so muss das Vorzeichen des Wärmestroms als negativ angesehen werden. Durch die daraus resultierende Gleichung wird anstelle eines Wärmestromverlustes ein Wärmestromgewinn dargestellt.

$$\dot{Q}_{koll} = c_w * \dot{m}_w * (-\vartheta_{ein} + \vartheta_{aus}) \quad (\text{Gl. 4-20})$$

In der Gleichung (Gl. 4-20) ist nun der Wärmestrom über den Kollektor dargestellt. Der Wärmestrom bezieht sich ausschließlich auf die Wasserseite des Kollektors. Um gemäß den Gesetzmäßigkeiten der Thermodynamik einen Energieerhaltungssatz aufstellen zu können, muss man folgend auch eine Betrachtung der Energie der Luftseite berücksichtigen. Die Energie, die durch den Kollektor erzeugt werden kann, ist von drei einfachen Faktoren abhängig.

$$\dot{Q}_{koll} = q_s * \eta * A \quad (\text{Gl. 4-21})$$

| | | |
|--------|------------------|------------------------------|
| q_s | W/m ² | Strahlungsleistung der Sonne |
| A | m ² | Fläche des Kollektors |
| η | % | Wirkungsgrad |

Die Wärmeerzeuger

Durch die Multiplikation der Strahlungsleistung mit der Fläche des Kollektors und dem Wirkungsgrad kann die Leistung der Luftseite dargestellt werden. Berücksichtigt man, dass der Energieerhaltungssatz gelten muss, können die beiden Gleichungen (Gl. 4-20) und (Gl. 4-21) gleich gesetzt werden.

$$\dot{Q}_{koll} = \dot{Q}_{koll} \quad (\text{Gl. 4-22})$$

$$c_w * \dot{m}_w * (-\vartheta_{ein} + \vartheta_{aus}) = q_s * \eta * A \quad (\text{Gl. 4-23})$$

Der Wirkungsgrad und die Austrittstemperatur des Kollektors sind zwei unbekannte Größen in der Betrachtung. Um die Gleichung (Gl. 4-19) verwenden zu können, wird sie nach der Austrittstemperatur umgestellt.

$$\vartheta_{aus} = \frac{c_w * \dot{m}_w * \vartheta_{ein} + Q_{koll}}{c_w * \dot{m}_w} \quad (\text{Gl. 4-24})$$

In [3] wird die Kollektortemperatur beschrieben als arithmetischer Mittelwert der beiden Temperaturen von Eintritt und Austritt des Kollektors. Durch die Gewinnung der Austrittstemperatur des Kollektors aus Gleichung (Gl. 4-24), kann die Kollektortemperatur in der Gleichung (Gl. 4-17), wie folgt ersetzt werden.

$$\vartheta_{koll} = \frac{(\vartheta_{ein} + \vartheta_{aus})}{2} \quad (\text{Gl. 4-25})^3$$

Durch die ausschließliche Betrachtung von Temperaturdifferenzen innerhalb der beschriebenen Gleichungen, sind die Temperaturen ϑ_{aus} und T_{aus} identisch. Als Konsequenz kann in der Gleichung (Gl. 4-25) das ϑ_{aus} mit der Gleichung (Gl. 4-24) ersetzt werden.

$$\vartheta_{koll} = \frac{(\vartheta_{ein} + \frac{c_w * \dot{m}_w * \vartheta_{ein} + Q_{koll}}{c_w * \dot{m}_w})}{2} \quad (\text{Gl. 4-26})$$

Die Gleichung (Gl. 4-26) spiegelt die Temperaturniveauanhebung innerhalb des Kollektors durch die Zufuhr der aus der solaren Energie gewonnenen Wärme wieder. Als letzter Schritt muss die Wirkungsgradgleichung für den Kollektor aufgelöst werden. Mit Hilfe der

Die Wärmeerzeuger

Gleichung (Gl. 4-26) wird die Kollektortemperatur innerhalb der Gleichung (Gl. 4-18) ersetzt. In Folge dessen ist der Wirkungsgrad ausschließlich von bekannten Größen abhängig.

$$\eta_{koll} = \eta_0 - k_1 * \frac{\left(\vartheta_{ein} + \frac{c_W * \dot{m}_W * \vartheta_{ein} + Q_{koll}}{c_W * \dot{m}_W}\right) - \vartheta_a}{q_s} - k_2 * \frac{\left(\frac{\vartheta_{ein} + \frac{c_W * \dot{m}_W * \vartheta_{ein} + Q_{koll}}{c_W * \dot{m}_W}}{2} - \vartheta_a\right)^2}{q_s} \quad (\text{Gl. 4-27})$$

Durch das beschriebene Gleichnis in (Gl. 4-22) wird als letzter Schritt die Kollektorwärme wie folgt ersetzt.

$$\eta_{koll} = \eta_0 - k_1 * \frac{\left(\vartheta_{ein} + \frac{c_W * \dot{m}_W * \vartheta_{ein} + q_s * \eta * A}{c_W * \dot{m}_W}\right) - \vartheta_a}{q_s} - k_2 * \frac{\left(\frac{\vartheta_{ein} + \frac{c_W * \dot{m}_W * \vartheta_{ein} + q_s * \eta * A}{c_W * \dot{m}_W}}{2} - \vartheta_a\right)^2}{q_s} \quad (\text{Gl. 4-28})$$

Erkennbar ist, dass der Wirkungsgrad von sich selber abhängig ist. Alle anderen Größen gelten als konstante oder auch als veränderliche Eingangsgrößen innerhalb des Systems. Sie sind davon abhängig, welcher Kollektortyp für die Berechnung ausgewählt wird und von Ort, Zeit und Winkellage der Apparatur. Bei der Gleichung (Gl. 4-28) wurde ein Lösungsverfahren angewendet, um den Ausdruck von der direkten Abhängigkeit von sich selber zu unterbinden. Durch den Erfolg eines solchen Verfahrens wurde folgende Gleichung für den Wirkungsgrad eines Kollektors unter genannten Bedingungen gewonnen (siehe Gl.4-29).

Die Wärmeerzeuger

$$\eta_{koll} = \frac{c_w \cdot \dot{m}_w \cdot \sqrt{a+b+c} + ((-c_w) \cdot k_2 \cdot \dot{m}_w \cdot \vartheta_{ein} + 2c_w \cdot k_2 \cdot \dot{m}_w \cdot \vartheta_a + (-c_w) \cdot k_1 \cdot \dot{m}_w) \cdot A + (-2c_w^2) \cdot \dot{m}_w^2}{k_2 \cdot q_s \cdot A^2}$$

(Gl. 4-29)

- a $(4\eta_0 \cdot k_2 \cdot q_s + k_1^2) \cdot A^2$
- b $(4c_w \cdot k_2 \cdot \dot{m}_w \cdot \vartheta_{ein} - 8c_w \cdot k_2 \cdot \dot{m}_w \cdot \vartheta_a + 4c_w \cdot k_1 \cdot \dot{m}_w) \cdot A$
- c $(4c_w^2 \cdot \dot{m}_w^2)$

Mit den drei Gleichungen (Gl. 4-24), (Gl.4-26) und (Gl.4-29) lässt sich die potentielle Wärmeleistung, die am Solarkollektor erzeugt werden kann, beschreiben. Die Betrachtung des Kollektors alleine ist jedoch nicht ausreichend, um genaue Aussagen über die Wärmeerzeugung treffen zu können. Weiterhin muss der zugehörige Warmwasserspeicher mit in die Berechnung einbezogen werden. Er liefert wichtige Ein- und Ausgangsgrößen, um das Kollektormodell beschreiben zu können. Im folgenden Kapitel wird der Zusammenhang von Kollektor und Speicher näher beschrieben.

4.4 Warmwasserspeicher

Ein Warmwasserspeicher ist ein Teil der Wärmeversorgung und Wärmeerzeugung in einem Gebäude. Er ist in erster Linie dafür zuständig, dass unregelmäßige Lastspitzen durch Abzweigen von Warmwasser aus dem Speicher abgefangen werden. Andere Wärmeerzeuger liefern zu dieser Zeit schon maximale Leistung oder sind noch nicht in Betrieb. Die Inbetriebnahme eines zusätzlichen Wärmeaggregates würde innerhalb einer Lastspitze zu viel Zeit in Anspruch nehmen und aus diesem Grund wird ein Warmwasserspeicher vorsorglich mit Energie gespeist. Wie viel Energie bzw. Warmwasser in den Speicher geladen wird, ist davon abhängig, wie der Lastgang prognostiziert wird.

Um einen Speicher mathematisch darstellen zu können, muss man sich die theoretische Modellbildung zu Nutze machen. Im einfachsten Fall besteht der Speicher aus einem homogenen Inhalt, dessen Zustand an jedem Ort identisch ist. Die Abbildung 4.4-1 zeigt ein Modell für ein offenes System. Hierbei ist E die Energie und m die Masse innerhalb des Speichers. Zudem symbolisieren die Pfeile jeweils die zu- und abströmende Masse \dot{m} und den Energiestrom \dot{E} .

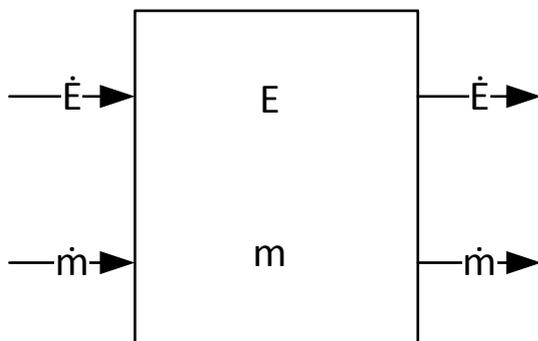


Abbildung 4.4-1: offenes System

Betrachtet man Systemgrenzen gibt es drei verschiedene Systemarten für die Modellierung. Ein „abgeschlossenes System“ hat weder einen Massefluss, noch einen Energiefluss. Dies tritt in der Realität jedoch nie auf, da immer Energie an die Umgebung, zum Beispiel in Form von Wärmeverlusten, abgegeben wird. Erweitert man dieses Modell unter der gewonnenen Erkenntnis, so erhält man das „geschlossene System“. Es beschreibt ein Modell in dem die Masse konstant bleibt aber die Energie variiert. Im Fall des Wärmespeichers muss die dritte Art angewendet werden. Das „offene System“ zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl ein

Die Wärmeerzeuger

Masse- als auch ein Energietransport vollzogen wird. Weitergehend muss betrachtet werden, wie viele Phasen eines Stoffes oder ob sogar mehrere Stoffe in einem System existieren. In einem Warmwasserspeicher befindet sich Wasser in flüssiger Form. Da eine Temperatur von über 100 °C nie erreicht wird, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Aggregatzustand nicht ändert. Es wird also von einem Einphasensystem und auch nur von einem Stoff ausgegangen. Daher ist die Modellbildung relativ trivial, wenn man von nur *einer* homogenen Schicht ausgeht. Die Energie und die Masse in einem offenen System sind die jeweiligen Erhaltungsgrößen und sie liefern die physikalische Grundlage für die Modellbildung. Da diese Erhaltungsgrößen bei der Modellbildung bilanziert werden müssen, werden diese Größen zu Bilanzgrößen.

Im nächsten Schritt muss entschieden werden, welche Form die Bilanzgleichungen aufweisen sollen, um der Verwendung der gewonnenen Informationen gerecht zu werden. Ob eine *integrale Form* oder eine *differenzielle Form* zum Einsatz kommt, hängt von der Verwendung ab. Will man ein Strömungsprofil beschreiben oder eine bestimmte Temperatur an einem bestimmten Ort im Bilanzraum, so müssen die Bilanzgleichungen als Differenzialgleichungen beschrieben werden. Wenn es ausreichend ist, die Querschnittstemperatur des Mediums zu kennen, da kleine örtliche Differenzen keine übergeordnete Rolle spielen, so ist die Verwendung von Integralgleichungen notwendig. Für die Anwendung der Modellbildung innerhalb dieser Arbeit ist es ausreichend die Bilanzgrößen als Querschnitt über den Bilanzraum zu sehen. Daher ist die *integrale Form* der Bilanzgleichungen anzuwenden.

Man kann das in Abbildung 4.4-1 dargestellte System mit den gewonnenen Informationen mit Hilfe von zwei Integralgleichungen beschreiben. Die erste Gleichung ist eine Massenbilanz. Die Massenbilanz beschreibt die Änderung der Masse des Systems. Sie besteht aus der Summe aller zufließenden Massenströme in das System, von denen man die Summe aller abfließenden Massenströme aus dem System heraus subtrahiert.

$$\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_{ei} - \sum_j \dot{m}_{aj} \quad (\text{Gl. 4-30})$$

Bei der Modellierung eines Pufferspeichers trifft man die Annahme, dass sich die Masse des Systems nicht ändert. Somit bleibt sie konstant und muss nicht bilanziert werden.

Die Wärmeerzeuger

Die Energiebilanz in einem offenen System wird mit Hilfe der Enthalpie beschrieben. Die Enthalpie ist der Wärmeinhalt von einem thermodynamischen System. Weiter wird sie aus der Transformation von der Inneren Energie gewonnen. Unter der Annahme von einem konstanten Druck wird die Enthalpiebilanz wie folgt beschrieben.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial m} * \frac{dm}{dt} + \frac{\partial H}{\partial \vartheta} * \frac{d\vartheta}{dt} \quad (\text{Gl. 4-31})$$

Nach der Lösung der partiellen Ableitungen innerhalb der Gleichung (Gl. 4-31) vereinfacht sich die Gleichung noch weiter.

$$\frac{dH}{dt} = h * [\sum_i \dot{m}_{ei} - \sum_j \dot{m}_{aj}] + c_p * m * \frac{d\vartheta}{dt} \quad (\text{Gl. 4-32})$$

Die Enthalpie wird noch weiter umgeformt. In der Gleichung (Gl. 4-32) ist die Temperaturänderung des Systems nach der Zeit enthalten. Sie ist die Abbildungsgröße für die Bilanzgröße H. So wird die Gleichung (Gl. 4-32) weiter so umgestellt, dass der folgende Ausdruck entsteht.

$$c_p * \frac{d(\vartheta * m)}{dt} = \left[\sum_i (h_{ei} - h) * \dot{m}_{ei} - \sum_j (h_{aj} - h) * \dot{m}_{aj} \right] + [\sum_i \dot{Q}_{zui} - \sum_j \dot{Q}_{abj}] \quad (\text{Gl. 4-33})$$

Im nächsten Schritt kann die Massenbilanz $\frac{dm}{dt}$, die in der Gleichung (Gl. 4-33) steckt eliminiert werden, indem man sie aus der linken Seite der Gleichung dividiert. Damit vereinfacht sich die Gleichung wie folgt.

$$c_p * m * \frac{d\vartheta}{dt} = [\sum_i (h_{ei} - h) * \dot{m}_{ei}] + [\sum_i \dot{Q}_{zui} - \sum_j \dot{Q}_{abj}] \quad (\text{Gl. 4-34})$$

Als Ergebnis stehen der Modellbildung so eine extensive und eine intensive Bilanzgröße zur Verfügung. Die intensive Bilanzgröße H wird mit Hilfe der Temperatur ϑ abgebildet. In unserem Fall ist die extensive Bilanzgröße m ein Teil der Eingangsgrößen und muss nicht

Die Wärmeerzeuger

bestimmt werden, sondern ist vorzugeben. Daher vereinfacht sich das Modell für dieses einphasige homogene System. Es reicht die Bilanzierung für die Energie. Passt man die Abbildung 4.4-1 an, entsteht das folgende Modell.

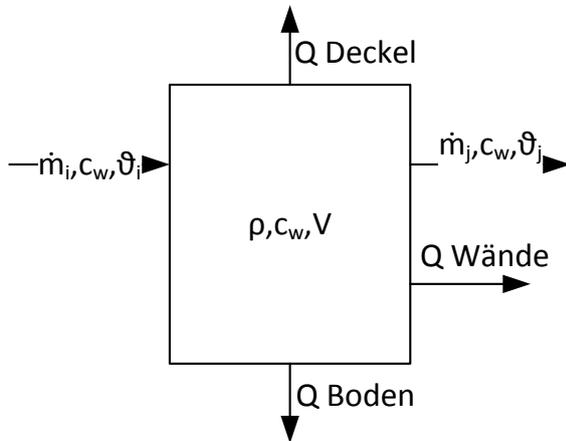


Abbildung 4.4-2: Einkapazitätenmodell

In der Abbildung 4.4-2 ist das Einkapazitätenmodell für den Warmwasserspeicher dargestellt. Es besteht aus nur einem Bilanzraum. Im einfachsten Fall existieren nur ein Zufluss und nur ein Abfluss. Energieverluste werden durch Wärmeabgabe über die Wände des Speichers simuliert. Da innerhalb dieser Arbeit die Betrachtung von Wärmeverlusten die Darstellung des Verfahrens verkomplizieren würde, wird zu Gunsten der besseren Darstellung auf die Berechnung von Wärmeverlusten innerhalb des Speichers verzichtet. Aus diesem Grund darf die Berechnung des Speichers nicht als exakt angenommen werden. Sie dienen lediglich zur Orientierung.

Um die Energie des Speichers darzustellen, wird die Temperatur dieses Einkapazitätenmodells mit der folgenden Gleichung beschrieben.

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\sum \dot{Q}_{zu} - \sum \dot{Q}_{ab}}{V \cdot c_w \cdot \rho} \quad (\text{Gl. 4-35})$$

Wird der Speicher nur über den Kollektorkreis beladen, kann die Summe der Energiezuflüsse auf lediglich eine Energiequelle reduziert werden. Betrachtet man ausschließlich das Beladen des Speichers, dann kann die Gleichung noch weiter vereinfacht werden.

Die Wärmeerzeuger

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\dot{m}_w * c_w * (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL})}{V * c_w * \rho} \quad (\text{Gl. 4-36})$$

| | | |
|------------------|-------------------|--------------------|
| ρ | kg/m ³ | Dichte |
| V | m ³ | Volumen |
| ϑ_{VL} | °C | Vorlauftemperatur |
| ϑ_{RL} | °C | Rücklauftemperatur |

Die Wärmezufuhr erfolgt über einen Wärmetauscheransatz. So wird im Speicher eine Heizwendel durchflossen, die mit dem Pumpenmassenstrom vom Solarkollektor durchflossen wird. Dessen Vorlauftemperatur, entspricht der Temperatur, die der Kollektor durch die Umwandlung von Solarenergie in thermische Energie umwandeln konnte. Die Rücklauftemperatur aus Gleichung (Gl. 4-36) kann nicht direkt erschlossen werden. Hierfür muss ein genauer Wärmetauscheransatz gewählt und durchdacht werden. Im Allgemeinen sieht die Gleichung zur Wärmeübertragung bei einem Wärmetauscher wie folgt aus.

$$\Phi = k * A * \Delta\vartheta_m \quad (\text{Gl. 4-37})^4$$

| | | |
|---------------------|--------------------|------------------------------|
| Φ | W | übertragene Wärmeleistung |
| k | W/m ² K | Wärmedurchgangskoeffizient |
| A | m ² | Wärmeüberträgerfläche |
| $\Delta\vartheta_m$ | K | mittlere Temperaturdifferenz |

Die übertragene Wärmeleistung aus Gleichung (Gl. 4-37) entspricht der Leistung die in Gleichung (Gl. 4-23) beschrieben wird. Die Größen k und A müssen definiert werden, so bleibt die mittlere Temperaturdifferenz als einzige Unbekannte bestehen. Sie wird wie folgt definiert.

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_{gr} - \Delta\vartheta_{kl}}{\ln \frac{\Delta\vartheta_{gr}}{\Delta\vartheta_{kl}}} \quad (\text{Gl. 4-38})^4$$

Die Wärmeerzeuger

$\Delta\vartheta_{gr}$ K große örtliche Temperaturdifferenz

$\Delta\vartheta_{kl}$ K kleine örtliche Temperaturdifferenz

Wendet man die Gleichung (Gl. 4-37) auf das Beispiel für einen Wärmetauscher an, der einer wasserdurchflossenen Heizspirale entspricht, wird die Gleichung wie folgt angepasst.

$$\Delta\vartheta = \frac{\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}}{\ln \frac{\vartheta_{VL} - \vartheta_M}{\vartheta_{RL} - \vartheta_M}} \quad (\text{Gl. 4-39})^5$$

ϑ_M °C Mediumtemperatur

Die Gleichung (Gl. 4-39) ist dem [5] entnommen. Sie beschreibt die mittlere Temperaturdifferenz bei der Wärmeübertragung bei freier einphasiger Strömung, genauer bei Wärmeabgabe von Heizkörpern beim Betrieb mit Warmwasser. Die Mediumtemperatur ist im beschriebenen Fall, die Speichertemperatur. Versucht man die Gleichung (Gl. 4-39) nach der Rücklauftemperatur aufzulösen, so erhält man einen wiederum verschachtelten Term, der nicht auf analytischem Weg gelöst werden kann. Im [5] ist jedoch gleichermaßen definiert, dass bei kleinen Temperaturspreizungen von Vorlauftemperatur zu Rücklauftemperatur die Gleichung der Temperaturdifferenz vereinfacht werden kann. Hierzu ist erforderlich, dass der Quotient der Differenzen von Rücklauf zu Medium und Vorlauf zu Medium größer als 0,7 sein muss. Trifft diese Bedingung zu, dann kann mit der arithmetisch gemittelten Übertemperatur gerechnet werden. Es gilt dann:

$$\Delta\vartheta = \left(\frac{\vartheta_{VL} + \vartheta_{RL}}{2} \right) - \vartheta_M \quad (\text{Gl. 4-40})^5$$

Wendet man die gewonnen Erkenntnisse auf den Wärmeübertrageransatz an, so können die Gleichungen (Gl. 4-40) und (Gl. 4-21) in den Ansatz (Gl. 4-37) eingesetzt werden. Wird die gewonnene Gleichung nach der Rücklauftemperatur umgestellt, so erhält man folgende Gleichung.

Die Wärmeerzeuger

$$\vartheta_{RL} = -(\vartheta_{VL} - 2 * \vartheta_M - \left(\frac{2 * \dot{Q}_{koll}}{k * A}\right)) \quad (\text{Gl. 4-41})$$

Damit sind alle Probleme für das Einkapazitätenmodell des Speichers gelöst. In der Realität jedoch ist eine einzige homogene Schicht bei einem Pufferspeicher sehr unwahrscheinlich. Für gewöhnlich bilden sich auf Grund der Höhe und der unterschiedlich schnellen Erwärmung des Speichers Schichten aus. Man spricht hierbei auch von einem Schichtspeichermodell. Jede Wasserschicht hat eine andere Temperatur und damit auch eine andere Kapazität. Es muss also eher von einem Mehrkapazitätenmodell ausgegangen werden, damit das Speichermodell im Ansatz den reellen Gegebenheiten entspricht. Jede dieser Schichten mit unterschiedlicher Temperatur, beeinflusst jeweils die Schichten, an die sie angrenzt. Physikalische Phänomene, wie zum Beispiel Wärmeleitung und Konvektionsströme, sind hierbei zu berücksichtigen. Der Ansatz für ein solches Modell ist aus dem [4] entnommen. Um ein solches Modell einfach zu beschreiben, sind drei Schichten vollkommen ausreichend. Um die Energie innerhalb der Schichten zu beschreiben, eignet sich eine Betrachtung der Exergie. Im Zuge dieser Arbeit wurde aber auf eine Betrachtung der Exergie bewusst verzichtet und stattdessen die Enthalpie gewählt. Anhand dieses Konzeptes lässt sich das Modell vielfältig und nach Belieben erweitern.

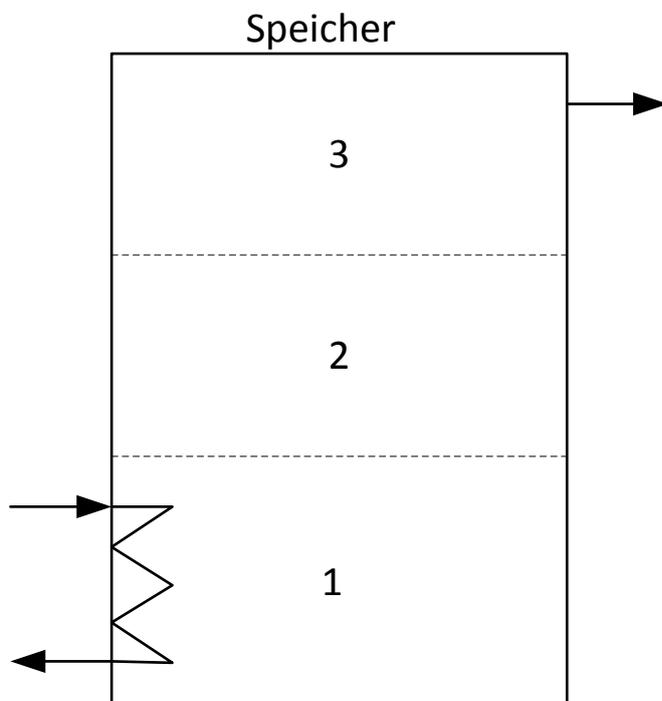


Abbildung 4.4-3: Schichtspeicher

Die Wärmeerzeuger

In der Abbildung 4.4-3 ist der Wärmespeicher als Schichtspeicher dargestellt. Wie der Name schon sagt, wurde er in drei gleich große Schichten geteilt. In der ersten Schicht befindet sich der Wärmetauscher, welcher die erzeugte Wärmeenergie des Solarkollektors in den Wärmespeicher einspeist. Die zweite Schicht ist eine Zwischenschicht, die den Übergang der Wärmemenge zeitlich und auch optisch anhand der Temperaturänderung symbolisieren soll. In der dritten und letzten Schicht, die sich am oberen Ende des Speichers befindet, kann eine Wärmeabgabe realisiert werden. Ausgehend vom [4] wird in mehreren Literaturstellen vorgeschlagen, den Wärmeaustausch zwischen den Schichten auf ein eindimensionales Wärmeleitungsproblem zu reduzieren. Mit einer effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} wird der Wärmeaustausch zwischen den Schichten charakterisiert. Die Wärmeleitung zwischen den angrenzenden Schichten wird mit folgenden Gleichungen berechnet:

$$\Phi_{Leit,\overline{k,k-1}} = -A_{QS} * \frac{\lambda_{eff}}{d_{\overline{k,k-1}}} * (\vartheta_k - \vartheta_{k-1}) \quad (\text{Gl. 4-42})^4$$

bzw.

$$\Phi_{Leit,\overline{k,k+1}} = -A_{QS} * \frac{\lambda_{eff}}{d_{\overline{k,k+1}}} * (\vartheta_k - \vartheta_{k+1}) \quad (\text{Gl. 4-43})^4$$

| | | |
|--------------------------------|----------------|---|
| $\Phi_{Leit,\overline{k,k-1}}$ | W | Wärmestrom zwischen Schicht k und k-1 |
| $\Phi_{Leit,\overline{k,k+1}}$ | W | Wärmestrom zwischen Schicht k und k+1 |
| A_{QS} | m ² | horizontale Querschnittsfläche des Speichers |
| λ_{eff} | W/mK | effektive Wärmeleitfähigkeit |
| $d_{\overline{k,k-1}}$ | m | Abstand zwischen den Schichtmittelpunkten k und k-1 |
| $d_{\overline{k,k+1}}$ | m | Abstand zwischen den Schichtmittelpunkten k und k+1 |
| ϑ_k | °C | Temperatur der Schicht k |
| ϑ_{k-1} | °C | Temperatur der Schicht k-1 |
| ϑ_{k+1} | °C | Temperatur der Schicht k+1 |

Unter der Berücksichtigung von Temperaturunterschieden innerhalb und auch zwischen den verschiedenen Schichten treten in der Realität auch Konvektionsströme auf. Diese tragen dazu bei, dass sich die Schichten schneller vermischen und dadurch der Temperatenausgleich beschleunigt wird. Weil die Konvektionsströme aber nicht betrachtet werden, muss durch

Die Wärmeerzeuger

Zuhilfenahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit die Ausgleichszeit realistisch gestaltet werden. Wendet man die gewonnenen Informationen auf die Gleichung für einen Einkapazitätspeicher an, so erhält man eine bzw. drei Gleichungen für das in Abbildung 4.4-3 dargestellte Modell.

$$\frac{d\vartheta_1}{dt} = \frac{\dot{m}_w * c_w * (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) + (-A_{QS} * \frac{\lambda_{eff}}{d_{1,2}} * (\vartheta_1 - \vartheta_2))}{V * c_w * \rho} \quad (\text{Gl. 4-44})$$

$$\frac{d\vartheta_2}{dt} = \frac{(-A_{QS} * \frac{\lambda_{eff}}{d_{2,1}} * (\vartheta_2 - \vartheta_1)) + (-A_{QS} * \frac{\lambda_{eff}}{d_{2,3}} * (\vartheta_2 - \vartheta_3))}{V * c_w * \rho} \quad (\text{Gl. 4-45})$$

$$\frac{d\vartheta_3}{dt} = \frac{(-A_{QS} * \frac{\lambda_{eff}}{d_{3,2}} * (\vartheta_3 - \vartheta_2))}{V * c_w * \rho} \quad (\text{Gl. 4-46})$$

Die drei Gleichungen sind die Erweiterung der Gleichung (Gl. 4-35), welche die Temperaturänderungen innerhalb der drei Speicherschichten für das Mehrkapazitätenmodell darstellen.

Die Speichertemperatur wird zu einem Vektor $\overrightarrow{dT_{sp}(k)}$ zusammengefasst. Mit Hilfe eines Lösungsverfahrens innerhalb von MatLab lässt sich die Lösung des Gleichungssystems berechnen. Damit steht dem Modell die Speichertemperatur zur Verfügung. Sie ist das direkte Ergebnis des solaren Ertrags durch den Solarkollektor. Werden die beiden Modelle für Solarkollektor und Mehrkapazitätenpufferspeicher miteinander verbunden, erhält man das gesamte Modell für die regenerative Energieerzeugung durch einen Solarkollektor. Dieses Modell lässt sich beliebig erweitern und konkretisieren.

In der folgenden Abbildung wird das Modell schematisch dargestellt.

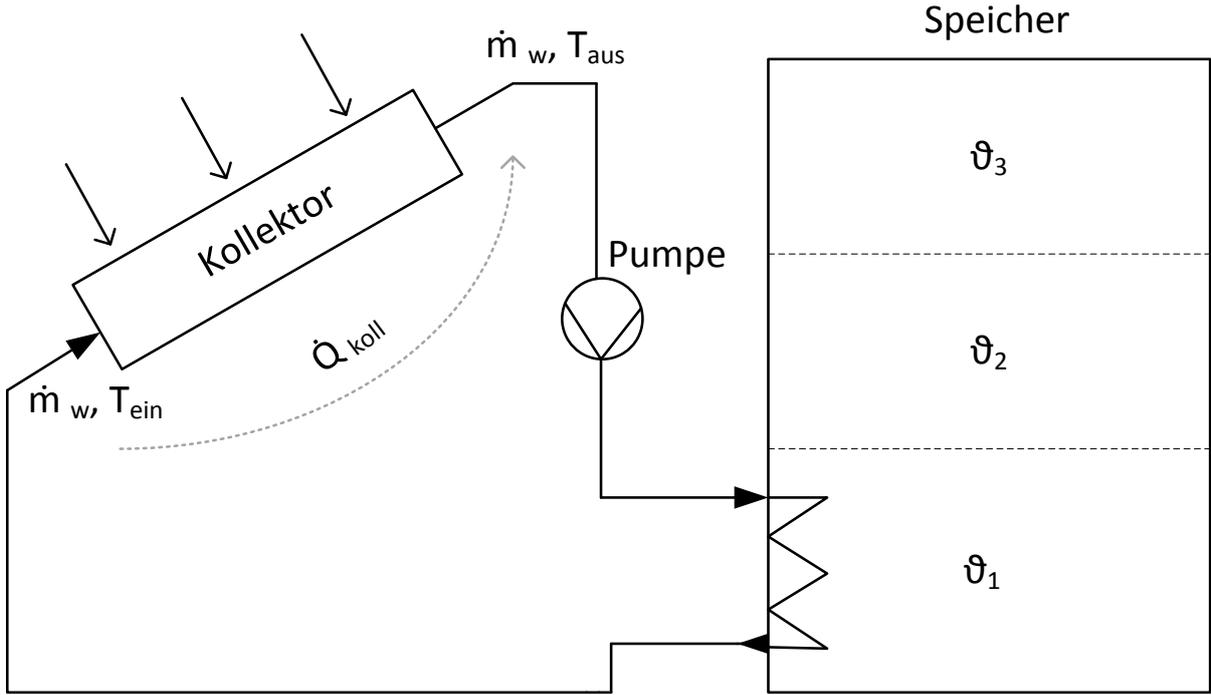


Abbildung 4.4-4: Kollektor-Speicher Modell

4.5 Verifikation des Kollektor-Speicher Modells

Nachdem alle notwendigen Gleichungen entwickelt wurden, muss das Speichermodell in Kombination mit dem Solarkollektor getestet werden. Hierzu dient zunächst ein normales Matlab Programm.

Das Modell von Solarkollektor in Kombination mit dem Mehrschichtspeicher, wobei die übertragene Wärme mittels eines Wärmetauscheransatzes übertragen wird, wurde mit dem Programmcode in Anhang A2 und A3 getestet.

Die Matlab function „*schichttemp*“ enthält alle notwendigen Größen für den Matlabworkspace. Zudem sind die Gleichungen für Wirkungsgrad und Kollektortemperaturen in ihr beschrieben. Nachdem in der Funktion der Kollektor physikalisch berechnet worden ist, wird das Gleichungssystem für die Speichertemperaturen aufgestellt. Mit Hilfe des in Matlab integrierten Lösungsverfahrens für Differentialgleichungssysteme, wird im nächsten Schritt der Funktionsaufruf mit einer integrierten Schleife dazu verwendet, das Kollektor-Speicher System zu testen. Hierfür werden einige Startgrößen benötigt. Die beiden Kollektortemperaturen für Vorlauf und Rücklauf werden definiert auf jeweils 40°C Vorlauf und 30°C Rücklauf, was einer Temperaturspreizung von 10°C entspricht. Mit der Temperaturspreizung von Vor- und Rücklauf kann man die Menge an übertragener Wärme am Tauscher steuern. Je größer der Temperaturunterschied ist, desto mehr Wärme wird übertragen. Weiter wird ein Zeithorizont von 3000 Sekunden definiert. Innerhalb dieser Zeit wird die Funktion simuliert.

Für die Lösung der Differenzialgleichungen wird der Matlابلöser „ode45“ gewählt. Das implementierte Verfahren hinter dem „ode45“ Löser ist das Runge-Kutta-Verfahren zur numerischen Lösung von Differenzialgleichungen mit einem Anfangswertproblem. Im Allgemeinen ist das Runge-Kutta-Verfahren die Weiterentwicklung des Euler-Verfahrens. Im speziellen ist das Verfahren ein eingebettetes Runge-Kutta-Verfahren mit der Ordnung $p=5$ der Lösung und der Ordnung $p=4$ für die eingebettete Lösung. Dieses eingebettete Verfahren wurde von den amerikanischen Mathematikern J.R. Dormand und P.J. Prince entwickelt. Genauer steht „ode45“ für „*Ordinary Differential Equation*“ mit der Ordnung 4 für die eingebettete Lösung und 5 für die Lösung.

Damit das Lösungsverfahren einen Erfolg erzielen kann, muss ein Anfangswert übergeben werden. Im speziellen Fall muss ein Anfangswertvektor übergeben werden, in dem die

Die Wärmeerzeuger

Anfangswerte der Speichertemperaturen definiert sind. Das numerische Ergebnis des Lösungsverfahrens ist eine Matrix mit drei Spalten. Jede Spalte symbolisiert eine Speicherschicht und jede Zeile einen Zeitpunkt innerhalb der 3000s Simulationszeit. Damit die Simulation nicht nach 3000s abgebrochen wird, ersetzt nach einem Schleifendurchlauf die letzte Zeile der Lösungsmatrix den Anfangswertvektor. So wird realisiert, dass sich der Speicher weiter erwärmen kann. Da keine physikalischen Gesetzmäßigkeiten das Modell außerhalb der Gleichungen einschränken, muss ein Abbruchkriterium dafür Sorge tragen, dass sich das Modell nicht bis ins Unendliche aufheizt. Als Abbruchkriterium dient die Kollektorvorlauftemperatur. Wird der Wert von 99°C überschritten, bricht die Simulation ab. Weiterhin wird auch das Kriterium für die in Kapitel 4.4 beschriebene Temperaturdifferenz am Wärmetauscher ausgewertet. Dies ist notwendig, weil in [5] die verwendete Gleichung eben nur dann Gültigkeit besitzt, wenn der Quotient oberhalb von 0,7 liegt.

Das Ergebnis dieser Modellverifikation ist nur im Kommandofenster des Programms sichtbar. Es beinhaltet eine Vielzahl an Zeilen, in denen die einzelnen Zeilen und Spalten der Speichermatrix sowie die sekundlichen Änderungen von Kollektortemperatur und Rücklauftemperatur zu sehen sind. Aufgrund der Menge an Daten und der unanschaulichen Darstellung ist das Ergebnis dieser Arbeit nicht beigelegt. Die Analyse erfolgte durch eine genaue Betrachtung der einzelnen Zeilen und deren nachvollziehbares Verhalten bzw. deren Auswirkungen aufeinander. Das Kriterium für die Wärmetauschertemperaturdifferenz ist fast in jedem Zeitpunkt erfüllt und kann daher als gegeben angesehen werden. Weiterhin liefert die Simulation stichhaltige und sinnvolle Werte für die Speichertemperaturen und die Rück- bzw. Vorlauftemperatur. Weiterhin wurde anhand dieses Tests der Lambda-Wert für die Wärmeleitung zwischen den Schichten so weit nach oben korrigiert, dass das Fehlen von Konvektionsströmen innerhalb des Speichers ausgeglichen werden kann. Als Konsequenz können die Gleichungen als bedingt korrekt angenommen werden und somit im Weiteren als Grundlage für eine komplexere Simulation dienen.

5 Steuerung und Simulation

5.1 Entwicklung der Steuerung

Das Anforderungsprofil der Steuerung umfasst mehrere Punkte. Kern des Ganzen ist die Beladung des Warmwasserspeichers mit Energie. Welche Menge an Energie durch die Wärmeerzeuger in den Speicher eingespeist werden muss, ist von zwei weiteren Punkten abhängig. Zum einen ist hierfür eine Lastprognose notwendig. Durch Regression von Verbrauchsdaten kann so eine Prognose getroffen werden, wann welche Energie bzw. Leistung der Speicher liefern muss, um den Bedarf zu decken. Zum anderen ist es davon abhängig, wie groß der Einspeicherungshorizont ist. Dieser entspricht der Zeit, in der der Speicher mit Energie beladen werden kann. Nach dieser Zeit soll der Speicher als Wärmequelle dienen. In Folge dessen, muss der Speicher bis zur benötigten Energie aufgeheizt sein. Was genau heißt das für die Steuerung? Durch die Definition von Energie, die dem Produkt aus Leistung und Zeit entspricht, muss bei einem großen Zeitraum nur eine geringe Leistung erzeugt werden. Umgekehrt ist bei einem kleinen Zeitfenster für die Speicherung die benötigte Leistung deutlich größer. Es muss also realisiert werden: je geringer die Zeit, desto höher die Leistung oder je länger die Zeit, desto geringer die Leistung. Eine weitere wichtige Aufgabe der Steuerung ist eine intelligente und effiziente Ansteuerung der Wärmeerzeuger. In der Abbildung 5.1-1 ist schematisch das Zusammenspiel von den einzelnen Abhängigkeiten der Steuerung dargestellt.

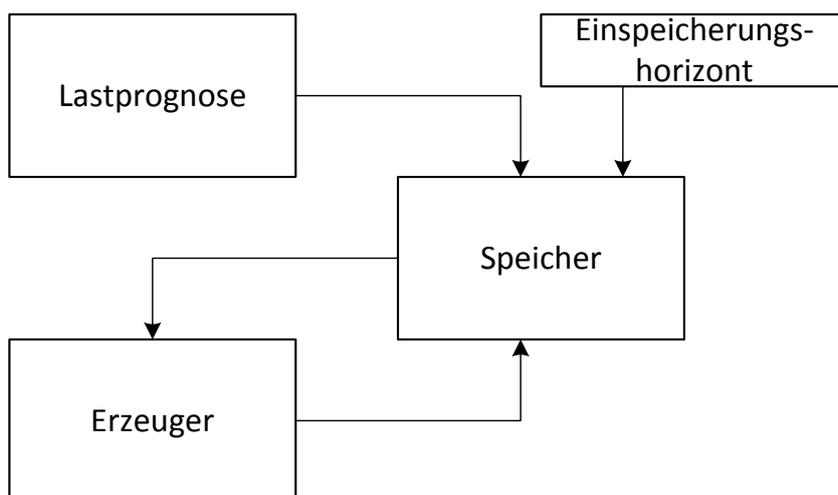


Abbildung 5.1-1: Entwicklung der Steuerung

Wichtigste Größe bei der Wechselwirkung von Speicher und Erzeugern ist die

Steuerung und Simulation

Speicherenergie. Sie dient der Steuerung als Regelgröße, wobei sie innerhalb der Steuerung mit der durch den prognostizierten Lastgang gewonnenen Führungsgröße verglichen wird. Die Aufgabe der Steuerung ist es, die Differenz von Führungsgröße und Regelgröße zu minimieren. Weiter ist es die Aufgabe der Steuerung, die Erzeuger in ihrem Betrieb so zu staffeln, dass möglichst geringe Kosten entstehen. Als Hilfsmittel hierfür dient der oft erwähnte Kostenstrom. Je nach Betriebsart des Blockheizkraftwerkes wird als erstes verglichen, wie groß die jeweiligen Kostenströme sind. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sich bei größerer Leistung auch der Kostenstrom linear erhöht. Verändert sich der Anstieg der Kostenfunktion nicht, ist es irrelevant, mit welcher Leistung gefahren wird, da der Kostenstrom sich entsprechend mit verändert. Unter Berücksichtigung der gesparten Zeit entstehen dabei keine höheren Kosten. Ein solches Verhalten ist zum Beispiel bei dem Heizkessel zu beobachten. Bei der Betrachtung des Blockheizkraftwerks tritt jedoch ein anderer Effekt auf. In der Abbildung 5.1-1 ist das zu erkennen (siehe Abbildung 5.1-1).

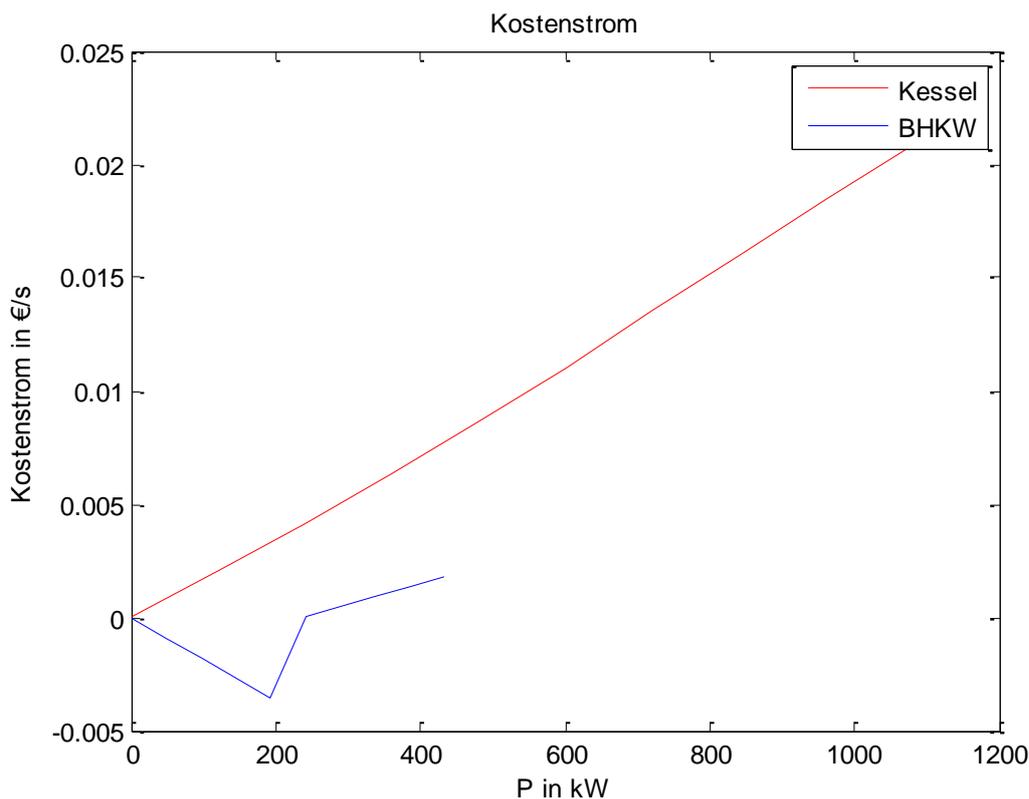


Abbildung 5.1-2: Kostenstrom Nürtingen

In Abhängigkeit der Betriebsart des BHKW's ändert sich der Kostenfaktor für die Kostenstromfunktion. In der Abbildung 5.1-2 ist eine wärmegeführte Betriebsart mit einer gewissen Stromabnahme als Eigenbedarf zu sehen. Bis zur Grenze von 200 kW ist ein

Steuerung und Simulation

negativer Anstieg für den BHKW Kostenstrom zu erkennen. Nachdem der Eigenbedarf gedeckt ist, steigt der Kostenstrom an, weil nun der mehrproduzierte Strom wesentlich unprofitabler verkauft werden muss. Als Resultat ändert sich der Anstieg der Funktion. Somit arbeitet das BHKW in unterschiedlichen Leistungsbereichen unterschiedlich effizient für den Betreiber und es sollte immer das Minimum der benötigten Leistung in Abhängigkeit des Zeithorizontes ausgewählt werden. Somit wird gewährleistet, dass auch der geringste Kostenstrom bei der jeweiligen Betriebsart erzielt wird. Durch eine Änderung der abgenommenen Strommenge für den Eigenbedarf ändert sich auch der kostengünstigste Arbeitspunkt. In dem Fall, wenn die geforderte Leistung kleiner ist als der Strombedarf, wird die Leistung entsprechend angehoben. In der Abbildung 5.1-2 wäre das dann der Fall, wenn die geforderte Leistung unterhalb von 200 kW liegt. Damit wird das Minimum an Kosten gewährleistet.

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Bedarf}}{\text{Einspeicherhorizont}} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

| | |
|---------------------|-----|
| Leistung | kW |
| Bedarf | kWh |
| Einspeicherhorizont | h |

Dabei ist der Bedarf die Differenz aus der gewonnenen Prognose und der aktuellen Speicherenergie.

$$\text{Bedarf} = \text{Prognose} - \text{Speicherenergie} \quad (\text{Gl. 5-2})$$

| | |
|-----------------|-----|
| Prognose | kWh |
| Speicherenergie | kWh |

Die beiden Gleichungen (Gl. 5-1) und (Gl. 5-2) bilden das Grundgerüst der Steuerung. Danach werden die Aggregate, anhand ihres Kostenstroms gestaffelt wie in einer Sequenzierung. Aggregate, die weniger Kosten erzeugen, werden demnach bevorzugt. Der Solarkollektor wird aus dieser Sequenzierung heraus gelöst. Der Grund dafür ist, dass der Solarkollektor keine zuverlässige und vorhersehbare Leistung erzeugt. Die erzeugte Leistung

Steuerung und Simulation

kann nur präzise mit Hilfe einer Simulation ermittelt werden. Eine mögliche Lösung für die Vorhersage der Kollektorleistung wäre, wenn man die Leistung durch einen mittleren Wirkungsgrad und den Strahlungsverlauf berechnen würde. Eine weitere mögliche Berechnung der Kollektorleistung könnte durch die Annahme einer stationären Speichertemperatur erfolgen. Eine solche Betrachtung innerhalb dieser Arbeit ist aus zeitlichen Gründen nicht möglich. Um genaue Aussagen darüber treffen zu können, welche der möglichen Optionen für die Leistungsprognose für den Solarkollektor am zutreffendsten ist, muss noch weiter erforscht werden. Weiter kann der Kostenstrom im Betrieb des Solarkollektors vernachlässigt werden, da dieser nur durch die Pumpenleistung definiert ist. Aus diesem Grund wird die Leistung des Solarkollektors aktuell als gesetzt angesehen. Ausgehend von den BHKW Betriebsarten bilden sich aus den gewonnenen Erkenntnissen folgende Sequenzierungen (siehe Abbildung 5.1-2).

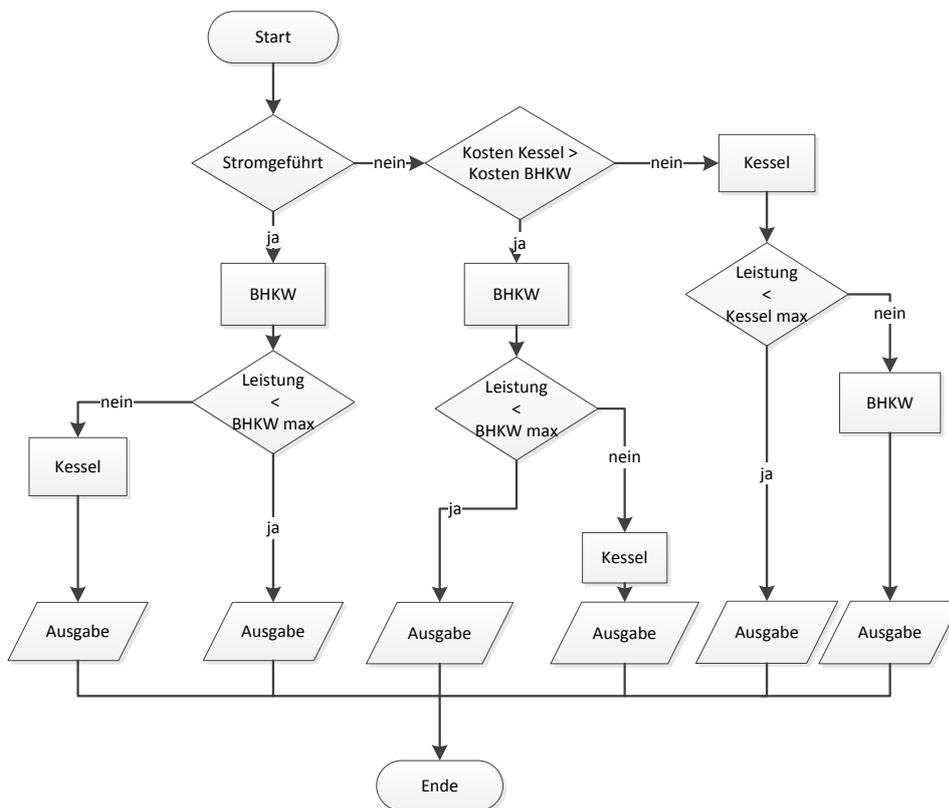


Abbildung 5.1-3: Ablaufplan Sequenz

In der Abbildung 5.1-2 ist zu erkennen, dass sich je nach Betriebsart des Blockheizkraftwerks zwei mögliche Szenarien ausprägen können. Ist der Kostenstrom des BHKW im Arbeitspunkt kleiner als der Kostenstrom für den Heizkessel, wird die Leistung des BHKW auf die entsprechend benötigte Energie gefahren und dann erfolgt die Ausgabe. Wenn die maximale Leistung des BHKWs in dem Fall nicht ausreichen sollte, um innerhalb des Zeithorizontes

Steuerung und Simulation

den Speicher auf das benötigte Energieniveau zu erwärmen, wird die Differenz von Maximalleistung des BHKW und der in Gleichung (Gl. 5-1) beschriebenen Leistung dem Kessel zugeführt und danach ausgegeben. Gleichermaßen läuft dieser Prozess auch ab, wenn der Heizkessel einen geringeren Kostenstrom im Arbeitspunkt erzeugt.

Bei einer stromgeführten Nutzung des Blockheizkraftwerks ist das BHKW unabhängig von seinem Kostenstrom für Wärmeerzeugung als gesetzt vorgegeben, da nur bei einer entsprechenden Ansteuerung der notwendige Strom durch den Betrieb des BHKWs erzeugt werden kann. Der Quellcode für die Funktion befindet sich im Anhang A6.

5.2 Entwicklung der Simulation

Bei der Entwicklung einer Simulation muss zunächst darauf geachtet werden, welchem Zweck sie dienen soll. Anhand der Rahmenbedingungen kann dann eine hinreichend genaue Simulation geschaffen werden. Dabei ist als erstes darauf zu achten, welchen Zeitraum die Simulation abdecken soll.

Für den Test der Wärmeerzeuger und des Mehrschichtspeiches wird ein Zeithorizont von 24 Stunden als Simulationszeit festgelegt. Denn in der Realität wird ein Lastgang eines Gebäudes oder einer Liegenschaft oft als Tagestrend angelegt. So kann rechtzeitig nach dem Aufstellen einer Prognose eine Reaktion der Aggregate folgen. Da die Simulation in Sekunden arbeitet, wird die Simulation nach 86400 Sekunden beendet. Das entspricht genau 24 Stunden. Die Simulation wird mit Hilfe des Programms Simulink von Mathworks geschrieben und auch verarbeitet. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten und deren Inhalt beschrieben.

Der Solarkollektor

Der Solarkollektor wird mit Hilfe eines Subsystems im Programm eingefügt. Die Maske des Solarkollektor-Subsystems sieht wie folgt aus (siehe Abbildung 5.2-1).

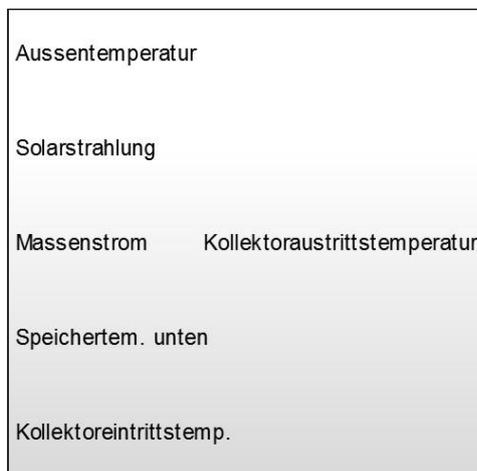


Abbildung 5.2-1: Solarkollektor

In der Abbildung 5.2-1 sind linker Hand die Eingangsgrößen in das Subsystem und rechter Hand die Ausgangsgrößen zu sehen. Dabei werden die zwei Eingangsgrößen „Aussentemperatur“ und „Solarstrahlung“ als Verlaufskurven dargestellt. Die Verlaufskurven können mit einem „*n-D Lookup Table*“ innerhalb der Simulink-Oberfläche erzeugt werden. In

Steuerung und Simulation

der Abbildung 5.2-2 und 5.2-3 sind die beiden Bausteine für die Verlaufskurven zu sehen.

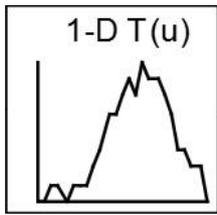


Abbildung 5.2-2: Temperaturverlauf

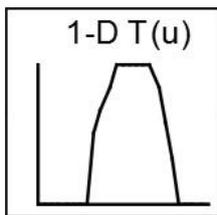


Abbildung 5.2-3: Strahlungsverlauf

Innerhalb der Lookup Tables werden jeweils zwei Vektoren mit 24 Werten definiert, ein x-Vektor für den Zeitverlauf und ein y-Vektor für die Rohdaten. Bei der Temperatur besteht der y-Vektor aus Temperaturwerten in °C und beim Strahlungsverlauf aus Strahlungswerten in W/m². Der x-Vektor ist bei beiden gleich. Es wird pro Stunde, also pro 3600 Sekunden, jeweils ein Stützpunkt erzeugt. Damit entstehen die beiden Graphen in den Abbildungen 5.2-4 und 5.2-5.

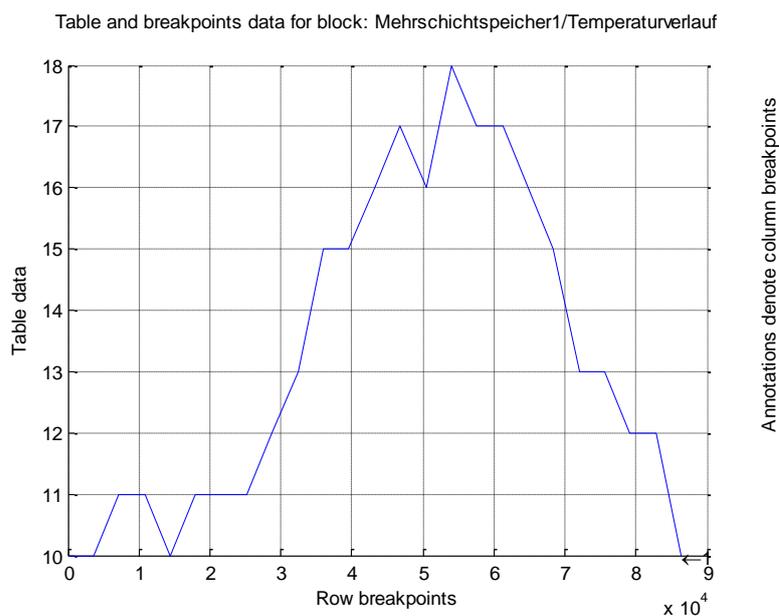


Abbildung 5.2-4: Temp. Graph

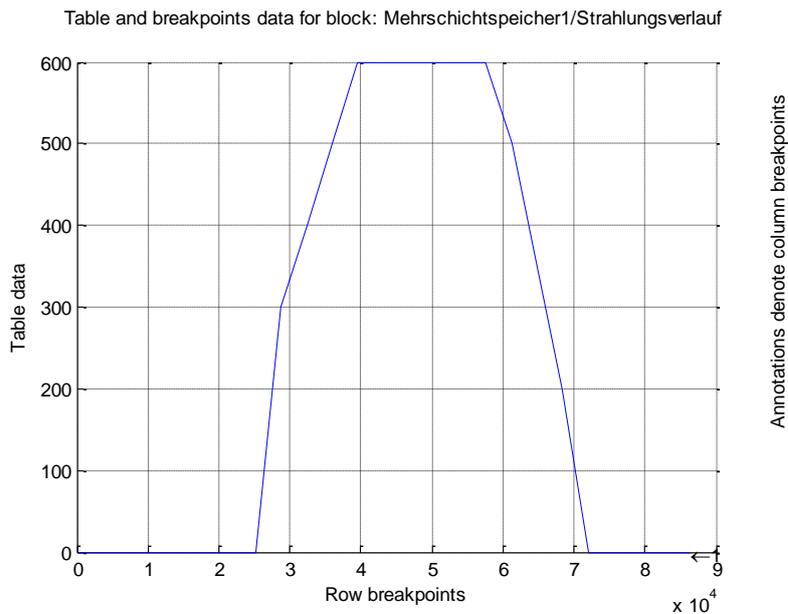


Abbildung 5.2-5: Strahlung Graph

Die weiteren Eingangsgrößen „Speichertemp. unten“ und „Kollektoreintrittstemp.“, werden jeweils durch Rückführung von den beiden anderen Subsystemen gewonnen. Die Speichertemperatur wird durch das Speichermodell gewonnen und die Kollektoreintrittstemperatur durch das Wärmetauschermodell. Der „Massenstrom“ wird als normale Konstante definiert.

Innerhalb des Subsystems befinden sich die Gleichungen für den Solarkollektor. Kern des Kollektors sind der Wirkungsgrad, die Kollektortemperatur und die Kollektoraustrittstemperatur. Durch eine Memory Funktion am Ausgang der Gleichung für den Wirkungsgrad wird im Zeitschritt t die Berechnung der anderen beiden Gleichungen mit dem Wert des Wirkungsgrades von $t-1$ berechnet. Diese Vorkehrung ist notwendig, damit bei der Ausführung der Simulation keine algebraische Schleife entsteht. Sämtliche Eingangssignale werden durch einen Multiplexer zu einem Bus zusammengeführt. Durch die Memory Funktion kann weiter auch ein Anfangswert im Zeitpunkt $t=0$ bestimmt werden. Weiterhin ist ein Scope angelegt, damit eine gründliche Fehleranalyse durch das Aufzeichnen von allen relevanten Daten über die gesamte Simulationsdauer gewährleistet ist. In der folgenden Abbildung 5.2-6 ist nun der Aufbau des Subsystems des Solarkollektors abgebildet (siehe Abbildung 5.2-6).

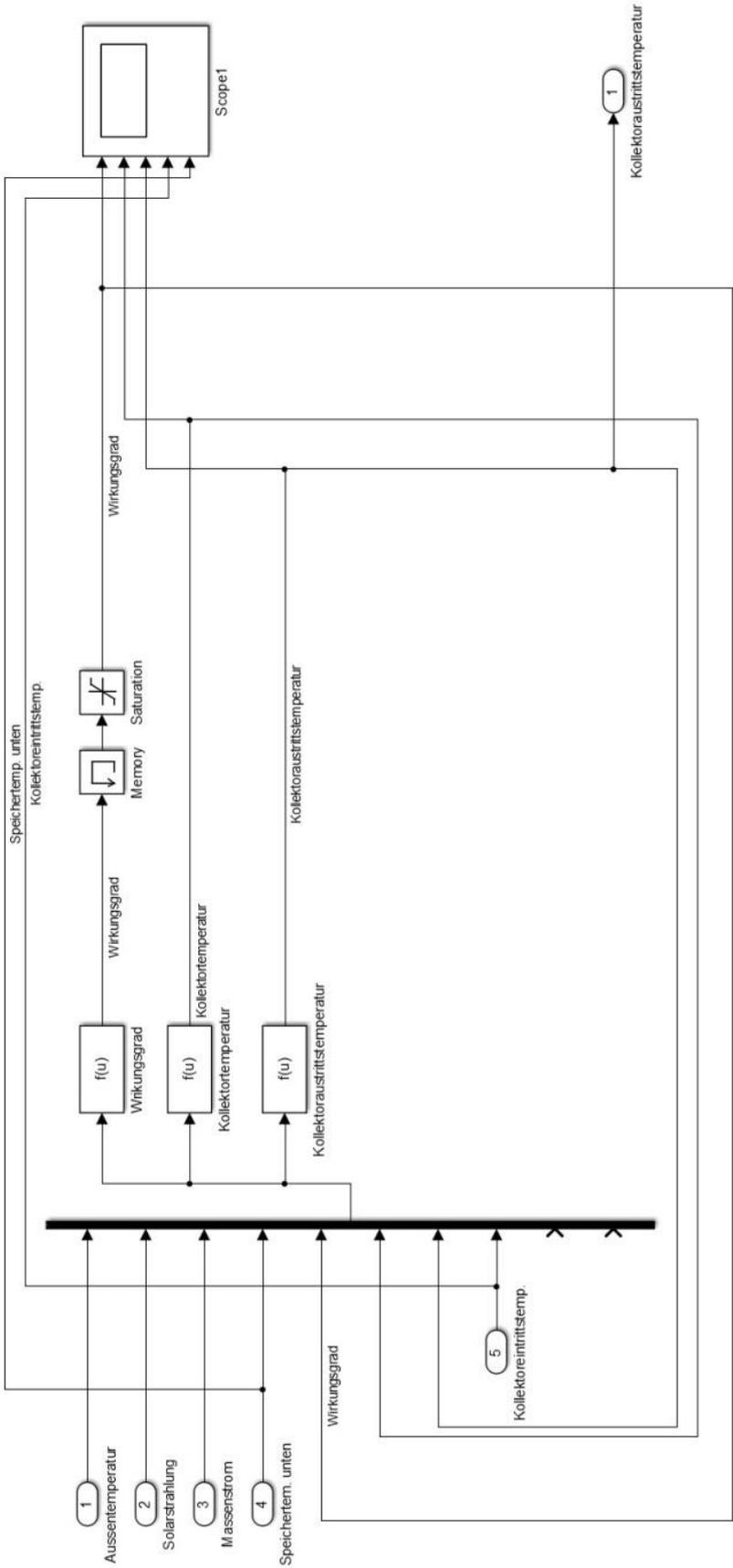


Abbildung 5.2-6: Solarkollektor System

Der Wärmetauscher

Der Wärmetauscher wird wie der Solarkollektor, mit einem Subsystem implementiert. Als Eingangsgrößen dienen die beiden Temperaturen „*Vorlauftemp.*“ und „*Speichertemperatur unten*“. Erstere wird durch das Solarkollektormodell gewonnen. Die Kollektoraustrittstemperatur entspricht demzufolge der Vorlauftemperatur für das Wärmetauschermodell. Letztere, die untere Speichertemperatur, ist notwendig, um die Rücklauftemperatur innerhalb des Wärmetauschers zu bestimmen und wird durch das Mehrschichtspeichermodell gewonnen (siehe Abbildung 5.2-7).



Abbildung 5.2-7: Wärmetauscher

Die Ausgangsgrößen des Systems sind in der Abbildung 5.2-7 rechter Hand zu sehen. Die „*Kollektorwärmeleistung*“ dient als Eingangsgröße für das Mehrschichtspeichermodell und ist dort die Wärmequelle für die untere Speicherschicht. Die zweite Ausgangsgröße „*Kollektoreintrittstemp./ Rücklauf*“ erklärt sich von selbst. Sie dient dem Solarkollektormodell als Eingangsgröße.

Innerhalb des Subsystems des Wärmetauschers befinden sich die beiden Funktionsgleichungen für die Wärmeleistung und die Rücklauftemperatur. Dabei ist der Wärmeleistung, wie auch schon beim Solarkollektor, ein Memory Block nachgeschaltet. Dieser Block hat auch an dieser Stelle die Aufgabe zu gewährleisten, dass im nachfolgenden Zeitschritt die Wärmeleistung für die Berechnung der Rücklauftemperatur zur Verfügung steht. Eingangssignale und Ergebnisse werden auch innerhalb des Wärmetauschermodells mit Hilfe eines Mux Blocks gesammelt, um dann verarbeitet zu werden (siehe Abbildung 5.2-8).

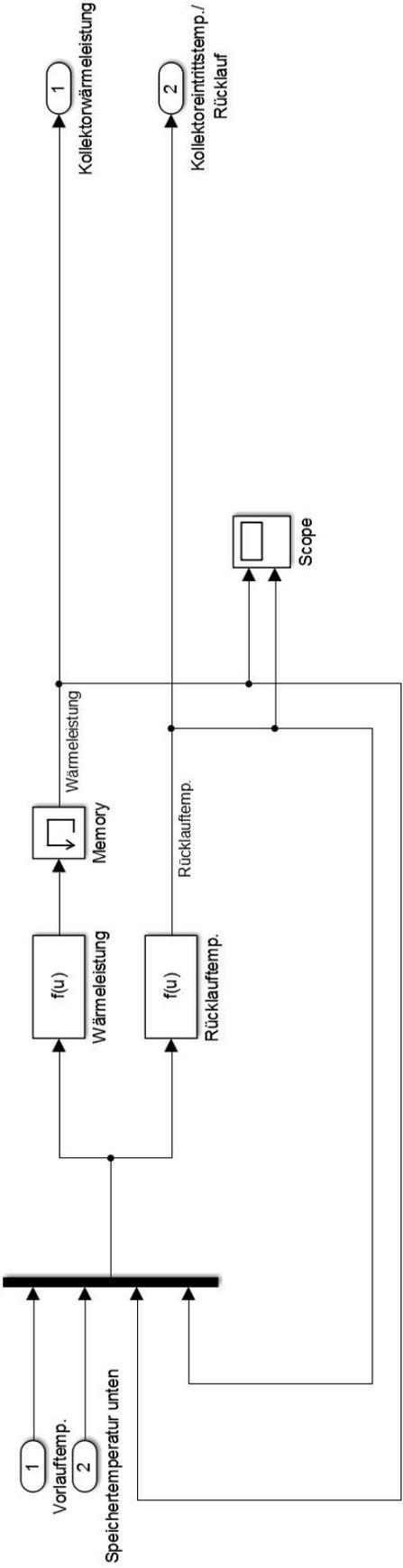


Abbildung 5.2-8: Wärmetauscher System

Steuerung und Simulation

Der Mehrschichtspeicher

Der Mehrschichtspeicher ist das dritte Subsystem der Simulation. Als Eingangsgrößen besitzt er die drei Leistungen der Wärmeerzeuger „Kollektorleistung“, „Kesselleistung“ und „BHKW Leistung“. Jede dieser Leistungen dient einer Speicherschicht als Wärmequelle oder Wärmezufuhr. Die Kollektorleistung wird durch das Wärmetauschermodell gewonnen. Die anderen beiden Leistungen werden durch das Steuerungsmodul, das im Kapitel 5.1 beschrieben wird, gewonnen. Als Ausgangsgrößen besitzt der Mehrschichtspeicher die Temperatur der drei Speicherschichten und jeweils die ihr zugehörige Energie. Die Ausgangsgröße „Speichertemperatur unten“ ist hierbei, bei dem derzeitigen Stand des Simulationsmodells, die einzige Größe die für die Berechnung der Simulation weiter verwendet wird. Die anderen beiden Ausgangsgrößen „Speichertemperatur mitte“ und „Speichertemperatur oben“ dienen aktuell nur der Anschaulichkeit. Für die Berechnung der Speicherenergie bzw. der Berechnung des Bedarfs an Wärme sind die drei Ausgangsgrößen „Energie 1“, „Energie 2“ und „Energie 3“ notwendig. Hierbei handelt es sich um die Wärmeenergien der einzelnen Schichten im Speicher. Die Summe aus den drei Ausgangsgrößen dient als Vergleichsgröße für die Berechnung des benötigten Wärmebedarfs (siehe Abbildung 5.2-9).

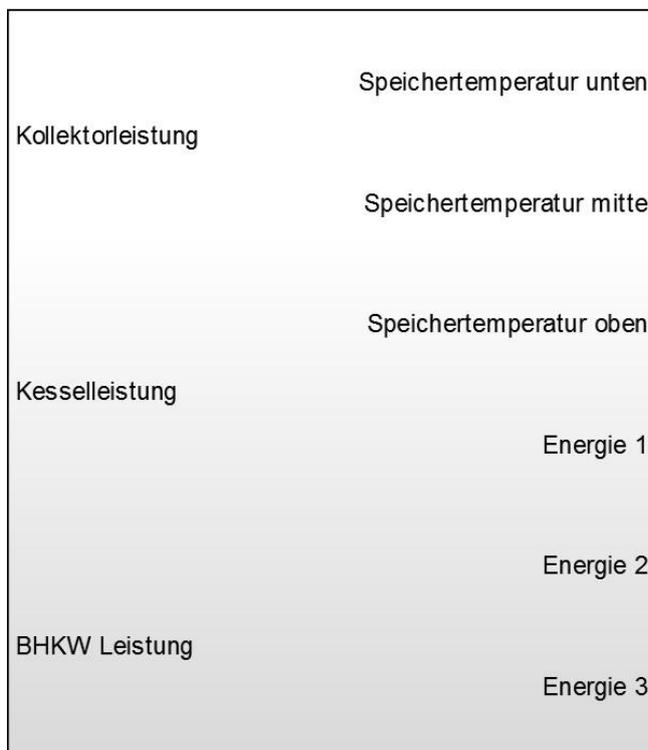


Abbildung 5.2-9: Mehrschichtspeicher

Steuerung und Simulation

Im Mehrschichtspeicher Subsystem werden die Eingangssignale wiederum durch einen Mux Block gesammelt verarbeitet. Den Hauptinhalt bilden die drei Differenzialgleichungen für die Speichertemperaturen θ_1 , θ_2 und θ_3 . Diesen Gleichungen wird jeweils ein Integrator nachgeschaltet, welcher die jeweilige Differenzialgleichung im Zeitschritt t integriert und deren Lösung weiter gibt. Innerhalb der Integratoren werden Startwerte, die sog. „initial conditions“, für die Speicherschichttemperaturen festgelegt. Die Startwerte werden mit Hilfe des in Anhang A5 abgebildeten Matlab Programms in den Workspace geschrieben (Temp1, Temp2, Temp3). Weiterhin sind die drei Funktionsgleichungen für die Energie einer der Speicherschichten implementiert. Sie werden mit der folgenden Gleichung berechnet.

$$Q = V * \rho * c_w * \vartheta \quad (\text{Gl. 5-3})$$

Dabei bleiben Volumen, Dichte und spezifische Wärmekapazität immer konstant und nur die Temperatur ändert sich (siehe Abbildung 5.2-10).

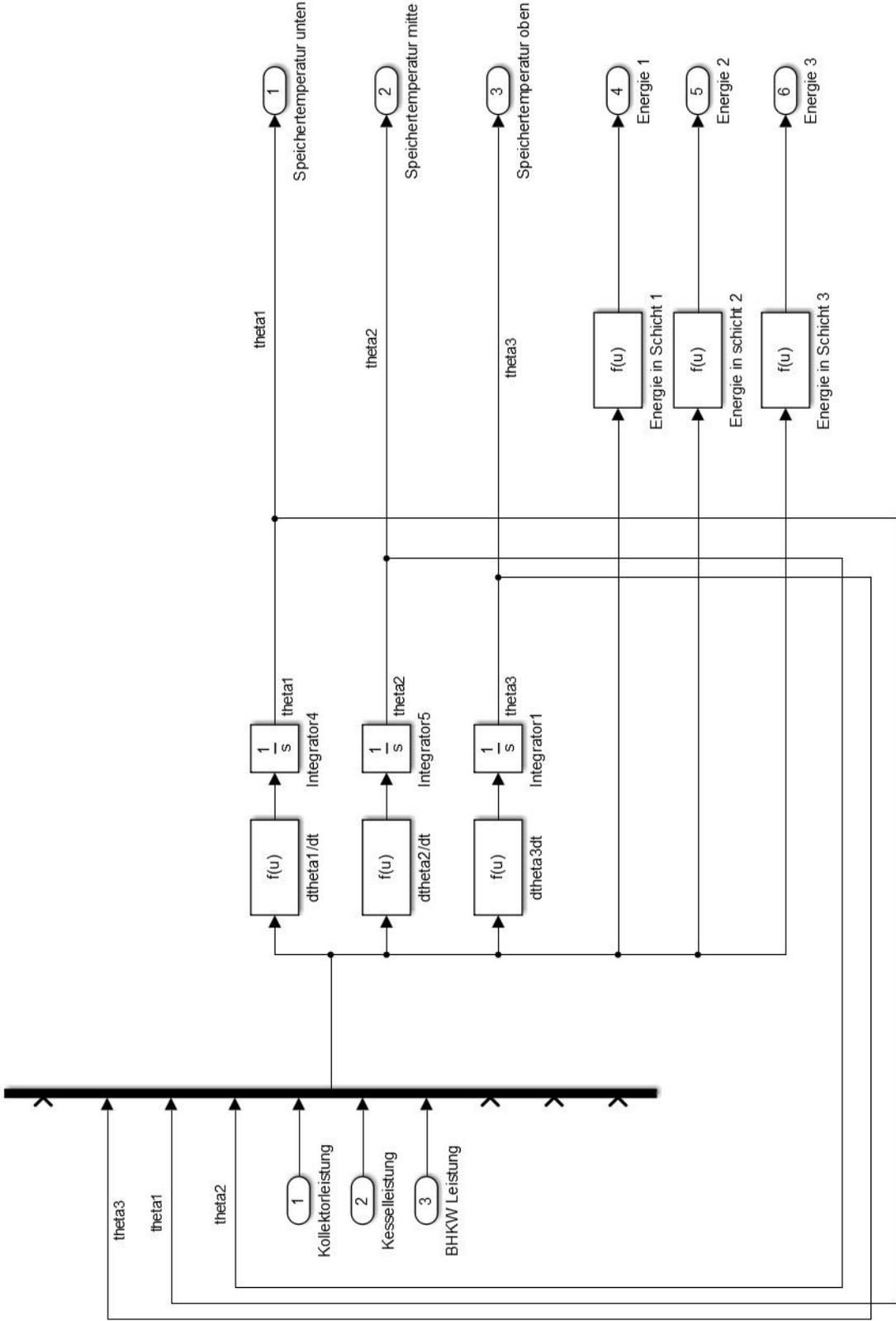


Abbildung 5.2-10: Mehrschichtspeicher System

Das Steuerungsmodul der Wärmeerzeuger

Das Konzept des Steuerungsmoduls, welches in Kapitel 5.1 beschrieben ist, fügt sich mit Hilfe einer Matlabfunktion mit in die Simulationsumgebung ein. Gleichmaßen wie auch bei den anderen Modellen sind verschiedene Eingangs- und Ausgangsgrößen innerhalb der Steuerung definiert und außerhalb der Funktion durch eine Beschriftung auf dem Funktionsblock zu erkennen. Die Eingangsgröße „*BHKW_Betriebsart*“ ist mit einer Konstanten verbunden. Hier muss zwischen drei Funktionsweisen unterschieden werden. Die beiden normalen Betriebsarten sind „1“ und „2“, wobei die „1“ wärmegeführt ohne Stromabnahme und die „2“ mit Stromabnahme ist. Die „3“ steht für eine stromgeführte Betriebsart. Die „*Stromabnahme*“ ist der prozentuale Anteil des erzeugten Stroms, der auch vom Verbraucher benötigt wird. Jedoch wird die Stromabnahme im derzeitigen Stand der Simulation lediglich als Anschauungswert hinzugezogen und nirgendwo anderweitig verwendet. Trotz allem ist die Stromabnahme ein wichtiger Bestandteil für die Kostenstromberechnung, denn je mehr Strom selbst verbraucht wird, desto weniger muss von anderen Erzeugern im öffentlichen Stromnetz eingekauft werden. Dies bedeutet, dass der Kostenstrom mit steigender Stromabnahme automatisch sinkt (siehe Kapitel 4.2). Die „*Speicherenergie*“ ist der derzeitige Stand der Energie, innerhalb des gesamten Speichers. Mit Hilfe der Eingangsgröße „*Einspeicherhorizont*“ wird der Zeitraum in Stunden festgelegt, in der die Speicherenergie auf den benötigten Sollwert gebracht werden soll.

Die Ausgangsgrößen der Steuerung „*Kesselleistung*“ und „*BHKWLeistung*“ werden als Eingangsgrößen für das Mehrschichtspeichermodell benötigt und mit Hilfe jeweils einer Verstärkung (Gain) auf die notwendige Einheit skaliert. Der erzeugte „*Strom*“ wird innerhalb der Simulation nicht weiter verwendet. Er dient zur Veranschaulichung (siehe Abbildung 5.2-11).



Abbildung 5.2-11: Steuerungsfunktion

Der Quelltext der Steuerungsfunktion ist dem Anhang A6 zu entnehmen. Zusammen mit den anderen Subsystemen und den Konstanten, die innerhalb der Simulation definiert sind, bildet das Steuerungsmodul die Simulation für das Grundverfahren zur Ansteuerung konventioneller und regenerativer Wärmeerzeuger.

Die Lastprognose

Die Lastprognose ist eine eigenständige Simulation, die es ermöglicht, einen vorher definierten Lastgang innerhalb einer bestimmten Zeit zu integrieren. Durch dieses Verfahren erhält man die Energie, die in dieser Zeit benötigt wird, um eine solche Leistungsabgabe zu gewährleisten. Das Ergebnis der Simulation kann und wird mit Hilfe einer Simulink Senke in den Matlabworkspace geschrieben. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Verwendung dieses Ergebnisses auch außerhalb der Simulation in allen Teilbereichen von Matlab. In der folgenden Abbildung ist das Simulationsmodell für die Lastprognose abgebildet (siehe Abbildung 5.2-12).

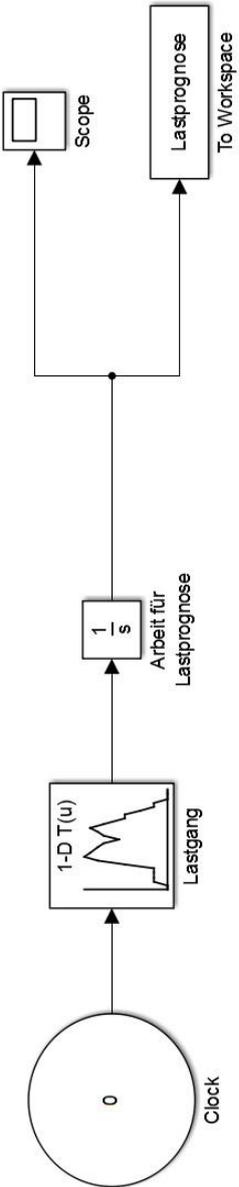


Abbildung 5.2-12: Lastprognose

5.3 Verifikation der Simulation und Steuerung an Hand eines realen Lastgangs

Um die Richtigkeit einer Simulation und derer Modelle zu gewährleisten, ist eine Modellverifikation unabdingbar. Dieser Vorgang hilft dabei, Fehler oder gewisse Irrtümer innerhalb des Modells oder auch in der Realisierung durch die Simulation zu lokalisieren und ggf. zu vermeiden. Hierfür wurden Scope Blöcke angelegt, die eine Datenaufzeichnung von Parametern innerhalb der Simulation ermöglichen. Dieser Vorgang wurde mehrfach durchgeführt. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse eines realistischen Datensatzes der Liegenschaft Nürtingen erörtert.

Dabei wurde ein Datensatz für den Verlauf von Temperatur und Lastgang über 24 Stunden der Liegenschaft Nürtingen ausgewertet und als Ausgangskriterium verwendet. Es handelt sich hierbei um den 24. Oktober 2014. Die Leistung für den Lastgang der Liegenschaft wurde hierbei halbiert, da die Simulation lediglich jeweils ein Wärmeaggregat und nur einen Warmwasserspeicher aufweist. Das Krankenhaus Nürtingen besitzt von diesen allerdings jeweils zwei. Alle anderen Daten werden originalgetreu verarbeitet. In den folgenden Abbildungen 5.3-1 und 5.3-2 sind jeweils der Lastgang und der Temperaturverlauf dargestellt.

Table and breakpoints data for block: Lprog/Lastgang

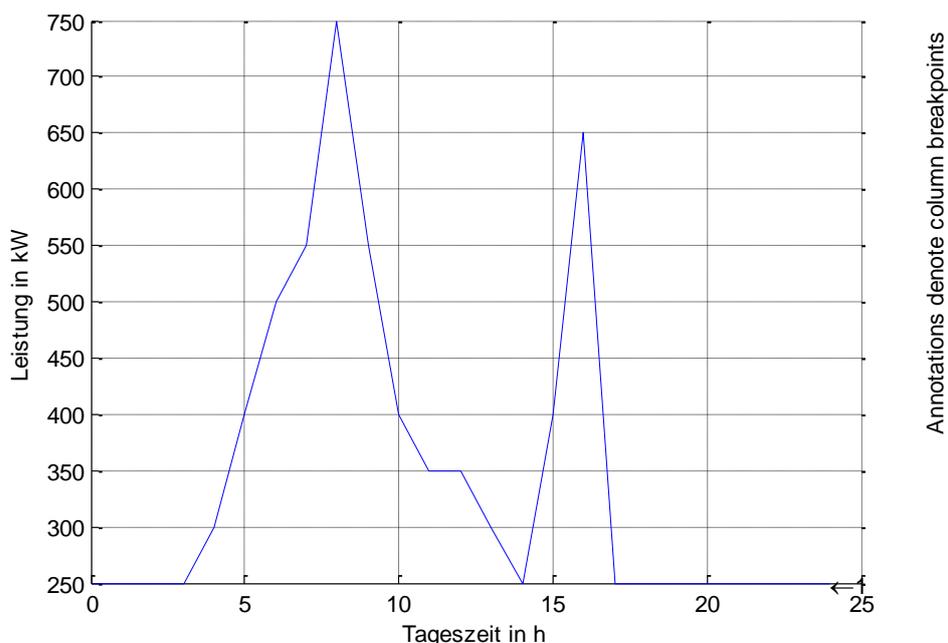


Abbildung 5.3-1: Lastgang Nürtingen

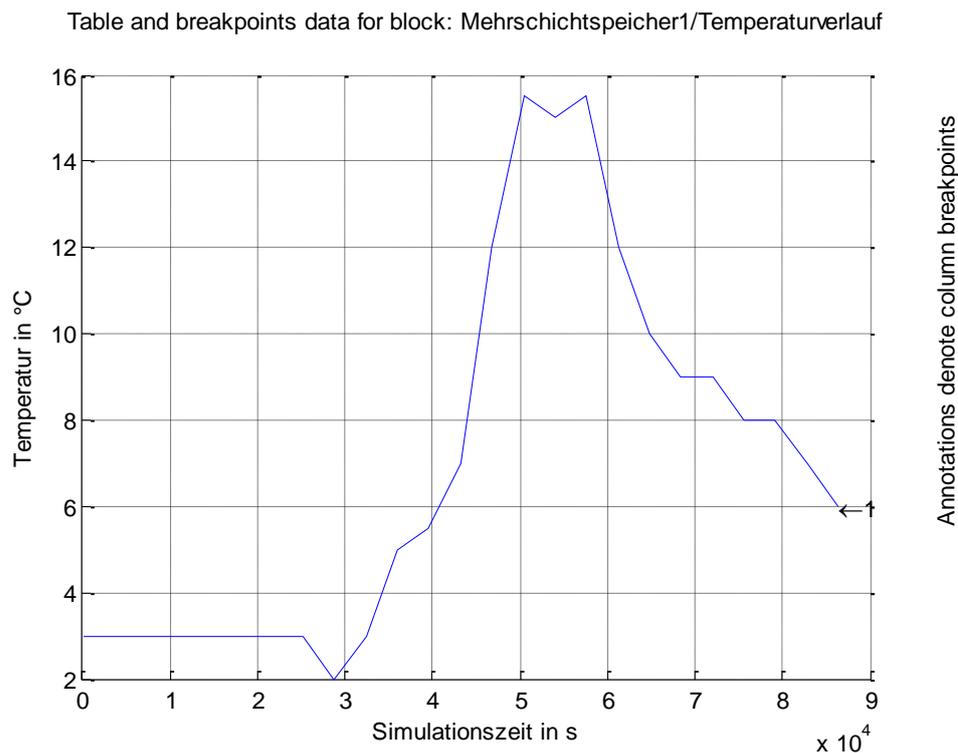


Abbildung 5.3-2: Temperatur Nürtingen

Die Auswertung des Lastgangs über 24 Stunden durch die Lastprognosensimulation ergibt eine Prognose von 8500 kWh. Diese Energie muss also vom Speicher geleistet werden, wenn eine Versorgung durch den Speicher von 100% erfolgen soll. Jedes andere Szenario ist ebenfalls denkbar, aber für den Test wird eine 100% Speicherversorgung angenommen. In der Abbildung 5.3-1 ist zu erkennen, dass die signifikanten Lastspitzen innerhalb der Tageszeit von 5 bis 16 Uhr auftreten und der Rest des Tages eher im Normalbetrieb weiterverläuft. Daher wäre eine Einspeicherung außerhalb der Lastspitzen ratsam. Der Einspeicherhorizont wird somit auf 12 Stunden festgelegt.

Um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten, muss auch die Strahlung im Verlauf des Tages angepasst werden. Hierfür wird eine PV-Strahlungskarte bzw. ein Informationssystem verwendet, das durch das [7] der Europäischen Union zur Verfügung gestellt wird. Hierfür werden Breiten- und Längengrad der Liegenschaft, der Monat des Jahres, Neigungsgrad der Ebene und die Ausrichtung der Ebene in die jeweilige Himmelsrichtung benötigt. Das Ergebnis ist in der Abbildung 5.3-3 zu sehen.

Table and breakpoints data for block: Mehrschichtspeicher1/Strahlungsverlauf

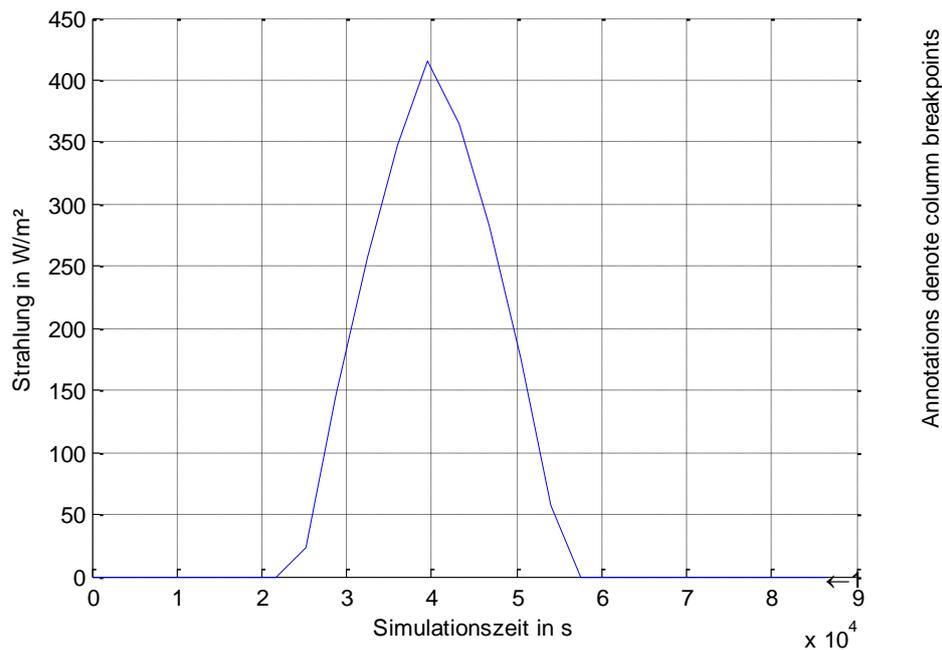


Abbildung 5.3-3: Strahlungsverlauf 24.10.14

Mit Hilfe dieser drei Graphen als Ausgangsparameter wird eine Simulation durchgeführt. In der Abbildung 5.3-4 sind die Kollektorparameter dargestellt. Der Wirkungsgrad beginnt wie bei einem Solarkollektor üblich bei über 60% und nimmt mit steigender Kollektortemperatur und steigender Vorlauftemperatur weiter kontinuierlich ab. Die durch den Kollektor erbrachte Wärmeleistung wirkt lediglich zirka 7 Stunden, solange die Strahlungsleistung oberhalb von 0 W/m² liegt (siehe Abbildung 5.3-4). Der Leistungsverlauf für den Solarkollektor wird in der Abbildung 5.3-5 deutlich. Es ist klar zu erkennen, dass, solange keine solare Einstrahlung erfolgt, auch kein Leistungsumsatz erfolgt. Die vom Solarkollektor erbrachte Leistung folgt strikt dem Einstrahlungsverlauf, der in der Abbildung 5.3-3 zu sehen ist. Weiterhin ist zu sehen wie sich die Rücklauftemperatur am Wärmetauscher verhält. Sie steigt zu Beginn der Simulation stark an und erhöht sich dann kontinuierlich bis zur Obergrenze von zirka 75°C. Eine solche Erhöhung der Rücklauftemperatur ist auch weiterhin aktiv, obwohl der Solarkollektor keine Leistung mehr erzeugt. Die Ursache hierfür sind die anderen Wärmeerzeuger. Der Wärmetauscher entzieht sozusagen in der Phase, in der der Solarkollektor keine Leistung erbringt, dem Speicher etwas Energie, weil der Wärmetauscher nicht ausschließlich in eine Richtung arbeitet (siehe Abbildung 5.3-5).

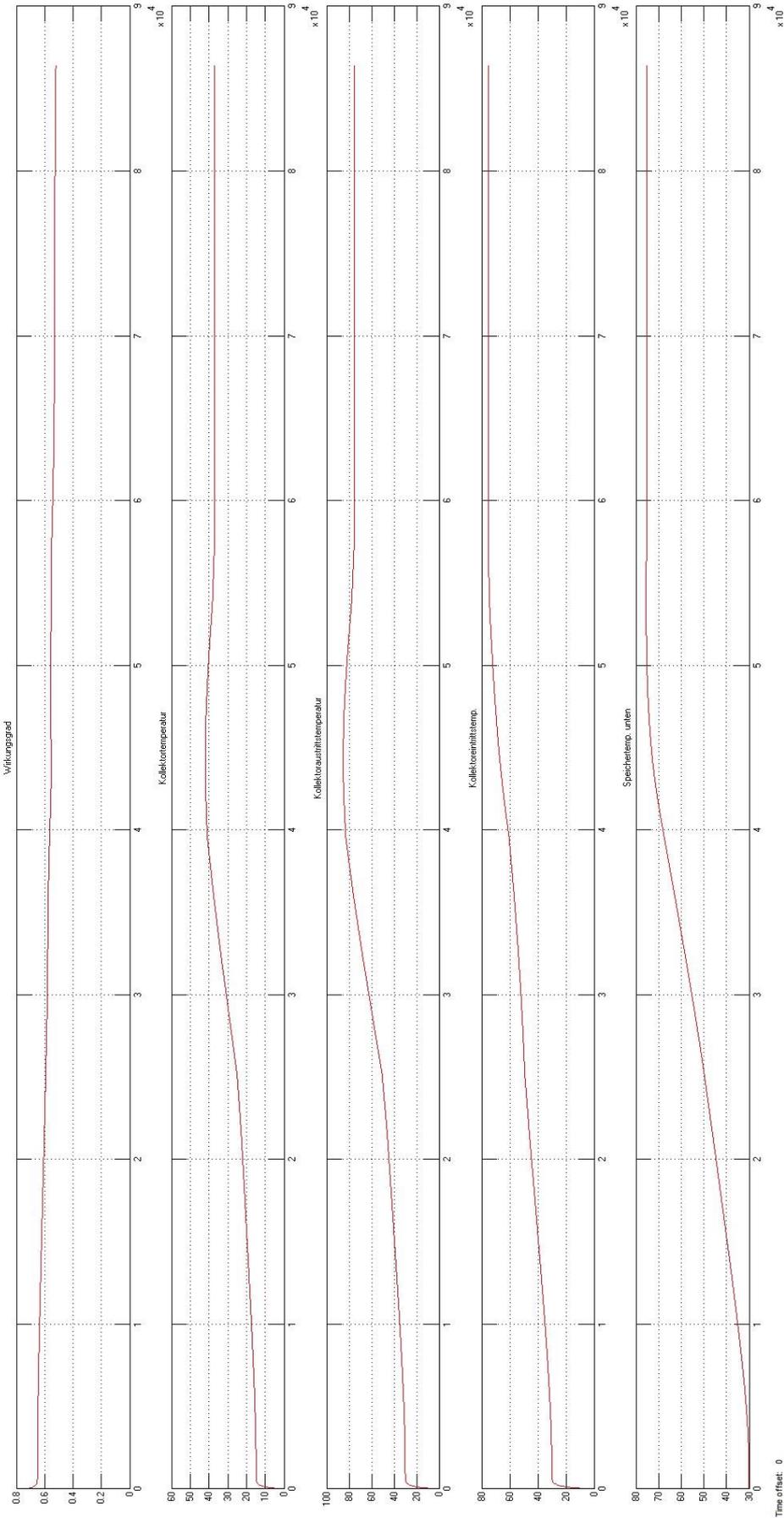


Abbildung 5.3-4: Kollektor Scope

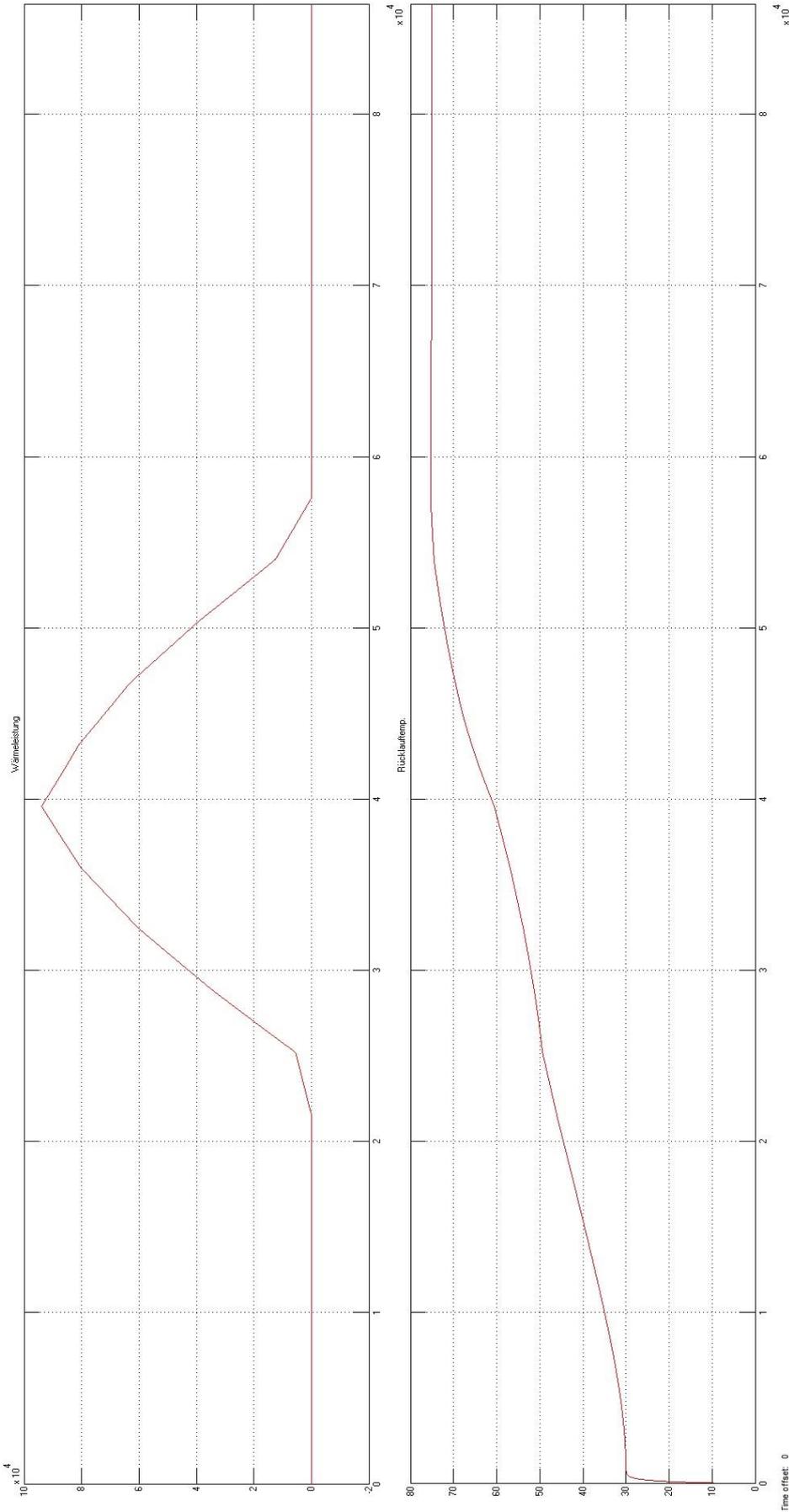


Abbildung 5.3-5: Wärmetauscher Scope

Steuerung und Simulation

Nach der Differenz von Lastprognose und tatsächlichem Speicherstand bleibt der Bedarf. Dieser Bedarf wird nun von der Steuerung durch den Leistungshorizont geteilt und als Ergebnis bleibt die Leistung, die von den Aggregaten zusätzlich erbracht werden muss. In der Abbildung 5.3-6 ist der Graph für die Wärmeerzeuger zu sehen. Sichtbar wird, dass sich der Heizkessel über die gesamte Simulationsdauer auf null befindet. Das Blockheizkraftwerk jedoch wird auf zirka 420 kW Leistung hochgefahren. Zugleich wird ein Strom erzeugt, der ebenfalls in der Abbildung zu sehen ist. Dies bedeutet, dass durch die Steuerung erkannt wurde, dass sich der Bedarf durch den alleinigen Einsatz des BHKW's realisieren lässt. Bei etwa der Hälfte der Simulationszeit ist im Graphen der Sprung von 420 kW auf 0 kW des BHKW's zu erkennen. An dieser Stelle wird der prognostizierte Bedarf an Energie durch die Temperatur des Speicherinhaltes erreicht. Unter realen Bedingungen würde die Leistung nicht derart schlagartig auf null gehen, sondern mit etwas Verzögerung. Eine derartige Anpassung der Simulation durch Zeitverzögerungsglieder kann jedoch jederzeit geschehen (siehe Abbildung 5.3-6). Entsprechend steigen durch die wirkende Leistung im Verlauf der Simulation die Speichertemperaturen bzw. die Speichertemperaturen weiter an. Durch die Einspeisung der Leistung des BHKW in die obere Speicherschicht steigt diese Temperatur etwas schneller an, was in der Abbildung 5.3-7 zu sehen ist. Nachdem die Leistungseinspeisung in den Speicher abgeschlossen ist, findet ein Ausgleich der Temperaturniveaus innerhalb des Speichers statt. Deutlich wird dieser Sachverhalt durch das Abschwächen des Anstiegs der Temperaturen und sogar durch das kurzzeitige Fallen der oberen Speichertemperatur zur Simulationsmitte hin. Bei einer Temperatur von 75°C Speicherinhalt ist der Sollwert für den Speicher erreicht (siehe Abbildung 5.3-7).

Jeder Vorgang innerhalb dieser Graphen ist eindeutig nachvollziehbar. Es kann daher die Annahme getroffen werden, dass die Simulation und deren interne Modelle korrekt sind. In Hinblick auf die Dienlichkeit der Simulationsmodelle für diese Arbeit muss dennoch die Aussage getroffen werden, dass sie nicht zu hundert Prozent der Natur entsprechen und viele Verbesserungen getroffen werden können, was im nächsten Kapitel näher erläutert wird.

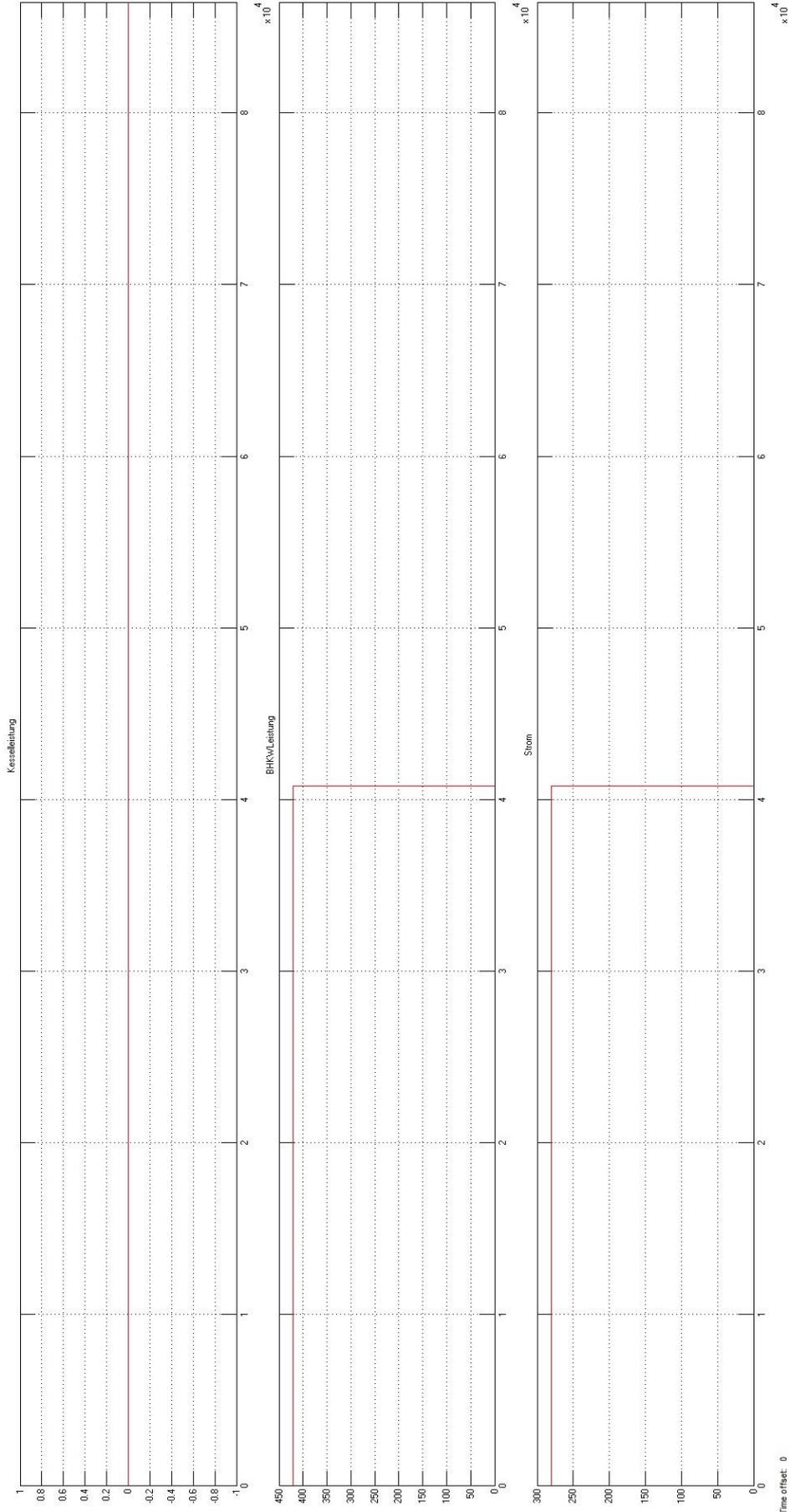


Abbildung 5.3-6: Leistungen Scope

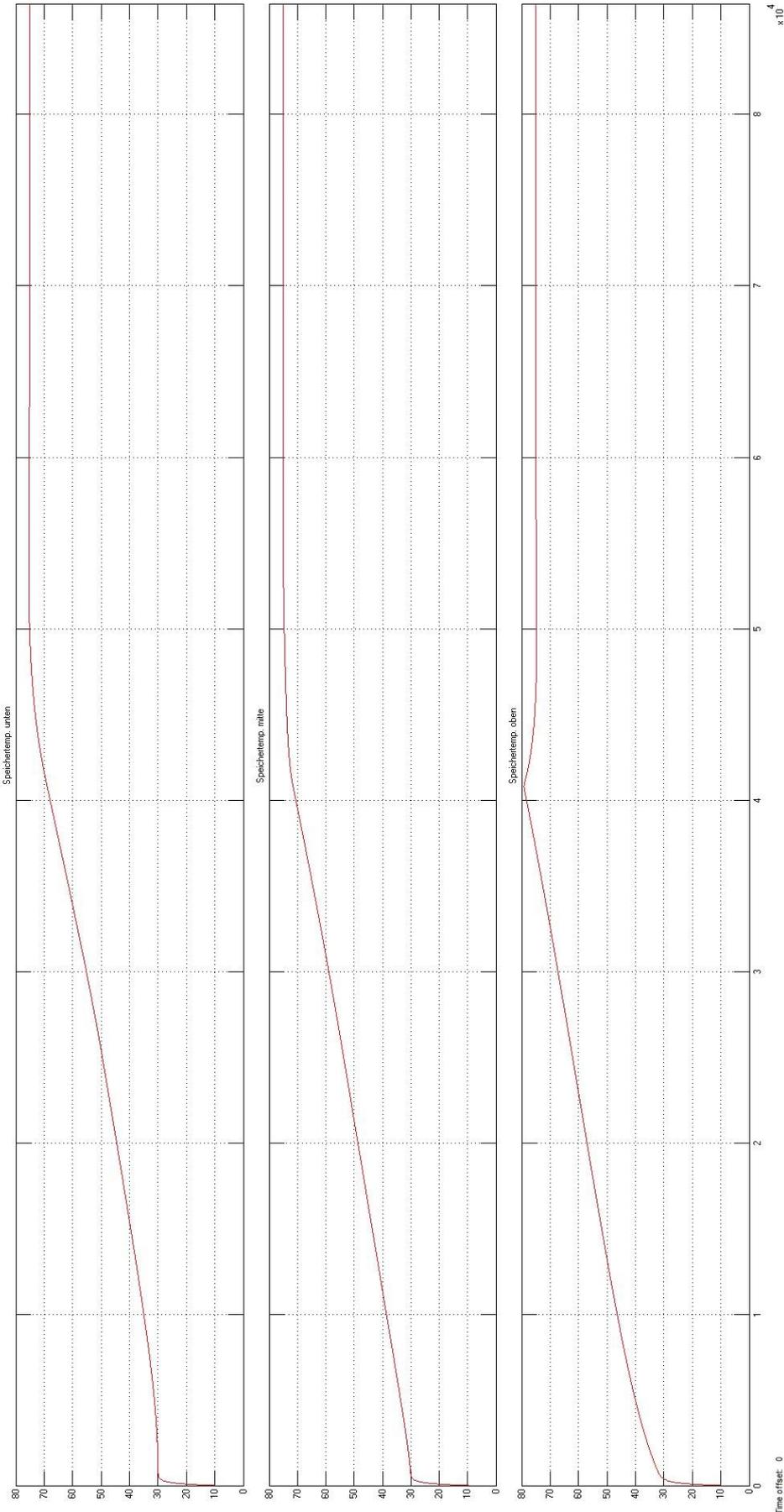


Abbildung 5.3-7: Speicher Scope

6 Ausblick

Das Ergebnis dieser Masterarbeit ist eine voll funktionsfähige Steuerung für Wärmeerzeuger unterschiedlicher Art und Weise. Sie ist aber nur ein Teil eines Entwicklungsprozesses für die Energiezentrale der Zukunft. Weiterhin wurde innerhalb dieser Arbeit nur auf die Erzeugerseite der Nutzwärme eingegangen. Als nächster Schritt ist eine vollständige Analyse von Verbrauchsdaten notwendig, die mit Hilfe einer Datenreduktion und anschließender Regression ein solides Vorhersagemodell für die anstehende Last bietet. Anhand dieses Modells und eines zusätzlichen Prognosemodells für Wetter und Strahlung ist auch die Einreihung der Leistungserzeugung durch den Solarkollektor in die Steuerung denkbar.

In Hinblick auf die hinreichend genaue Modellierung des Speichers innerhalb dieser Arbeit muss gesagt sein, dass für ein genaueres Modell die Modellierung sowohl von Konvektionsströmen innerhalb des Speichers, als auch Wärmeabgaben an die Umgebung und Wärmeabgaben an verschiedene Verbraucher in das Modell eingearbeitet werden sollten. Auch die Anzahl der Temperaturniveaus innerhalb des Speichers ist den Erzeugern oder aber auch den unterschiedlichen Temperaturabnahmeprofilen der Verbraucher anzupassen. Als nächster konkreter Schritt sollte also die Betrachtung der Verbraucherseite erfolgen.

Mit Blick auf den Einsatz der Energiezentrale der Zukunft werden so nicht nur sinnvoll Ressourcen geschont, sondern auch effektiv Kosten gespart. Sie ist somit ein weiterer Schritt für die Eindämmung der Erderwärmung. Effektive und intelligente Nutzung von Ressourcen ist auch weiterhin das „Engineering“ von Morgen.

7 Anhang

A1 Wärmeerzeuger Gesamt

```
clc
clear all
% Brennwertkessel Alg.

K = [ 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100,
      1.07 1.075 1.07 1.06 1.04 1.02 0.99 0.975 0.968 0.965];

figure(1), plot(K(1,:), K(2,:), '*b');
title('Wirkungsgradkennlinie (Brennwert)');
xlabel('x in %');
ylabel('eta in %');

hold on

p1 = -1.5e-010;
p2 = 4.3421e-008;
p3 = -4.0792e-006;
p4 = 0.00012483;
p5 = -0.0011928;
p6 = 1.0735;

% Polynom 5. Ordnung für Brennwertkesselwirkungsgrad
x = 1:10:110;
N(x) = (p1*(x.^5)) + (p2*(x.^4)) + (p3*(x.^3)) + (p4*(x.^2)) + (p5*x) + p6;

figure(1), plot(x, N(x));
hold off
legend('Markante Punkte', 'Polynom');

% Kostenberechnung für Kesselsequenz
k = 6.7*0.01/3600; %€/kws
kstrom = 5.18*0.01/3600; %€/kws
KS = [];
for l = 1:11;
    KS(l) = k*(x(l)/N(x(l))); %€/s
end;
figure(2), plot(x, KS, '-r');
hold on
title('Kostenstrom');
xlabel('x in %');
ylabel('Kostenstrom in €/s');

% BHKW mit Erdgasturbine Alg.

Kth = [ 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100,
        0.70 0.68 0.65 0.63 0.61 0.602 0.598 0.595 0.593 0.592];
Keta = [ 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100,
        0.17 0.22 0.24 0.26 0.27 0.28 0.285 0.289 0.293 0.294];
```

Anhang

```
Kges =[ 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100,
        0.80 0.785 0.78 0.775 0.773 0.773 0.769 0.765 0.763 0.761 0.760];

figure(3),plot(kth(1,:),kth(2,:), '*b');
hold on

% Polynom 5. Ordnung für thermischen Wirkungsgrad
p1 = 1.4744e-010;
p2 = -4.6591e-008;
p3 = 5.3499e-006;
p4 = -0.00025028;
p5 = 0.0023262;
p6 = 0.697;

x= 1:10:110;
Nth(x) = p1*x.^5 + p2*x.^4 + p3*x.^3 + p4*x.^2 + p5*x + p6;
figure(3),plot(x, Nth(x));
hold off
title('Wirkungsgradkennlinie (thermisch)');
xlabel('x in %');
ylabel('eta_t_h');
legend('Markante Punkte', 'Polynom');

figure(4),plot(kel(1,:),kel(2,:), '*b');
hold on
% Polynom 4. Ordnung für elektrischen Wirkungsgrad
l1 = -5.711e-009;
l2 = 1.5625e-006;
l3 = -0.00016344;
l4 = 0.0083369;
l5 = 0.10283;

Nel(x) = l1*x.^4 + l2*x.^3 + l3*x.^2 + l4*x + l5;
figure(4),plot(x, Nel(x));
hold off
title('Wirkungsgradkennlinie (elektrisch)');
xlabel('x in %');
ylabel('eta_e_l');
legend('Markante Punkte', 'Polynom');

%Berechnung des normierten Brennstoffeinsatzes Qbr

Qbr=[];
for e=1:11;
Qbr(e)= (x(e)/Nel(x(e)));
end;

% Ermittlung der Nutzwärme Qnutz

Qnutz=[];
for e=1:11;
Qnutz(e)= (Qbr(e)*Nth(x(e)));
end;

% Nges=[];
```

Anhang

```
% for e=1:11;
% Nges(e)= (Qnutz(e)+x(e))/(Qbr(e));
% end;

figure(5),plot(Qnutz, Nth(x) );

%Kostenberechnung für BHKWsequenz wärmegeführt
k=6.7*0.01/3600;          %€/kws

KSbhw=[];
for l=1:11;
    if l<=5
        KSbhw(l)= (k*Nth(x(l))*Qbr(l))-(20*0.01/3600*Ne1(x(l))*Qbr(l));          %€/s
    else
        KSbhw(l)= (k*Nth(x(l))*Qbr(l))-(((5.18*0.01/3600*Ne1(x(l))*Qbr(l))*(1-
        ((51/(x(l)/100))/100)))+(20*0.01/3600*Ne1(x(l))*Qbr(l))*((51/(x(l)/100))/100))
    end;
end;
% for l=1:11;
% KSbhw(l)= (k*Nth(x(l))*Qbr(l))-(kstrom*Ne1(x(l))*Qbr(l));
% end;
figure(2),plot(x, KSbhw);
hold off
legend('Kessel', 'BHKW');
```

A2 Schichttemperatur

```
function dTsp=schichttemp(t,Tsp)
global Trl2 Tv1 T_aus
Utot= 1.1; % W/m²/K Flachkollektor
eta0= 0.8; %
k1= 1.90; % W/K*m²
k2= 0.001; % W/K²m²
qs= 600; % W/m²
T_ein= Trl2; % °C
T_a= 30; % °C
Ako11= 100; % m²
cw=4182; % J/kgK
rho=998.2; % kg/m³

mw=1; %kg/s
cw=4182; %j/kgK

% Solarthermischer Wandler Alg.
%Für die statische Betrachtung der Phase 2 gilt (Heatpipe-Vakuurröhre):

eta= (cw*mw*sqrt((4*eta0*k2*qs+k1^2)*Ako11^2+(8*cw*k2*mw*T_ein-8*cw*k2*mw*T_a+4*cw*k1*mw)*Ako11+4*cw^2*mw^2))+(-2*cw*k2*mw*T_ein+2*cw*k2*mw*T_a-cw*k1*mw)*Ako11-2*cw^2*mw^2)/(k2*qs*Ako11^2) % Wirkungsgrad

Tkol1=((eta*qs*Ako11+cw*mw*T_ein)/(cw*mw)+T_ein)/2; % Kollektortemperatur

T_aus=(eta*qs*Ako11+cw*mw*T_ein)/(cw*mw) % Kollektoraustrittstemperatur

Tv1=T_aus; % °C
k= 10600; %W/m²K
l=2; %m
Ar=0.05*pi*l; %m² Mantelfläche Wärmetauscher
Qw=(mw*cw*(Tv1-Trl2)) %W
%%G=(2*Qw)/(k*Ar);
Trl1=-((Tv1-2*Tsp(1))-(2*Qw/k*Ar)) %°C , Gleichung nach VDI Wärmeatlas Wärmeleistung
von Raumheizflächen
Trl2=Trl1;
lamdaeff=10000.644; %Wärmeleitung zwischen Schichten
r=0.7978; %m Radius des Behälters
d=1; %m Abstand der Schichtmittelpunkte
V=2; %m³ Volumen eines Behältersegments
A=pi*r^2; %m² Kreisfläche des Behälters

Q=(eta*qs*Ako11); % Wärmeleistung

% ODE45
dTsp(1)= (Qw+(((A*lamdaeff/d)*(Tsp(1)-Tsp(2)))))/(V*rho*cw);
dTsp(2)= (((A*lamdaeff/d)*(Tsp(2)-Tsp(3))) +(((A*lamdaeff/d)*(Tsp(2)-Tsp(1)))))/(V*rho*cw);
dTsp(3)= ( (((A*lamdaeff/d)*(Tsp(3)-Tsp(2)))))/(V*rho*cw);
dTsp=dTsp';
end
```

A3 Schichtspeicher ODE

```
clc
close all
format short
% Sichtspeicher DGLs mit Hilfe vom ode45 solver lösen

% Definitionen
global Tv1 Tsp Tr12
Tr12=30;
Tv1=40;
t=[0 3000];
Tsp0=[30 50 70];
while Tv1 < 99
[t,x] = ode45(@schichttemp,t,Tsp0)
Tsp0=x(end,:);
Tv1
Tr12
end
Ddiff=Tv1-Tr12
Tsp1=x(end,1);
Tsp=Tsp1;

%%options = optimoptions('fsolve','Algorithm','levenberg-marquardt');
%%[Tkollektor,fval] = fsolve(@kollektortemp,50,options)
tkriterium= (Tr12-Tsp)/(Tv1-Tsp)
```

A4 Nürtingen Wärmeerzeuger Gesamt

```
clc
clear all
% Brennwertkessel Alg.

K =[ 0 120 240 360 480 600 720 840 960 1080 ,
     1.07 1.075 1.07 1.06 1.04 1.02 0.99 0.975 0.968 0.965];

figure(1),plot(K(1,:),K(2,:), '*b');
title('Wirkungsgradkennlinie (Brennwert)');
xlabel('P in kW');
ylabel('eta in %');

hold on

p1 = -6.0282e-16;
p2 = 1.7323e-12;
p3 = -1.4423e-09;
p4 = 1.8753e-07;
p5 = 2.0514e-05;
p6 = 1.0704;

% Polynom 5. Ordnung für Brennwertkesselwirkungsgrad
x1= 1:120:1081;
N = (p1*(x1.^5)) + (p2*(x1.^4)) + (p3*(x1.^3)) + (p4*(x1.^2)) + (p5*x1) + p6;

figure(1),plot(x1, N);
hold off
Legend('Markante Punkte', 'Polynom');

%Kosteberechnung für Kesselsequenz
k=6.7*0.01/3600;           %€/kws
kstrom=5.18*0.01/3600;   %€/kws
kstrom1=20*0.01/3600;   %€/kws
KS=[];
for l=1:10;
KS(l)= k*(x1(l)/N(l));   %€/s
end;
figure(2),plot(x1, KS, '-r');
hold on
title('Kostenstrom');
xlabel('P in kW');
ylabel('Kostenstrom in €/s');

% BHKW mit Erdgasturbine Alg.

Kth =[0 48 96 144 192 240 288 336 384 432 ,
      0.70 0.68 0.65 0.63 0.61 0.602 0.598 0.595 0.593 0.592];
Ke1 =[0 32 64 96 128 160 192 224 256 288 ,
      0.17 0.22 0.24 0.26 0.27 0.28 0.285 0.289 0.293 0.294];
Kges =[ 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100,
```

```
0.80 0.785 0.78 0.775 0.773 0.769 0.765 0.763 0.761 0.760];

figure(3),plot(kth(1,:),kth(2,:), '*b');
hold on

% Polynom 4. Ordnung für thermischen Wirkungsgrad
p1 = 5.7862e-14;
p2 = -7.3881e-11;
p3 = 3.2857e-08;
p4 = -5.0462e-06;
p5 = -0.00026113;
p6 = 0.70013;

x2= 1:48:433;
Nth(x2) = (p1*(x2.^5))+(p2*(x2.^4))+(p3*(x2.^3))+(p4*(x2.^2))+(p5*x2)+p6;
figure(3),plot(x2, Nth(x2));
hold off
title('Wirkungsgradkennlinie Nürtingen (thermisch)');
xlabel('P in kW');
ylabel('eta_t_h');
legend('Markante Punkte', 'Polynom');
%
figure(4),plot(kel(1,:),kel(2,:), '*b');
hold on
% % Polynom 4. Ordnung für elektrischen Wirkungsgrad
l1 = -5.4464e-11;
l2 = 4.0714e-08;
l3 = -1.1718e-05;
l4 = 0.0017231;
l5 = 0.17136;

x3=1:32:289;
Nel(x3) = l1*x3.^4 + l2*x3.^3 + l3*x3.^2 + l4*x3 + l5;
figure(4),plot(x3, Nel(x3));
hold off
title('Wirkungsgradkennlinie Nürtingen(elektisch)');
xlabel('P in kW');
ylabel('eta_e_l');
legend('Markante Punkte', 'Polynom');

%Berechnung des normierten Brennstoffeinsatzes Qbr

Qbr=[];
for e=1:10;
Qbr(e)= (x3(e)/Nel(e));
end;

% Ermittlung der Nutzwärme Qnutz

Qnutz=[];
for e=1:10;
Qnutz(e)= (Qbr(e)*Nth(e));
end;
```

Anhang

```
% % Nges=[];
% % for e=1:10;
% % Nges(e)= (Qnutz(e)+x(e))/(Qbr(e));
% % end;

%figure(5),plot(Qnutz, Nth(x2) );

%Kostenberechnung für BHKWsequenz wärmegeführt
k=6.7*0.01/3600;          %€/kws

KSbhkw=[];
% for l=1:10;
%     if l<=5
%     KSbhkw(l)= (k*x2(l))-(20*0.01/3600*x3(l));          %€/s
%     else
%     KSbhkw(l)= (k*x2(l))-(((5.18*0.01/3600*x3(l))*(1-
((51/(x3(l)/100))/100)))+(20*0.01/3600*x3(l))*((51/(x3(l)/100))/100)));
%     end;
%     end;
for l=1:10;
    KSbhkw(l)= (k*x2(l))-(kstrom*x3(l));
end;
figure(2),plot(x2, KSbhkw);
hold off
legend('Kessel', 'BHKW');
```

A5 Workspacedeklarationen Mehrschichtspeicher

```
%Workspacedeclarationen für Mehrschichtspeicher.mdl

clc
clear screen
close all
clear all

global Lastprognose

%Kollektorgroßen
Utot= 1.1;           % W/m²/K  Flachkollektor
eta0= 0.8;           %
k1= 1.90;            % W/K*m²
k2= 0.001;           % W/K²m²
qs= 600;             % W/m²
Akol1= 400;          % m²
cw=4182;             % J/kgK
rho=998.2;           % kg/m³
mw=1;                % kg/s
cw=4182;             % j/kgK

%Wärmetauschergrößen
k= 10600;            % W/m²K
l=8;                 % m      Länge Heizspirale
Ar=0.08*pi*l;        % m²     Mantelfläche Wärmetauscher
lamdaeff=10000.644; %      Wärmeleitung zwischen Schichten
r=3.2571;            % m      Radius des Behälters
d=1;                 % m      Abstand der Mittelpunkte
V=33.33;             % m³     Volumen eines Behältersegments
A=pi*r^2;            % m²     Grundfläche eines Behältersegments

%Speicher
Temp1=30;            % °C    Starttemperatur
Temp2=30;            % °C    Starttemperatur
Temp3=30;            % °C    Starttemperatur
```

A6 Steuerungsfunktion Wärmeerzeuger

```
function [Kesselleistung,BHKWLeistung,Strom] = fcn(
BHKW_Betriebsart,Stromabnahme,Speicherenergie,Einspeicherhorizont )
Prognose=8500; %Lastprognose(58,1); % in kwh
Bedarf=Prognose-3450; % in kwh
Speicherenergie;
n=Prognose-Speicherenergie;
Leistung=Bedarf/Einspeicherhorizont; % in kw

Kesselleistung=0;
BHKWLeistung=0;
Strom=0;

% Kennlinien für Kessel und BHKW mit Kostenströmen
faktor=1.501547; % Faktor zur Umrechnung BHKW Strom-/wärmeleistung
%Kostenfaktoren
k=6.7*0.01/3600; %€/kws
kstrom=5.18*0.01/3600; %€/kws
kstrom2=20*0.01/3600; %€/kws
% Brennwertkessel Alg.

% Polynom 5. Ordnung für Brennwertkesselwirkungsgrad
p1 = -6.0282e-16;
p2 = 1.7323e-12;
p3 = -1.4423e-09;
p4 = 1.8753e-07;
p5 = 2.0514e-05;
p6 = 1.0704;

x1= 1:120:1081;

N = (p1*(x1.^5)) + (p2*(x1.^4)) + (p3*(x1.^3)) + (p4*(x1.^2)) + (p5*x1) + p6;

% BHKW mit Erdgasturbine Alg.

% Polynom 4. Ordnung für thermischen Wirkungsgrad
p1 = 5.7862e-14;
p2 = -7.3881e-11;
p3 = 3.2857e-08;
p4 = -5.0462e-06;
p5 = -0.00026113;
p6 = 0.70013;

x2= 1:48:433;

Nth =(p1*(x2.^5))+p2*(x2.^4))+p3*(x2.^3))+p4*(x2.^2))+p5*x2)+p6;

% Polynom 4. Ordnung für elektrischen Wirkungsgrad
l1 = -5.4464e-11;
l2 = 4.0714e-08;
l3 = -1.1718e-05;
```

Anhang

```
14 = 0.0017231;
15 = 0.17136;

x3=1:32:289;

Nel = 11*x3.^4 + 12*x3.^3 + 13*x3.^2 + 14*x3 + 15;

%Berechnung des normierten Brennstoffeinsatzes Qbr
%   Qbr= (Leistung/faktor/Nel(Leistung/faktor));

% Ermittlung der Nutzwärme Qnutz
%   Qnutz= (Qbr*Nth(Leistung/faktor));

if BHKW_Betriebsart ==1    % 1 = Wärmegeführt ohne Stromabnahme

    % Kostenstrom BHKW

    KSbhw= (k*Leistung)-(kstrom*(Leistung/faktor));

    % Kostenstrom Kessel

    KS= k*(Leistung/((p1*(Leistung^5)) + (p2*(Leistung^4)) + (p3*(Leistung^3)) +
(p4*(Leistung^2)) + (p5*Leistung) + p6));           %€/s

    if KSbhw >= KS

        if n >0
            if Leistung <= 1200
                Kesselleistung=Leistung;
                BHKWLeistung=0;
                n=n-(Leistung/3600);
            else
                Kesselleistung=1200;
                BHKWLeistung=Bedarf-1200;
                Strom=(Bedarf-1200)/faktor;
                n=n-(Leistung/3600);
            end;

        else
            Kesselleistung=0;
            BHKWLeistung=0;
            Strom=0;

        end;
    else

        if n >0

            if Leistung <= 485
                Kesselleistung=0;
                BHKWLeistung=Leistung;
                Strom=Leistung/faktor;
                n=n-(Leistung/3600);
            else
```

```
        Kesselleistung=Leistung-485;
        BHKWLeistung=485;
        Strom=485/faktor;
        n=n-(Leistung/3600);
    end
else
    Kesselleistung=0;
    BHKWLeistung=0;
    Strom=0;
end

end

elseif BHKW_Betriebsart ==2      % 2 = Wärmegeführt mit x% Stromabnahme

    % Berechnung für Storm oder Wärmegeführt
    h=Stromabnahme/100;          %Stromabnahme in %
    Strommenge=h*323;           %Strom in kw
    if Strommenge >= (Leistung/faktor)
        Leistung=Strommenge*faktor;
    else
        Leistung=Leistung;
    end;
    g=(Leistung/faktor)/100;
    u=Strommenge/g;
    % Kostenstrom BHKW
    if Strommenge <= (Leistung/faktor)
        Ksbhkw= (k*Leistung)-(((kstrom*(Leistung/faktor))*(1-
(u/100)))+(kstrom2*(Leistung/faktor))*(u/100)));
    else

        Ksbhkw= (k*Leistung)-(kstrom2*(Leistung/faktor));
    end;

    % Kostenstrom Kessel

    KS= k*(Leistung/((p1*(Leistung^5)) + (p2*(Leistung^4)) + (p3*(Leistung^3)) +
(p4*(Leistung^2)) + (p5*Leistung) + p6));          %€/s

    if Ksbhkw >= KS

        if n >0
            if Leistung <= 1200
                Kesselleistung=Leistung;
                BHKWLeistung=0;
                n=n-(Leistung/3600);
            else
                Kesselleistung=1200;
                BHKWLeistung=Bedarf-1200;
                Strom=(Bedarf-1200)/faktor;
                n=n-(Leistung/3600);
            end;
        else
```

```
        Kesselleistung=0;
        BHKWLeistung=0;
        Strom=0;

    end;
else

    if n>0
        if Leistung <= 485
            Kesselleistung=0;
            BHKWLeistung=Leistung;
            Strom=Leistung/faktor;
            n=n-(Leistung/3600);
        else
            Kesselleistung=Leistung-485;
            BHKWLeistung=485;
            Strom=485/faktor;
            n=n-(Leistung/3600);
        end;
    else
        Kesselleistung=0;
        BHKWLeistung=0;
        Strom=0;

    end;
end;

else    % 3 = Stromgeführt

    % Berechnung für storm oder wärmegeführt
    h=Stromabnahme/100;           %Stromabnahme in %
    Strommenge=h*323;           %Strom in kw
    if Strommenge >= (Leistung/faktor)
        Leistung=Strommenge*faktor;
    else
        Leistung=Leistung;
    end;

    % Kostenstrom BHKW

    Ksbhkw= (k*Leistung)-(kstrom2*(Leistung/faktor));

    % Kostenstrom Kessel

    KS=k*(Leistung/((p1*(Leistung^5)) + (p2*(Leistung^4)) + (p3*(Leistung^3)) +
    (p4*(Leistung^2)) + (p5*Leistung) + p6));           %€/s

    if Ksbhkw >= KS

        if n>0
            if Leistung <= 1200
                Kesselleistung=Leistung-Strommenge*faktor;
                BHKWLeistung=Strommenge*faktor;
                n=n-(Leistung/3600);
            else
```

```
        Kesselleistung=1200;
        BHKWLeistung=(Strommenge*faktor)+(Bedarf-1200);
        Strom=((Strommenge*faktor)+(Bedarf-1200))/faktor;
        n=n-(Leistung/3600);
    end;
else
    Kesselleistung=0;
    BHKWLeistung=0;
    Strom=0;
end;
else
    if n>0
        if Leistung <= 485
            Kesselleistung=0;
            if Leistung <= Strommenge*faktor
                BHKWLeistung=Strommenge*faktor;
                Strom=Strommenge;
                n=n-(Leistung/3600);
            else
                BHKWLeistung=Leistung;
                Strom=Leistung/faktor;
                n=n-(Leistung/3600);
            end;
        else
            Kesselleistung=Leistung-485;
            BHKWLeistung=485;
            Strom=485/faktor;
            n=n-(Leistung/3600);
        end;
    else
        Kesselleistung=0;
        BHKWLeistung=0;
        Strom=0;
    end;
end;
end;
end;
```

A7 Simulationsmodell

