



TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Fachgebiet Energieversorgungsnetz und Integration  
Erneuerbarer Energien

STUDIENARBEIT

# Objektorientierte Implementierung und Simulation einer Kältelast mit Kältespeicher im Energieversorgungsnetz

vorgelegt von Juri STEBLAU

Matr.-Nr: 300244

29. Juni 2011

**Korrektoren:**

Advisor: Dipl.-Ing. Felix KLEIN - (TU-Berlin)

Examinator: Prof.Dr.-Ing. Kai STRUNZ - (TU-Berlin)

---

## Realisation und Simulation einer Kältelast mit Kältespeicher im Energieversorgungsnetz

---

**Abstract:** Hier bitte am Ende der Arbeit auf english die kurze Inhaltsangabe schreiben.

Hier muss noch ein Abstract rein !!!AM ENDE!!!

**Keywords:** Möglicherweise in Englisch! Fuck!

---

## Todo list

Abstract nicht da . . . . .	i
Einleitung mehrfach durchlesen! . . . . .	1
Reicht so? Guck bitte nach oben. . . . .	1
Bewertung einfügen. . . . .	1
Der Satz ist scheiße, umschreiben. . . . .	1
Das am Ende zur Ende schreiben . . . . .	1
Irgendwie bewerten? . . . . .	1
Grobentwurf einbinden . . . . .	2
Aufgabenstellung richtig beschreiben . . . . .	2
freaky . . . . .	3
Was ist los? . . . . .	4
SIND, das ist hier nicht gut. . . . .	4
Was ist hier mit dem Komma? . . . . .	4
Das ist nicht ganz ok? . . . . .	4
Der Satz ist total scheiße man . . . . .	8
Hört sich komisch an! . . . . .	8
Figure: Modellgrundlage . . . . .	9
bald schnell machen . . . . .	9
das ist scheiße! . . . . .	15
freaky sentence . . . . .	15
Hier auf Kapitel verweisen. . . . .	16
Kältemaschinen beschreiben? . . . . .	16
$i \times 1$ eigentlich noch nicht ideal, Schwachstelle, umdenken . . . . .	17
Beschränkungen hier? . . . . .	17
das ist doch überflüssig, oder? . . . . .	18
Das ist noch zu Überprüfen . . . . .	18
Wo wird das Verwendet? Hier schreiben . . . . .	18
Klären was das ist. . . . .	19
Das ist noch nicht richtig im Programm implementiert. Das muss DU NOCH MACHEN! . . . . .	19
Funktion mit für die graphische Ausgabe schreiben . . . . .	19
Funktion für tabellarische Ausgabe schreiben . . . . .	20

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>MATLAB® -Code Verzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Abkürzungsverzeichnes</b>	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Problemanalyse</b>	<b>2</b>
2.1 Aufgabenstellung . . . . .	2
2.2 Erster Schritt der Planung . . . . .	2
2.2.1 Funktionen und Daten . . . . .	3
<b>3 Problemspezifikation: Ermittlung eines Lösungsweges</b>	<b>4</b>
3.1 Problemlösungsansatz . . . . .	4
3.2 Anwendung der OOP am Modell . . . . .	5
<b>4 Kurze Darstellung der Theorie des Modellsupermarktes</b>	<b>8</b>
4.1 Ausformuliertes Einfügen . . . . .	8
4.2 Überblick über die mathematische Zusammenhänge . . . . .	9
4.2.1 Wermeverlustquellen bei Kühlgeräten . . . . .	9
4.2.2 Erforderliche Kälteleistung . . . . .	10
4.2.3 Transmissionswärmeleistung . . . . .	10
4.2.4 Leistungszahl . . . . .	10
4.2.5 Speichermittel, Kennzahl . . . . .	11
4.2.6 Verbrauch abhängig von der Öffnungszeit . . . . .	11
4.2.7 Berechnung der Temperaturänderung . . . . .	12
<b>5 Handhabung des Programms</b>	<b>14</b>
5.1 Allgemeines . . . . .	14
5.1.1 Systemanforderungen . . . . .	14
5.1.2 Installation . . . . .	14
5.1.3 Aufruf der Simulation . . . . .	15
5.1.4 Deklamation der berechneten Daten . . . . .	19
<b>A Anhang</b>	<b>21</b>
A.1 Anhang Example section . . . . .	21
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>22</b>

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Vier Knoten Beispiel . . . . .	5
3.2	Klassendiagramm Modellkonstrukt . . . . .	6
3.3	Sequenzdiagramm Modellkonstrukt . . . . .	7
4.1	Modellgrundlage . . . . .	9

# Tabellenverzeichnis

# MATLAB<sup>®</sup>-Code Verzeichnis

5.1	<code>config_grid.m</code>	15
5.2	<code>config_supermarkets.m</code>	16
5.3	<code>config_fridges.m</code>	17

# Abkürzungsverzeichnis

NK_KR_V.....	normalgekühltes Kühltregal an Verbundanlage
NK_KT_S.....	normalgekühlte Kühltruhe steckerfertig
OOP .....	objektorientierte Programmierung
TK_TKT_S.....	tiefgekühlte Tiefkühltruhe steckerfertig



## KAPITEL 1

# Einleitung

Die Erforschung der Ursachen und der Folgen des Klimawandels, die wachsende Schwierigkeit bei der Bereitstellung der konventionellen Energien, die Neubewertung der Risiken und technischen Mitteln bei der Endlagerung von Abfällen der Atomindustrie, die besorgniserregende Erkenntnis der bisherigen Fehlbewertung der Atom-sicherheit **werden mit Gewissheit** die politisch beschlossene Förderung der erneuerbaren Energien zu einer grundlegenden Energieform in den kommenden Jahren in Deutschland und in Europa forcieren.

Einleitung  
mehrfach  
durchlesen!

Reicht so?  
Guck bitte  
nach oben.

Bewertung ein-  
fügen.

Der Satz ist  
scheiße, um-  
schreiben.

Der Umstieg auf alternative Energien ist mit einigen Problemen verbunden. An einigen Orten ist der Einsatz dieser Technik aus politischer, technischer, ökonomischer oder ökologischer Sicht nicht möglich. Darum weichen oft die Stromerzeugung und der Strombedarf zeitlich und räumlich voneinander ab. Windkraft im Meer, Wasserkraft in den Bergen, Sonnenkraft in dem Süden, Geothermie in Island, Biomasse Land. Es ist auch eine Tatsache, dass nur ein Teil der erneuerbaren Energien direkt vom Menschen beeinflusst werden kann. Besonders die Menge der durch Sonne und Wind gewonnenen Energie schwankt abhängig von der Wetterlage. Die Integration dieser Energie in Netz führt zur erhöhten Bereitstellung an Regenergie. Hauptsächlich wird diese Herausforderung durch übermäßige Belastung der zur Ausregelung geeigneten konventionellen thermischen Kraftwerke gelöst. Durch den regelungsbedingten ineffizienten Teillastbetrieb und wiederholte An- und Abfahrvorgänge sinkt der Wirkungsgrad und ein höherer Verschleiß der ist die Folge. Aus langfristiger Sicht wird jedoch

Das am Ende zur Ende schreiben

eine Investition in Lastmanagement und in Energiespeicher unentbehrlich sein.

Der Anteil am Bedarf an elektrischen Energie vom Gesamtverbrauch eines Industrielandes für Kälteerzeugung in den Supermärkten wird in Australien zum Beispiel auf ein Prozent [McG07, Seite 8] und in Schweden auf zwei [Ari05, Seite 6] und [Ene11] Prozent geschätzt.

Irgendwie bew-  
erten?

Brückentechnologien nicht sicher. Politischer Druck wächst. Es muss in Angriff genommen werden alle Potentiale zur Senkung des Energieverbruchs auszuschöpfen. Rationale Anwendung der Energie in öffentlichen (Kleingewerblichen, Supermärkte) Einrichtungen oft sehr schwer umsetzbar. Es müssen Reize gefunden werden, die das Verhalten zur rationalen Nutzung der Energie fördern.

# Problemanalyse

---

### Inhaltsangabe

<b>2.1 Aufgabenstellung</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>2.2 Erster Schritt der Planung</b> . . . . .	<b>2</b>
2.2.1 Funktionen und Daten . . . . .	3

---

In diesem Kapitel wird ein detailliertes Bild über die Aufgabenstellung gegeben. Außerdem werden die Schritte, die beim Programmentwurf in der Planungsphase durchgegangen worden sind, Punkt für Punkt beschrieben.

Grobentwurf  
einbinden

## 2.1 Aufgabenstellung

Ein Programm zur Simulation des variablen Lastverhaltens von Kältelast mit Kältespeicher im Energieversorgungsnetz.

Aufgabenstellung  
richtig  
beschreiben

- Präzisierung
- Formalisierung
- netzbezogene Beschränkungen
- kältetechnische Beschränkungen

Das Simulationsprogramm wird im Zusammenhang mit einem Lastflussoptimierungsprogramm aufgerufen.

## 2.2 Erster Schritt der Planung

Die an das Programm gestellten Anforderungen werden im ersten Schritt des Softwareentwurfs bestimmt. Die Ermittlung der Funktionen des Programms, sowie die Form und die Menge der Daten, die in das Programm fließen müssen, bilden das Ziel der ersten Phase der Planung.

### 2.2.1 Funktionen und Daten

Die Intention der Arbeit, ein Programm zur Simulation des variablen Lastverhaltens von Kältelast mit Kältespeicher im Energieversorgungsnetz, bestimmt die Funktionen, die das Simulationsprogramm zu erfüllen hat. Dem Anwender des Programms wird die Möglichkeit bereitgestellt, das Lastverhalten einer variablen Anzahl an Modellkältelasten in einem beliebigen Energieversorgungsnetz in Folge vom Anwender bestimmten Lastmanagements zu simulieren um anschließend die Verbrauchsdaten in einem Lastflussoptimierungsprogramm zu verwenden.

Im Energieversorgungsnetz ist eine Kältelast ein gewöhnlicher Energieverbraucher, der an Knoten des Energieversorgungsnetzes angeschlossen ist. Besonders interessant als Untersuchungsgegenstand bei der Betrachtung der Möglichkeiten zum Lastmanagement im Rahmen der Integration der fluktuierenden Erneuerbaren Energie in ein Energieversorgungsnetz wird diese Art der Last, speziell die Kälteanlagen in den bestehenden Supermarktketten, durch die Tatsache, dass einen hohen Prozentanteil am Gesamtenergieverbrauch eines Landes darauf abfällt [Ari05]. Der durchschnittliche Energieverbrauch der Kälteanlagen je Supermarktkette kann auf Grund der technischen Ausführung unterschiedlich sein. Der Energieverbrauch entsteht an definierten Punkten im Netz. An den einzelnen Knotenpunkten können mehrere Kältelasten angeschlossen sein.

freaky

Auf Grund dieser Analyse erscheinen folgende Funktionen für die Umsetzung des Programms besonders zweckmäßig.

- Eines auf das Problem reduziertes Computermodell des Energieversorgungsnetzes wird erstellt. Die relevanten Input-Informationen sind:
  - Anzahl der Knoten,
  - Anzahl der an einen Knoten angeschlossene Speicher,
  - Menge der zu regelnder Energie,
  - bzw. LMP-Preise.
- Ein Computermodell der Kältelast wird erstellt. Die relevanten Input-Informationen sind:
  - Modellparameter Kältelast.
- Der Informationsfluss zwischen den Computermodellen Energieversorgungsnetz und Kältelast wird in einer Weise implementiert, die es ermöglicht, den elektrischen Energieverbrauch der jeweiligen Kältelasten eindeutig zu berechnen und dem Verursacher sowie dem Anschlussort, an dem die Energie verbraucht wird, zuzuordnen. Der elektrische Energieverbrauch wird auf Grund der Modellparameter der Kältelasten sowie der bevorzugten Betriebsmodi der Kältelasten berechnet.

# Problemspezifikation: Ermittlung eines Lösungsweges

### Inhaltsangabe

<b>3.1 Problemlösungsansatz</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>3.2 Anwendung der OOP am Modell</b> . . . . .	<b>5</b>

- Ermitteln eines Lösungsweges

In diesem Kapitel wird anhand eines vier Knoten Beispielnetzes die Lösung vorgestellt. Unabhängig von dem mathematischen Modell des Modellsupermarktes wird die Umsetzung der Implementierung vorgestellt.

Was ist los?

Software entwickeln, Entscheidung Vorgehensmodell Programmiersprache Programmierparadigma

## 3.1 Problemlösungsansatz

OOP: Lösung von Problemen durch ein Gefecht kooperierender Objekte. [PH09]

### Gedankliche Konzepte, Motivation und Einsatz der OOP

Seit Ende des letzten Jahrhunderts herrscht in der Fachliteratur für Informatik die Meinung, dass der Einsatz von objektorientierten Techniken beim Softwareentwurf Programme hervorbringt, die im Vergleich *einfacher erweiterbar, besser testbar und besser wartbar* sind. Dabei wird ein Verfahren angewendet, nach dem große Systeme in kleinere Teile des Ganzen zerlegt werden. Diese lassen sich dann im Allgemeinen mit weniger Aufwand und Fehlerwahrscheinlichkeit programmieren. Inspiriert durch die Vorgänge aus der realen Welt, werden die Abläufe durch operierende Objekte vorgestellt, die Aufträge erledigen und vergeben können. Die obengenannte Aufgabenstellung und die Thematik erlaubt es mit Hilfe der Grundelemente der objektorientierten Software, *Datenkapselung, Polymorphie «Vielgestaltigkeit» und Vererbung*, die Lösung des Problems mit Zuversicht anzugehen und ein flexibles Programm herzustellen. Es besteht die Möglichkeit, Supermarktketten mit unterschiedlicher Ausführung, Größe und unterschiedlichem Energieverbrauch in einem Energieversorgungsnetz flexibel zu modellieren<sup>1</sup>.

SIND, das ist hier nicht gut.

Was ist hier mit dem Komma?

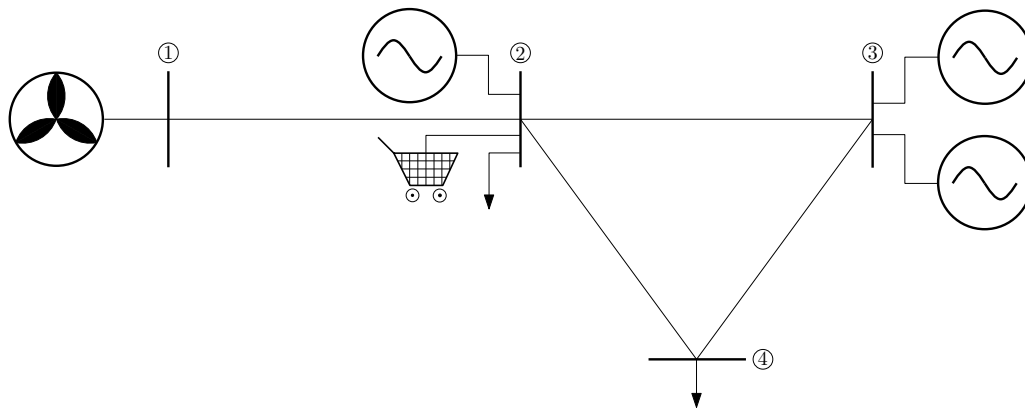
Das ist nicht ganz ok?

<sup>1</sup> Ausführliche Informationen dazu findet man z.B. in [LR09], [PH09] oder [Wei10].

## 3.2 Anwendung der OOP am Modell

In der Abbildung 3.1 wird ein einfaches Energieversorgungsnetz mit vier Knoten dargestellt. Am Knoten eins ist eine regenerative elektrische Energiequelle, in diesem Fall ein Windpark, angeschlossen. Weitere konventionelle elektrische Energiequellen befinden sich an den Knoten zwei und drei. Die passiven Lasten befinden sich am Knoten zwei und vier. Der Kältespeicher ist am Knoten zwei angeschlossen. Im Bild wird der Kältespeicher Supermarkt durch einen Einkaufswagen symbolisiert. Die Knoten sind untereinander durch Leitungen verbunden.

Abbildung 3.1: Vier Knoten Beispiel



In der Realität kann ein Energieversorgungsnetz durch die Variation der Knotenzahl und die Vermaschung beliebig komplizierte Form aufweisen. Bei der Umsetzung der gegebenen Situation im Programm.

Hier noch ein Zwischentext.

Abbildung 3.2: Klassendiagramm Modellkonstrukt

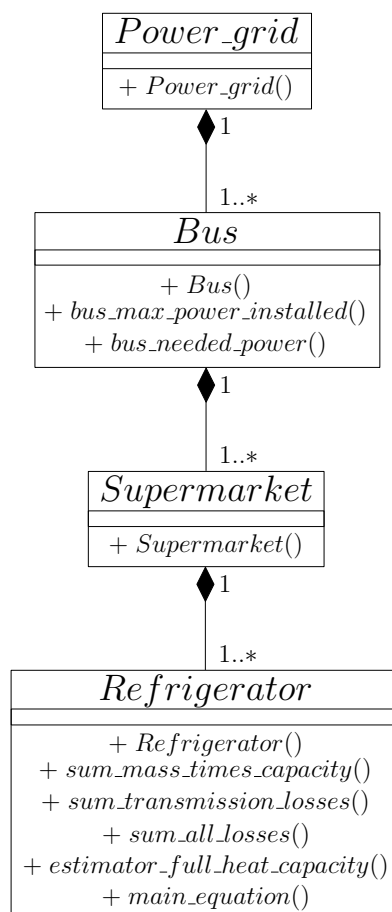
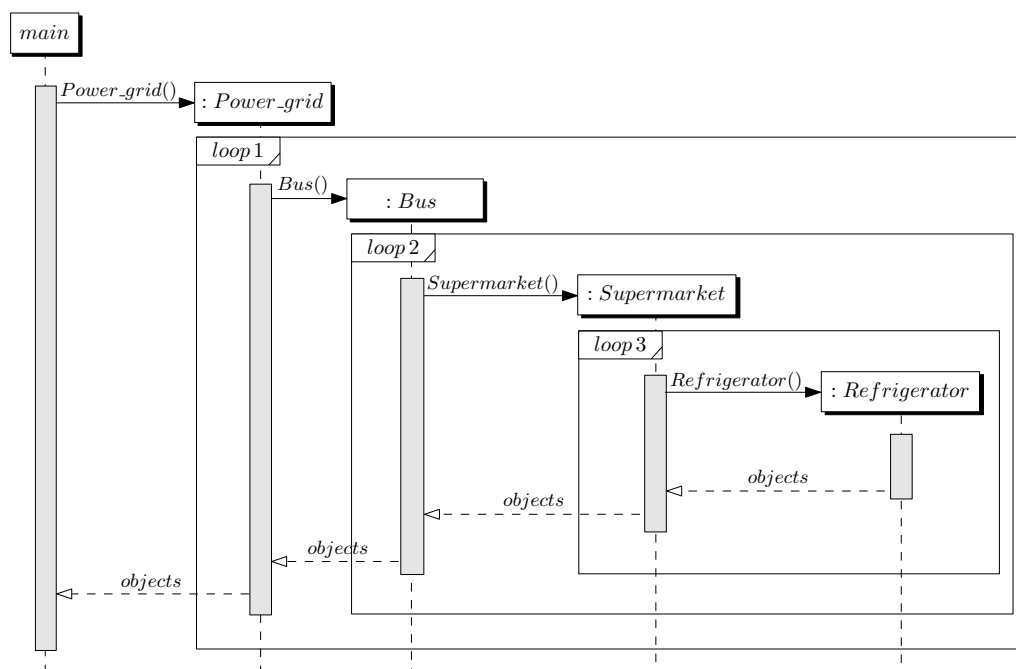


Abbildung 3.3: Sequenzdiagramm Modellkonstrukt



## KAPITEL 4

# Kurze Darstellung der Theorie des Modellsupermarktes

### Inhaltsangabe

4.1	Ausformuliertes Einfügen . . . . .	8
4.2	Überblick über die mathematische Zusammenhänge . . . . .	9
4.2.1	Wärmeverlustquellen bei Kühlgeräten . . . . .	9
4.2.2	Erforderliche Kälteleistung . . . . .	10
4.2.3	Transmissionswärmeleistung . . . . .	10
4.2.4	Leistungszahl . . . . .	10
4.2.5	Speichermittel, Kennzahl . . . . .	11
4.2.6	Verbrauch abhängig von der Öffnungszeit . . . . .	11
4.2.7	Berechnung der Temperaturänderung . . . . .	12

In diesem Kapitel wird ein knapper Überblick über die mathematischen und physikalischen Zusammenhänge, die bei der Entwicklung eines Modellsupermarktes zwingend beachtet werden müssen, vorgestellt. Es beinhaltet eine Zusammenfassung des mathematischen Konstruktes aus dem Kapitel 3 der Diplomarbeit von Caroline Möller [Mö10], der bei der Entwicklung des Programms zu Grunde gelegt wurde.

Der Satz ist total scheiße man

## 4.1 Ausformuliertes Einfügen

Die primäre Aufgabe der Kühleinheiten in einem Supermarkt besteht in der Regel darin, Lebensmittelltemperatur unter die Zimmertemperatur zu bringen und diese dabei zu halten. Körper mit unterschiedlicher Temperatur sind bestrebt, wenn sie thermisch von einander nicht vollkommen isoliert sind, durch gegenseitige Wechselwirkung ihre Temperaturen anzugleichen, sodass ein Wärmegleichgewicht entsteht, wobei der natürliche, selbständige Wärmefluss immer von einem Körper mit höheren Temperatur in Richtung des Körpers mit kleineren Temperatur stattfindet. Um eine negative Temperaturänderung herzustellen und diese auch zu halten, muss die eindringende Wärmeenergie ständig in der selben Höhe abgeführt werden, damit die Temperatur konstant bleibt. Diese Energiemenge pro Zeiteinheit wird als Kälteleistung bezeichnet. Eine Abweichung von dieser Menge führt zum Steigen der Tem-

Hört sich komisch an!



Abbildung 4.1: Modellgrundlage



peratur, wenn weniger und zum sinken der Temperatur wenn mehr abgeführt wird. Um diesen Kühlkreislauf aufrecht zu erhalten, muss Leistung aufgewendet werden<sup>1</sup>.

## 4.2 Überblick über die mathematische Zusammenhänge

Das wird ausformuliert und mit einem Bild visualisiert.

bald schnell  
machen

- Temperaturunterschied
- Wärmeausgleich (Verlust an Kälte)
- Kälteenergie gespeichert in Körpern mit einer bestimmten spezifischen Wärmekapazität
- Kälteenergie gespeichert in Masse

### 4.2.1 Wermeverlustquellen bei Kühlgeräten

Die Temperaturdifferenz  $\Delta t$  ist direkt proportional zur eindringenden Wärmeenergie  $Q$  und wird mit

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c} \quad (4.1)$$

ermittelt, wobei  $m$  die Masse des Stoffes, der die Wärmeenergie aufnimmt, und  $c$  seine spezifische Wärmekapazität ist. Wärmeverluste bedeuten hier die Verluste durch eindringende Wärme oder die „Verluste an Kälte“ [Mö10].

<sup>1</sup> Eine detaillierte Beschreibung dieser Prozesse in einer Koprozessionskälteanlage und Spezifikation ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ausführliche Informationen dazu findet man z.B. in [Mö10, Ari05, CH04].

### 4.2.2 Erforderliche Kälteleistung

Gegeben sind also:

- der Kältebedarf in  $kW$  bei Kühlstellen, die zu einer Verbundanlage gehören,
- der elektrische Energieverbrauch in  $kWh/24 h$  bei steckerfertigen Geräten,
- die installierte Verdichterkälteleistung in  $kW$  bei Kälteaggregaten.

Die installierte Kälteleistung ist oft größer als der Kältebedarf. Bei Angaben zur installierten Kälteleistung muss deshalb die tägliche Betriebszeit des Verdichters  $\tau_B$  berücksichtigt werden. Die tägliche Betriebszeit des Verdichters ist in der Literatur mit  $16h$  für Plusanlagen und  $18h$  für Minusanlagen angegeben. Unter Verwendung der Gleichung für die installierte Kälteleistung  $\dot{Q}_0$

$$\dot{Q}_0 = \frac{24}{\tau_B} \quad (4.2)$$

erhält man den Kältebedarf oder die erforderliche Kälteleistung  $Q_0$ .

### 4.2.3 Transmissionswärmeleistung

Die Wärmedurchgangskoeffizienten  $k$ , auch  $k$ -Werte genannt, welche angeben, wieviel Wärmeleistung pro  $m^2$  und pro  $1 K$  Temperaturdifferenz durch die Wand diffundiert, sind wichtig für die Berechnung der Transmissionswärmeleistung  $\dot{Q}_{Tr}$ . Die Transmissionswärmeleistung wird mit

$$\dot{Q}_{Tr} = A \cdot k \cdot \Delta t \quad (4.3)$$

berechnet, wobei  $A$  die Fläche der wärmeübertragenden Wände und  $\Delta t$  die Temperaturdifferenz der Kühlraumtemperatur zur Umgebungstemperatur ist.

### 4.2.4 Leistungszahl

Der Zusammenhang zwischen der aufgewendeten elektrischen Antriebsleistung eines Verdichters in einer Kompressionskälteanlage  $P$  und genutzten Kälteleistung  $\dot{Q}_0$  wird durch die Kältezah  $\varepsilon$  Gleichung (4.4) wiedergegeben.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_0}{P} \quad (4.4)$$

Um auf die für die Kühlung in einer Stunde benötigte elektrische Leistung für eine Kühleinheit zu kommen, muss der in dieser Stunde anfallende Bedarf an Kälteleistung durch die Leistungszahl dividiert werden. Die Leistungszahl wird in die zweite Spalte im Array (vergl. Zeile 4 im MATLAB®-Code 5.3) eingetragen.

### 4.2.5 Speichermittel, Kennzahl

Neben den technischen Daten und den Abmaßen der Flächen, sind Angaben zur Art und Menge der eingelagerten Lebensmittel notwendig. Deren Massen und spezifische Wärmekapazitäten sind ein wichtiges Kriterium für die Wärmespeicherfähigkeit und damit den Temperaturverlauf, von dem wiederum die Nutzung als Speicher abhängt. Das Produkt aus Masse  $m$  und spezifischer Wärmekapazität  $c$  wird auch absolute Wärmekapazität  $C$  genannt. Je größer die absolute Wärmekapazität  $C$ , umso mehr Wärme kann ein Produkt speichern und umso langsamer steigt seine Temperatur (vgl. Gleichung (4.1) auf Seite ).

### 4.2.6 Verbrauch abhängig von der Öffnungszeit

Die Wärmeverluste sind abhängig von den Öffnungszeiten des Supermarkts. In der Nacht, wenn der Markt geschlossen ist, werden offene Kühlregale in nahezu allen Supermärkten mit Nachtrollos verschlossen. Die folgenden Rechnungen gehen davon aus, dass Verluste in der Nacht bei geschlossenem Supermarkt nur durch Transmissionswärme auftreten. Die Beleuchtung ist ausgeschaltet, die Türen werden nicht geöffnet, die offenen Kühlregale sind mit Nachtrollos verschlossen. Es gibt keine Personen im Markt, die Wärme abgeben. Die Truhen können mit Nachtabdeckplatten aus Kunststoffschäum abgedeckt werden [COP-10]. Durch diese Maßnahmen sinkt der Energieverbrauch auf 10 bis 20% des Bedarfs während der Öffnungszeiten [KAU-08].

Am Tag müssen neben den Verlusten durch die Transmissionswärme auch alle anderen Verluste, die auftreten, berücksichtigt werden. Diese zusätzlichen Verluste werden zur Vereinfachung als weitgehend konstant angenommen. Aus den soeben angestellten Überlegungen folgt:

$$\dot{Q}_{Nacht} = \dot{Q}_{Tr} \quad (4.5)$$

und

$$\dot{Q}_{Tag} = \dot{Q}_{mehr} + \dot{Q}_{Tr} \quad (4.6)$$

Für die Kälteverbraucher, bei denen der Kältebedarf gegeben ist, kann die Gleichung (4.6) unter Berücksichtigung von  $\dot{Q}_0 = \dot{Q}_{Tag}$  und des Faktors für die Kältebedarfsabsenkung  $K$  zur Berechnung des Mehrbedarfs an Leistung  $\dot{Q}_{mehr}$  verwendet werden. Da für  $\dot{Q}_{mehr}$  jedoch ein konstanter Wert gebraucht wird, muss auch mit einem konstantem Wert für  $\dot{Q}_{Tr}$  gerechnet werden. Dieser wird einmalig aus der mittleren Kühlraumtemperatur  $\bar{t}_{KR}$  mit folgender Gleichung gebildet und nur für die Berechnung von  $\dot{Q}_{mehr}$  verwendet.

$$\bar{\dot{Q}}_{Tr} = A \cdot k \cdot (t_{amp} - \bar{t}_{KR}) \quad (4.7)$$

Der Fehler, der durch diese Mittelung entsteht, ist vernachlässigbar, da die Transmissionswärmeverluste sehr gering sind im Vergleich zu den Gesamtwärmeverlusten am Tag und diese aufgrund des gegebenen oder ermittelten Kälteleistungsbedarfs  $\dot{Q}_0$  konstant sind.

Folgender Ausdruck ergibt sich damit für  $\dot{Q}_{mehr}$  bei Kälteverbrauchern mit gegebener Kälteleistung:

$$\dot{Q}_{mehr} = \dot{Q}_0 \cdot K - \bar{\dot{Q}}_{Tr} \quad (4.8)$$

Aufgrund der nicht vorhandenen Angabe für den Kältebedarf bei steckerfertigen Geräten ist eine zweite Methode notwendig, um auch hier den Mehrbedarf am Tag zu ermitteln. Der Wert des spezifischen elektrischen Energieverbrauchs pro 24 Stunden ist bei diesen Geräten gegeben. Mit dieser Angabe kann wie folgt gerechnet werden. Zunächst wird der spezifische Energieverbrauch  $W_{spez24}$  mit dem Faktor für die Kältebedarfsabsenkung  $K$ , dem Verdichteranteil  $v$  und mit der Anzahl der Geräte  $n$  multipliziert. Als Ergebnis erhält man die Verdichterarbeit pro 24 Stunden  $W_{Verd24}$  für den gesamten Kälteverbraucher.

$$W_{Verd24} = W_{spez24} \cdot K \cdot v \cdot n \quad (4.9)$$

Werte für den Anteil der Verdichterarbeit am Gesamtenergieverbrauch sind in der Literatur mit 0,627 [PER-06] oder 0,66 [KAU-08] gegeben. Der Anteil der Verdichterarbeit  $W_{mehr}$ , der zuständig ist für das Abführen der eindringenden Wärmeenergie  $Q_{mehr}$  ergibt sich mit folgender Gleichung:

$$W_{mehr} = W_{Verd24} - \frac{\dot{Q}_{Tr}}{\varepsilon} \cdot 24h. \quad (4.10)$$

Die Wärmeleistung  $\dot{Q}_{mehr}$  lässt sich dann anschließend mit

$$\dot{Q}_{mehr} = \frac{W_{mehr}}{12h} \cdot \varepsilon \quad (4.11)$$

berechnen.

Dabei entspricht  $\dot{Q}_{Nacht}$  der mittleren Transmissionswärmeleistung  $\dot{Q}_{Tr}$ .  $\dot{Q}_{Tag}$  ist der Kältebedarf  $\dot{Q}_0$ , multipliziert mit dem Faktor für die Kältebedarfsabsenkung  $K$  bei Geräten, bei denen der Kältebedarf gegeben ist. Bei steckerfertigen Geräten ist  $\dot{Q}_{Tag}$  die Summe aus dem Mehrbedarf an Leistung am Tag  $\dot{Q}_{mehr}$  und der mittleren Transmissionswärmeleistung  $\dot{Q}_{Tr}$ .

#### 4.2.7 Berechnung der Temperaturänderung

Mit den Wärmeverlusten, die am Tag und in der Nacht in unterschiedlicher Größe auftreten, wird für jeden Zeitschritt die Zeit bis zum kritischen Temperaturmaximum bestimmt. Diese Zeit braucht das Programm, um den Einsatz der Supermarktkälteanlagen als Speicher zu planen. Mit der Gleichung

$$\tau_{krit}(i) = \frac{m \cdot c \cdot (t_{max} - t(i))}{\bar{\dot{Q}}_{Tr_{ln}}} \quad (4.12)$$

wird die Zeit  $\tau_{krit}$  für jeden Zeitpunkt  $i$  berechnet, wobei  $\bar{\dot{Q}}_{Tr_{ln}}$  der logarithmische Mittelwert ist, der sich aus den Transmissionswärmeleistungen zum jeweils aktuellen Zeitpunkt  $i$  mit der Temperatur  $t(i)$  und den Transmissionswärmeleistungen zum

Zeitpunkt, an dem der Kühlinnenraum die maximale Temperatur  $t_{max}$  erreicht hätte, berechnet. Am Tag müssen die restlichen Verluste  $\dot{Q}_{mehr}$  zusätzlich zu den Transmissionwärmeverlusten für die Berechnung der Zeit bis zur kritischen Temperatur berücksichtigt werden, wodurch sich folgende Gleichung ergibt:

$$\tau_{krit}(i) = \frac{m \cdot c \cdot (t_{max} - t(i))}{\dot{Q}_{Trin} + \dot{Q}_{mehr}} \quad (4.13)$$

Die Zeit  $\tau_{krit}$  ist abhängig vom Anstieg der Temperaturen und dieser wiederum von den eindringenden Wärmelasten.

Um den Temperatúrausgleich in den Lebensmitteln im Algorithmus zu berücksichtigen, werden deshalb die zu- und abgeführten Wärmeenergiemengen bei der Berechnung der Temperatur für jeden Zeitschritt stets mit dem Faktor 0,8 multipliziert. Die Gleichung zur stündlichen Berechnung der aktuellen Temperatur ist damit:

$$t(i+1) = 0.8 \cdot \frac{Q_v - Q_{ab}}{m \cdot c} + t(i) \quad (4.14)$$

wobei  $Q_v$  die aktuell eindringende Wärmeenergie und  $Q_{ab}$  die abgeführte Wärmeenergie ist.

# Handhabung des Programms

## Inhaltsangabe

<b>5.1 Allgemeines</b>	<b>14</b>
5.1.1 Systemanforderungen	14
5.1.2 Installation	14
5.1.3 Aufruf der Simulation	15
5.1.4 Deklamation der berechneten Daten	19

## 5.1 Allgemeines

Das Programm ist ein Packet aus MATLAB<sup>®</sup> M-files zur Simulation von Kälteanlagen mit Kältespeichern<sup>1</sup> in einem Energieversorgungsnetz. Das Simulationsprogramm ist in der Lage das Verhalten einer bzw. mehrerer Supermarktkälteanlagen als flexibler Verbraucher in einem Energieversorgungsnetz zu simulieren. Das Programm kann über eine vordefinierte Schnittstelle in ein Leistungsflussberechnungs-Programm eingebunden werden.

### 5.1.1 Systemanforderungen

Zur Benutzung des Programms muss auf Grund der gewählten Programmiersprache und der objektorientierten Programmierweise folgendes gelten:

- Im Rechner muss die Software MATLAB<sup>®</sup> der Version 5.0 oder höher<sup>2</sup> eingerichtet sein.

Die Anforderungen an die Hardware sind durch die eingesetzte MATLAB<sup>®</sup>-Version bestimmt.

### 5.1.2 Installation

Das Programm richtet sich in seiner Installation und der Benutzung nach dem allgemein gültigen Gebrauch der MATLAB<sup>®</sup> M-files<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Da gewöhnliche Supermarktketten Untersuchungsobjekt dieser Studie sind, werden die Termini Kältelast, Kälteanlagen mit Kältespeichern und Supermarktkette als gleichbedeutend aufgefasst und verwendet.

<sup>2</sup> MATLAB<sup>®</sup> verfügbar über The MathWorks, Inc. (<http://www.mathworks.com>).

<sup>3</sup> Ausführliche Information dazu findet man z.B. im [Ang09].

### 5.1.3 Aufruf der Simulation

Die Primärfunktion des Programms ist, wie oben schon erwähnt, die Simulation des Lastverhaltens eines Supermarkts oder mehreren Supermarktketten in einem Energieversorgungsnetz. Das setzt voraus, dass folgende grundlegende Prinzipien realisiert werden:

1. Ein oder mehrere MATLAB®-Modelle von Supermärkten können erstellt und gleichzeitig an verschiedenen Knoten im Energieversorgungsnetz verwendet werden.
2. Von einem besonderen Interesse sind die Energieverbrauchszahlen zum Beispiel für eine bestimmte Kälteeinheit oder für die gesamte Kette. Die Realisierung der Speicherung dieser Daten ist zwingend.

#### 5.1.3.1 Vorbereitung der Input-Information

Je nach Fall oder theoretischer Grundlage können die Konfigurationsdateien verändert werden. Zum Starten des Programms werden folgende Konfigurationsdateien benötigt:

das ist scheiße!

- config\_grid.m
- config\_supermarkets.m
- config\_fridges.m

#### config\_grid.m

Es ist wichtig, dass die topologische Eigenschaft des Netzes im Programm berücksichtigt werden, damit bei der Berechnung des Leistungsflusses die Laständerung, die durch den Betrieb der Kältebelastung entsteht, am Knoten, an dem sie verursacht wird, gezählt wird. Damit das Programm mit den für die Simulation notwendigen Informationen, die das Energienetz beschreiben, versorgt wird, ist die Form, die in MATLAB®-Code 5.1 vorgestellt wird, für die config\_grid.m-Datei zwingend:

freaky sentence

MATLAB®-Codes 5.1: config\_grid.m

```
%% Bus, Supermarkets, Number of Supermarkets
configuration_grid = {...
    1 , {Aldi      ,      1500;      ...
        Netto    ,      500};      ...
    2 , {0        ,      0};      ...
    3 , {0        ,      0};      ...
    4 , {0        ,      0};      ...
};
```

In der **config\_grid.m**-Datei wird ein  $n \times 2$ -Cell Array ( $n \in \mathbb{Z}_0^+$ ) definiert, der die Information über die Topologie des Netzes sowie die Verteilung der Kältelasten im Netz beinhaltet. Ein Cell Array ist ein Speicherobjekt, der verschiedene Datentypen unterschiedlicher Größe aufnehmen kann [Ang09, Teil 2, Seite 15]. Ein Cell Array wird mit dem Befehl  $c = \text{cell}(\dots)$  oder mit Hilfe von geschweiften Klammern  $c = \{\dots\}$ , wie in diesem Fall, erzeugt. Der Zugriff auf ein Cell Array wird in dem folgenden Kapitel kurz erklärt<sup>3</sup>. Jede Zeile des Cell Arrays **configuration\_grid**, der in der **config\_grid.m**-Datei definiert werden muss, steht für ein Knotenpunkt im Netz. In der ersten Spalte wird die Nummer des Knotens bzw. Busses gespeichert. In die zweite Spalte werden die Arten der Kältelasten und deren Anzahl an jeweiligen Knoten festgelegt. Es ist wiederum ein  $m \times 2$ -Cell Array ( $m \in \mathbb{Z}_0^+$ ). Jede Zeile dieses Cell Arrays ist für eine eigene Art Supermarktkette reserviert. In die erste Spalte kommt der Name der Supermarktkette deren Eigenschaften in der **config\_supermarkets.m**-Datei vergl. MATLAB®-Code 5.2 gespeichert sind. In die zweite Spalte wird die Anzahl der Supermärkte einer Kette festgelegt die an dem bestimmten Knoten simuliert werden soll.

Hier auf Kapitel verweisen.

Um Fehler auf dieser Ebene zu vermeiden, muss die **config\_grid.m**-Datei unbedingt die oben vorgestellte Form beibehalten.

### **config\_supermarkets.m**

MATLAB®-Codes 5.2: config\_supermarkets.m

```
%%      Kind of fridge
Aldi = {...
        NK_KT_S;      ...
        NK_KR_V;      ...
        TK_TKT_S      ...
    };
Netto = {...
        NK_KT_S      ...
    };
```

Die Kältelast in einem Supermarkt bilden die einzelnen je nach Einsatzzweck speziell dafür konstruierten Kühleinheiten. Die Anzahl, die technischen Eigenschaften und die Betriebsweise dieser Kältemaschinen können in der Realität beispielsweise auf Grund von klimatischen, wirtschaftlichen oder auf Kundenverhalten bezogenen Standortbesonderheiten Unterschiede aufweisen. Für eine breite Betrachtung des Einflusses auf ein Energieversorgungsnetz durch den Einsatz unterschiedlicher Supermarktketten ist es zweckmäßig die beschriebenen Besonderheiten im Simulationsprogramm zu verfolgen. In der Konfigurationsdatei **config\_supermarkets.m** (vergl. MATLAB®-Code 5.2) wird festgelegt, wie die einzelnen Supermarktketten aus verschiedenen Kälteeinheiten zusammengesetzt sind. Die Gruppierung der einzelnen Kühleinheiten zu einem Modellsupermarkt erfolgt in der **config\_supermarkets.m**-Datei durch Definition eines oder mehrerer

Kältemaschinen beschreiben?



Cell Arrays, die jeweils ein Supermarkt abbilden. Die Dimension eines solchen Arrays muss  $i \times 1$ -Cell Array ( $i \in \mathbb{Z}_0^+$ ) sein. Jede Zeile eines solchen Cell Arrays ist für je eine Art Kühleinheit reserviert. Die spezifischen Eigenschaften einer Kühleinheit werden in der Konfigurationsdatei **config\_fridges.m** gespeichert.

$i \times 1$  eigentlich noch nicht ideal, Schwachstelle, umdenken

### config\_fridges.m

Die Konfigurationsdatei **config\_fridges.m** kann als eine Datenbank für Kälteeinheiten aufgefasst werden. In dieser Datenbank werden Informationen nach einem bestimmten Muster gruppiert und gespeichert, sodass jede Gruppe eine bestimmte Kühleinheit abbildet. Im Programm kann aus je einem dieser physikalisch fundierten Modellen<sup>4</sup> ein Kühleinheit-Objekt erzeugt werden. Abhängig von der Zusammensetzung der Konfigurationsdateien **config\_grid.m** und **config\_supermarkets.m** wird die Zuweisung im Gesamtmodell (Anzahl in einem bestimmten Supermarkt und an einen bestimmten Knoten im Energieversorgungsnetz) durchgeführt.

Beschränkungen hier?

Am Beispiel des Modells einer steckerfertigen Normalkühltruhe<sup>4</sup>, abgekürzt NK\_KT\_S (vergl. MATLAB®-Code 5.3), wird im folgenden die Eingabeform eines solchen Datenbankeintrages in der Datei **config\_fridges.m** erläutert. Zur Beschreibung einer Kühleinheit ist erforderlich, die Daten in einen  $1 \times 15$ -Cell Array zu erfassen. Die Größe und die Art des Arrays ist vorgegeben durch die im Modell getroffenen Annahmen<sup>4</sup> zur Anzahl und dem Typus der modellbeschreibenden Daten. Die Struktur eines Cell Arrays ermöglicht neben der zusammenhängenden Speicherung verschiedener Datentypen einen durch MATLAB® darauf direkten Zugriff.

MATLAB®-Codes 5.3: config\_fridges.m

```
1 % fridge configuration parameters
2 NK_KT_S = { ...
3     1, ... % 1 if plugin module or 2 if combine fridge
4     4.7e3, ... % energy consumption per day Wh/24h
5     2, ... % epsilon power quotient
6     0.66, ... % compressor quotient
7     0 ... % installed cooling power in W
8     2, ... % number_of_walls
9     [16.4 6.7], ... % area_wall
10    [0.38 0.38], ... % heat_transmission_coefficient
11    [19 15], ... % temperature_outside
12    [200 200], ... % masse_stored
13    [2.3 3.52], ... % specific_mass_capacity
14    -6, ... % temperature_min in Celsius
15    2, ... % temperature_max in Celsius
16    1, ... % averaged cooling room temperature in Celsius
17    0, ... % refrigerating capacity
18    };
```

<sup>4</sup> In dieser Arbeit werden Kühleinheiten-Modelle verwendet, die von Caroline Möller in ihrer Diplomarbeit [Mö10] erarbeitet wurden.

**Spalte eins** (vergl. Zeile 3 im MATLAB<sup>®</sup>-Code 5.3) Die Unterscheidung in steckerfertige Kälteanlagen und Kälteverbundanlagen im Programm ist notwendig, da bei der Berechnung der Kälteverluste unterschiedliche Verfahren zu Grunde gelegt werden. Diese Differenzierung erfolgt durch die Zuweisung einer Eins für die steckerfertige Einheit und einer Zwei für eine Einheit an Verbundanlage in der ersten Spalte im Array .

das ist doch überflüssig, oder?

Das ist noch zu Überprüfen

**Spalte zwei** Die durchschnittliche elektrische Energieaufnahme ist eine Kennzahl in Watt pro 24 Stunden, die durch die Hersteller mit Hilfe eines genormten Verfahren ermittelt wird und in den technischen Blättern angegeben werden muss.

Wo wird das Verwendet? Hier schreiben

**Spalte drei** In diese Spalte wird die Leistungszahl (ausführlich beschrieben im Abschnitt 4.2.4) eingetragen.

**Spalte vier** Der Anteil des Verdichters an dem Tagesenergieverbrauch der Kühleinheiten wird Leistungszahl genannt. Aus der Gleichung (4.9) im Kapitel 4 geht hervor, wie diese Kennzahl in die Berechnung eingeht. Die Leistungszahl wird in der Spalte vier festgehalten.

**Spalte fünf** Werden anschlussfertige Kälteaggregate zur Kühlung von Räumen verwendet, so wird die installierte Kälteleistung in Kilowatt in die Spalte fünf anstatt einer Null eingetragen.

**Spalte sechs** Ein Teil der Wärmeverluste ist auf die Transmissionsverluste durch die Wände zurückzuführen. Die Anzahl der Wände muss für die Rechnung berücksichtigt werden, Sie wird in die sechste Spalte eingetragen.

**Spalte sieben** Für die Transmissionsverlustberechnung sind unter anderen die Flächengrößen und die jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten der einzelnen Wände maßgebend<sup>5</sup>. Für je eine Flächengröße in Quadratmeter ist in der Spalte sieben des NK\_KT\_S-Arrays ein Spaltenplatz im  $1 \times w$ -Zeilenarray reserviert. Die  $w$  steht für die Anzahl der Wände.

**Spalte acht** In der achten Spalte werden in einem weiteren  $1 \times w$ -Zeilenarray die mit den Flächen korrespondierende Wärmedurchgangskoeffiziente<sup>5</sup> in gleicher Reihenfolge gespeichert.

**Spalte neun** Die Temperatur außerhalb der Kühleinheit bestimmt<sup>5</sup> die Größe der Transmissionsverluste. In der neunten Spalte werden nach dem gleichen Prinzip und in der gleichen Form wie im vorhergegangenen Eintrag die Außentemperatur für jede Wand eingetragen.

**Spalte zehn** Die Abhängigkeit der Temperaturänderung von der in einer Kühleinheit deponierten Masse an Waren und deren spezifische Wärmekapazität ist aus der Gleichung (4.1) im Kapitel 4 ersichtlich. In der Realität werden in

<sup>5</sup> Der mathematische Zusammenhang wird im Kapitel 4 in der Gleichung (4.7) deutlich gemacht.

einem Kühlschrank gewöhnlich mehrere verschiedene Lebensmittel gekühlt. Möchte man gemischte Beladung simulieren, so sind die Massen in der Spalte zehn im NK\_KT\_S in der gleichen Art und Weise wie in der Spalte sieben acht oder neun zu einzutragen. Der Eintrag erfolgt in Kilogramm.

**Spalte elf** Zu jeder in der Spalte zehn eingetragener Massezahl muss in der Spalte neun nach dem Beispiel der Spalte acht die spezifische Wärmekapazität eingetragen werden.

**Spalte zwölf** In der Realität fällt die Spanne für Variation die Innentemperatur in einem Lebensmittelkühlschrank eher gering aus, da die Temperatur auf einem bestimmten Niveau gehalten werden muss, damit die Lebensmittel maximal lange frisch bleiben können. Möchte man die Kälte im Lebensmittel speichern, darf die Lebensmittelltemperatur einen bestimmten Bereich nicht Verlassen. In der Spalte zwölf im NK\_KT\_S wird die untere Temperaturgrenze in Grad Celsius festgelegt.

**Spalte elf** In der Spalte elf wird die obere Temperaturgrenze in Grad Celsius festgelegt.

**Spalte zwölf** Die Bedeutung<sup>6</sup> der mittleren Kühlraumtemperatur ist kurz im Kapitel 4 angeschnitten. Notiert wird diese Kennzahl in der Spalte zwölf im NK\_KT\_S eingetragen.

**Spalte dreizehn** Keine Ahnung

Klären was das ist.

#### 5.1.3.2 Die main.m Datei

### 5.1.4 Deklamation der berechneten Daten

Die inhaltliche Auswertung der Simulation ist dem Benutzer vorbehalten. Darum müssen die Ergebnisse der Simulation in einer anwenderfreundlichen Form zugänglich gemacht werden. Durch sinnvolle graphische Darstellung der untersuchten Größen kann zum Beispiel die Überprüfung, die Veranschaulichung oder die Bestimmung der funktionalen Abhängigkeit dieser durchgeführt werden.

Das ist noch nicht richtig im Programm implementiert. Das muss DU NOCH MACHEN!

#### 5.1.4.1 Graphische Ausgabe

**Wichtig!!!** hier wird nicht der Quellcode erklärt, sondern die Darstellung der Ausgabe.

Funktion mit für die graphische Ausgabe schreiben

<sup>6</sup> Ausführlich begründet wird das in [Mö10].

#### 5.1.4.2 Tabellarische Ausgabe im Command-Window und Exel

Funktion für tabellarische Ausgabe schreiben

ANHANG A

# Anhang

---

## A.1 Anhang Example section

This for other bibtex stye file: only [Mö10] one author [Ang09] and many authors [CH04].

# Literaturverzeichnis

- [Ang09] Angermann, Beuschel, Rau und Wohlfarth. *MATLAB - Simulink - Stateflow: Grundlagen, Toolboxes, Beispiele*. Oldenbourg, München, 6., aktualis. Aufl. edition, 2009. 14, 16, 21
- [Ari05] Jaime Arias. *Energy Usage in Supermarkets - Modelling and Field Measurements*. text, Royal Institute of Technology, KTH, Energy Technology ; Stockholm, 2005. 1, 3, 9
- [CH04] Risto Ciconkov and Arnd Hilligweg. Simulationsprogramme für Kälteanlagen Einsatz in Ausbildung und Praxis. *Technik im Bau, Fachzeitschrift für Technische Gebäudeausrüstung*, 77(3):64–70, 2004. 9, 21
- [Ene11] EnergieAgentur.NRW. Energieeffizienz im Lebensmittel-Einzelhandel. URL: <http://www.ea-nrw.de/unternehmen/page.asp?TopCatID=3695&CatID=3721&RubrikID=3743> , [Stand: 24. März 2011]. 1
- [Kle08] Martin Kleimaier. Netzintegration von Strom aus erneuerbaren Energiequellen: Zunehmende dezentrale Einspeisung erfordert eine Umrüstung der Netze. *Energy 2.0*, 1(7):45–47, 2008.
- [LR09] Bernhard Lahres and Gregor Rayman. *Objektorientierte Programmierung. das umfassende Handbuch*. Galileo computing. Galileo Press, Bonn, 2., aktualisierte und erw. Aufl. edition, 2009. 4
- [McG07] Sean McGowan. Supermarket refrigeration going natural. *HVAC&R Nation*, pages 8–9, 2007. 1
- [Mö10] Caroline Möller. Spezifikation und Simulation einer Kältelast mit Kältespeicher im Energieversorgungsnetz. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin, Juli 2010. 8, 9, 17, 19, 21
- [PH09] Arnd Poetzsch-Heffter. *Konzepte Objektorientierter Programmierung: Mit Einer Einführung in Java*. Springer, Berlin, 2009. 4
- [Wei10] Michael Weigend. *Objektorientierte Programmierung mit Python 3. Einstieg, Praxis, professionelle Anwendung*. mitp-Verl., Heidelberg u.a., 4., aktualisierte Aufl. edition, 2010. 4