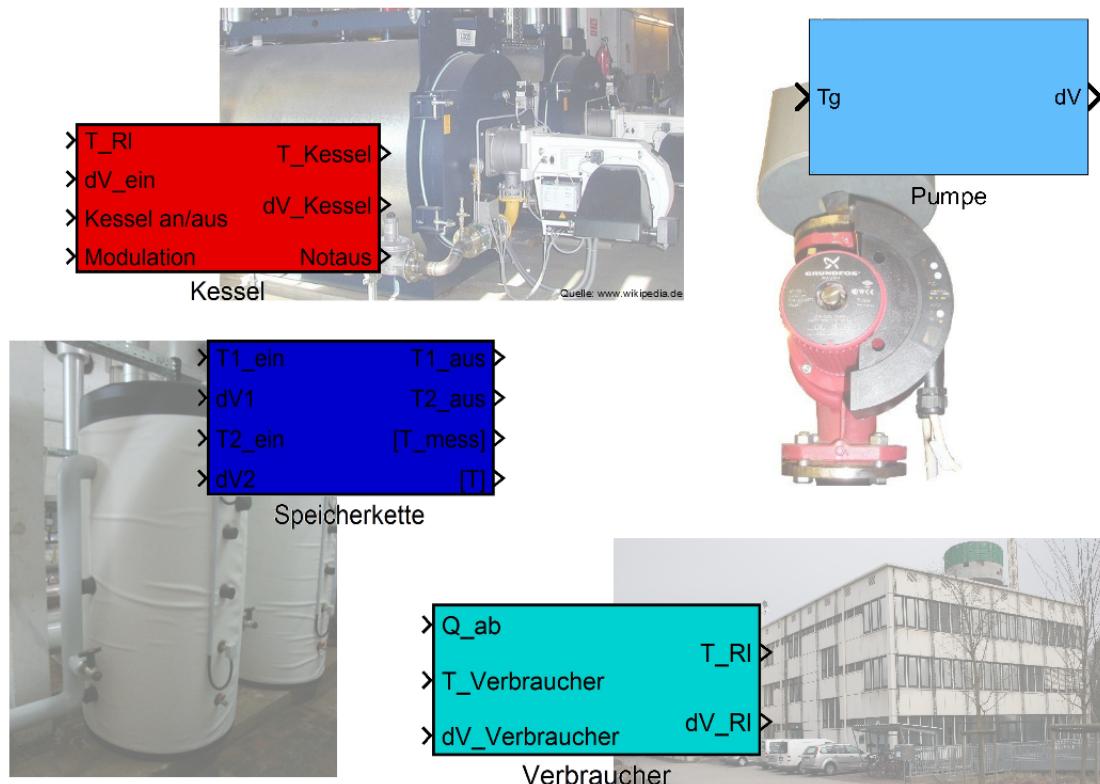


# Dokumentation Matlab HeatLib

Zur Verwendung mit Matlab<sup>©</sup>



**Autor** K. Kruppa (HAW Hamburg, Life Sciences)

*Matlab HeatLib Dokumentation*

Version 1.0,  
03.02.2014

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Dies ist Version 1.0 der *Dokumentation Matlab HeatLib*.  
Kontakt: kai.krappa@haw-hamburg.de

Copyright ©2014, M.Sc. Kai Krappa, HAW Hamburg, Life Sciences

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

You can find a copy of the license by following the link <http://www.gnu.org/licenses/>.

Dieses Dokument darf unter den Bedingungen der GNU Free Documentation License, Version 1.3 oder einer neueren von der Free Software Foundation veröffentlichten Version, vervielfältigt, verbreitet und/oder modifiziert werden; ohne invariante Abschnitte, ohne vorderen Umschlagtext und ohne hinteren Umschlagtext. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie <http://www.gnu.org/licenses/>.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 MatlabHeatLib im Überblick . . . . .	2
1.1.1 Installation . . . . .	2
1.1.2 Anforderungen . . . . .	3
1.1.3 Lizenz . . . . .	3
1.2 Physikalische Grundlagen . . . . .	4
<b>2 Block Dokumentation</b>	<b>5</b>
2.1 Wärmeerzeuger . . . . .	6
2.2 Volumenstrommodellierung . . . . .	16
2.3 Weitere Blöcke . . . . .	39
<b>3 Demo</b>	<b>58</b>
3.1 Aufbau der Beispielanlage . . . . .	59
3.2 Simulation der Anlage . . . . .	61

# 1 Einleitung

Das folgende Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten dieser Toolbox. Dazu wird zunächst die Funktionalität kurz vorgestellt und außerdem die Voraussetzungen zur Verwendung der Toolbox erläutert. Dies beinhaltet die Installation und die Systemanforderungen. Abschließend werden einige physikalische Grundlagen erläutert, die zur Modellierung von Wärmeversorgungssystemen notwendig sind.

MatlabHeatLib im Überblick 2

Physikalische Grundlagen 4

## 1.1 MatlabHeatLib im Überblick

---

Die MatlabHeatLib ist eine Simulink Blockbibliothek. Sie wurde iRahmen der Bachelorarbeit von Herrn Kai Kruppa [1] entworfen, um das Verhalten von Heizungsanlagen in Nicht-Wohngebäuden zu modellieren, und stetig weiterentwickelt. Die Bibliothek enthält verschiedene charakteristische Komponenten von Heizungen, aus denen sich Modelle großer, komplexer Heizungsanlagen erstellen lassen. Bestandteile sind zum einen wärmeerzeugende Elemente, wie z.B. ein Kessel. Außerdem gibt es Komponenten, die den Volumenstrom zwischen den einzelnen Modellen beeinflussen. Auch ein Verbraucher mit einem Gebäudemodell und ein Speicher sind vorhanden.

Die hier erstellten Modelle enthalten nicht alle in der Realität auftretenden physikalischen Effekte. Die mathematische Beschreibung der Komponenten würde sonst zu kompliziert und das Modell zu komplex werden. Somit werden die Aspekte, die nur einen geringen Einfluss auf das physikalische Verhalten der Komponenten haben vernachlässigt. Das reale Verhalten wird allerdings trotzdem annähernd gut beschrieben. In der **Block Dokumentation** (Kapitel 2) werden angelehnt an [1] die einzelnen Heizungskomponenten sowie deren mathematische Modellierungen näher beschrieben. Zuvor werden im Abschnitt „**Physikalische Grundlagen**“ die der Modellierung zugrunde liegenden wichtigsten physikalischen Zusammenhänge kurz erläutert.

### 1.1.1 Installation

Um die MatlabHeatLib zu verwenden, muss zunächst die Datei `MatlabHeatLib.mdl` auf die Festplatte in ein Verzeichnis kopiert werden. Diese Datei enthält die Bibliothek. Sie kann nun direkt mit Simulink geöffnet werden. Man hat dann Zugriff auf die einzelnen Komponenten der Bibliothek und kann sie, wie bei jeder anderen Bibliothek auch, in den eigenen Modellen verwenden.

Es besteht allerdings auch die Möglichkeit die HeatLib dem *Library Browser* von Simulink hinzuzufügen. Der Ordner bzw. das Verzeichnis, in dem sich die HeatLib befindet, muss dazu dem Matlab-Pfad angehören. Ist dies nicht der Fall, kann man das Verzeichnis mit dem Befehl `addpath('directory')` dem Pfad hinzufügen und mit `savepath` speichern, sodass das Verzeichnis auch noch in später folgenden Matlab Sessions dem Pfad angehört.

In dem Ordner muss zusätzlich auch eine Datei `slblocks.m` vorhanden sein. Diese muss vom Anwender erstellt werden. Sie legt die Art der Darstellung der Bibliothek im *Library Browser* fest. Der folgende Codeausschnitt enthält eine minimale Version der Funktion `slblocks.m`, die aussreicht, um die HeatLib in den *Library Browser* zu integrieren.

```

function blkStruct = slblocks
% Name of the library file (.mdl)
    Browser.Library = 'MatlabHeatLib';
% Displayed name in the library browser
    Browser.Name      = 'Matlab HeatLib';
    blkStruct.Browser = Browser;
% End of slblocks.m

```

Diese Funktion muss nun einmal ausgeführt werden. Nach einem Neustart von Matlab und Simulink befindet sich die HeatLib dann im Library Browser von Simulink, solange sich der Ordner und die Datei MatlabHeatLib.mdl im Matlab-Pfad befindet.

Der folgende Codeausschnitt fasst das Vorgehen noch einmal zusammen. Die Datei MatlabHeatLib.mdl befindet sich beispielhaft im Verzeichnis *C:\Users\user\Documents\MATLAB\libraries*. Zudem ist in dem Ordner das m-File slblocks.m wie oben angegeben vorhanden.

```

% Add the directory of the library to the Matlab path
addpath('C:\Users\user\Documents\MATLAB\libraries')
savepath
% Execute the function slblocks to add the
% library to the library browser
slblocks

```

### 1.1.2 Anforderungen

Die Voraussetzung für die Verwendung der MatlabHeatLib ist zunächst die Installation einer Matlab-Version. Außerdem muss Simulink vorhanden sein, um mit der Bibliothek arbeiten zu können. Die aktuelle Version der HeatLib wurde mit der Matlab-Version R2012b erstellt.

### 1.1.3 Lizenz

Die Matlab HeatLib wird unter der *GNU General Public License* veröffentlicht:

*Copyright (C) 2014 Kai Kruppa, HAW Hamburg, Life Sciences  
This program is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the  
GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3  
of the License, or (at your option) any later version.  
This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY;  
without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR  
PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.*

Eine Kopie der *GNU General Public License* ist der Bibliothek beigefügt oder kann unter <http://www.gnu.org/licenses/> eingesehen werden.

## 1.2 Physikalische Grundlagen

---

Die Grundlage für die Modellierung der Komponenten bildet die Wärmeleistungsbilanz. Das bedeutet, dass die Summe der zugeführten und der abgeführten Leistungen Null ergeben muss. Dabei geht die zugeführte Leistung mit einem positiven Vorzeichen, die abgeführte mit einem negativen Vorzeichen in die Bilanz ein. Die Wärmeleistung ergibt sich aus der zeitlichen Ableitung der Wärmemenge  $Q$ . Diese erhält man aus

$$Q = c\rho VT, \quad (1)$$

wobei  $c$  die spezifische Wärmekapazität und  $\rho$  die Dichte des Mediums der Temperatur  $T$  mit dem Volumen  $V$  beschreibt, [2]. Das Medium in der Anlage ist Wasser, so dass sich für die Materialparameter  $c$  und  $\rho$  folgende Werte ergeben

- $c = 4182 \frac{J}{kgK}$ ,
- $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ , [2].

Da sowohl die Temperatur als auch das Volumen zeitabhängig sein können, gilt für die Wärmeleistung, unter Beachtung der Produktregel der Differentiation,

$$\frac{dQ}{dt} = c\rho \frac{dV}{dt}T + c\rho V \frac{dT}{dt}. \quad (2)$$

Je nachdem in welchem Zusammenhang die Wärmeleistung berechnet wird, kann die Temperatur oder das Volumen als zeitlich konstant angenommen werden. Das bedeutet, dass die Ableitung der jeweiligen Variable Null wird. Damit erhält man für die Wärmeleistung

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = \begin{cases} c\rho\dot{V}T & \text{für } T = const \\ c\rho V\dot{T} & \text{für } V = const. \end{cases} \quad (3)$$

Die zeitliche Ableitung einer Variable wird in den Simulink Blöcken, z.B. für  $Q$ , durch  $dQ$  beschrieben, da die hier verwendeten Darstellungen  $\frac{dQ}{dt}$  und  $\dot{Q}$  dort nicht möglich sind.

Um die Verbindung der einzelnen Komponenten zu beschreiben, muss das Verhalten des Volumenstroms  $\dot{V}$  und der Temperatur  $T$  an einem Knotenpunkt betrachtet werden. Werden in einem Knoten  $n$  Volumenströme zu einem vereinigt, so ergibt sich der gesamte Volumenstrom zu

$$\dot{V}_{ges} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_n. \quad (4)$$

Für die Mischungsgleichung der Temperatur muss zunächst die Wärmeleistungsbilanz am Knoten aufgestellt werden

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dots + \dot{Q}_n. \quad (5)$$

Durch Einsetzen von (3) in (5) erhält man

$$c\rho\dot{V}_{ges}T_{ges} = c\rho\dot{V}_1T_1 + c\rho\dot{V}_2T_2 + \dots + c\rho\dot{V}_nT_n. \quad (6)$$

Daraus folgt für die Temperatur des vereinigten Volumenstroms, [7]

$$T_{ges} = \frac{T_1\dot{V}_1 + T_2\dot{V}_2 + \dots + T_n\dot{V}_n}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_n}. \quad (7)$$

## 2 Block Dokumentation

Im nun folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Blöcke der MatlabHeatLib einzeln näher vorgestellt. Die Modellierungen der einzelnen Komponenten basieren zu großen Teilen auf den in [1] entwickelten Modellen. Die Beschreibungen der Bibliotheksblöcke erfolgt dabei immer nach dem gleichen folgenden Schema. Zunächst werden die Funktionalität und die Eigenschaften der Blockmasken erläutert und ein Bild des Blockes angegeben. Daraufhin erfolgen die Beschreibungen der Ein- und Ausgänge sowie der Parameter der jeweiligen Komponente. Außerdem wird eine allgemeine formelmäßige Beschreibung des Verhaltens des Blockes angegeben, die zeigt, wie die Ausgangssignale aus den Eingangssignalen berechnet werden. Abschließend ist die Simulink Implementation der zuvor beschriebenen Modelle abgebildet. Die einzelnen Elemente der HeatLib sind im folgenden Kapitel in verschiedene Bereiche eingeteilt worden.

Das sind zum einen die **Wärmeerzeuger**, die dem Volumenstrom Wärmeleistung hinzufügen. Eine weitere Gruppe bilden Komponenten der **Volumenstrommodellierung**, die den Volumenstrom beeinflussen, d.h. sie teilen ihn z.B. auf oder führen ihn zusammen. Die Komponenten, die sich keiner Kategorie zuordnen lassen, sind in dem Abschnitt **weitere Blöcke** zu finden. Die Dokumentation der einzelnen Komponenten erfolgt dann in den jeweiligen Kapiteln, die unten noch einmal aufgeführt sind.

Wärmeerzeuger	6
Volumenstrommodellierung	16
Weitere Blöcke	39

## 2.1 Wärmeerzeuger

---

In diesem Abschnitt werden die Komponenten beschrieben, die Wärme erzeugen. D.h. sie nehmen kaltes Wasser aus dem Rücklauf auf und geben warmes Wasser an den Vorlauf ab. Dem am Eingang anliegenden Volumenstrom wird eine einstellbare Leistung  $\dot{Q}_{zu}$  zugeführt, sodass am Ausgang ein erwärmter Volumenstrom abgeführt werden kann.

Wärmeerzeuger		
Block	Beschreibung	Seite
Kessel	Kessel als Wärmeerzeuger	7
Blockheizkraftwerk	BHKW als Wärmeerzeuger	12

## Kessel

---

### Beschreibung

Der Kessel erhitzt das Wasser aus dem Rücklauf, das an seinem Eingang anliegt und gibt das warme Wasser wieder an den Vorlauf ab. Das Wasser fließt als Volumenstrom  $dV_{ein}$  mit der Temperatur  $T_{Rl}$  in den Kessel hinein. Dem Wasser im Kesselvolumen  $V_{Kessel}$  wird die Leistung  $\dot{Q}_{zu}$  zugeführt. Die Einstellung von  $\dot{Q}_{zu}$  erfolgt über das *Modulation*-Signal, das in dieser Dokumentation mit  $\varphi_{Kessel}$  bezeichnet wird. Es gibt den prozentualen Anteil der tatsächlich zugeführten von der maximalen Leistung  $P_{max,Kessel}$  an. Die zugeführte Leistung darf dabei allerdings nicht niedriger als die minimale Leistung  $P_{min,Kessel}$  sein. Über das Signal *Kessel an/aus*, dass hier durch  $\psi_{Kessel}$  beschrieben wird, kann die zugeführte Leistung an- oder abgeschaltet werden. Durch die bereitgestellte Leistung wird das Wasser im Kessel erhitzt. Das warme Wasser fließt mit dem Volumenstrom  $dV_{Kessel}$  und der Temperatur  $T_{Kessel}$  wieder aus dem Kessel heraus. Es wird angenommen, dass der Volumenstrom durch den Kessel konstant ist und dass das Wasser im Kesselinnenraum überall die gleiche Temperatur hat. Die Wärmeverluste werden angenähert in einer Verlustleistung  $\dot{Q}_{Verlust}$  zusammengefasst. Sie beschreibt die Verluste des Kessels an die Umgebung, d.h. die Wärmeübergänge zwischen dem Kessel und der Umgebung. Diese werden proportional zur Differenz von Vorlauf- und Umgebungstemperatur angenommen. Die Proportionalitätskonstante ist der Verlustleistungskoeffizient  $k_{Kessel}$ . Die Umgebungstemperatur wird nicht gemessen, sondern muss näherungsweise durch den Parameter  $T_{Umgebung}$  angegeben werden.

Des weiteren ist eine Schutzfunktion für den Kessel implementiert. Diese wird aktiv, wenn der einfließende Volumenstrom Null beträgt, der Kessel aber trotzdem angeschaltet ist, d.h. mit einer Leistung  $\dot{Q}_{zu}$  größer als Null betrieben wird. Da kein Wasser durch den Kessel fließt, wird auch kein Wasser aus dem Kessel abgeführt. Das Wasser, das sich im Inneren des Kessels befindet, heizt sich immer weiter auf.

Erhitzt sich das Wasser im Kessel zu stark, d.h steigt die Temperatur  $T_{Kessel}$  über die vom Anwender festgelegte Notaustemperatur *notaustemp*, gelangt der Kessel in den Notausbetrieb. Dies bedeutet, dass der Kessel automatisch für die Dauer der Notauszeit *notauszeit*, die auch als Parameter angegeben werden muss, abgeschaltet wird. Die zugeführte Leistung wird somit für diese Zeit auf Null gesetzt. Das Wasser im Kessel kühlt ab. Nach Ablauf der Notauszeit wird wieder die durch das aktuelle Modulationssignal festgelegte Leistung angelegt. Diese Funktion dient dem Schutz des Kessels, da er durch zu hohe Temperatur beschädigt werden kann. Geht der Kessel in den Notausbetrieb, wird dies über das Ausgangssignal *Notaus* angezeigt.

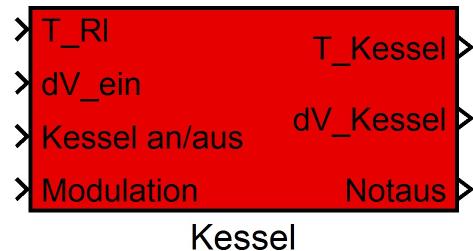
**Block**

Abbildung 1: Simulink-Block des Kessels

**Ein- und Ausgänge**

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Rl	Rücklauftemperatur	[K]
dV_ein	Volumenstrom des Rücklaufs	[ $\frac{m^3}{s}$ ]
Kessel an/aus	Schalter, der den Kessel an- oder ausschaltet	[−]
Modulation	Moduliert die zugeführte Leistung	[−]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Kessel	Temperatur des abfließenden Volumenstroms	[K]
dV_Kessel	Abfließender Volumenstrom	[ $\frac{m^3}{s}$ ]
Notaus	Anzeige für den Notausbetrieb	[−]

## Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
V_Kessel	Kesselvolumen	[m <sup>3</sup> ]
P_min	Minimale Kesselleistung	[kW]
P_max	Maximale Kesselleistung	[kW]
k_Kessel	Verlustleistungskoeffizient	[W/K]
c	Spezifische Wärmekapazität des Mediums	[J/kgK]
rho	Dichte des Mediums	[kg/m <sup>3</sup> ]
notaustemp	Notaustemperatur	[K]
notauszeit	Notauszeit	[s]
KesselInit	Anfangswert der Temperatur $T_{Kessel}$	[K]
T_Umgebung	Umgebungstemperatur	[K]

## Allgemeine Beschreibung

zugeführte Leistung:

$$\dot{Q}_{zu} = \begin{cases} 0 & \text{für } \psi_{Kessel} = 0 \\ 0 & \text{für } T_{Kessel} > notaustemp \\ max(P_{min,Kessel}, \varphi_{Kessel} P_{max,Kessel}) & \text{sonst} \end{cases} \quad (8)$$

mit  $\varphi_{Kessel} \in [0, 1]$

Wärmeleistungsbilanz:

$$\dot{Q}_{Kessel} = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{Verlust} + \dot{Q}_{Kessel,Rl} - \dot{Q}_{Kessel,Vl} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{Kessel} = c\rho V_{Kessel} \dot{T}_{Kessel}, \quad (10)$$

$$\dot{Q}_{Kessel,Rl} = c\rho \cdot dV_{Kessel} T_{Rl}, \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{Kessel,Vl} = c\rho \cdot dV_{Kessel} T_{Kessel}, \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{Verlust} = k_{Kessel}(T_{Kessel} - T_{Umgebung}) \quad (13)$$

Kesselausgangstemperatur:

(10),(11),(12),(13)  $\Rightarrow$  (9)

$$\begin{aligned} \dot{T}_{Kessel} &= \frac{\dot{Q}_{Kessel}}{c\rho V_{Kessel}} \\ &= \frac{\dot{Q}_{zu} - k_{Kessel}(T_{Kessel} - T_{Umgebung}) + c\rho \cdot dV_{Kessel}(T_{Rl} - T_{Kessel})}{c\rho V_{Kessel}} \end{aligned} \quad (14)$$

Volumenstrom:

$$dV_{Kessel} = dV_{ein} \quad (15)$$

### Simulink Implementation

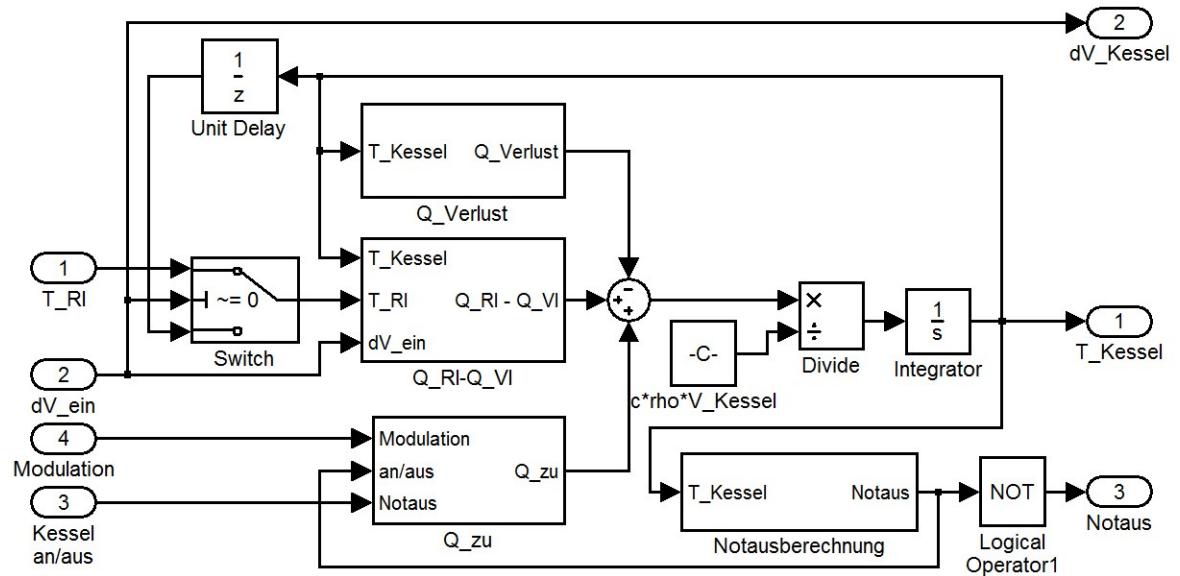


Abbildung 2: Blockschaltbild des Kessels

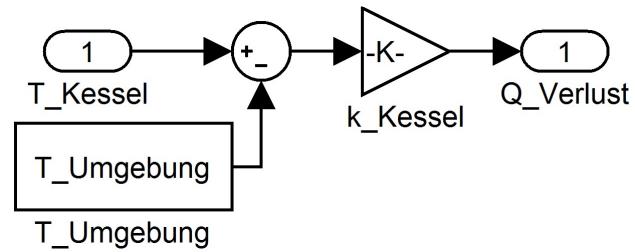


Abbildung 3: Berechnung der Verlustleistung  $\dot{Q}_{Verlust}$

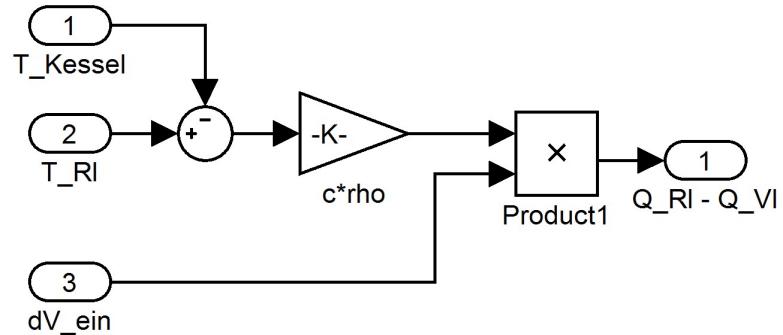
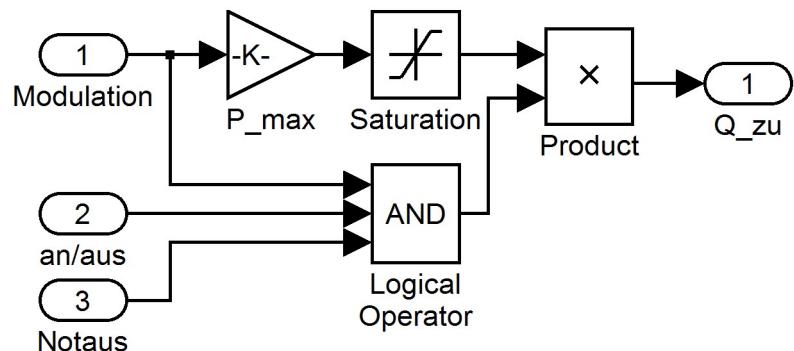
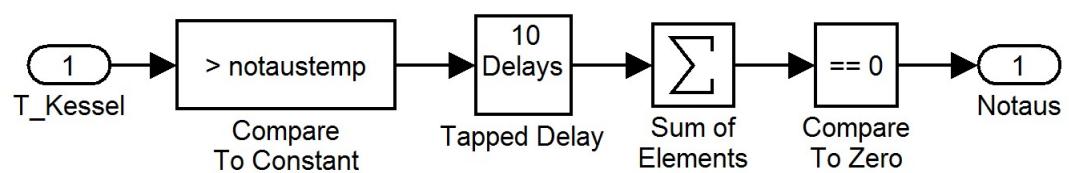
Abbildung 4: Berechnung der Leistungsdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf  $\dot{Q}_{Rl} - \dot{Q}_{Vl}$ Abbildung 5: Berechnung der zugeführten Leistung  $\dot{Q}_{zu}$ 

Abbildung 6: Berechnung des Notaus-Signals

## Blockheizkraftwerk

---

### Beschreibung

Im Blockheizkraftwerk, im Folgenden mit BHKW abgekürzt, findet das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung Anwendung. Es wird sowohl thermische, als auch elektrische Energie erzeugt. Das folgende Modell berücksichtigt allerdings nur die Wärmeleistung und nicht die elektrische Leistung.

Die mathematische Beschreibung des BHKW's ist ähnlich zu der des Kessels (Seite 7). Am Eingang des BHKW's liegt ein Volumenstrom  $dV_{ein}$  mit der Rücklauftemperatur  $T_{RI}$  an. Das im BHKW-Volumen  $V_{BHKW}$  befindliche Wasser wird erhitzt, da ihm die Leistung  $\dot{Q}_{zu}$  zugeführt wird. Am Ausgang fließt dann das erhitzte Wasser mit dem Volumenstrom  $dV_{BHKW}$  und der Temperatur  $T_{BHKW}$  wieder ab. Die zugeführte Leistung lässt sich, wie auch beim Kessel, durch das Signal *Modulation*, hier in der Dokumentation als  $\varphi_{BHKW}$  bezeichnet, zwischen der minimalen Leistung  $P_{min,BHKW}$  und der maximalen Leistung  $P_{max,BHKW}$  variieren.

Es besteht die Möglichkeit das Ventil des BHKW's mittels des Schaltersignals *BHKW an/aus* (Werte 0 oder 1) zu schließen. Das Schaltersignal wird im Folgenden durch  $\psi_{BHKW}$  beschrieben. Ist es geschlossen, so beträgt der Volumenstrom durch die Komponente Null und auch die zugeführte Leistung  $\dot{Q}_{zu}$  wird auf Null gesetzt. Ansonsten hat der Volumenstrom einen bestimmten Wert und ist innerhalb des BHKW's als konstant anzunehmen. Beträgt der Volumenstrom  $0 \frac{m^3}{s}$  und das Modulationssignal ist ungleich 0, wird das Wasser im Inneren des BHKW's immer weiter aufgeheizt, da kein Wasser abgeführt wird und somit auch kein kaltes Wasser hinein gelangen kann. Die Verluste, die im BHKW auftreten, werden näherungsweise durch eine Verlustleistung  $\dot{Q}_{Verlust}$  beschrieben, die proportional zur Differenz von Vorlauf- und Umgebungstemperatur  $T_{Umgebung}$  ist, wobei der Verlustleistungskoeffizient  $k_{BHKW}$  die Proportionalitätskonstante beschreibt.

### Block

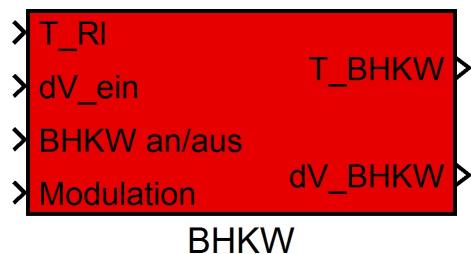


Abbildung 7: Simulink-Block des BHKW's

## Ein- und Ausgänge

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Rl	Rücklauftemperatur	[K]
dV_ein	Volumenstrom des Rücklaufs	[m³/s]
BHKW_an/aus	Schalter, der das BHKW an- oder ausschaltet	[–]
Modulation	Moduliert die zugeführte Leistung	[–]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_BHKW	Temperatur des abfließenden Volumenstroms	[K]
dV_BHKW	Abfließender Volumenstrom	[m³/s]

## Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
V_BHKW	Volumen des BHKW's	[m³]
P_min	Minimale Leistung des BHKW's	[kW]
P_max	Maximale Leistung des BHKW's	[kW]
k_BHKW	Verlustleistungskoeffizient	[kW/K]
c	Spezifische Wärmekapazität des Mediums	[J/kgK]
rho	Dichte des Mediums	[kg/m³]
BHKWInit	Anfangswert der Temperatur $T_{BHKW}$	[K]
T_Umgebung	Umgebungstemperatur	[K]

## Allgemeine Beschreibung

Zugeführte Leistung:

$$\dot{Q}_{zu} = \begin{cases} \max(P_{min,BHKW}, \varphi_{BHKW} P_{max,BHKW}) & \text{für } \psi_{BHKW} = 1 \\ 0 & \text{für } \psi_{BHKW} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

mit  $\varphi_{BHKW} \in [0,1]$

Wärmleistungsbilanz:

$$\dot{Q}_{BHKW} = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{Verlust} + \dot{Q}_{BHKW,Rl} - \dot{Q}_{BHKW,Vl} \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{BHKW} = c\rho V_{BHKW} \dot{T}_{BHKW}, \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{BHKW,Rl} = c\rho \cdot dV_{BHKW} T_{Rl}, \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{BHKW,Vl} = c\rho \cdot dV_{BHKW} T_{BHKW} \text{ und} \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{Verlust} = k_{BHKW} (T_{BHKW} - T_{Umgebung}) \quad (21)$$

Ausgangstemperatur des BHKW's:  
 $(18), (19), (20), (21) \Rightarrow (17)$

$$\begin{aligned}\dot{T}_{BHKW} &= \frac{\dot{Q}_{BHKW}}{c\rho V_{BHKW}} \\ &= \frac{\dot{Q}_{zu} - k_{BHKW}(T_{BHKW} - T_{Umgebung}) + c\rho dV_{BHKW}(T_{RI} - T_{BHKW})}{c\rho V_{BHKW}}\end{aligned}\quad (22)$$

Volumenstrom:

$$dV_{BHKW} = \begin{cases} dV_{ein} & \text{für } \psi_{BHKW} = 1 \\ 0 & \text{für } \psi_{BHKW} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

### Simulink Implementation

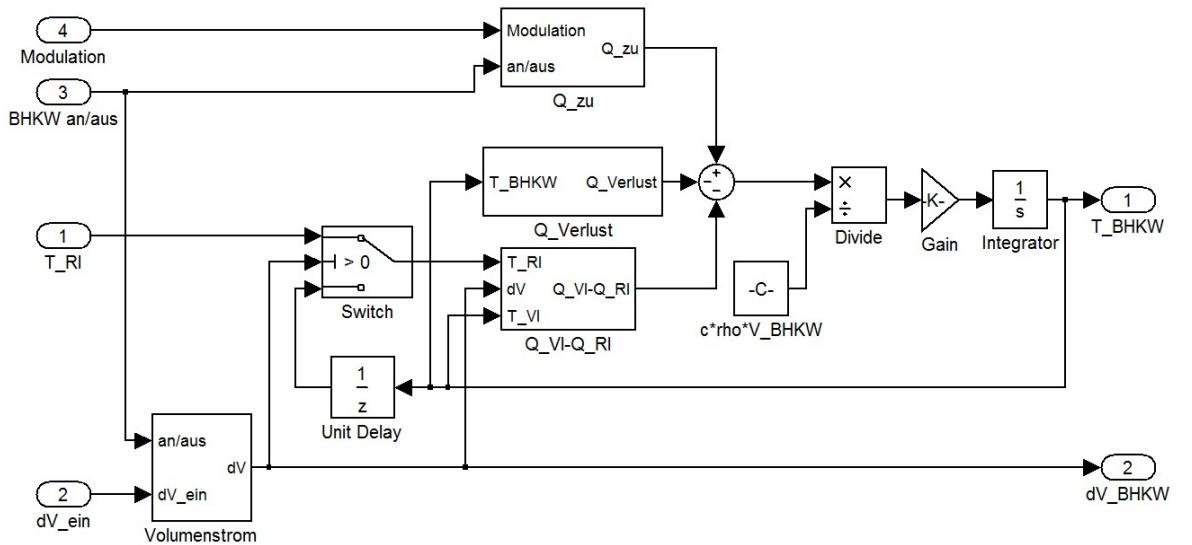


Abbildung 8: Blockschaltbild des BHKW's

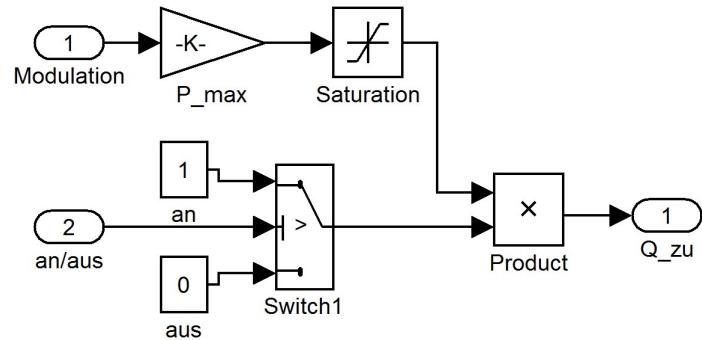
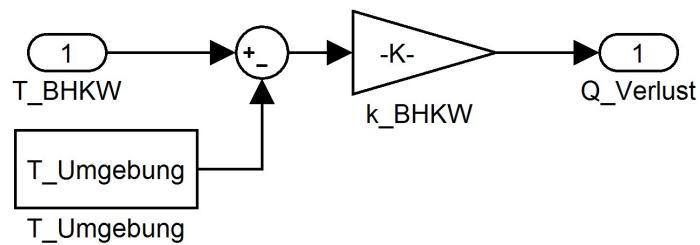
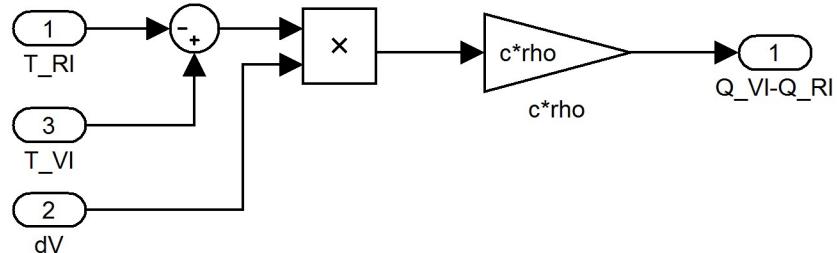
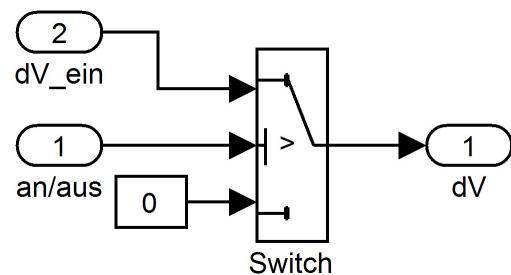
Abbildung 9: Berechnung der zugeführten Leistung  $\dot{Q}_{zu}$ Abbildung 10: Berechnung der Verlustleistung  $\dot{Q}_{Verlust}$ Abbildung 11: Berechnung der Leistungsdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf  $\dot{Q}_{Vl} - \dot{Q}_{Rl}$ 

Abbildung 12: Berechnung des Ausgangsvolumenstroms

## 2.2 Volumenstrommodellierung

---

Im Folgenden sollen die Komponenten beschrieben werden, die den Volumenstrom modellieren. Sie führen dem Volumenstrom keine Leistung hinzu, sondern sorgen lediglich für die Verteilung oder Vermischung der Ströme. So gehören zum Beispiel Elemente, die Volumenströme vereinigen oder verteilen zu dieser Kategorie.

Volumenstrommodellierung		
Block	Beschreibung	Seite
Vorlaufsammler	Zusammenführung von Volumenströmen	17
Volumenstromverteilung	Verteilung von Volumenströmen	19
Mischventil	3-Wege-Mischventil	22
Vorlaufmischer	Mischventil zwischen Vor- u. Rücklauf	25
Rücklaufanhebung	Mischer zur Anhebung der Rücklauftemperatur	28
Pumpe	Modell einer Pumpe	31
Speicherkette	Wärmespeicher	34

## Vorlaufsammler

### Beschreibung

Der Vorlaufsammler beschreibt einen Knotenpunkt für Volumenströme. Es werden  $n$  Volumenströme zu einem einzigen zusammengeführt. Die einfließenden Volumenströme  $[dV] = [dV_1 \ dV_2 \ \dots \ dV_n] \in \mathbb{R}^n$  sowie deren Temperaturen  $[T] = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n] \in \mathbb{R}^n$  werden als Vektorsignale an die Komponente übergeben. Dort werden sie anhand der Mischungsgleichungen (4) und (7) miteinander vermischt, sodass ein einzelner Volumenstrom  $dV_{Vl}$  mit der Temperatur  $T_{Vl}$  wieder aus dem Vorlaufsammler hinaus fließt.

### Block

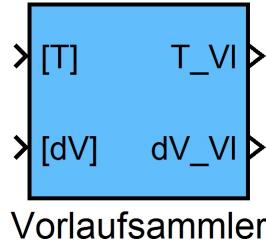


Abbildung 13: Simulink-Block des Vorlaufsammlers

### Ein- und Ausgänge

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
[T]	Vektor mit den Temperaturen der einfließenden Volumenströme	[K]
[dV]	Vektor mit den einfließenden Volumenströmen	[m <sup>3</sup> /s]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Vl	Temperatur des zusammengeführten Volumenstroms	[K]
dV_Vl	Zusammengeführter Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]

### Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Keine Parameter		

### Allgemeine Beschreibung

Vektorsignale für Temperatur und Volumenstrom:

$$[T] = [T_1 \ T_2 \ \cdots \ T_n]^T \quad (24)$$

$$[dV] = [dV_1 \ dV_2 \ \cdots \ dV_n]^T \quad (25)$$

Ausgangstemperatur:

$$T_{Vl} = \frac{T_1 \cdot dV_1 + T_2 \cdot dV_2 + \cdots + T_n \cdot dV_n}{dV_1 + dV_2 + \cdots + dV_n} \quad (26)$$

$$= \frac{[T]^T [dV]}{dV_{Vl}} \quad (27)$$

Ausgangsvolumenstrom:

$$dV_{Vl} = dV_1 + dV_2 + \cdots + dV_n \quad (28)$$

### Simulink Implementation

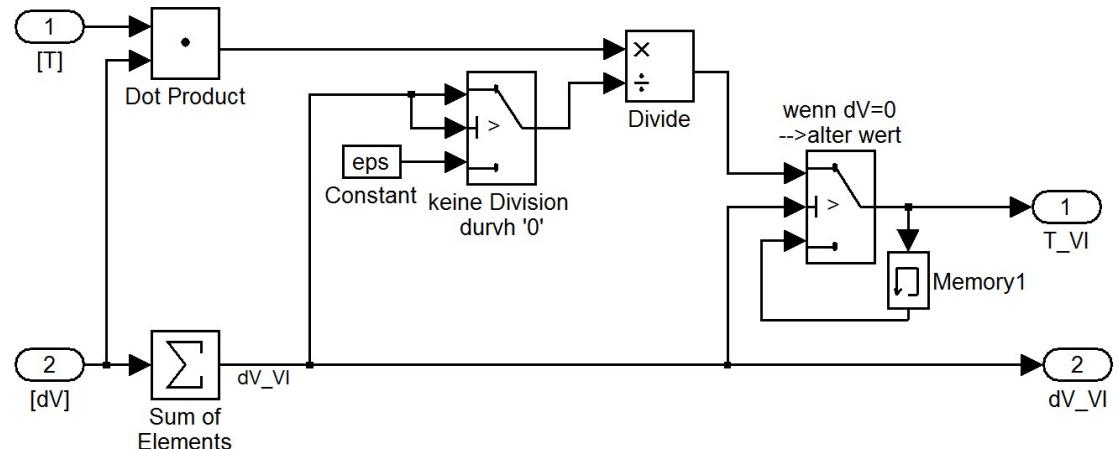


Abbildung 14: Blockschaltbild des Vorlaufsammlers

## Volumenstromverteilung

---

### Beschreibung

Durch den Block der Volumenstromverteilung wird der einfließende Volumenstrom  $dV_{ges}$  auf  $n$  Volumenströme  $dV_1, dV_2, \dots, dV_n$  aufgeteilt. Diese Volumenströme werden zu einem Vektorsignal  $[dV] \in \mathbb{R}^n$  zusammengefasst. Das Signal  $[Schalter] \in \mathbb{R}^n$  gibt an, wie die Aufteilung erfolgt. Es beinhaltet die einzelnen Schaltersignale, die im folgenden als  $\chi_i$  bezeichnet werden. Sie geben an, welche Ausgänge einen Volumenstrom erhalten und wie groß dieser jeweils sein soll. Abhängig von der Stellung der Schalter, verteilt sich der einfließende Volumenstrom auf die Ausgänge. Das Verhältnis, in dem der einfließende Volumenstrom aufgeteilt wird, kann über die Schaltersignale sowohl absolut, als auch prozentual angegeben werden. Ist das Ventil eines Ausgangs geschlossen, d. h. das entsprechende Schaltersignal ist gleich Null, fließt dort kein Volumenstrom.

Da in dieser Komponente ein einfließender Volumenstrom nur auf mehrere Volumenströme aufgeteilt wird und keine Leistung hinzufügt, ändert sich die Temperatur nicht. Das heißt die Temperatur  $T_{RI}$  des einfließenden Volumenstroms ist gleich den Temperaturen  $T_{RI,1}, T_{RI,2}, \dots, T_{RI,n}$  der Ausgangsvolumenströme. Die Ausgangstemperaturen werden zu einem Vektorsignal  $[T_{RI}] \in \mathbb{R}^n$  zusammengefasst.

### Block

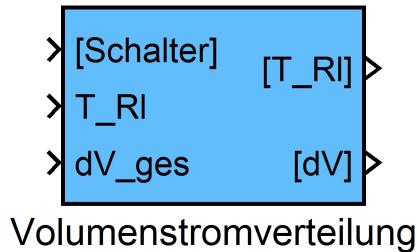


Abbildung 15: Simulink-Block der Volumenstromverteilung

## Ein- und Ausgänge

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
[Schalter]	Vektor mit den Schaltersignalen	[−]
T_Rl	Temperatur des einfließenden Volumenstroms	[K]
dV_ges	Gesamter einfließender Volumenstrom	[m³/s]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
[T_Rl]	Vektor mit den Temperaturen der aufgeteilten Volumenströme	[K]
[dV]	Vektor mit den aufgeteilten Volumenströmen	[m³/s]

## Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Keine Parameter		

## Allgemeine Beschreibung

Vektorsignale für Schalter, Temperatur und Volumenstrom:

$$[Schalter] = [\chi_1 \ \chi_2 \ \chi_3 \ \cdots \ \chi_n]^T \quad (29)$$

$$[T_{Rl}] = [T_{Rl,1} \ T_{Rl,2} \ T_{Rl,3} \ \cdots \ T_{Rl,n}]^T \quad (30)$$

$$[dV] = [dV_1 \ dV_2 \ dV_3 \ \cdots \ dV_n]^T \quad (31)$$

Verteilung des Volumenstromes  $dV_{ges}$ :

$$dV_{ges} = dV_1 + dV_2 + \cdots + dV_n \text{ wobei} \quad (32)$$

$$dV_i = \frac{\chi_i}{\sum_{i=1}^n \chi_i} \cdot dV_{ges} \text{ mit } i = 1 \dots n \quad (33)$$

Erfolgt die Angabe des Verteilungsverhältnisses in Prozent, gilt für die Schaltersignale

$$\sum_{i=1}^n \chi_i = 1 \text{ bzw. } 100\%. \quad (34)$$

Temperaturen der Ausgangsvolumenströme:

$$T_{Rl} = T_{Rl,1} = T_{Rl,2} = \cdots = T_{Rl,n} \quad (35)$$

### Simulink Implementation

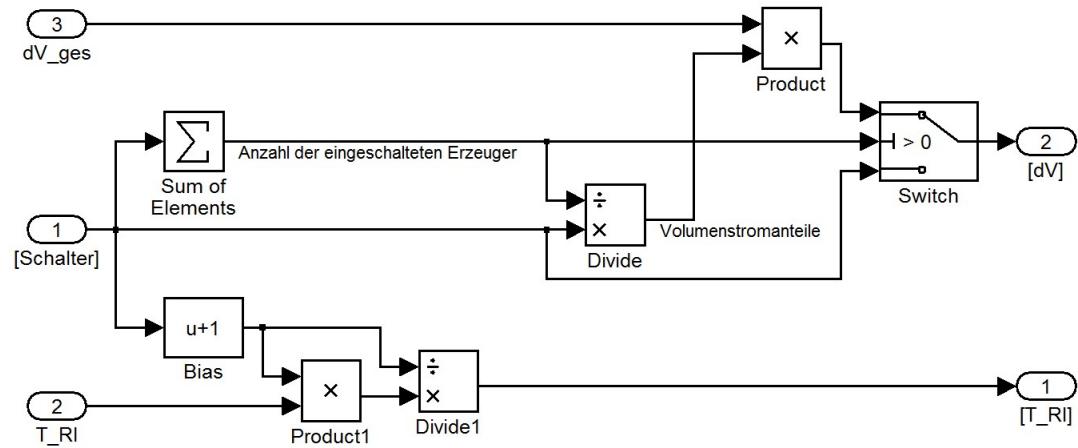


Abbildung 16: Blockschaltbild der Volumenstromverteilung

## Mischventil

---

### Beschreibung

Das Mischventil ist ein 3-Wege-Ventil. Als Eingang fließen zwei Volumenströme  $dV_1$  und  $dV_2$  mit den Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  in die Komponente hinein. Als Ausgang verlässt ein Volumenstrom  $dV_{misch}$  mit der Temperatur  $T_{misch}$  das Ventil. Der Aufbau des Mischventils ist in Abbildung 17 dargestellt. Es besteht durch diese Komponente die Möglichkeit, je nach Ventilstellung, dem Volumenstrom  $dV_1$  Wasser mit dem Volumenstrom  $dV_2$  beizumischen. Dies geschieht abhängig vom Mischverhältnis  $k$ . Das Mischverhältnis gibt, bezogen auf  $dV_1$ , an, wie viel Wasser diesem Volumenstrom beigemischt werden soll. Das bedeutet, durch  $k$  wird die Größe des Volumenstroms  $dV_2$  bestimmt.

Beträgt  $k$  Null, wird dem Volumenstrom 1 kein Wasser hinzugefügt und der Volumenstrom bleibt konstant. Ist dies nicht der Fall, d.h.  $k$  ist ungleich Null, so erhöht sich der Volumenstrom und  $dV_{misch}$  ist größer als  $dV_1$ . Ist das Mischverhältnis bekannt, lassen sich mittels der Mischungsgleichungen (4) und (7) der Volumenstrom und die Temperatur des Mischprodukts berechnen.

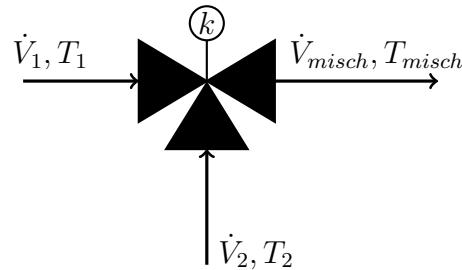


Abbildung 17: 3-Wege Mischventil

### Block

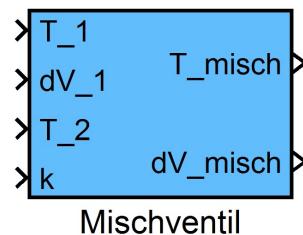


Abbildung 18: Simulink-Block des Mischventils

### Ein- und Ausgänge

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_1	Temperatur des ersten Volumenstroms	[K]
dV_1	Erster Volumenstrom	[m³/s]
T_2	Temperatur des zweiten Volumenstroms	[K]
k	Mischverhältnis	[–]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_misch	Temperatur des Mischprodukts	[K]
dV_misch	Volumenstrom des Mischprodukts	[m³/s]

### Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Keine Parameter		

### Allgemeine Beschreibung

Temperatur des Mischprodukts:

$$\begin{aligned}
 T_{misch} &= \frac{T_1 \cdot dV_1 + T_2 \cdot dV_2}{dV_1 + dV_2} \\
 &= \frac{1}{1+k} (T_1 + kT_2)
 \end{aligned} \tag{36}$$

Volumenstrom des Mischprodukts:

$$\begin{aligned}
 dV_{misch} &= dV_1 + dV_2 \\
 &= (1+k)dV_1
 \end{aligned} \tag{37}$$

Mischverhältnis:

$$k = \frac{dV_2}{dV_1} \tag{38}$$

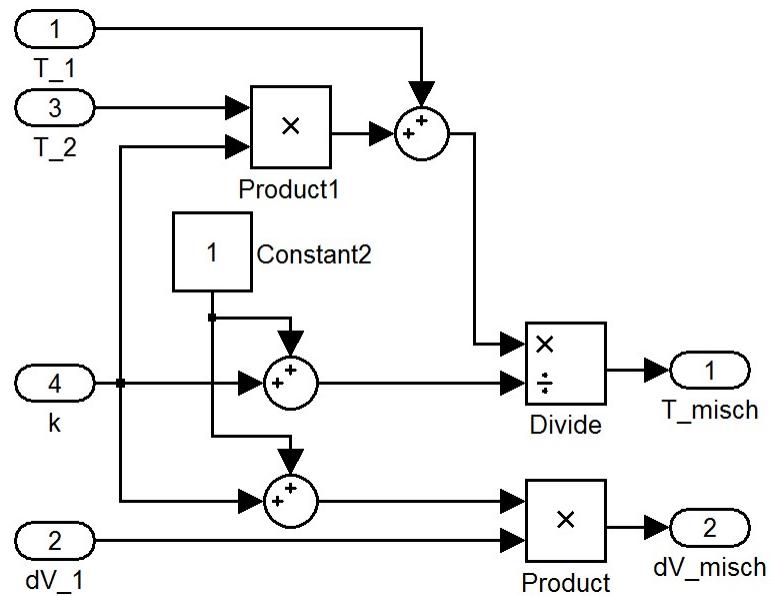
**Simulink Implementation**

Abbildung 19: Blockschaltbild des Mischventils

## Vorlaufmischer

### Beschreibung

Beim Vorlaufmischer handelt es sich um ein 3-Wege-Ventil, das zwischen Vorlauf und Rücklauf geschaltet wird. Es besteht somit die Möglichkeit, je nach Ventilstellung, kaltes Wasser aus dem Rücklaufvolumenstrom  $dV_{Rl}$  über einen Bypass dem warmen Wasser aus dem Vorlaufvolumenstrom  $dV_{Vl}$  beizumischen. Dies geschieht, sobald die Vorlauftemperatur  $T_{Vl}$  über ihren vorgegebenen Sollwert  $T_{Vl,soll}$  gestiegen ist. So ist eine Regelung der Vorlauftemperatur möglich. Die Temperatur  $T_{Verbraucher}$ , die den Verbraucher erreicht, wird dann auf dem Sollwert gehalten, solange die Solltemperatur zwischen Vor- und Rücklauftemperatur liegt. Diese Begrenzung der Temperatur dient dazu, dass das Wasser, welches in den Verbraucher fließt, nicht zu heiß wird. Abbildung 20 zeigt den Aufbau des Vorlaufmischers.

Der Vorlaufmischer besteht aus den Bibliothekskomponenten **Mischventil** und **Mischverhältnis**. Die Vorlaufsolltemperatur wird über ein Eingangssignal angegeben und kann z.B. von der Komponente **Heizkurve** bereitgestellt werden. Das Mischverhältnis  $k$  gibt an, wie groß der Volumenstrom durch den Bypass im Verhältnis zum Vorlaufvolumenstrom ist. Es liegt im Intervall  $[0, 1]$ . Maximal kann dem Verbraucher somit ein gegenüber dem Vorlaufvolumenstrom verdoppelter Volumenstrom zugeführt werden. Hat  $k$  den Wert Null, so wird dem Rücklauf kein Wasser entnommen und es gilt  $dV_{Verbraucher} = dV_{Vl}$ . Steigt  $k$  jedoch an, wird immer mehr Wasser aus dem Rücklauf über den Bypass abgeführt. Das Mischverhältnis wird so berechnet, dass die Vorlauftemperatur des Verbrauchers auf dem Wert von  $T_{Vl,soll}$  gehalten wird, sobald sie größer als die Soll-Vorlauftemperatur ist. Dies ist möglich, solange  $T_{Vl,soll}$  zwischen  $T_{Vl}$  und  $T_{Rl}$  liegt. Der Ausgangsvolumenstrom  $dV_{Verbraucher}$  mit der Temperatur  $T_{Verbraucher}$  lässt sich über die Mischungsgleichungen (4) und (7) berechnen.

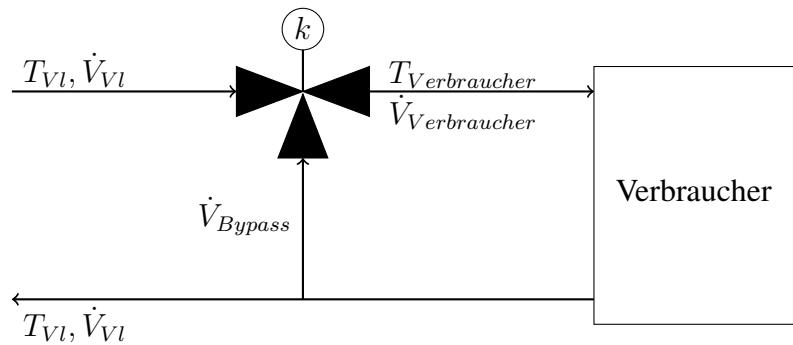


Abbildung 20: Vorlaufmischer

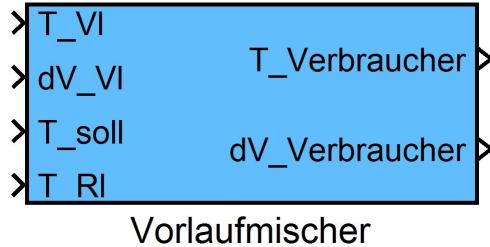
**Block**

Abbildung 21: Simulink-Block des Vorlaufmischers

**Ein- und Ausgänge**

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Vl	Temperatur des Vorlaufs	[K]
dV_Vl	Volumenstrom des Vorlaufs	[m³/s]
T_soll	Vorlaufsolltemperatur	[K]
T_Rl	Temperatur des Rücklaufs	[K]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Verbraucher	Temperatur des Mischprodukts	[K]
dV_Verbraucher	Volumenstrom des Mischprodukts	[m³/s]

**Parameter**

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Keine Parameter		

**Allgemeine Beschreibung**Ausgangsvolumenstrom:

$$\begin{aligned}
 dV_{Verbraucher} &= dV_{Vl} + dV_{Bypass} \\
 &= (1 + k)dV_{Vl}
 \end{aligned} \tag{39}$$

Temperatur des Ausgangsvolumenstroms:

$$\begin{aligned}
 T_{Verbraucher} &= \frac{T_{Vl} \cdot dV_{Vl} + T_{Rl} \cdot dV_{Bypass}}{dV_{Vl} + dV_{Bypass}} \\
 &= \frac{1}{1 + k}(T_{Vl} + kT_{Rl})
 \end{aligned} \tag{40}$$

Mischverhältnis:

$$k = \frac{dV_{Bypass}}{dV_{Vl}} \quad (41)$$

$$= \frac{T_{Vl} - T_{Vl,soll}}{T_{Vl,soll} - T_{Rl}} \in [0, 1] \quad (42)$$

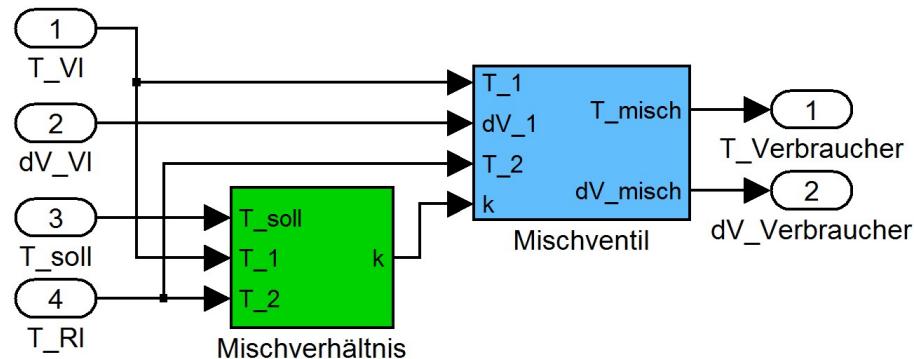
**Simulink Implementation**

Abbildung 22: Blockschaltbild des Vorlaufmischers

# Rücklaufanhebung

---

## Beschreibung

Die Rücklaufanhebung wird in den Rücklauf, z.B. vor einem **Wärmeerzeuger**, verwendet. Sie dient dazu, die Temperatur des Rücklaufs zu erhöhen, indem dem Rücklauf warmes Wasser aus dem Vorlauf beigemischt wird. Dies wird z.B. bei Komponenten wie dem BHKW verwendet, da zu niedrige Rücklauftemperaturen Schäden an dem BHKW hervorrufen könnten. Es sollte möglichst eine gewisse Mindestrücklauftemperatur eingehalten werden. Die Ausgangstemperatur der Rücklaufanhebung  $T_{misch}$  soll nicht niedriger als die durch einen Parameter festgelegte Mindestrücklauftemperatur  $T_{min}$  sein. Dies ist allerdings nicht immer möglich. Eine beispielhafte Anwendung dieser Komponente zeigt die Abbildung 23.

Die Rücklaufanhebung besteht hauptsächlich aus zwei HeatLib-Komponenten. Sie setzt sich aus einem **Mischventil** sowie der Berechnung des **Mischverhältnisses** zusammen. Am Eingang der Rücklaufanhebung liegen die Temperatur  $T_{Rl}$  und der Volumenstrom  $dV_{Rl}$  der Rücklaufs an. Zusätzlich ist die Temperatur  $T_{Vl}$  des Vorlaufs ein Eingangssignal der Komponente.

Die Berechnung wie viel Wasser aus dem Vorlauf dem Rücklauf beigemischt werden soll, wird von dem Block **Mischverhältnis** übernommen. Das Mischverhältnis  $k$  wird anhand der Solltemperatur  $T_{soll}$  bestimmt. Die Aufgabe der Rücklaufanhebung ist es, die Rücklauftemperatur nicht kleiner als die Mindestrücklauftemperatur werden zu lassen. Ist die Rücklauftemperatur  $T_{Rl}$  größer als  $T_{min}$  muss nicht eingegriffen werden und  $T_{Rl,soll}$  ist gleich  $T_{Rl}$ . Sinkt  $T_{Rl}$  allerdings unter  $T_{min}$ , wird  $T_{Rl,soll}$  gleich  $T_{min}$  gesetzt. Zusammengefasst bedeutet das für die Solltemperatur

$$T_{Rl,soll} = \begin{cases} T_{Rl} & \text{für } T_{Rl} > T_{min} \\ T_{min} & \text{für } T_{Rl} < T_{min}. \end{cases} \quad (43)$$

Im Falle eines zu kalten Rücklaufs, wird dann soviel Wasser aus dem warmen Vorlauf hinzugemischt, dass das Mischprodukt die Temperatur  $T_{min}$  erreicht hat. Dies ist allerdings nicht unbegrenzt möglich. Das Mischverhältnis wird nach (74) berechnet. Da  $k$  jedoch auf das Intervall  $[0, 1]$  beschränkt ist, ergibt sich die maximal zu erreichende Mischtemperatur durch Einsetzen von  $k = 1$  in (74) zu

$$T_{misch,max} = \frac{T_{Rl} + T_{Vl}}{2}. \quad (44)$$

Das berechnete Mischverhältnis wird dann an das Mischventil weitergeben, welches die entsprechende Beimischung des Vorlaufs zu dem Rücklauf vornimmt. Die Ausgänge bilden die Temperatur  $T_{misch}$  sowie der Volumenstrom  $dV_{misch}$  des Mischprodukts, das den Wärmeerzeuger erreicht. Der dritte Ausgang ist der Volumenstrom  $dV_{Vl}$  des Vorlaufs außerhalb des Mischkreises. Dieser entspricht dem Eingangsvolumenstrom  $dV_{Rl}$ , da dem Ausgangsvolumenstrom des Wärmeerzeugers durch das Mischventil genau soviel Wasser entnommen wird, wie zuvor hinzugefügt wurde.

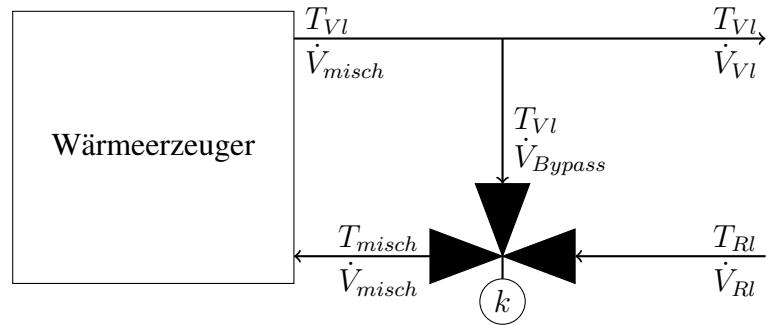


Abbildung 23: Wärmeerzeuger mit Rücklaufanhebung

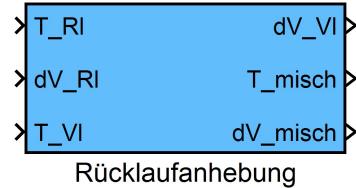
**Block**

Abbildung 24: Simulink-Block der Rücklaufanhebung

**Ein- und Ausgänge**

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Rl	Rücklauftemperatur	[K]
dV_Rl	Rücklaufvolumenstrom	[m³/s]
T_Vl	Vorlauftemperatur	[K]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
dV_Vl	Vorlaufvolumenstrom	[m³/s]
T_misch	Temperatur des Mischprodukts	[K]
dV_misch	Volumenstrom des Mischprodukts	[m³/s]

**Parameter**

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_min	Mindestrücklauftemperatur	[K]

### Allgemeine Beschreibung

Begrenzung der Sollrücklauftemperatur:

$$T_{Rl,soll} = \begin{cases} T_{Rl} & \text{für } T_{Rl} > T_{min} \\ T_{min} & \text{für } T_{Rl} < T_{min} \end{cases} \quad (45)$$

Mischverhältnis:

nach (74)

$$k = \frac{T_{Rl} - T_{Rl,soll}}{T_{Rl,soll} - T_{Vl}} \quad (46)$$

Temperatur des Mischprodukts:

nach (36)

$$T_{misch} = \frac{1}{1+k}(T_{Rl} + kT_{Vl}) \quad (47)$$

Volumenstrom des Mischprodukts:

nach (37)

$$dV_{misch} = (1+k)dV_{Rl} \quad (48)$$

Vorlaufvolumenstrom:

$$dV_{Vl} = dV_{Rl} \quad (49)$$

### Simulink Implementation

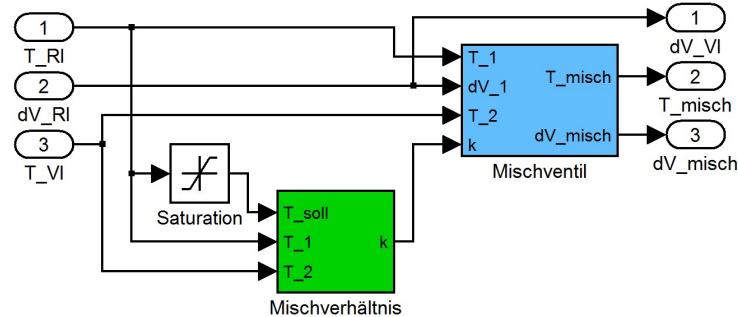


Abbildung 25: Blockschaltbild der Rücklaufanhebung

## Pumpe

---

### Beschreibung

Die Pumpe bestimmt den Volumenstrom  $\dot{V}$  in der gesamten Anlage. Bei den anderen Komponenten, z.B. dem **Verbraucher** oder dem **Kessel** wird angenommen, dass sie den Gesamtvolumenstrom nicht ändern. Die Volumenstrom kann nur durch Komponenten aus dem Bereich der **Volumenstrommodellierung** verteilt und wieder zusammengeführt werden. Der Gesamtvolumenstrom bleibt jedoch auch dabei konstant.

Die Pumpe stellt den Volumenstrom  $\dot{V}$  in Abhängigkeit von der Differenz zwischen tatsächlicher Gebäudetemperatur  $T_g$  und Soll-Gebäudetemperatur  $T_{g,soll}$  ein. Die Temperatur  $T_g$  kann durch das **Gebäude** Modell simuliert werden. Ist die Gebäudetemperatur unterhalb der Soll-Temperatur  $T_{g,soll}$ , erzeugt die Pumpe einen hohen Volumenstrom, d.h. größer als der mittlere Volumenstrom  $\dot{V}_m$ . Bei einer zu hohen Temperatur  $T_g$ , größer als  $T_{g,soll}$ , liefert die Pumpe einen Volumenstrom, der kleiner als  $\dot{V}_m$  ist. Die Pumpenkennlinie, die den Volumenstrom  $\dot{V}$  in Abhängigkeit von der Differenz  $T_g - T_{g,soll}$  darstellt, wiest im idealen Fall einen linearen Verlauf aus.

Ist die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Gebäudetemperatur  $|T_g - T_{g,soll}|$  größer als die Temperaturdifferenz  $\Delta T_g$ , befindet sich der Volumenstrom in Sättigung auf seinem minimalen bzw. maximalen Wert  $\dot{V}_m \pm \dot{V}_a$ , wobei  $\dot{V}_a$  die Volumenstromamplitude beschreibt. In Abbildung 26 ist der ideale Verlauf einer Pumpenkennlinie dargestellt. Die Pumpe bildet somit den Einfluss der Thermostatventile der Heizkörper in dem Gebäude auf den Volumenstrom in der Heizungsanlage ab.

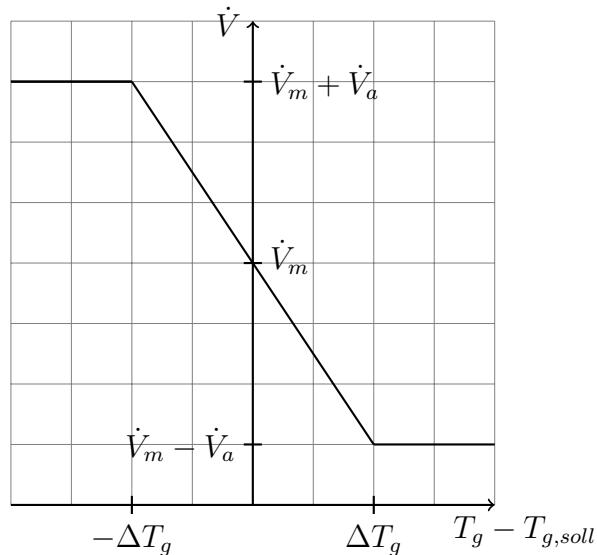


Abbildung 26: Ideale Pumpenkennlinie

**Block**

Abbildung 27: Simulink-Block der Pumpe

**Ein- und Ausgänge**

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Tg	Gebäudetemperatur	[K]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
dV	Volumenstrom	[m³/s]

**Parameter**

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
dVm	mittlerer Volumenstrom	[m³/s]
dVa	Volumenstromamplitude	[m³/s]
Tg_soll	Soll-Gebäudetemperatur	[K]

**Allgemeine Beschreibung**

Volumenstrom:

$$\dot{V} = \begin{cases} \dot{V}_m - \dot{V}_a & \text{für } T_g - T_{g,soll} \geq \Delta T_g \\ \dot{V}_m + \frac{\dot{V}_a}{\Delta T_g} (T_g - T_{g,soll}) & \text{für } -\Delta T_g < T_g - T_{g,soll} < \Delta T_g \\ \dot{V}_m + \dot{V}_a & \text{für } T_g - T_{g,soll} \leq -\Delta T_g \end{cases} \quad (50)$$

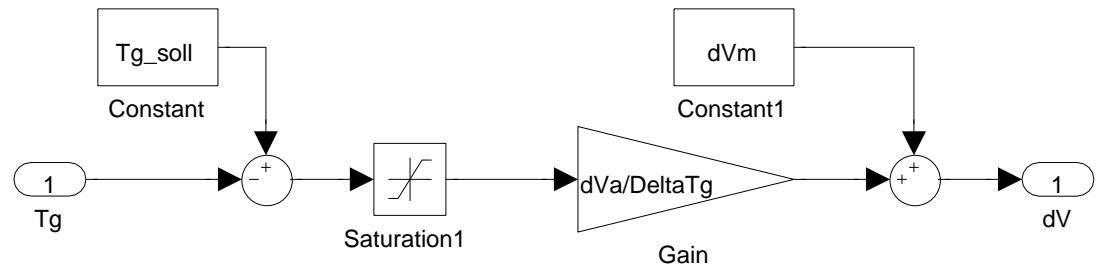
**Simulink Implementation**

Abbildung 28: Blockschaltbild der Pumpe

# Speicherkette

---

## Beschreibung

Die Speicherkette dient dazu, warmes Wasser zu speichern und dann zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur Verfügung zu stellen. Das Modell des Speichers wurde im Laufe der Masterarbeit von Herrn Jan Seifert entwickelt, [5]. Die Speicherkette kann, wie im Folgenden noch näher beschrieben wird, in verschiedene Richtungen durchflossen werden. Um dies direkt in Simulink umzusetzen, müssen Schalter verwendet werden, da in den Blockschaltbildern eine feste Signalflussrichtung vorgegeben ist. Allerdings führt der Einsatz von Schaltern zu großen Simulationszeiten. Daher wird die Komponente an geeigneter Stelle aus dem Gesamtsystem ausgeschnitten und das Verhalten durch C-Code beschreiben, der in Simulink eingebunden werden kann. Ein Schema des Modells ist in Abbildung (29) angegeben. Die Volumenströme  $dV_1$  und  $dV_2$  haben eine feste Laufrichtung. Auf der Quellenseite fließt heißes Wasser mit dem Volumenstrom  $dV_1$  und der Temperatur  $T_{1,ein}$  in den Speicher hinein und verlässt die Komponente mit dem gleichen Volumenstrom und der Temperatur  $T_{1,aus}$  in Richtung der Last. Auf der Seite der Last erreicht kaltes Wasser der Temperatur  $T_{2,ein}$  die Speicherkette. Dies hat den Volumenstrom  $dV_2$  und fließt mit der Temperatur  $T_{2,aus}$  wieder heraus. Innerhalb der Speicherkette ergeben sich, je nach der Größe von  $dV_1$  und  $dV_2$ , folgende zwei Durchlaufrichtungen:

- Laden  $\rightarrow \dot{V} > 0$ ,
- Entladen  $\rightarrow \dot{V} < 0$ .

Der Ladenbetrieb ist in Abbildung 29 durch einen roten Pfeil, der Entladebetrieb durch einen blauen Pfeil gekennzeichnet. So dient die obere Rohrverzweigung in der Speicherkette im Zustand Laden als Verteiler und die untere als Mischer. Im Falle der Entladens ist dies genau anders herum.

Innerhalb des Speichers durchläuft Wasser mit dem Volumenstrom  $\dot{V}$  eine Serienschaltung von  $k$  gleich aufgebauten Speichertanks. Das Modell erlaubt es 1 bis 10 Tanks in der Speicherkette zu betreiben. Jeder Tank hat ein zylindrisches Volumen  $V_{tank}$  und die Höhe  $H_{tank}$ . Zur Berechnung wird das Speichervolumen diskretisiert und in  $n$  gleich große Schichten aufgeteilt. Es kann maximal mit 100 Schichten gerechnet werden. An jedem Speichertank kann die Temperatur an zwei Stellen gemessen werden. Über den Parameter  $H_{sensors} \in \mathbb{R}^2$  lassen sich die Anschlusshöhen der beiden Temperatursensoren je Tank festlegen. Die Höhen werden alle vom Boden des jeweiligen Tanks gemessen. Die gemessenen Temperaturen werden in dem Ausgangsvektorsignal  $[T_{mess}] \in \mathbb{R}^{2 \cdot k}$  zusammengefasst. Die Anfangstemperaturen der Sensoren aller Tanks werden durch  $T_{init} \in \mathbb{R}^{2 \cdot k}$  angegeben. Durch sie werden auch die Startwerte der übrigen Schichten mittels linearer Approximation geschätzt. Jeder Tank verfügt über einen Zu- und einen Abfluss, dessen Anschlusshöhen durch  $H_{in}$  und  $H_{out}$  angegeben werden. Jede Schicht wird als vollständig durchmischt angenommen, sodass in der jeweiligen Schicht  $i$  die gleichmäßige Temperatur  $T_i$  vorherrscht. Das Ausgangssignal  $[T] \in \mathbb{R}^{n \cdot k}$  beinhaltet die Temperaturen aller Schichten. Die Temperaturen in den einzelnen Schichten werden hauptsächlich durch 3 verschiedene Wärmetransportmechanismen beeinflusst, die im Folgenden näher vorgestellt werden sollen. Die formelmäßige Beschreibung der einzelnen Vorgänge ist in der [allgemeinen Beschreibung](#) zu finden.

- *Wärmestrom aus Massentransport*

Der Wärmetransport, der durch den Volumenstrom  $\dot{V}$ , d.h. den Transport von Masse hervorgerufen wird, hat den größten Einfluss auf die Änderung der Energie in den Schichten. Das Wasser gelangt von einer Schicht zur nächsten.

- *Wärmeleitung zwischen angrenzenden Schichten*

Zwischen zwei angrenzenden Schichten findet eine Wärmeleitung ohne Massentransport statt. Die Wärmestromdichte ist nach dem Gesetz von Fourier proportional zum Temperaturgradienten  $\frac{\Delta T}{\Delta z}$ , wobei  $\Delta z$  den mittleren Schichtabstand beschreibt. Der Proportionalitätsfaktor setzt sich aus der Querschnittsfläche  $A_c$  zwischen zwei Schichten und der effektiven Wärmeleitfähigkeit  $k_{eff}$ , die die Wärmeleitung über die Flüssigkeit, die Außenhülle sowie die Isolierung beinhaltet, zusammen.

- *Wärmedurchgang zur Umgebung*

Ein Teil der Wärme im Speicher geht über die Tankaußenhülle und die Isolierung verloren. Diese Wärmeverluste werden über das Newtonsche Abkühlungsgesetz modelliert. Sie sind proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der Speicherschicht  $T_i$  und der Umgebung  $T_a$ . Den Proportionalitätsfaktor erhält man aus dem Produkt der Kontaktfläche  $A_s$  und dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$ .

Mit all diesen Prozessen lässt sich eine Wärmeleistungsbilanz aufstellen. Die Änderung der Wärme, d.h. die Wärmeleistung  $\dot{Q}_i$ , in einer Schicht ergibt sich aus der durch Masse transportierten Wärmeleistung, der Wärmeleitung aus der oberen und unteren angrenzenden Schicht sowie den Wärmeverlusten nach Außen. Somit lässt sich für jede einzelne Schicht eine Differentialgleichung aufstellen. Für die gesamte Speicherkette erhält man ein nichtlineares Modell. Dieses nichtlineare Modell wird in der Simulink Implementation durch einen C-Code beschrieben, der dann in Simulink eingebunden wird.

Der Parameter *mode* legt fest, wie der Zufluss in die Speichertanks erfolgen soll. Dies ist zum einen in einer festen Anschlusshöhe  $H_{in}$  möglich. Zum anderen kann der Zufluss über eine Schichtladung erfolgen. Das bedeutet, dass das Wasser in die Schicht der passenden, d.h. der annähernd gleichen Temperatur eingeleitet wird. Um eine Temperaturinversion zu verhindern, wenn z.B. heißes Wasser in eine kalte Schicht eingeleitet wird, wird ein einfacher Mischalgorithmus angewendet. Dieser stellt sicher, dass z.B. warmes Wasser im Speicher aufsteigt, solange bis sich ein realistischer Temperaturverlauf im Speicher einstellt.

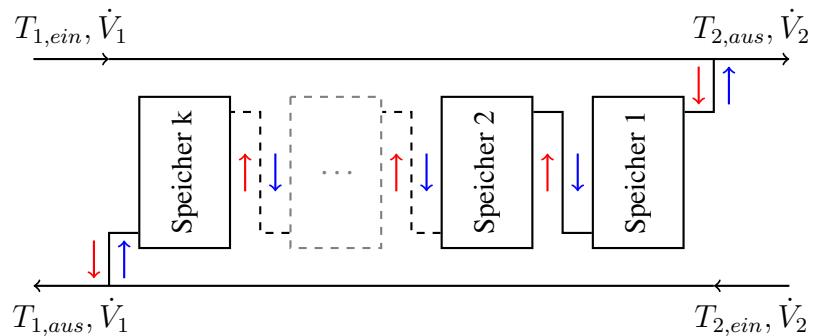


Abbildung 29: Aufbau des Modells des Speicherkette

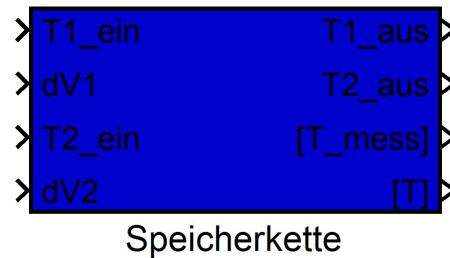
**Block**

Abbildung 30: Simulink-Block der Speicherkette

**Ein- und Ausgänge**

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T1_ein	Eingangstemperatur des Volumstroms 1	[K]
dV1	Volumenstrom 1	[ $\frac{m^3}{s}$ ]
T2_ein	Eingangstemperatur des Volumstroms 2	[K]
dV2	Volumenstrom 2	[ $\frac{m^3}{s}$ ]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T1_aus	Ausgangstemperatur des Volumstroms 1	[ $\frac{m^3}{s}$ ]
T2_aus	Ausgangstemperatur des Volumstroms 2	[K]
[T_mess]	Temperaturen an den Messpunkten im Speicher	[K]
[T]	Temperaturen der Schichten der Tanks	[K]

## Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
k	Anzahl der Speichertanks (1-10)	[–]
n	Anzahl der Rechenknoten pro Tank (1-100)	[–]
mode	Zuflussmodus (feste Position (0) oder Schichtlagerung (1))	[–]
Tinit	Anfangstemperatur der Sensoren aller Tanks	[K]
Hsensors	Anschlusshöhen der Temperatursensoren in einem Speicher	[m]
Ta	Umgebungstemperatur	[K]
Vtank	Volumen eines Tanks	[m <sup>3</sup> ]
Htank	Höhe eines Tanks	[m]
Hin	Anschlusshöhe des Ladezuflusses	[m]
Hout	Anschlusshöhe des Ladeabflusses	[m]
U	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
k <sub>eff</sub>	Effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]

## Allgemeine Beschreibung

Wärmeleistungsbilanz:

- Wärmestrom aus Massentransport

$$\dot{Q} = c\dot{m}\Delta T = c\rho\dot{V}(T_{i-1} - T_i) \quad (51)$$

- Wärmeleitung zwischen angrenzenden Schichten

$$\dot{Q} = k_{eff}A_c \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (52)$$

- Wärmedurchgang zur Umgebung

$$\dot{Q} = UA_s(T_i - T_a) \quad (53)$$

Aus (51), (52) und (53) folgt zusammen mit der Wärmeleistung einer Schicht

$$\dot{Q}_i = c\rho V \dot{T}_i \quad (54)$$

die Wärmeleistungsbilanz einer mittleren Speicherschicht  $i$

$$c\rho V_i \dot{T}_i = c\rho \dot{V}(T_{i-1} - T_i) + \frac{k_{eff}A_c}{\Delta z_{i-1,i}}(T_{i-1} - T_i) + \frac{k_{eff}A_c}{\Delta z_{i,i+1}}(T_{i+1} - T_i) + UA_s(T_a - T_i). \quad (55)$$

Gesamtmodell:

DGLs der einzelnen Schichten (55) → nichtlineares Modell

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (56)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t)) \quad (57)$$

mit Eingängen, Zuständen und Ausgängen (Sensortemperaturen  $T_{S,i}$ )

$$u = \begin{bmatrix} T_{1,ein} \\ \dot{V}_1 \\ T_{2,ein} \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_{k,n} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} T_{S,1} \\ \vdots \\ T_{S,k,m} \end{bmatrix} \quad (58)$$

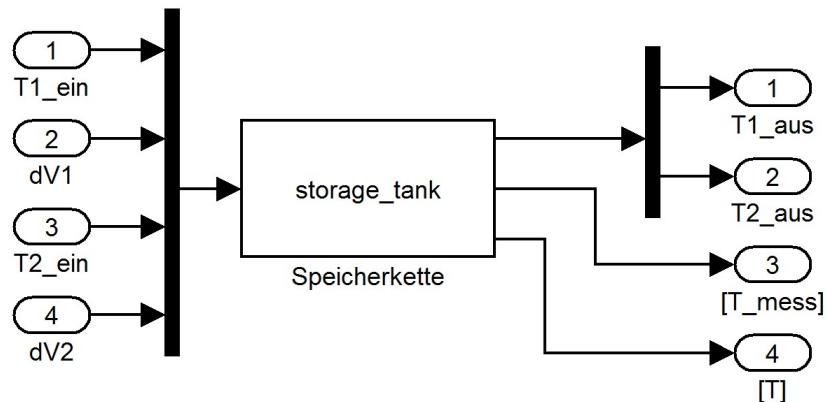
und die Anfangszustände  $x(0)$  ergeben sich aus  $[T_{init}] \in \mathbb{R}^{2 \cdot k}$ .**Simulink Implementation**

Abbildung 31: Blockschaltbild der Speicherkette

## 2.3 Weitere Blöcke

---

Dieser Teil der Dokumentation enthält Komponenten der MatlabHeatLib, die sich nicht in eine der vorangegangenen Kategorien einordnen lassen und auch keinen eigenen neuen Bereich bilden. Somit werden sie unter der Überschrift „Weitere Blöcke“ zusammengefasst und im Folgenden beschrieben. Die nachfolgende Tabelle enthält die Bibliothekskomponenten, die hier erläutert werden sollen.

Weitere Blöcke		
Block	Beschreibung	Seite
Verbraucher	Einfaches Verbrauchermodell	40
Gebäude	Ein-Zonen Modell eines Gebäudes	43
Heizkurve	Bestimmung der Vorlaufsolltemperatur	46
Mischverhältnis	Berechnung des Mischverhältnisses zweier Volumenströme um eine Solltemperatur zu erreichen	49
Wärmeübertrager	Übertragung von thermischer Energie zwischen 2 Volumenströmen	53

# Verbraucher

---

## Beschreibung

Innerhalb eines Verbrauchers entstehen viele komplizierte Wärmeübergänge durch Abgabe von Wärme von den Heizelementen z.B. an die Luft, auf die vielfältige Störeinflüsse einwirken können. Solche Einflüsse können z.B. die Sonne, Fenster, Lüftung oder andere Wärmequellen wie Personen oder elektrische Geräte sein, die wieder von Raum zu Raum variieren. All diese aufwendig zu modellierenden Effekte sollen hier nicht im Einzelnen berücksichtigt werden. Es wird nur das Ein- und Ausgangsverhalten des Verbrauchers gegenüber den Wärmeerzeugern betrachtet. Die genauen Vorgänge im Verbraucher sowie sein exakter Aufbau bleiben unbeachtet. Es handelt sich somit um ein einfaches Verbrauchermodell. Die vom Verbraucher aufgenommene Leistung wird in der Leistung  $\dot{Q}_{ab}$  zusammengefasst, die über ein Eingangssignal angegeben wird. Sie kann durch das **Gebäude**-modell der HeatLib bestimmt werden.

Das Modell dieser Komponente ist so aufgebaut, dass ein Volumenstrom  $dV_{Verbraucher}$  mit der Temperatur  $T_{Verbraucher}$  in den Verbraucher hinein fließt. Der Verbraucher nimmt die Leistung  $Q_{ab}$  auf, wodurch der Raum bzw. das Gebäude erhitzt wird. Das Verbrauchervolumen  $V_{Verbraucher}$  ist eine rechnerische Größe, die das gesamte Volumen des Wassers in den Heizkreisen des Verbrauchers beschreibt und als konstant angenommen wird. Das Wasser kühlte ab und wird durch den Volumenstrom  $dV_{RI}$  und mit der Temperatur  $T_{RI}$  abgeführt. Innerhalb des Verbrauchermodeells wurde vereinfachend der Einfluss der Thermostatventile, die den Durchlauf durch den Verbraucher beeinflussen würden, vernachlässigt. Der Einfluss der Thermostatventile wird durch den **Pumpen**-Block der HeatLib abgebildet. Der Volumenstrom innerhalb des Verbrauchers wird daher als konstant angenommen, d.h. er fällt am Ausgang, gegenüber dem Eingang, nicht ab und steigt auch nicht an.

## Block

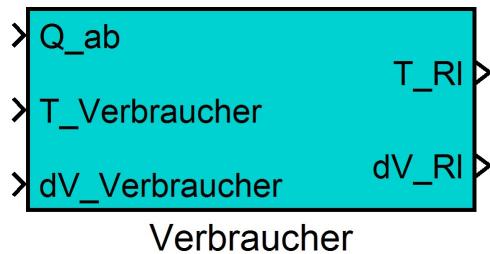


Abbildung 32: Simulink-Block des Verbrauchers

## Ein- und Ausgänge

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Q_ab	aufgenommene Leistung	[W]
T_Verbraucher	Temperatur des Eingangsvolumenstroms	[K]
dV_Verbraucher	Volumenstrom am Eingang	[m³/s]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Rl	Rücklauftemperatur	[K]
dV_Rl	Rücklaufvolumenstrom	[m³/s]

## Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
V_Ver	Volumen des Verbrauchers	[m³]
c	Spezifische Wärmekapazität	[J/kgK]
rho	Dichte	[kg/m³]
InitTempVerb	Anfangstemperatur des Verbrauchers	[K]

## Allgemeine Beschreibung

Wärmeleistungsbilanz:

$$\dot{Q}_{Verbraucher} = \dot{Q}_{Verbraucher,Vl} - \dot{Q}_{Verbraucher,Rl} - \dot{Q}_{ab} \quad (59)$$

$$\dot{Q}_{Verbraucher} = c\rho V_{Verbraucher} \dot{T}_{Rl} \quad (60)$$

$$\dot{Q}_{Verbraucher,Vl} = c\rho \cdot dV_{Verbraucher} T_{Verbraucher} \quad (61)$$

$$\dot{Q}_{Verbraucher,Rl} = c\rho \cdot dV_{Verbraucher} T_{Rl} \quad (62)$$

Verbraucherausgangstemperatur:

$$(60), (61), (62) \Rightarrow (59)$$

$$\begin{aligned} \dot{T}_{Rl} &= \frac{\dot{Q}_{Verbraucher}}{c\rho V_{Verbraucher}} \\ &= \frac{c\rho \cdot dV_{Verbraucher} (T_{Vl} - T_{Rl}) - \dot{Q}_{ab}}{c\rho V_{Verbraucher}} \end{aligned} \quad (63)$$

Ausgangsvolumenstrom:

$$dV_{Rl} = dV_{Verbraucher} \quad (64)$$

### Simulink Implementation

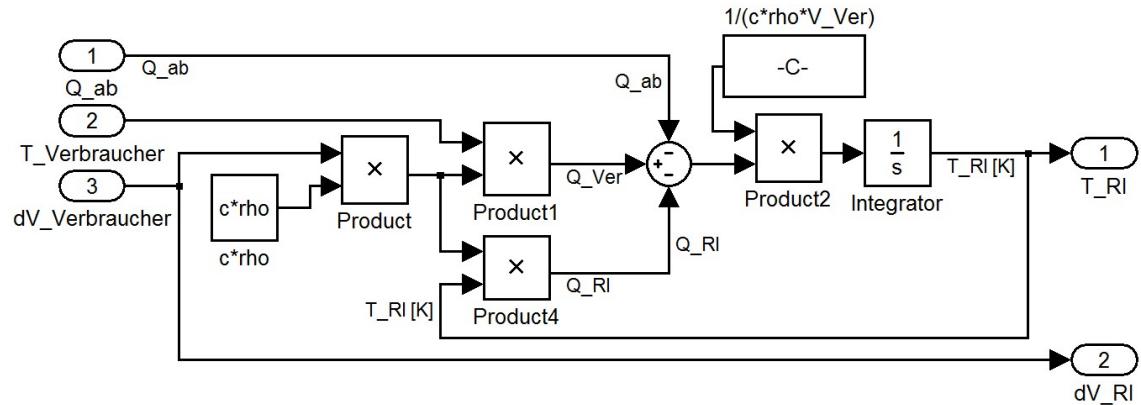


Abbildung 33: Blockschaltbild des Verbrauchers

# Gebäude

---

## Beschreibung

Das vorliegende Gebäudemodell berechnet die Temperatur  $T_g$  innerhalb des Gebäudes. Dabei findet ein sog. 1-Zonen-Modell Anwendung. Die Gebäudetemperatur wird im gesamten Gebäude als gleich angenommen und kann somit als eine fiktive Durchschnittstemperatur des gesamten Gebäudes interpretiert werden. Das Modell wurde in [3] entwickelt.

Im Inneren des Gebäudes befinden sich Heizkörper, deren Temperatur gleich der Rücklauftemperatur  $T_{RL}$  des **Verbrauchers** angenommen wird. Die Heizkörper geben Wärmeleistung über einen einfachen Wärmeübergang mit dem Wärmeübergangskoeffizienten  $k_{r,g}$  an das Gebäude ab und heizen es dadurch. Allerdings treten Wärmeverluste an die Umgebung mit der Außentemperatur  $T_a$  auf. Das Gebäude gibt Wärmeleistung mit dem Wärmeübergangskoeffizienten  $k_{g,a}$  an die Umgebung ab. Die im Gebäude auftretenden Wärmeübergänge sind in Abbildung 34 grafisch dargestellt. Zudem hat das Gebäude eine gewisse Wärmekapazität  $k_g$ . Damit lässt sich die Wärmeleistungsbilanz des Gebäudes aufstellen, aus der sich die Gebäudetemperatur  $T_g$  berechnen lässt. Der Wärmeleistungsbedarf  $\dot{Q}_{ab}$  entspricht der Wärmeleistung, die vom Heizkörper an das Gebäudeinnere abgegeben wird und wird daher proportional zur Differenz von Rücklauftemperatur  $T_{RL}$  und Gebäudetemperatur  $T_g$  angenommen.

Das Gebäudemodell kann mit dem **Verbraucher** und der **Pumpe** Anwendung finden. Über das Modell des Gebäudes wird der Wärmeleistungsbedarf berechnet, der im Verbrauchermodell benötigt wird, um die Rücklauftemperatur des Verbrauchers aus der Sicht des Erzeugers zu bestimmen. Die Pumpe stellt den Volumenstrom im Heizkreis in Abhängigkeit von der Gebäudetemperatur ein.

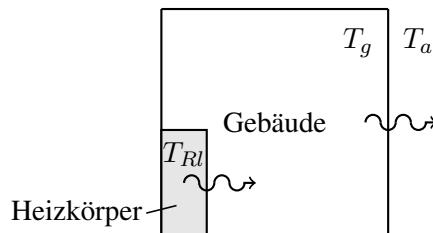


Abbildung 34: Wärmeübergänge im Gebäude

## Block

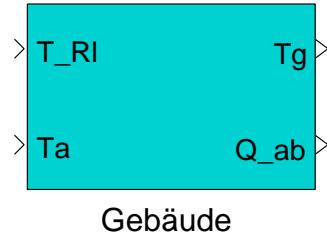


Abbildung 35: Simulink-Block des Gebäudes

## Ein- und Ausgänge

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_Rl	Rücklauftemperatur	[K]
Ta	Außentemperatur	[K]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Tg	Gebäudetemperatur	[K]
Q_ab	Wärmeleistungsbedarf des Verbrauchers	[W]

## Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
kg	Wärmekapazität des Gebäudes	[J/K]
krg	Wärmeübergangskoeffizient Heizkörper → Gebäude	[W/m²K]
kga	Wärmeübergangskoeffizient Gebäude → Umgebung	[W/m²K]
TgInit	Anfangswert der Gebäudetemperatur $T_g$	[K]

## Allgemeine Beschreibung

Wärmeleistungsbedarf:

$$\dot{Q}_{ab} = k_{r,g}(T_{Rl} - T_g) \quad (65)$$

Wärmeleistungsbilanz:

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_{ab} - \dot{Q}_{g,Verl} \quad (66)$$

$$\dot{Q}_g = k_g \dot{T}_g \quad (67)$$

$$\dot{Q}_{g,Verl} = k_{g,a}(T_g - T_a) \quad (68)$$

Gebäudetemperatur:

$$(65), (67), (68) \Rightarrow (66),$$

$$\dot{T}_g = \frac{k_{r,g}}{k_b}(T_{RI} - T_g) - \frac{k_{g,a}}{k_b}(T_g - T_a) \quad (69)$$

### Simulink Implementation

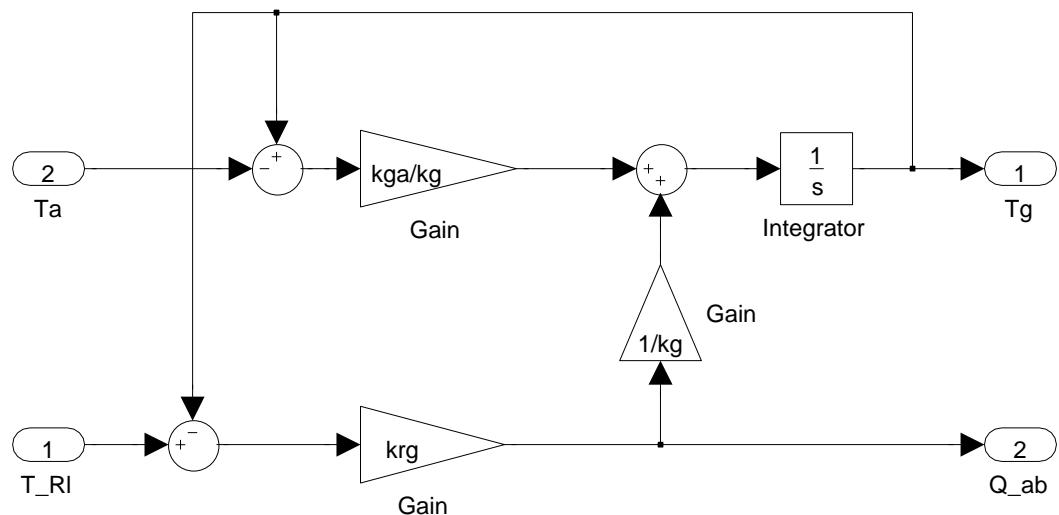


Abbildung 36: Blockschaltbild des Gebäudes

## Heizkurve

---

### Beschreibung

Die Heizkurve berechnet die Vorlaufsolltemperatur  $T_{soll}$  in Abhängigkeit von der Außentemperatur  $T_a$ . Je nachdem welche Außentemperatur vorherrscht, ist eine bestimmte Solltemperatur im Vorlauf einzustellen. Fällt die Außentemperatur ab, ist die Vorlauftemperatur zu erhöhen. Diese Abhängigkeit wird durch einen gesättigten linearen Zusammenhang beschrieben. Über die Parameter werden zwei Punkte  $(T_{a,1}, T_{soll,1})$  und  $(T_{a,2}, T_{soll,2})$  angegeben, die die Heizkurve festlegen. Außerhalb des Außentemperatur-Intervalls  $[T_{a,1}, T_{a,2}]$  hält die Vorlaufsolltemperatur jeweils ihren konstanten Wert  $T_{soll,1}$  bzw.  $T_{soll,2}$ . Innerhalb des Intervalls werden die beiden Punkte durch eine Gerade verbunden.

Für die folgenden zwei beispielhaften Punkte ergibt sich die in Abbildung 37 dargestellte Heizkurve:

- $(T_{a,1}, T_{soll,1}) = (20^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C})$ ,
- $(T_{a,2}, T_{soll,2}) = (-12^\circ\text{C}, 85^\circ\text{C})$ .

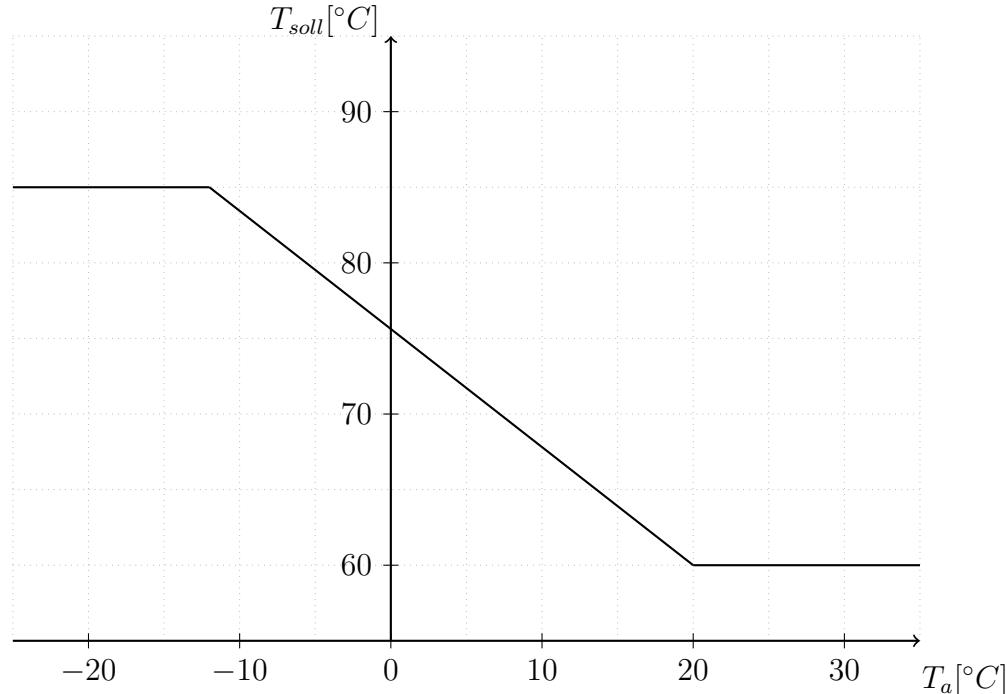


Abbildung 37: Heizkurve

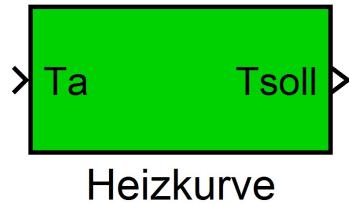
**Block**

Abbildung 38: Simulink-Block der Heizkurve

**Ein- und Ausgänge**

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Ta	Außentemperatur	[K]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Tsoll	Vorlaufsolltemperatur	[K]

**Parameter**

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Ta1c	$T_{a,1}$	[°C]
Ta2c	$T_{a,2}$	[°C]
Ts1c	$T_{soll,1}$	[°C]
Ts2c	$T_{soll,2}$	[°C]

**Allgemeine Beschreibung**Steigung der Heizkurve:

$$a = \frac{T_{soll,1} - T_{soll,2}}{T_{a,1} - T_{a,2}} \quad (70)$$

Y-Achsenabschnitt der Heizkurve:

$$b = T_{soll,1} - T_{a,1} \cdot \frac{T_{soll,1} - T_{soll,2}}{T_{a,1} - T_{a,2}} \quad (71)$$

$$= T_{soll,1} - T_{a,1} \cdot a \quad (72)$$

Heizkurve:

$$T_{soll} = \begin{cases} T_{soll,2} & \text{für } T_a < T_{a,2} \\ a \cdot T_a + b & \text{für } T_{a,2} < T_a < T_{a,1} \\ T_{soll,1} & \text{für } T_a > T_{a,1} \end{cases} \quad (73)$$

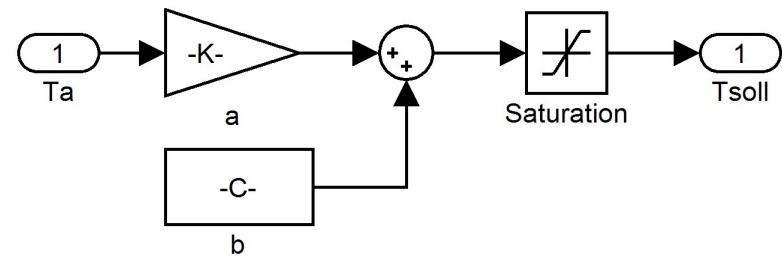
**Simulink Implementation**

Abbildung 39: Blockschaltbild der Heizkurve

## Mischverhältnis

---

### Beschreibung

Das Mischverhältnis berechnet, wie zwei Volumenströme miteinander vermischt werden müssen, um eine bestimmte Temperatur als Mischprodukt zu erhalten. Es bestimmt die Ventilstellung des 3-Wege-Mischventils, das in Abbildung 17 dargestellt ist. Aus der Temperatur  $T_1$  des Volumenstroms 1 und der Temperatur  $T_2$  des Volumenstroms 2 bestimmt der Block, wie viel Wasser der Temperatur  $T_2$  dem Volumenstrom 1 zugeführt werden muss, um eine bestimmte Solltemperatur  $T_{soll}$  als Mischprodukt zu erreichen.

Das Mischverhältnis  $k$  beschreibt das Verhältnis von zugeführtem Volumenstrom  $dV_2$  zum Eingangsvolumenstrom  $dV_1$ . Es liegt im Intervall  $[0, 1]$ , so dass der Volumenstrom des Mischprodukts maximal doppelt so groß sein kann wie  $dV_1$ . Beträgt das Verhältnis 0, wird dem Volumenstrom 1 kein Wasser zugeführt. Das Mischverhältnis soll so bestimmt werden, dass die Temperatur des Mischprodukts gleich der Solltemperatur ist. Dies ist jedoch nicht immer möglich. Die Solltemperatur des Mischprodukts kann erreicht werden, wenn sie zwischen  $T_1$  und  $T_2$  liegt. Befindet sich  $T_{soll}$  außerhalb des Intervalls  $[T_1, T_2]$ , ist die Temperatur des Mischprodukts ungleich  $T_{soll}$ . Die Mischung wird allerdings so vorgenommen, dass  $T_{misch}$  so gut wie möglich an die Solltemperatur angenähert wird. Die genaue Fallunterscheidung ist der unten aufgeführten allgemeinen Beschreibung zu entnehmen.

### Block

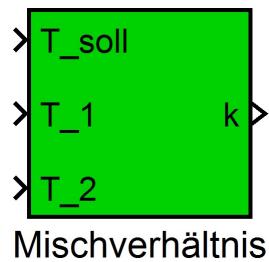


Abbildung 40: Simulink-Block des Mischverhältnisses

### Ein- und Ausgänge

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_soll	Solltemperatur	[K]
T_1	Temperatur des Volumenstroms 1	[K]
T_2	Temperatur des Volumenstroms 2	[K]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
k	Mischverhältnis	[–]

### Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
Keine Parameter		

### Allgemeine Beschreibung

#### Mischverhältnis:

Je nach Höhe der Temperaturen werden verschiedene Fälle unterschieden:

$$k = \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \begin{cases} \frac{T_1 - T_{soll}}{T_{soll} - T_2} \in [0, 1] & \text{für } T_1 > T_{soll} > T_2 \vee T_1 < T_{soll} < T_2, \\ 1 & \text{für } T_1 > T_2 > T_{soll} \vee T_1 < T_2 < T_{soll}, \\ 0 & \text{für } T_2 > T_1 > T_{soll} \vee T_2 < T_1 < T_{soll}. \end{cases} \quad (74)$$

### Simulink Implementation

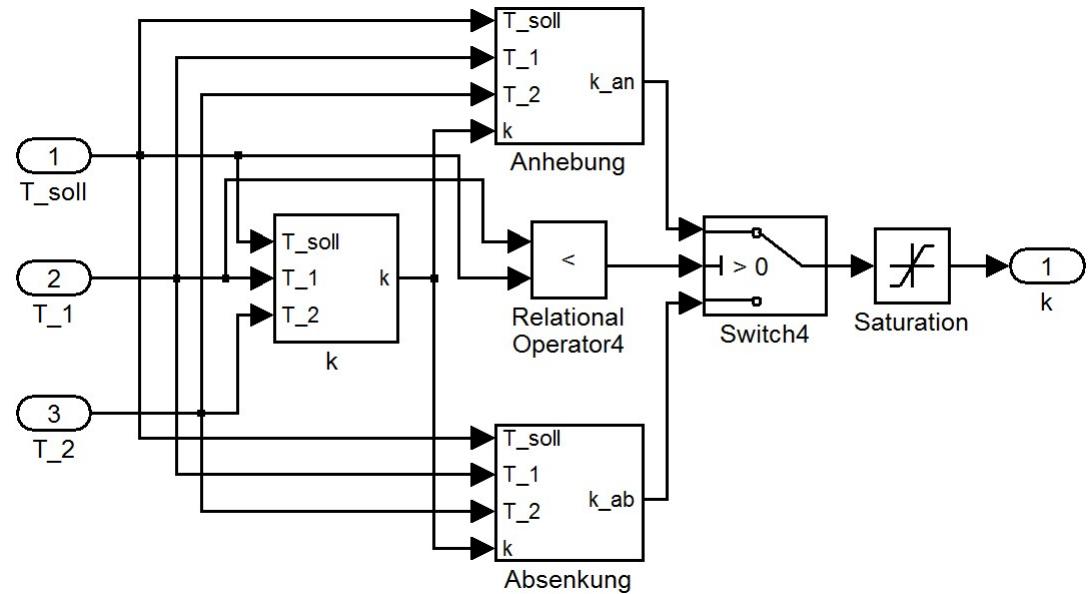


Abbildung 41: Blockschaltbild des Mischverhältnisses

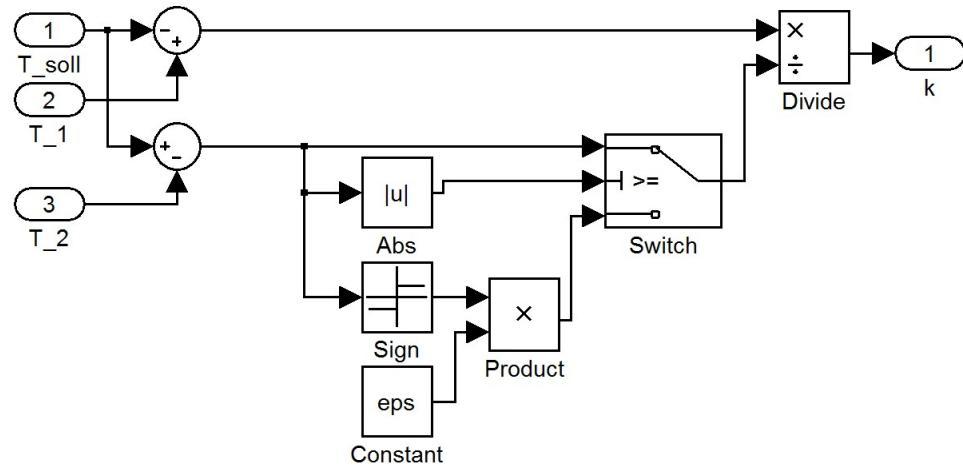
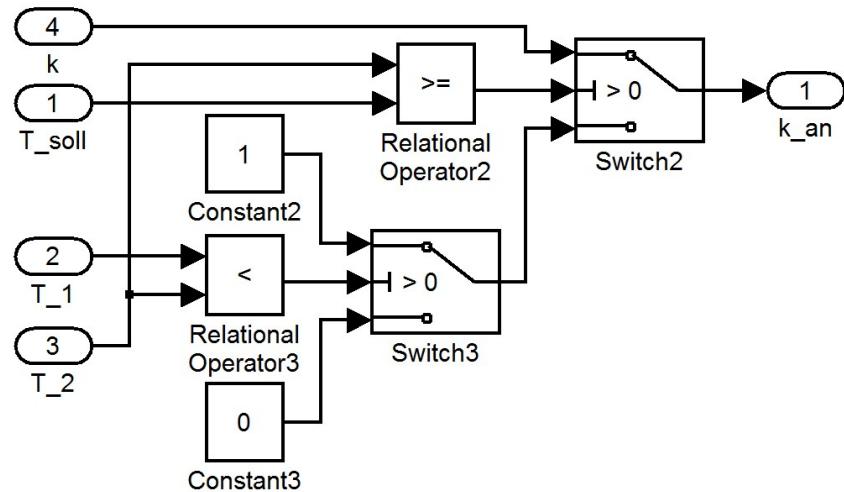
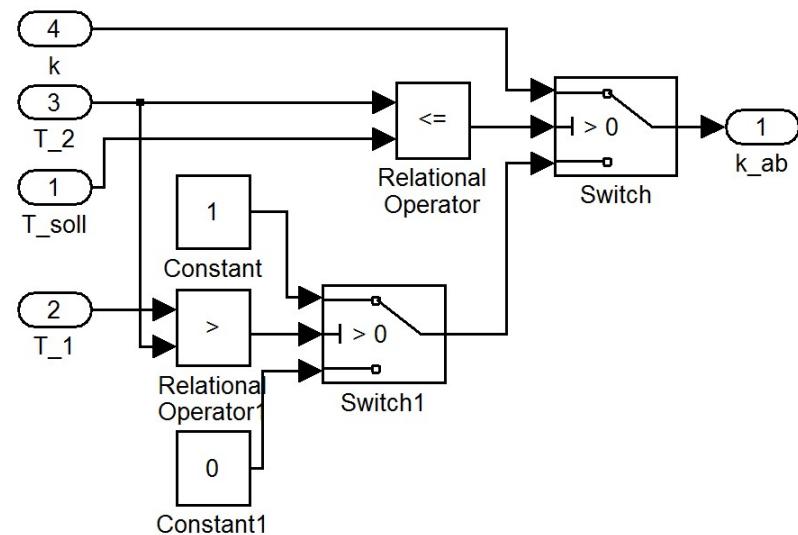


Abbildung 42: Berechnung des Verhältnisses k

Abbildung 43: Berechnung von  $k$  für den Fall der TemperaturanhebungAbbildung 44: Berechnung von  $k$  für den Fall der Temperaturabsenkung

# Wärmeübertrager

---

## Beschreibung

Mit dem Wärmeübertrager kann thermische Energie von einem Volumenstrom auf einen zweiten Volumenstrom übertragen werden. Die Wärme fließt vom wärmeren zum kälteren Fluid. Das Modell des Wärmeübertragers wurde in der Studienarbeit von Herrn Max Schmitt entwickelt und in der Bachelorarbeit von Herrn Timo Spengler überarbeitet, [4], [6].

Die Abbildung (45) zeigt ein Schema des Wärmeübertragers. Auf der Primärseite fließt Wasser mit dem Volumenstrom  $\dot{V}_1$  und der Temperatur  $T_{1,ein}$  in die Komponente hinein und verlässt sie mit dem gleichen Volumenstrom und der niedrigeren Temperatur  $T_{1,aus}$ . Auf der Sekundärseite läuft dies umgekehrt ab. Kaltes Wasser der Temperatur  $T_{2,ein}$  liegt mit einem Volumenstrom  $\dot{V}_2$  am Eingang an. Warmes Wasser fließt mit dem gleichen Volumenstrom und der Temperatur  $T_{2,aus}$  wieder aus dem Wärmeübertrager heraus. Der Übergang der thermischen Energie innerhalb des Wärmeübertragers findet durch die Hintereinanderschaltung folgender thermischer Prozesse statt:

- konvektiver Wärmeübergang auf der Primärseite zwischen dem Wasser und der Wand,
- Wärmeleitung innerhalb der Wand,
- konvektiver Wärmeübergang auf der Sekundärseite zwischen dem Wasser und der Wand.

Bei dem hier modellierten Wärmeübertrager handelt es sich um einen Gegenstrom-Wärmeübertrager. Durch die Berechnung der Wärmeübergänge erhält man die thermische Energie, die von der Primär- auf die Sekundärseite übertragen wird. Die Berechnung der Ausgangstemperaturen erfolgt über Wärmeleistungsbilanzen. Vereinfachend werden hier allerdings die Differentialgleichungen nicht numerisch gelöst, sondern ein statisches Modell verwendet, das analytisch lösbar ist. Der Grund dafür ist, dass die transienten Vorgänge relativ schnell abklingen. Aufgrund der für Heizungssysteme typischen großen Abtastzeiten von einer Minute und mehr können die Einschwingvorgänge meist gar nicht richtig erfasst werden. Daher beschreibt das statische Modell das Verhalten der Komponente hinreichend genau. Ein weiterer Aspekt, den das Modell berücksichtigt, ist die Verschmutzung, die innerhalb des Wärmeübertragers auftreten kann. Der Niederschlag von unerwünschten Stoffen an der Wand kann zu einer Verringerung des Wärmeübergangs sowie zu einem Druckverlust führen. Dies wird auch Fouling genannt. Es finden zwei entgegengesetzte Vorgänge statt. Zum einen wird Material an der Wand abgeschieden. Zum anderen wird aber auch Material von der Wand abgetragen. Die beiden Effekte gleichen sich soweit aus, sodass sich die Schmutzschicht asymptotisch einer maximalen Schichtdicke annähert. Dies hat negative Auswirkungen auf den Wärmeübergangskoeffizienten  $k$ .

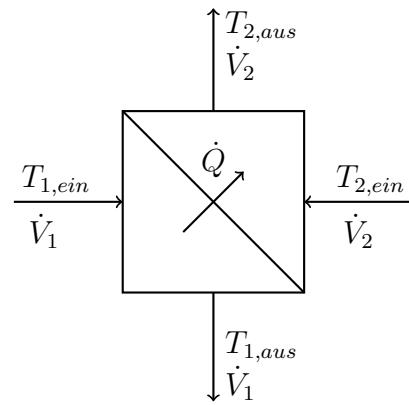


Abbildung 45: Wärmeübertrager

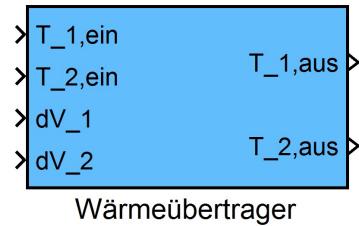
**Block**

Abbildung 46: Simulink-Block des Wärmeübertragers

**Ein- und Ausgänge**

EINGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_1,ein	Temperatur des einfließenden Volumenstroms auf der Primärseite	[K]
T_2,ein	Temperatur des einfließenden Volumenstroms auf der Sekundärseite	[K]
dV_1	Volumenstrom auf der Primärseite	[m^3/s]
dV_2	Volumenstrom auf der Sekundärseite	[m^3/s]
AUSGANG	BESCHREIBUNG	EINHEIT
T_1,aus	Temperatur des ausfließenden Volumenstroms auf der Primärseite	[K]
T_2,aus	Temperatur des ausfließenden Volumenstroms auf der Sekundärseite	[K]

## Parameter

PARAMETER	BESCHREIBUNG	EINHEIT
R_f	Wärmeleitwiderstand	[ $\frac{m^2 K}{W}$ ]
R_inf	Wärmeleitwiderstand für $t \rightarrow \infty$	[ $\frac{m^2 K}{W}$ ]
beta	Schichtwachstumskoeffizient	[ $\frac{1}{s}$ ]
ts	Abtastzeit	[s]
rho	Dichte	[ $\frac{kg}{m^3}$ ]
c	spezifische Wärmekapazität	[ $\frac{J}{kg K}$ ]
F	Übertragungsfläche einer Platte	[ $m^2$ ]
n	Anzahl der Übertragungsplatten	[–]

## Allgemeine Beschreibung

Wärmedurchgang:

mit Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2$ ), Kontaktflächen  $A_i$  ( $i = 1, 2, W$ ), Wanddicke  $d$ , Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$

- Wärmestrom zwischen dem Wasser der Primärseite und der Wand

$$\dot{Q}_1 = \alpha_1 A_1 (T_1 - T_{Wand,1}) \quad (75)$$

- Wärmestrom zwischen dem Wasser der Sekundärseite und der Wand

$$\dot{Q}_2 = \alpha_2 A_2 (T_{Wand,2} - T_2) \quad (76)$$

- Wärmeleitung in der Wand

$$\dot{Q}_3 = \lambda \frac{A_W}{d} (T_{Wand,1} - T_{Wand,2}) \quad (77)$$

- (75),(76),(77) → gesamter Wärmedurchgang

$$\dot{Q} = kA(T_1 - T_2) \text{ mit} \quad (78)$$

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{\alpha_1 A_1} + \frac{d}{\lambda A_W} + \frac{1}{\alpha_2 A_2} \quad (79)$$

### Wärmeleistungsbilanzen:

- dynamisch

$$c\rho \cdot dV_1(T_{1,ein} - T_{1,aus}) - kA \cdot \Delta T_m = c\rho V_1 \dot{T}_{1,aus} \quad (80)$$

$$c\rho \cdot dV_2(T_{2,ein} - T_{2,aus}) + kA \cdot \Delta T_m = c\rho V_2 \dot{T}_{2,aus} \quad (81)$$

mit der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite

$$\Delta T_m = \frac{(T_{2,aus} - T_{2,ein}) - (T_{1,ein} - T_{1,aus})}{\ln(\frac{T_{1,aus} - T_{2,ein}}{T_{1,ein} - T_{2,aus}})} \quad (82)$$

- statisch ( $\dot{T}_{i,aus} = 0$ )

$$c\rho \cdot dV_1(T_{1,ein} - T_{1,aus}) - kA \cdot \Delta T_m = 0 \quad (83)$$

$$c\rho \cdot dV_2(T_{2,ein} - T_{2,aus}) + kA \cdot \Delta T_m = 0 \quad (84)$$

Aus (83) und (84) folgt für die Ausgangstemperaturen mit  $C_i = c\rho V_i$ ,  $i = 1, 2$

$$T_{1,aus} = T_{1,ein} + (T_{2,ein} - T_{1,ein}) \frac{1 - \frac{C_1}{C_2}}{1 - \frac{C_1}{C_2} e^{kA(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1})}} \quad (85)$$

$$T_{2,aus} = T_{1,ein} + (T_{2,ein} - T_{1,ein}) \frac{1 - e^{kA(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1})}}{1 - \frac{C_1}{C_2} e^{kA(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1})}} \quad (86)$$

### Wärmedurchgangskoeffizienten unter Berücksichtigung der Verschmutzung:

$$k(t) = (R_f + R_{f,inf}(1 - e^{\beta t}))^{-1} \text{ mit } \beta < 0 \quad (87)$$

### Simulink Implementation

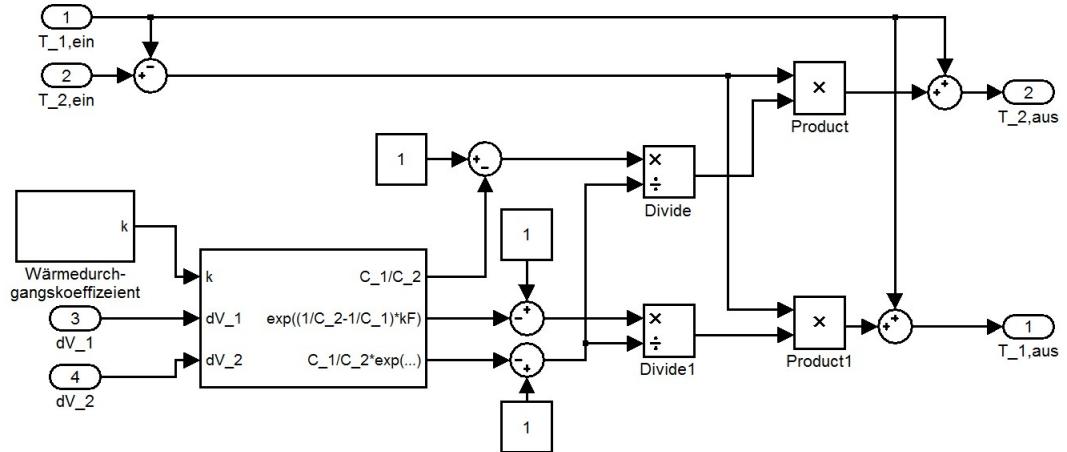
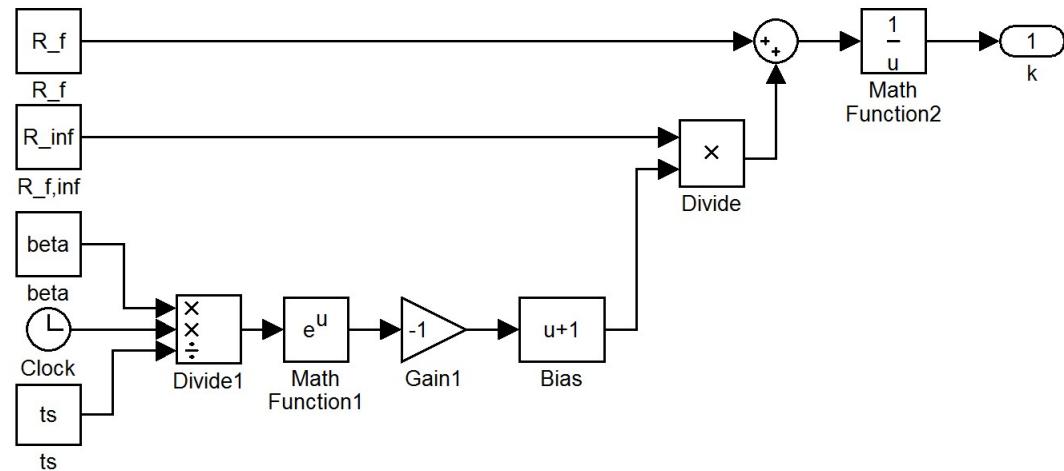
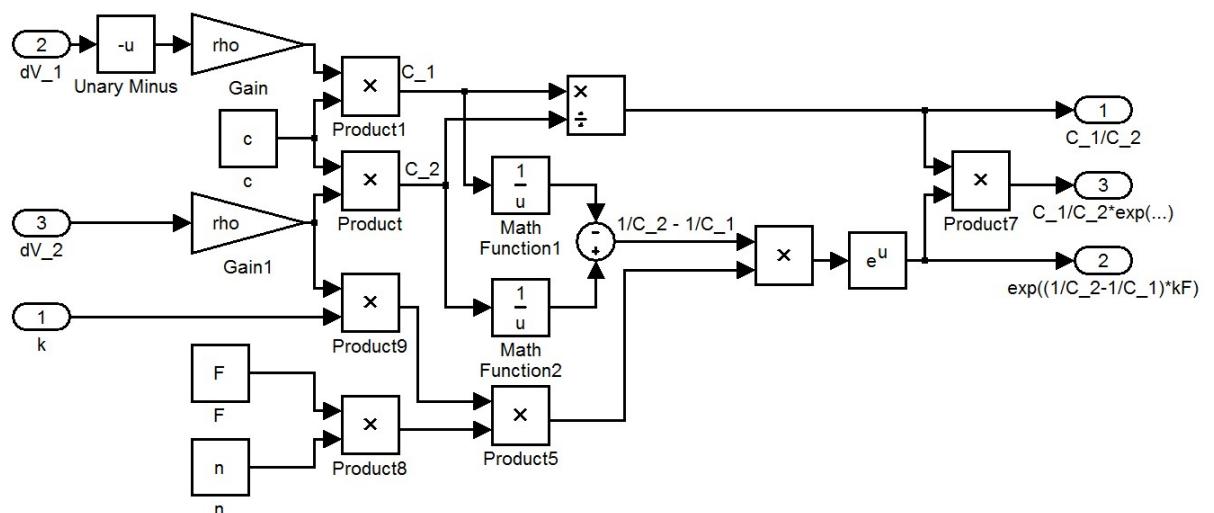


Abbildung 47: Blockschaltbild des Wärmeübertragers

Abbildung 48: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ Abbildung 49: Berechnung von  $C_1$ ,  $C_2$  und  $\alpha$

### 3 Demo

Dieser Abschnitt behandelt die Demo der Matlab HeatLib. Dabei handelt es sich um ein Beispiel, in dem Funktion einiger Komponenten der Bibliothek und deren Verschaltung gezeigt werden soll. Es handeltm sich um eine fiktive Heizungsanlage, die so in der Realität nicht existiert. Sie wurde so entworfen, dass sie viele Eigenschaften der HeatLib Komponenten und deren Zusammenschaltung verdeutlicht.

Im Folgenden soll nun zunächst der Aufbau der Beispielanlage näher beschrieben werden. Im zweiten Abschnit werden dann die Ergebnisse der Simulation gezeigt und kurz erläutert.

Aufbau der Beispielanlage 59

Simulation der Anlage 61

### 3.1 Aufbau der Beispielanlage

Für die Demonstration der Funktionalität und der Verschaltung einiger HeatLib Komponenten soll eine nicht real existierende Anlage dienen. Diese wird im Folgenden näher vorgestellt. In der Abbildung 50 ist ein Blockschema der fiktiven Beispielanlage zu sehen. Über zwei Wärmeerzeuger wird ein Verbraucher mit Wärme versorgt. Außerdem ist noch ein Speicher hinzuge schaltet.

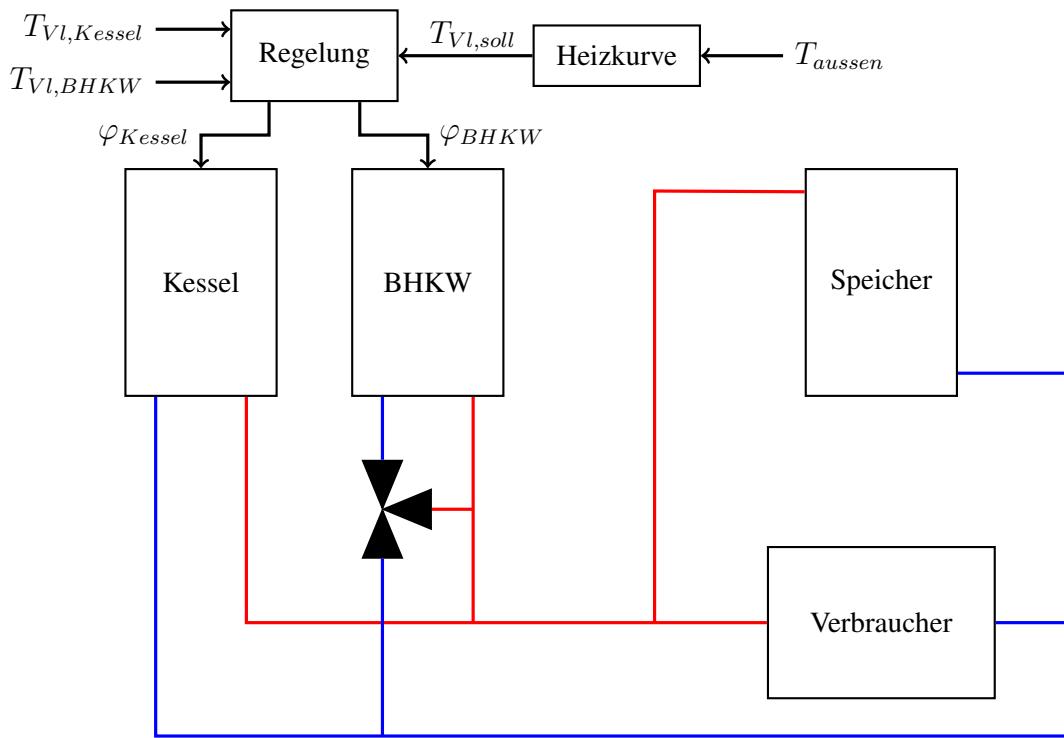


Abbildung 50: Aufbau der Beispielanlage

Bei den Wärmeerzeugern handelt es sich um einen **Kessel** und ein **BHKW**. Damit die Rücklauftemperatur des BHKWs nicht zu niedrig wird, ist dem BHKW eine **Rücklaufanhebung** vorgeschaltet. Die Rücklauftemperatur soll möglichst nicht unter eine Temperatur  $T_{min}$  sinken, die mit 50 °C festgelegt ist. Die Ausgänge des Kessels und des BHKWs, d.h. deren Vorläufe, werden mit dem **Vorlaufsammler** zu einem gesamten Vorlauf vermischt. Der gemeinsame Vorlauf ist an den **Verbraucher** und eine **Speicherkette** mit 4 Speichertanks angeschlossen. Je nach Durchflussrichtung des Speichers hat der Verzweigungspunkt, der den Speicher mit dem Vorlauf verbindet, die Funktion eines Mischers oder eines Verteilers. Im Ladezustand erfolgt eine Aufteilung des Volumenstroms des gesamten Vorlaufs auf die Speicherkette und den Verbraucher. Befindet sich der Speicher im Zustand entladen, wird der Verbraucher gemeinsam von den Wärmeerzeugern und der Speicherkette versorgt. Somit erreicht warmes Wasser den Verbraucher. Dieser entnimmt dem Volumenstrom eine bestimmte Leistung  $\dot{Q}_{ab}$ . Daher verlässt ein Volumenstrom mit niedrigerer Temperatur den Ver-

braucher. Je nach Betriebszustand des Speicher dient auch der nun folgende Verzweigungs-  
punkt als Verteiler oder Mischer. Im Ladezustand fließt kaltes Wasser aus der Speicherkette  
hinaus und vermischt sich mit dem Ausgangsvolumenstrom des Verbrauchers zum gesamten  
Rücklauf. Beim Entladen wird kaltes Wasser in den Speicher geleitet. Somit teilt sich der Ver-  
brauchervolumenstrom auf den Speicher und den Rücklauf zu den Wärmeerzeugern auf.  
Die Regelung der Wärmeerzeuger erfolgt über zwei PI-Regler. Der Kessel und das BHKW  
werden auf eine Sollvorlauftemperatur geregelt. Diese Solltemperatur wird von der **Heizkurve**  
festgelegt. Abhängig von der Außentemperatur ist eine bestimmte Temperatur des Vorlaufs  
nötig. Dieser Zusammenhang wird durch die Heizkurve beschrieben. Die PI-Regler stellen  
die Modulationssignale der Heizkomponenten dann so ein, dass die Sollvorlauftemperatur  
erreicht wird. Die Volumenströme werden vor der Simulation festgelegt.

### **3.2 Simulation der Anlage**

Um das im vorangegangenen Kapitel „[Aufbau der Beispielanlage](#)“ beschriebene Heizungssystem zu simulieren, wird es mit den in der [Block Dokumentation](#) vorgestellten Komponenten der HeatLib in Simulink aufgebaut. Die Abbildung 51 zeigt die Simulink Umsetzung der Anlage.

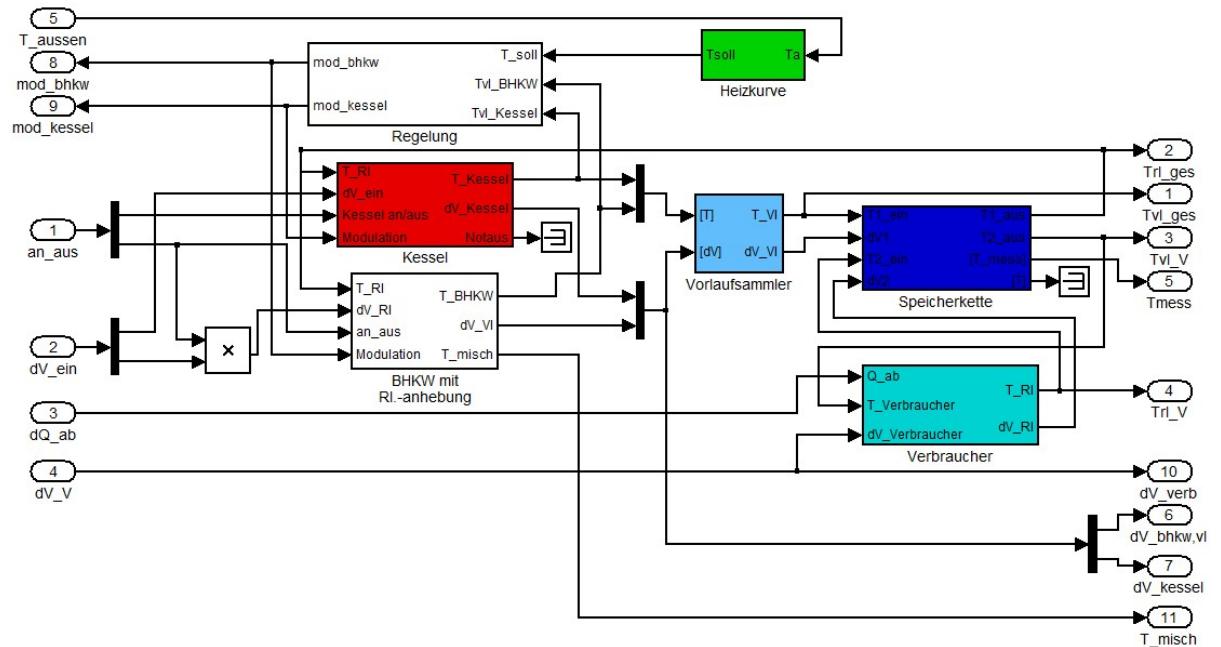


Abbildung 51: Simulink Implementation der Beispielanlage

Zur besseren Übersichtlichkeit sind das BHKW mit der dazugehörigen Rücklaufanhebung zu einem Block zusammengefasst. Dieser ist in der Abbildung 52 zu sehen. Auch der Regler hat einen eigenen Block, der so nicht in der HeatLib vorkommt. Es wurde hier ein einfacher Regler verwendet, um die vorgegebene Sollvorlauftemperatur einzustellen. Er ist in Abbildung 53 dargestellt.

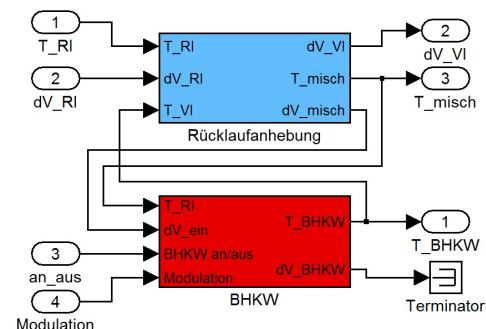


Abbildung 52: Simulink Implementation des BHKWs mit der Rücklaufanhebung

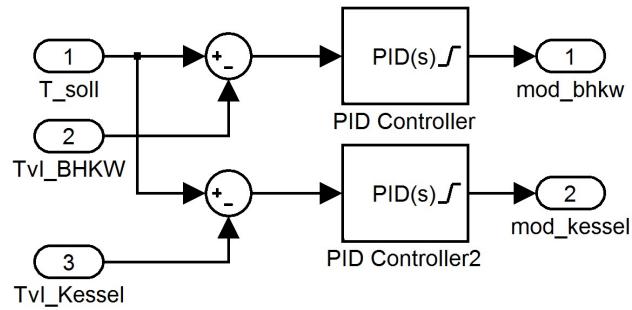


Abbildung 53: Simulink Implementation des Reglers

Die Definitionen der Parameter der einzelnen Komponenten sowie der Eingangssignale der Demo erfolgen in der Initialisierungsfunktion `InitFcn` des Simulink Modells `demo_heatlib.mdl`, die unter *File → Model Properties* zu finden ist. Dort ist auch die Stop-Funktion `StopFcn` angegeben, mit der die Ergebnisse nach Beendigung der Simulation geplottet werden.

Für die Simulation wird zum einen ein Außentemperaturverlauf vorgegeben. Anhand der Heizkurve erhält man die Sollvorlauftemperatur. Dies ist in Abbildung 54 zu sehen, die sowohl die Außentemperatur als auch die Heizkurve zeigt. Um es möglichst einfach zu halten, liegt in diesem Beispiel entweder eine Außentemperatur von 5 °C oder 20 °C vor.

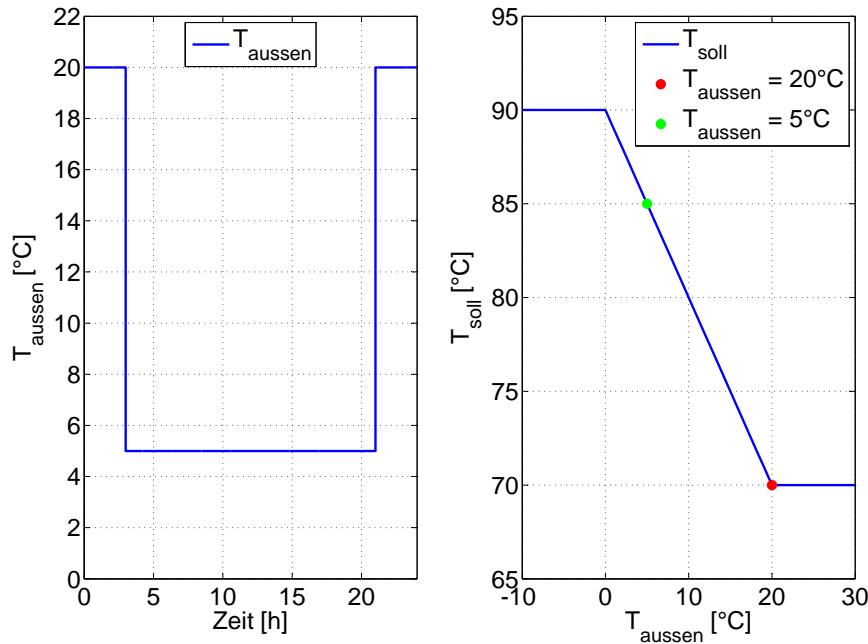


Abbildung 54: Außentemperaturverlauf und Heizkurve

Betrachtet man nach der Simulation der Anlage den Verlauf der Temperaturen des gesamten Vor- und Rücklaufs (Abbildung 55), erkennt man, dass die durch die Heizkurve vorgegebene Vorlauftemperatur gehalten wird. Die Rücklauftemperatur ändert sich abhängig davon, welche Leistung von der Last abgenommen wird. Es ist gut zu erkennen, wie die Rücklaufanhebung arbeitet. Sinkt die Temperatur  $T_{Rl,ges}$  des gesamten Rücklaufs unter die Mindestrücklauftemperatur wird die Rücklaufanhebung aktiv und mischt warmes Vorlaufwasser dem Rücklauf des BHKWs bei. So sinkt die Rücklauftemperatur des BHKWs  $T_{Rl,BHKW}$  nicht unter 50 °C.

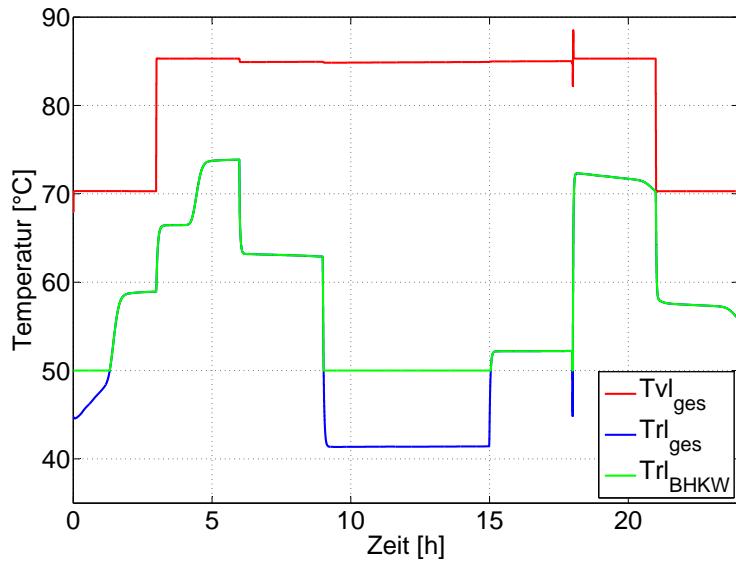


Abbildung 55: Verlauf der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen

Durch die Regler wird die Modulation des Kessels und des BHKWs so eingestellt, dass der Vorlauf seine Solltemperatur erreicht. Die so erzeugten Regelungssignale für die Wärmeerzeuger sind in Abbildung 56 dargestellt. Der Kessel ist zu Beginn und zum Ende der Simulation nicht aktiv. Er wird nur in der Mitte der Simulation hinzugeschaltet, wenn der Leistungsbedarf der Last am größten ist. In dieser Zeit soll zudem eine höhere Vorlauftemperatur erreicht werden.

Betrachtet man zusätzlich den Verbraucher, so lassen sich die Verläufe der Modulationssignale besser erklären. In Abbildung 57 sind zum einen die vorgegebene verbrauchte Leistung der Last sowie deren Eingangs- und Ausgangstemperatur zu sehen. Vergleicht man die Modulationssignale mit der verbrauchten Leistung, ist deutlich zu erkennen, dass die Wärmeerzeuger mehr Leistung bereitstellen müssen, wenn der Verbrauch steigt, um die Vorlauftemperatur auf dem Sollwert zu halten. Die Eingangstemperatur des Verbrauchers entspricht der Temperatur des gesamten Vorlaufs. Je mehr Leistung vom Verbraucher benötigt wird, desto niedriger ist die Rücklauftemperatur.

Außerdem ist ein Speicher mit 4 Tanks in der Anlage verbaut. Der Betriebszustand des Speichers ist abhängig von der Höhe der Volumenströme durch den Verbraucher und des gesamten

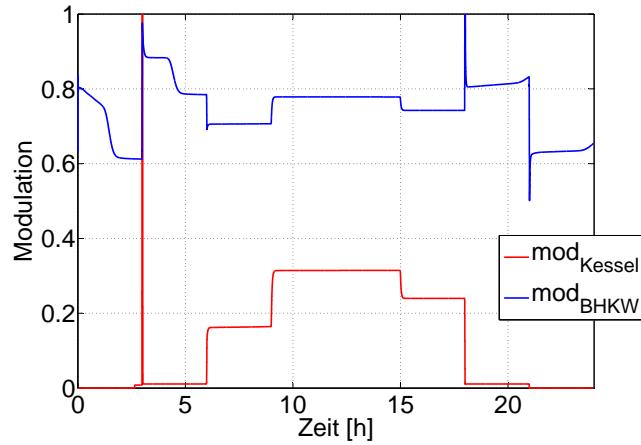
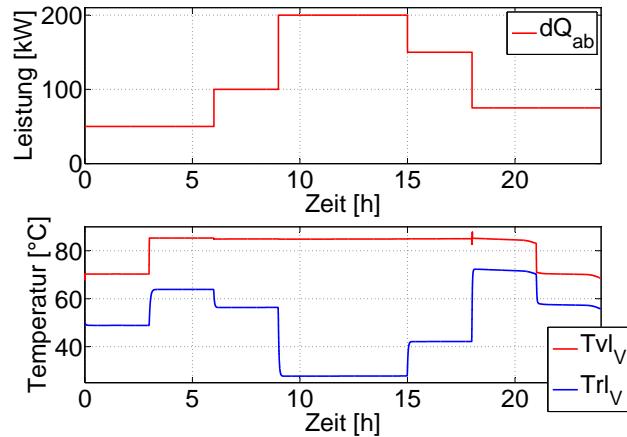


Abbildung 56: Verlauf der Modulationssignale von Kessel und BHKW

Abbildung 57: Verbrauchte Leistung  $\dot{Q}_{ab}$  und Vor- und Rücklauftemperatur des Verbrauchers

Vorlaufs. Die Volumenströme sind in der `InitFcn` des Simulink Modells angegeben. Daraus ergibt sich der resultierende Volumenstrom durch den Speicher. Ist der Volumenstrom größer als Null, wird er geladen. Im Betriebszustand Entladen ist der Volumenstrom kleiner als Null. In der Abbildung 58 sind der Volumenstrom und die Temperatur der Sensoren im Speicher dargestellt. Es ist deutlich zu sehen wie die Temperaturen bei positivem Volumenstrom ansteigen bis sie die maximale Temperatur erreicht haben, die der des einfließenden Wassers entspricht. Dies ist die Temperatur des gesamten Vorlaufs. Ist der Volumenstrom kleiner Null, fällt die Temperatur im Speicher auf den Wert des Rücklaufs.

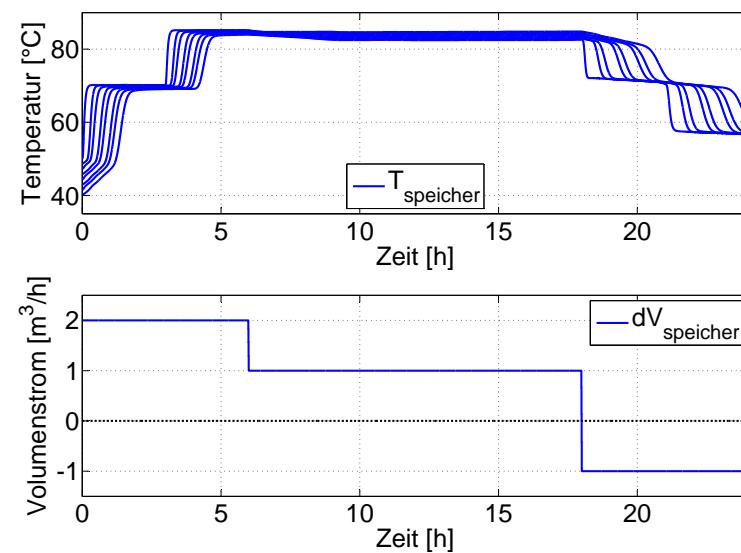


Abbildung 58: Temperaturen und Volumenstrom im Speicher

# **Index**

- Blockheizkraftwerk, 12
- Gebäude, 43
- Heizkurve, 46
- Kessel, 7
- Mischventil, 22
- Mischverhältnis, 49
- Pumpe, 31
- Rücklaufanhebung, 28
- Speicherkette, 34
- Verbraucher, 40
- Volumenstromverteilung, 19
- Vorlaufmischer, 25
- Vorlaufsammler, 17
- Wärmeübertrager, 53

## Literatur

- [1] KRUPPA, K.: *Vergleich verschiedener Modellierungswerkzeuge für Wärmeversorgungssysteme.* Institut für Regelungstechnik, TU Hamburg-Harburg, Bachelor Thesis, 2010 **2, 5**
- [2] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik.* 13. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, 1991. – ISBN 3-343-00759-5 **4**
- [3] PANGALOS, G. ; EICHLER, A. ; LICHTENBERG, G.: Tensor Systems: Multilinear Modeling and Applications. In: *3rd Int. Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, 2013. – submitted **43**
- [4] SCHMIDT, M.: *Modellierung des Wärmetauschers des Bezirksregierungsgebäudes in Düsseldorf.* Institut für Regelungstechnik, TU Hamburg-Harburg, Studienarbeit, 2011 **53**
- [5] SEIFERT, J.: *Entwicklung einer nichtlinearen modellprädiktiven Heizungsregelung zur energetisch optimierten Nutzung eines Warmwasserspeichers.* Institut für Regelungstechnik, TU Hamburg-Harburg, Masterarbeit, 2012 **34**
- [6] SPENGLER, T.: *Modellbildung einer Fernwärmeheizungsanlage und Identifikation der thermischen und hydraulischen Parameter.* Institut für Regelungstechnik, TU Hamburg-Harburg, Bachelorarbeit, 2011 **53**
- [7] TRINH, M.: *Modellbasierter Entwurf der Regelung eines Heizungssystems mit mehreren BHKWs und Wärmespeicher.* Institut für Regelungstechnik, TU Hamburg-Harburg, Studienarbeit, 2008 **4**