

Konzeption und Inbetriebnahme einer Raumheizungssteuerung zum Betrieb mit Modellprädiktiver Regelung

Conception and startup operations of a space heating control to run with model
predictive control

Master-Thesis
im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

vorgelegt von
Daniel Johannes Mayer
aus Sulzfeld

Erstkorrektor: Prof. Dr. Angelika Altmann-Dieses

Zweitkorrektor: Prof. Dr.-Ing. Marco-Braun

Matr.-Nr.: 51968

E-Mail: daniel-j-mayer@gmx.de

Bearbeitungszeitraum: 17.03.2015 – 29.02.2016

Tag der Einreichung: 17.03.2016

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
2016

Kurzfassung

Abstract

This text should be *italic*

Schlüsselwortliste: Test1, Test2, Test3

Keywords: *Test1, Test2, Test3*

Danksagung

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Quelltextverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Model Predictive Control	3
2.2 Technische Grundlagen zur Kommunikation mit Bussystemen	3
2.2.1 OSI-Kommunikationsmodell	3
2.2.2 Bussysteme	5
2.2.2.1 Netzwerk und Topologie	6
2.2.2.2 Elektrisches EIA-485 Netzwerk/Interface	8
2.2.2.3 Hardware	8
2.2.3 Modbus	8
2.3 Technische Grundlagen zur Modellbildung	9
2.3.1 Thermodynamische Systeme	9
2.3.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	11
2.3.3 Wärmeübertragung	12
3 Anlagendesign	13
3.1 Analyse der Anforderungen	13
3.2 Das Konzept der Anlage	14
3.3 Räumliche Gegebenheiten	15
3.4 Konzipierung der Steuerung	16
3.5 Umsetzung der Anlage	17
3.6 Inbetriebnahme und Ansteuerung der Anlage	17
4 Modellbildung des Raumes	18
4.1 Das einfache Raummodell	18
4.2 Erweiterung durch Sonneneinstrahlung	18
4.3 Erweiterung durch Heizkörper	18
4.4 Validierung des Modells	18
4.5 Anpassung des Modells mit Parameterschätzung	18
5 Schlussbetrachtung	19
5.1 Fazit	19

5.2 Ausblick und Ansatzpunkte für weitere Arbeiten	19
Literaturverzeichnis	20

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Übersetzung der Ziele in Anforderungen der Anlage	14
---	----

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Die sieben Schichten des Open System Interconnection Modells . . .	5
Abb. 2.2: Linienstruktur	6
Abb. 2.3: Impulsverzerrung auf einer Leitung	7
Abb. 2.4: Baumstruktur	8
Abb. 3.1: Raumskizze K004A vom K Gebäude der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft	16

Quelltextverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
engl.	englisch
et al.	und andere
etc.	et cetera (steht für und so weiter)
griech.	griechisch
i.d.R.	in der Regel
i.S.d.	im Sinne des/der
lat.	lateinisch
MPC	Model Predictive Control
OSI-Modell	Open System Interconnection Modell
p.a.	per anno
s.o.	siehe oben
u.a.	unter anderem
v.a.	vor allem
z.B.	zum Beispiel

*„Erfolgreich zu sein setzt zwei Dinge voraus: Klare Ziele
und den brennenden Wunsch, sie zu erreichen.“*

— JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Mit der steigenden Komplexität von Prozessen/ technischen Anlagen werden auch die Anforderungen an deren Steuerungen stetig höher. Um diesen Anforderungen und der steigenden Komplexität gerecht zu werden müssen entsprechend neue Steuerungen realisiert werden. Ein Ansatz ist die modellbasierte prädiktive Regelung. Mit Hilfe derer wird das zukünftige Verhalten eines Systems prognostiziert und versucht durch möglichst wenig Eingriff von Außen (Input der Geld kostet) einem eigens definierten Zielkriterium zu folgen. Test Test Test Ich wollte hier noch kurz festhalten, dass ich motiviert um einen großen Nutzen für die große Anlage zu realisieren und damit Chancen zu nutzen, die die große Anlage nicht bietet, also komplementär. Zum anderen entlastet es die große Anlage, da mit ihr nicht experimentiert werden soll, empfindlich Erfahrungen nutzen um mit dem Anlauf der großen Anlage Projektverantwortliche Markus Bohlayer und Adrian Bürger

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Konzipierung, Planung und Inbetriebnahme eines technischen Systems eine Anwendungs- und Testumgebung zu schaffen, um auf dem Gebiet der Model Predictive Control (MPC) Forschen zu können. Diese beschäftigt sich damit, ein technisches System oder allgemeiner einen Prozess – im mathematisch exakten Sinne – optimal zu regeln. Als konkrete Ziel wurde davon abgeleitet, eine Anlage zur Steuerung der Temperatur eines Raumes zu konzipieren, zu planen und zu implementieren. Die Herleitung dieses Ziels findet der Übersichtlichkeit halber in Kapitel 3 statt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden – anschließend an die Einleitung in 1 – die theoretischen Grundlagen in 2 ausgeführt. Zunächst wird die grundlegenden Theorie zu Model Predictive Control vorgestellt bevor anschließend weitere technische Grundlagen erklärt, welche für das weitere Verständnis dieser Arbeit benötigt werden.

Danach wird das technische System in Kapitel 3 Schritt für Schritt entwickelt, ausgehend von der Idee und den räumlichen Gegebenheiten/Nebenbedingungen, und weiter konkretisiert bis zur realisierten Umsetzung in eine funktionierende Anlage.

Dementsprechend werden zunächst das Konzept, die Planung und die technische Umsetzung der konkreten Anlage dargestellt, bevor anschließend die theoretischen

Grundlagen von Model Predictive Control und zur die Modellbildung erläutert werden. Anschließend wird das Modell für Model Predictive Control gebildet und ein erstes grobes Konzept zur Steuerung der Raumtemperatur vorgestellt. Abschließend wird eine Validierung des Modells versucht und findet eine Anpassung des Modells statt damit es künftig mit Model Predictive Control genutzt werden kann.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Model Predictive Control

Model Predictive Control an sich ist eine Methodik zur Steuerung von Systemen. Diese versucht zunächst, zu sich periodisch wiederholenden, diskreten Zeitpunkten das Verhalten eines Systems in der Zukunft – also einer immer gleich weit in die Zukunft hineinreichenden Periode – zu beschreiben. Hierzu bedient Model Predictive Control sich der Kenntnis des aktuellen Zustandes und eines physikalischen-mathematischen Modells des Systems, um dessen zukünftiges Verhalten „vorherzusagen“ bzw. abzubilden. Des Weiteren wird versucht das Verhalten des Systems mit minimalem Aufwand zu beeinflussen, um einem eigens- oder vordefinierten Zielkriterium zu folgen beziehungsweise diesem zu entsprechen.

2.2 Technische Grundlagen zur Kommunikation mit Bussystemen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von Hard- und Software beleuchtet die für die Kommunikation der Steuerung mit den einzelnen Anlagenteilen benötigt werden. Diese umfassen zunächst Bussysteme im Allgemeinen und werden anhand des spezifischen/konkreten Anwendungsfalls Modbus erläutert. Die Einführung wird sich an die Struktur nach Schnell and Wiedemann [2006] anlehnen.

2.2.1 OSI-Kommunikationsmodell

Hier wird das OSI mit Schichten → Referenzieren von Schichten in den Folgenden. Aufgrund der großen Anzahl verschiedener technischer Systemen existieren auch viele verschiedene Arten der Kommunikation von technischen Systemen. Bei einer genaueren Betrachtung dieser Kommunikation wird ersichtlich, dass diese oftmals ähnlich abläuft und sich durch ein Meta-Schema beschreiben lässt [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 8]. Um die Kommunikation auch über diese verschiedenen Systeme hinweg zu ermöglichen und zu formalisieren, wurde von der *International Organization for Standardization* 1984 ein abstraktes Referenz-Modell entwickelt, dass in der *ISO 7498-1* beschrieben ist und zur Entwicklung und Verbesserung von Standards der des Informationsaustauschs und als Referenz für die Konsistenz aller bestehenden Standards dient [osi, 1996, S. 1]. Das Ziel des Modells (design intend) war/ist es, eine Menge von Standards zu schaffen damit es autonomen Systemen möglich ist miteinander zu kommunizieren [osi, 1996, S. 4].

Das sogenannte Open System Interconnection Modell (OSI-Modell) wird zunächst allgemein erläutert, da die Kommunikation von technischen Systemen im Rahmen dieser Arbeit eine zentrale Rolle spielt, und wird anschließend im Kontext mit den

eingesetzten Protokollen/Schnittstellen der verschiedenen eingesetzten Technologien angewendet.

Zunächst wird im Standard definiert womit sich das Modell beschäftigt und abgegrenzt was im Modell berücksichtigt wird und was nicht [osi, 1996, S. 3]:

*„OSI is concerned with the exchange of information between open systems
(and not the internal functioning of each individual real open system).“*

Das OSI-Modell beschäftigt sich also zentral mit dem Austausch von Informationen und allen dazugehörigen Aufgaben. Diese sind sehr umfangreich und umfassen folgende Aufgabenbereiche/bzw werden jeweils/nur bezogen auf den Austausch von Informationen und wie folgt beschrieben, [osi, 1996, S. 3f.]:

- die physischen Medien zur Vernetzung von offenen Systemen,
- die Vernetzung (an sich) von offenen Systemen,
- die Übertragung von Daten, umfassenderweise eine Kooperation von Systemen

Bezogen auf den Austausch von Daten überschneiden sich die physischen Medien mit der Vernetzung und meinen also die Infrastruktur und deren Architektur, die zur Übertragung zur Verfügung steht. Bei der Kooperation von Systemen zur Datenübertragung sind weitaus mehr Aspekte zu beachten: Zunächst die Synchronisation der Prozesse, die Daten austauschen wollen. Des Weiteren die Darstellung der auszutauschenden Daten und deren eventuell notwendigen Transformation um mit einem anderen System kompatibel zu sein. Weitere wichtige Aufgaben sind die Datenspeicherung sowie deren Integrität und die Sicherheit des Austausch hinsichtlich Fehler und Einsicht von Außen [osi, 1996, S. 4].

Wie leicht zu erkennen ist, ist die Kommunikation zwischen verschiedenen technischen Systemen sehr umfangreich/komplex/kompliziert. Daher wird der Kommunikationsprozess im OSI-Modell stark abstrahiert und zunächst in 7 verschiedene, abstrakte Ebenen aufgeteilt um die einzelnen Aufgabenbereiche des Kommunikationsprozesses anfallen in Teilaufgaben zu gliedern bzw. zusammenzufassen, wie in Abbildung Abb. 2.1 dargestellt.

Jede Ebene hat dann klar definierte Teilaufgaben, die der Kommunikation dienen. Diese Ebenen werden Schichten genannt und haben klar definierte Schnittstellen/interfaces zu ihren Nachbarschichten. An diesen Schnittstellen stellen die einzelnen Schichten Dienste bereit die von den anderen Ebenen genutzt werden können. Durch diesen Aufbau können Schichten einfach bearbeitet oder ausgetauscht werden, ohne die Gesamtfunktionalität zu gefährden. Dadurch kann ein System auch aus Komponenten verschiedener Hersteller zusammengesetzt werden, diese Architektur dient also als Basis für offene Systeme. Wie in Abbildung Abb. 2.1 ebenfalls dargestellt ist, werden die Schichten eins bis vier auch als Übertragungsschichten oder Transportsystem zusammengefasst und sind für die Datenübertragung zwischen den Systemen verantwortlich. Die Schichten fünf bis sieben werden gemeinsam als Anwendungsschichten

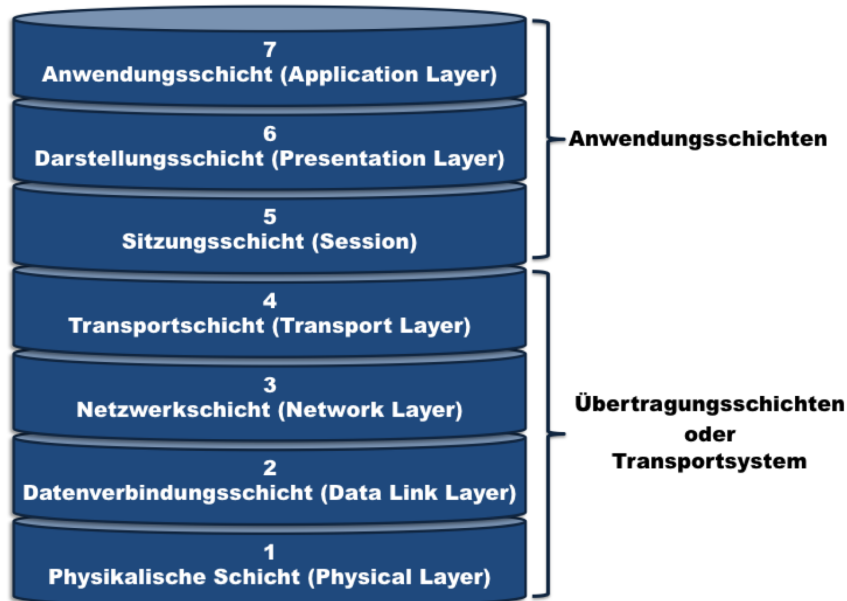


Abb. 2.1: Die sieben Schichten des *Open System Interconnection* Modells verändert nach [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 10] und [osi, 1996, S. 28]

bezeichnet und stellen die Zusammenarbeit bei der Datenübertragung zwischen der Anwendersoftware und dem Betriebssystem sicher [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 8f.].

Im Folgenden wird kurz auf die einzelnen Schichten eingegangen bevor das Zusammenwirken der einzelnen Schichten anhand eines Beispiels verdeutlicht wird.

Die Schicht eins – die physikalische Schicht – Möglichkeiten zur Verfügung und die physikalische Datenübertragung der einzelnen Bits [osi, 1996, S. 49f.]. Sie legt also die mechanischen, wie zb. stecker(endsystemkopplung), zuordnung der pins und kabelspezifikationen, elektrischen, art der codierung Spannungspegel etc., fest, idr Standards wie RS/EIA 232, RS/EIA 422, RS/EIA 485, oder aber auch Glasfaserstrecke. Wichtig ist dabei, dass diese lediglich die tatsächliche Strecke spezifiziert und nicht das physikalische Medium selbst ist und die Kommunikation unabhängig von der konkreten Ausprägung der Schicht ist [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 9].

Die zweite Schicht – die Datenverbindungsschicht – ist für verschiedene Verbindungsmodi

2.2.2 Bussysteme

Um ganz allgemein Prozesse überwachen und steuern zu können müssen unter den einzelnen Einheiten innerhalb eines Systems Informationen ausgetauscht werden. Dazu werden Kommunikationssysteme benötigt mit Hilfe derer Kommunikation erfolgen kann. Diesem Zweck dienen Bussysteme Info/Quelle Bussysteme lassen sich anhand verschiedener Kriterien einteilen bzw klassifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Modbus eingesetzt weshalb im Folgenden die Kriterien zunächst sehr allgemein

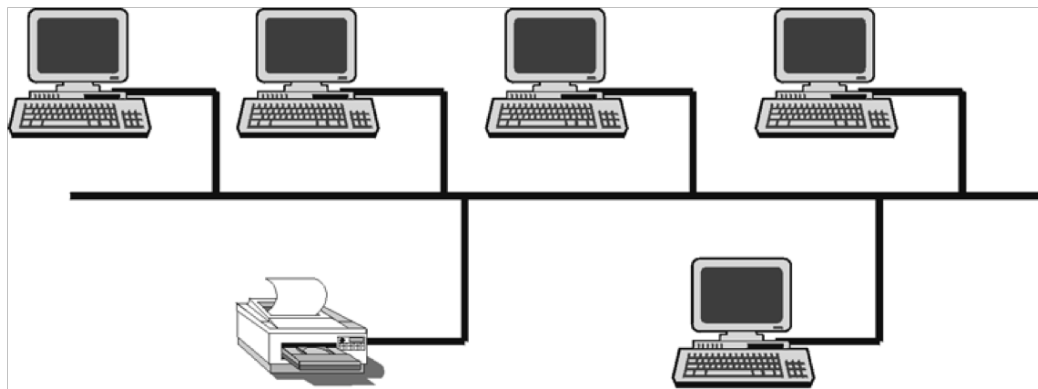


Abb. 2.2: Linienstruktur aus [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 3]

zum Verständnis des Kriteriums beschrieben werden. Die verschiedenen Ausprägungen der einzelnen Kriterien werden lediglich die für Modbus relevanten detailliert beschrieben.

2.2.2.1 Netzwerk und Topologie

Verknüpft man einzelne Prozesseinheiten – im folgenden Teilnehmer des Netzwerks – miteinander über Verbindungsleitungen, über die Informationen übertragen werden können, entstehen dabei Netzwerke. Diese Netzwerke können unterschiedlich ausgeprägt sein und werden anhand ihrer geometrischen Anordnung, der Netzwerktopologie, unterschieden. → Teilnehmer im Netzwerk definieren

Die einfachste Art zwei Teilnehmer miteinander zu verbinden ist eine direkte Zweipunktverbindung mit einer Leitung. Jedoch würde mit jeder steigenden Zahl von Teilnehmern auch überproportional mehr Verbindungsleitungen benötigt um alle Teilnehmer miteinander zu verbinden. Dies hätte für große Zweipunktverbindungsnetzwerke, die auch als vermaschtes Netz bezeichnet werden, eine unübersichtliche große Anzahl von Schnittstellen, einen extrem hohen Verkabelungsaufwand und damit verbundene hohe Kosten zur Folge. Um dies zu vermeiden ergeben sich noch verschiedene andere Möglichkeiten zur Anordnung von Teilnehmern in Netzwerken [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 1f.].

Die Zweipunktverbindungen sind wie oben beschrieben mit einem hohen Verkabelungsaufwand verbunden, weshalb bei großen Netzwerken oftmals zu einer Linienstruktur übergegangen wird. Diese wird auch Linienstruktur genannt und wird auch von der Modbus-Technologie empfohlen/vorgeschrieben. Charakteristisch dafür ist, dass alle Teilnehmer eine gemeinsame Verbindungsleitung zur Kommunikation nutzen. Dazu gibt es ein sogenanntes, langes Buskabel entlang dessen die einzelnen Teilnehmer mit Hilfe von kurzen Stichleitungen angebunden sind, wie auf Abbildung Abb. 2.2 zu sehen ist.

Dadurch wird der Verkabelungsaufwand auch für sehr große Netzwerke stark reduziert

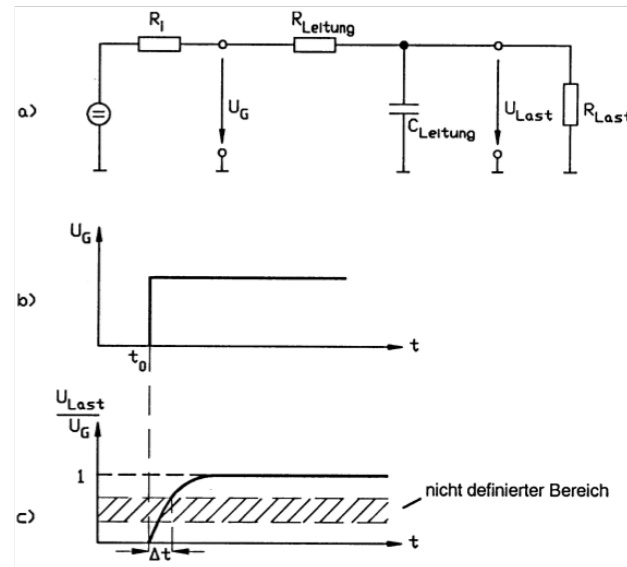


Abb. 2.3: Impulsverzerrung auf einer Leitung: a) Ersatzschaltbild der Anordnung b) Ausgangsspannung des Generators c) Empfängerspannung aus [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 4]

und auch die Anzahl an Schnittstellen der Teilnehmer auf eine einzige reduziert. Jedoch wird dadurch das gleichzeitige Senden von Teilnehmern erschwert und es müssen sogenannte Buszugriffsverfahren definiert werden, die nichts weiter als Regeln sind die den Zugriff auf den Bus festlegen. Da die Kommunikation auf einer einzigen Leitung stattfindet und ständig alle Teilnehmer alle Sendungen verfolgen wird der Sender durch diese Parallelschaltung der Empfänger stark belastet. Da die Buslängen meist sehr lang sind (hunderte Meter) ist die Leitungslänge im Bezug auf die zu übertragende Wellenlänge nicht mehr vernachlässigbar. Deshalb müssen beide Enden der Busleitung mit Leitungsabschlusswiderständen versehen werden sowie die Leitungslänge und die Teilnehmer je Netzwerk begrenzt werden. Der Leistungs- und Kapazitätswiderstand einer Leitung sind von der Länge der Leitung abhängig und werden durch das Ersatzschaltbild eines RC-Gliedes repräsentiert, wie in Abbildung Abb. 2.3a zu sehen ist. Durch diese Widerstände wird eine Impulsverzerrung δt auf der Leitung ausgelöst, die somit mittelbar auch von der Leitungslänge abhängt. Je länger die Leitung desto größer die beiden Widerstände und desto größer ist die Impulsverzerrung δt , da der Kondensator $C_{Leitung}$ mehr Zeit zum Aufladen benötigt und die Lastspannung sinkt, wie in Abbildung Abb. 2.3b und Abb. 2.3c dargestellt. Dadurch wird die maximale Frequenz der Datenübertragung beschränkt (auf den Kehrwert der Impulsverzerrung $f=1/t$). Dies bedeutet das die Frequenz der Datenübertragung entlang der Leitung von ihrer Länge mittelbar abhängig ist, da ansonsten der Empfänger den Wechsel des logischen Zustand nicht mehr registrieren kann [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 3ff.].

Weitere Bus-Strukturen sind die Baumstruktur, die eine Weiterentwicklung der Linienstruktur ist und auf Abbildung Abb. 2.4. Dabei werden einzelne Linienstrukturen durch Verstärkerelemente, sogenannte Repeater, miteinander verbunden und es kön-

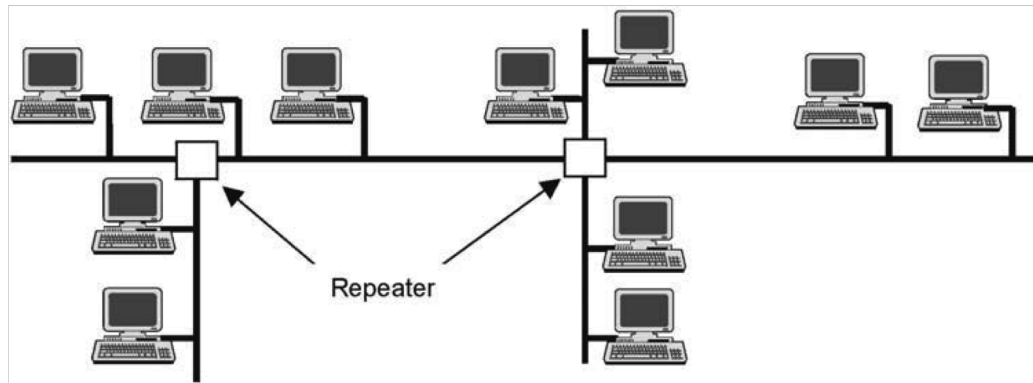


Abb. 2.4: Baumstruktur aus [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 5]

nen dadurch größere Flächen als mit der Linienstruktur vernetzt werden. [Schnell and Wiedemann, 2006, S.5 f.]. -> Galvanische Trennung und Abschirmung Diese Struktur ist insofern interessant, da es also im Rahmen dieser Arbeit Anlage noch eine nachträgliche Erweiterung/Vergrößerung der geplanten Anlage ermöglicht.

Modbus was da oben steht, Teilnehmer kabellängen etc.

Weitere wichtige Netzwerk Topologien, die für das Verständnis dieser Arbeit keine weitere Relevanz haben, jedoch genannt werden sollten sind die Ring- und die Stern-Struktur. Die Ring-Struktur ist dadurch gekennzeichnet, ein physikalischer Ring mit Zweipunktverbindungen aufgebaut wird in dem über Teilnehmer hinweg kommuniziert wird. Die Stern-Topologie ist durch eine Zentralstation gekennzeichnet, die mit allen Teilnehmer verbunden ist und über die die gesamte Kommunikation abläuft [Schnell and Wiedemann, 2006, S. 6f.].

2.2.2.2 Elektrisches EIA-485 Netzwerk/Interface

Hier wird EIA / RS485 dargestellt und abgegrenzt zu RS 232 und RS 422

2.2.2.3 Hardware

Kabel, Belegung

2.2.3 Modbus

Hier wird das Modbusprotokoll nach mod [2012] und mod [2006b] und mod [2006a] Und nach hier wird das Modbusprotokoll nach [mod, 2012, S.5] und [mod, 2006b, S.5] und [mod, 2006a, S.5]

2.3 Technische Grundlagen zur Modellbildung

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen zur Bildung eines mathematischen Modells des Raumes erläutert. Thermodynamische Systeme 1. HS thermo Wärmeübertragung

2.3.1 Thermodynamische Systeme

Im Raummodell müssen Energieströme, genauer betrachtet Wärmeströme, untersucht werden. Um diese thermodynamischen Vorgänge mit Hilfe von Bilanzierungsgleichungen zu beschreiben, folgt zunächst eine kurze Einführung in die Thermodynamische Systembildung nach [Baehr and Kabelac, 2012, S. 11ff.].

Thermodynamische Systeme werden durch den zu untersuchenden Raum abgegrenzt. Sie dienen dem Zweck der Bilanzierung von Massen- und Energieströmen und alles, was diesen abgegrenzten Raum an den Systemgrenzen umgibt, wird als Umgebung bezeichnet. Die begrenzenden Flächen können gedanklicher, physischer oder beider Natur zugleich sein, wichtig ist jedoch, dass die Systemgrenzen eindeutig festgelegt sind [Baehr and Kabelac, 2012, S. 11].

Anhand der Eigenschaften von den Systemgrenzen lassen sich die thermodynamischen Systeme weiter differenzieren. Solche Systeme, deren Grenzen undurchlässig für Materie sind, werden als *geschlossene Systeme* bezeichnet und werden durch eine konstante Stoffmenge innerhalb des Systems gekennzeichnet. Die Grenzen eines geschlossenen Systems sind meistens räumlich anhand eines fixen Volumens definiert, können aber auch beweglich sein, wie z.B. das Volumen einer vorgegebenen Stoffmenge unabhängig von dessen räumlicher Ausdehnung [Baehr and Kabelac, 2012, S. 12].

Sind die Grenzen von thermodynamischen Systemen für Materie durchlässig, werden diese als *offene Systeme* bezeichnet. In der Regel werden diese von Stoffströmen durchflossen und durch räumlich festgelegte Grenzen beschrieben. Diese werden in der Literatur auch als *Kontrollraum* oder *Kontrollvolumen* bezeichnet [Baehr and Kabelac, 2012, S. 12].

Ein *abgeschlossenes System* umfasst in der Regel mehrere Systeme oder ein einzelnes System und dessen Umgebung, so dass es zwischen den Grenzen des abgeschlossenen Systems und seiner Umgebung keine Wechselwirkungen gibt. Die Systemgrenzen werden also so gelegt, dass über sie hinweg keine beziehungsweise keine relevanten¹ Flüsse von Materie und Energie [Baehr and Kabelac, 2012, S. 13].

Nach der Abgrenzung folgt die *Beschreibung* von thermodynamischen Systemen und dessen *Eigenschaften*. Diese erfolgt durch *Variablen* und *physikalische Größen*, die ein System kennzeichnen. Falls die Variablen feste Werte annehmen, werden diese als *Zustandsgrößen* bezeichnet, da sie den *Zustand* eines Systems bestimmen [Baehr and Kabelac, 2012, S. 13]. Im Rahmen der Modellbildung in Kapitel 4 ist es ausreichend

¹ Relevant im Sinne von kaum messbarer Fluss und nicht messbare Auswirkung auf das System.

die Vorgänge und Effekte auf systemischer Ebene zu betrachten, wodurch sich Modelle mit wenigen Variablen und physikalischen Größen beschreiben lassen.

Die Variablen lassen sich in *äußere Größen*, welche den mechanischen Zustand eines Systems beschreiben², und *innere Größen* gliedern, welche den thermodynamischen Zustand, also die Eigenschaften der Materie innerhalb der Systemgrenzen, beschreiben [Baehr and Kabelac, 2012, S.13 f.].

Innerhalb der Grenzen eines thermodynamischen Systems, und damit implizit auch für das Raummodell³ wird *Homogenität* angenommen. Dies bedeutet, dass die physikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Temperatur und Druck, sowie die chemische Zusammensetzung an jeder Stelle innerhalb des Systems homogen ist, also die gleiche Ausprägung besitzt [Baehr and Kabelac, 2012, S.15].

Da wir im Rahmen der Modellbildung Zustände betrachten müssen auch deren Änderungen genauer untersucht werden. Die *Zustandsänderungen* eines Systems werden durch Änderungen von Energie oder Materie über dessen Grenzen hinweg bedingt und finden meist im Austausch der Umgebung statt. Während einer solchen Änderung des Systemzustands wird ein Prozess durchlaufen, der eine zeitliche Abfolge von Ereignissen ist. Eine Änderung des Zustands eines Systems mit der gleichen Wirkung kann also durch verschiedene Prozesse bewirkt werden. Daher beschreibt ein *Prozess* nicht nur die Veränderung des Zustands sondern viel mehr die Beziehungen zwischen einem System und seiner Umgebung [Baehr and Kabelac, 2012, S.21 f.].

Ein Prozess kann aber auch innerhalb eines Systems stattfinden, dass heißt ohne äußere Einwirkungen. Dies geschieht zum durch das Aufheben innerer Hemmungen oder dem Wegfall Zwängen von Außen. Diese Prozesse laufen in abgeschlossenen Systemen meist von selbst ab und streben als Ziel einen ausgeglichenen, also homogenen, Endzustand an. *Ausgleichsprozesse* dienen somit dazu, einen *Gleichgewichtszustand* zu erreichen und repräsentieren Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Teilen eines abgeschlossenen Systems. Dabei gleichen sich die Zustandsgrößen von einzelnen Subsystemen wie zum Beispiel der Druck oder die Temperatur einander an. Der Gleichgewichtszustand wird also durch die Zustände in den einzelnen Subsystemen bestimmt und ist dadurch charakterisiert, dass ein System diesen Zustand nicht von sich aus sondern nur durch äußere Eingriffe verlässt, zum Beispiel durch eine Veränderungen in der Umgebung. Die Erfahrung lehrt, dass ein System einem Gleichgewichtszustand entgegen strebt, wenn es sich selbst überlassen wird [Baehr and Kabelac, 2012, S.22 f.]. Im Rahmen der Modellbildung in Kapitel 4 nehmen diese *Ausgleichsprozesse* eine zentrale Rolle ein, weil der Großteil an Änderungen von einzelnen Zustandsgrößen innerhalb des Raumes darauf zurückgeführt werden können.

² Zum Beispiel die Koordinaten im Raum oder die relative Geschwindigkeit zum Beobachter)

³ Diese Annahme wird im Kapitel 5 noch überprüft und kritisch hinterfragt werden müssen

2.3.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik wird im Folgenden als allgemeiner Energieerhaltungssatz formuliert und anschließend angewendet um eine Energiebilanzgleichung für geschlossene thermodynamische Systeme zu erhalten.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik erweitert den mechanischen Energieerhaltungssatz um die Energieformen Wärme und innere Energie. Er handelt ganz allgemein vom Prinzip der Energieerhaltung und dient er der Bilanzierung von Systemen [Baehr and Kabelac, 2012, S. 43].

Die Gesamtenergie eines Systems E setzt sich zusammen aus der potenziellen E_{pot} und kinetischen Energie E_{kin} wie in der Mechanik und wird durch die innere Energie U ergänzt [Baehr and Kabelac, 2012, S. 49]:

$$E := E_{pot} + E_{kin} + U \quad (\text{Gl. 1})$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden nur ortsfeste Systeme betrachtet die sich dadurch auszeichnen, dass deren potenzielle Energie E_{pot} in etwa konstant ist. Weiterhin erfahren sie im betrachteten Inertialsystem Erde auch nur sehr kleine Änderungen in ihrer Geschwindigkeit, weshalb auch die kinetische Energie E_{kin} in etwa konstant ist. Da die Änderungen der mechanischen Energien in Bezug auf die Änderung der inneren Energie sehr klein sind werden im Folgenden nicht weiter betrachtet und die Gesamtenergie eines Systems E vereinfacht und lediglich aus der inneren Energie bestehend angenommen.

Die innere Energie hängt von der spezifischen Wärmekapazität c_p , der Masse eines Systems m_{sys} und der Temperatur t beziehungsweise T ab [Baehr and Kabelac, 2012, S. 54]:

$$U := m * c_p * T = m * c_p * t + u_0, \text{ mit } t = T - T_0 \quad (\text{Gl. 2})$$

Nach dem Prinzip der Energieerhaltung, kann die Energie eines Systems also weder erzeugt noch vernichtet werden sondern lediglich durch den Energietransport über dessen Grenzen hinweg verändert werden. Daraus ergeben sich folgende qualitative Formen des Energietransports [Baehr and Kabelac, 2012, S. 48f.]:

- Die Arbeit W , die entweder von oder an einem System verrichtet wird, in differentieller Form die Leistung P .
- Die Wärme Q , die entweder in das System hinein- oder herausfließt, in differentieller Form der Wärmestrom \dot{Q} .
- Der Transport von Materie, also das Einbringen oder Wegnehmen von Masse m eines System, in differentieller Form die Materialflüsse \dot{m} .

Mit der zuvor getroffenen Annahme, dass die innere Energie der des Systems entspricht,

und unter Beachtung der Vorzeichenkonvention, welche besagt dass zugeführte Energie positiv und abgeführte Energie negativ zu bewerten ist, lassen sich die Änderungen der Energie eines Systems mit der folgenden Gleichung quantitativ beschreiben [Baehr and Kabelac, 2012, S. 54]:

$$\Delta U = Q + W + m_{in} * c_p * T_{in} - m_{out} * c_p * T_{out}$$

beziehungsweise in differentieller Form

$$\frac{dU}{dt} = \dot{U} = \dot{Q} + \dot{P} + \dot{m}_{in} * c_p * T_{in} - \dot{m}_{out} * c_p * T_{out} \quad (\text{Gl. 3})$$

2.3.3 Wärmeübertragung

Da zur Betsimmung und Steuerung einer Raumheizungsanlage die Betrachtung von Wärmeströmen unumgänglich ist werden die Grundlagen dazu im Folgenden erläutert. Die Wärmeübertragung kann grundsätzlich nur durch zwei Arten stattfinden, durch Strahlung, die ohne stofflichen Träger durch elektromagnetische Wellen erfolgt, welche keine weitere Relevanz für weitere Betrachtungen hat und deshalb hier nicht erläutert wird, und durch die Wärmeleitung, die sich wiederum in die Leitung und die Konvektion aufteilt. [Böckh and Wetzel, 2014, S. 3f.]

Die Wärmeübertragung wird durch den Wärmestrom \dot{Q} beschrieben, der quantifiziert wieviel Wärme pro Zeiteinheit [W] übertragen wird [Böckh and Wetzel, 2014, S. 5]. Für die weitere Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit ist lediglich die Wärmeleitung ohne KOnvektion von Relevanz, weshalb diese nun näher erläutert wird. Kinetische Kopplungsgleichung[Böckh and Wetzel, 2014, S. 7] Gleichung $\dot{Q} = k * A * \Delta T$ Geben Wärmestrom als Funktion an von verschiedenen Paramatern, hier Fläche an der Austausch stattfindet, Temperaturdifferenz und Wärmedurchgangszahl bzw Wärmeübergangszahl an. Wärmedurchgangskoeffizient oder auch U Wert Übertsragung folgt ab Seite 17 Wärmebuch

3 Anlagendesign

In diesem Kapitel wird das Design, die Entstehung und Umsetzung der Anlage erläutert. Hierzu wird ausgehend von einer Anforderungsanalyse zunächst das Konzept der Anlage entwickelt, dass anschließend immer weiter konkretisiert wird. Dabei werden die einzelnen Anlagenteile und deren Funktionsweisen detailliert beschrieben und an die realen Einsatzbedingungen angepasst. Abschließend wird die Realisierung und deren Besonderheiten der realen Anlage beschrieben.

3.1 Analyse der Anforderungen

Um die Anforderungen an die Anlage zu bestimmen, muss zunächst der Zweck/ das Einsatzziel der Anlage untersucht werden. Mit Hilfe der Anlage soll, wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, auf dem Gebiet der Model Predictive Control geforscht und wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden (Das Ziel wurde von der Hochschule Karlsruhe in Person von Herrn Adrian Bürger vorgegeben). Um dies zu erreichen, muss die Anlage entsprechend als Entwicklungs- und Anwendungsumgebung für den Einsatz verschiedener Optimalsteuerungen und -regelungen dienen.

Konkret sollen mit dem Einsatz der Anlage die folgende Ziele verfolgt werden: Der Fokus der wissenschaftlichen Arbeit soll beim Einsatz/Laufen der Anlage besonders auf folgenden Aspekten liegen

- Die Einarbeitung in die Thematiken Modellbildung, Optimalsteuerung und Model Predictive Control soll ermöglicht/vereinfacht werden.
- Das Sammeln von Erfahrungen im Umgang mit der Software, Hardware und deren Schnittstellen sowie verschiedener Methodiken im Bereich Model Predictive Control soll stattfinden.
- Das Vergleichen von Ergebnissen durch den Einsatz verschiedener Optimalsteuerungen und -regelungen soll möglich sein.
- Das Besitzen einer hohen Funktionalität und einer hohen Robustheit gegenüber Fehlern soll erreicht werden, insbesondere um .

Aus diesen Einsatzzielen der Anlage lassen sich die konkreten Anforderungen an die Umgebung ableiten. Die Anforderungen sind in Tabelle Tab. 3.1 zusammengefasst.

Einsatzziele	Anforderungen
Einarbeitung in die Thematiken	Komplexität erwünscht, allerdings nicht zu hoch
Sammeln von Erfahrungen	
Vergleich von Ergebnissen	Schnell und einfach messbare Reaktionen
Hohe Funktionalität und Robustheit gegenüber Fehlern	Einfache Anwendung mit geringer Störanfälligkeit
	Einfache, robuste Einzelkomponenten
	Finanzieller und baulicher Aufwand möglichst minimal

Tab. 3.1: Übersetzung der Ziele in Anforderungen der Anlage

Um die Einarbeitung zu vereinfachen sollte die Anlage möglichst wenig Komplexität aufweisen, um die Zusammenhänge und Wechselwirkung zwischen den einzelnen Gebieten und Komponenten möglichst einfach begreifbar zu machen. Da jedoch auch Erfahrungen gesammelt werden sollen, wird ein bestimmtes Maß an Komplexität vorausgesetzt, da diese mit einer wachsenden Zahl von Schnittstellen, verschiedener Soft- und Hardware einhergeht. Dadurch ergibt sich die Forderung nach einem Kompromiss zwischen Verständlichkeit und Komplexität, weshalb ein bestimmtes Maß an Komplexität erwünscht ist. Das einfache Vergleichen von Ergebnissen soll dadurch ermöglicht werden, dass die Reaktionen/Ergebnisse/Messungen schnell und einfach zu messen sind. Das bedeutet konkret, dass die Anlage zum einen „schnell“ eine Reaktion auf Steuerungsimpulse zeigen soll. Zum anderen soll die Reaktion einfach, das heißt ohne großen technischen und monetären Aufwand und möglichst direkt, messbar sein. Die letzte, sehr wichtige, abgeleitete Anforderung ist eine hohe Funktionalität, um Fehlerquellen außerhalb der Forschung auszuschließen und damit die wissenschaftliche Arbeit zu erleichtern. Entsprechend wird auch eine Robustheit gegenüber Fehlern gefordert, da bei Testeinsätzen von Steuerungen sehr wahrscheinlich auch Fehler passieren sich einstellen und diese keine Schaden an der Anlage verursachen sollen. Eine weitere Anforderung, unabhängig von den Einsatzzielen oder den technischen Eigenschaften wurde von Seiten der Hochschule vorgegeben: Die Anlage soll mit einem möglichst geringen finanziellen und baulichen Aufwand verbunden sein.

3.2 Das Konzept der Anlage

Trotz einer Vielzahl von technischen Anwendungen, die sich für den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Zweck und dessen Anforderungen eignen, qualifiziert sich sich besonders eine dafür: Die Steuerung einer Raumtemperatur.

Diese ist mit schnellen als auch einfachen Messungen ohne großen technischen Aufwand verbunden. , sowie deren Komplexität noch überschaubar ist und mit wenig finanziellem Aufwand verbunden ist. Dadurch ergeben sich zwei potentielle technische Anwendungen: Zum einen die Klimatisierung eines Raumes und zum anderen die

Beheizung eines Raumes. Beide weisen ein passendes Maß an Komplexität aufweisen und sich auf Grund ihrer Eigenschaften hervorragend für den Einsatz mit Model Predictive Control eignen. Da sich die Raumheizung jedoch mit weniger baulichem und finanziellem Aufwand realisieren lässt, wurde letztendlich entschieden diese konkrete Anwendung zum Einsatz zu bringen.

Die Idee der Anlage ist, es mit möglichst wenig Aufwand und Komplexität ermöglichen im ersten Schritt die Raumtemperatur zu erfassen und im nächsten Schritt die Raumtemperatur durch Beheizung zu steuern. Der Bedarf an Komponenten hierfür lässt sich grob in drei verschiedene Gruppen gliedern. Zum einen in die Sensoren zur Ermittlung des Zustandes innerhalb des Raums, der Aktorik zur Beeinflussung des Raumzustandes und einem logischen Controller der die Steuerung der Sensorik und Aktorik übernimmt. Um den Zustand im Raum zu bestimmen, werden zunächst also Raumtemperatursensoren benötigt. Des Weiteren muss für die Steuerung auch der Zustand der Heizung erfassbar sein, was durch Temperatursensoren am Ein- und Ausgang der Heizung und einen Durchflusssensor überwacht werden soll. Um den Zustand im Raum beeinflussen zu können, soll der Heizkörper im Raum über einen Aktor am Ventil des Heizkörpers gesteuert werden. Der logische Controller soll im Rahmen von Model Predictive Control Optimalsteuerungspläne berechnen, wofür ausreichende Rechenkapazität zur Verfügung stehen muss – da Optimierung gradientenbasiert erfolgt – weshalb diese Aufgabe von einem Rechner übernommen werden soll.

Somit gilt es eine Schnittstelle zu finden um eine Zusammenarbeit aller Gruppen zu ermöglichen.

Die Anforderungen an die Anlage wurden bereits in Kapitel 1.2 erläutert und sollen nun bei der Planung Beachtung finden. Bei der Konzipierung müssen neben den Anforderungen, welche in Kapitel 1.2, weitere Überlegungen angestellt werden um eine reibungslose Zusammenarbeit der verschiedenen Anlagenteile gewährleisten zu können. (Größtmögliche Kompatibilität) Dazu werden zunächst die Restriktionen der einzelnen Anlagenteile Die Optimalsteuerung Das Hauptaugenmerk bei der Konzipierung liegt deshalb auf der Kompatibilität und möglichst großen Einfachheit der einzelnen Komponenten der Heizungsteuerung.

3.3 Räumliche Gegebenheiten

Einen ersten Überblick der räumlichen Gegebenheiten sowie deren Lage ist auf der Skizze in Abbildung Abb. 3.1 gegeben. Der Raum, dessen Temperatur geregelt werden soll, befindet auf dem Campus der Hochschule Karlsruhe im Gebäude K und ist ein Büro für wissenschaftliche Mitarbeiter. Wie in Abbildung Abb. 3.1 zu sehen, ist der Raum von 4 Wänden quaderförmig umgeben. Die beiden dickeren Wände, die grob nach Süden und Westen ausgerichtet sind, grenzen an die Außenumgebung. Die anderen beiden Wände, sowie Decke und Boden, grenzen an anderen Räume im

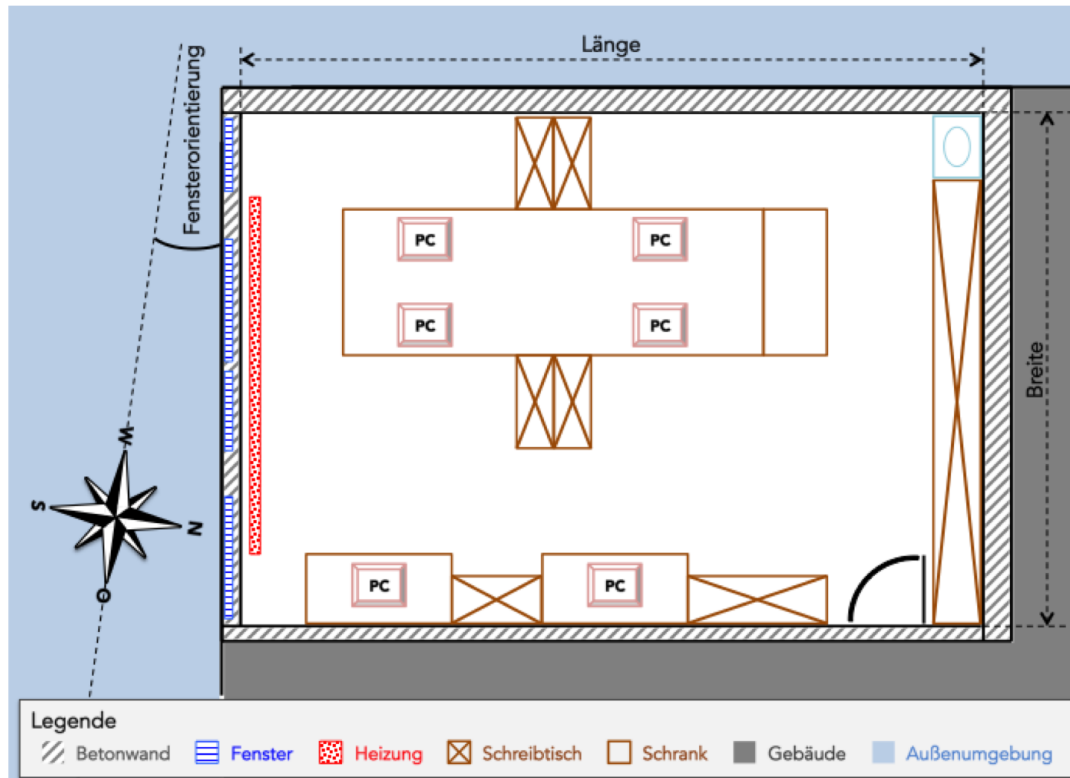


Abb. 3.1: Raumskizze K004A vom K Gebäude der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

Gebäude. Die Ein- und Ausgangstüre befindet sich in der nordöstlichen Ecke an der Ostwand. Die nach Süden ausgerichtete Außenwand besitzt eine hohe Fensterfront. Außerdem ist unterhalb des Fensters ein Heizkörper installiert, der bisher mit einen Thermostat ausgestattet ist, der die Heizung über ein Ventil steuert. Da der Raum ein Büro ist, sind Innerhalb des Raumes nicht nur eine Büroausstattung aus Schreibtischen und Schränken auch sechs Rechner sowie deren Nutzer zu finden/berücksichtigen.

3.4 Konzipierung der Steuerung

Die Steuerung der Anlage Für die Berechnung von Optimalsteuerungsplänen wird Die Optimalsteuerung stellt in diesem Fall den begrenzenden Faktor dar, da die Optimierungsumgebund CasADi für dynamische Systeme nur unter JModelica.org läuft. Daher wird darauf aufbauend das benötigte Modell für die MPC in Modelica gebildet unter Berücksichtigung der Restriktionen bezüglich JModelica. Die gemeinsame Schnittstelle beider ist Python, über die damit auch die Kommunikation mit den Hardwarekomponenten der Heizungsteuerung erfolgen muss/soll.

Bild Hardware — Software Interface Python, da Software darauf angewiesen ist.

Das Hauptaugenmerk bei der Planung liegt deshalb auf der Kompatibilität und möglichst großen Einfachheit der einzelnen Komponenten der Heizungsteuerung.

Die Optimalsteuerung stellt in diesem Fall den begrenzenden Faktor dar, da die Optimierungsumgebund CasADi für dynamische Systeme nur unter JModelica.org

läuft. Daher wird darauf aufbauend das benötigte Modell für die MPC in Modelica gebildet unter Berücksichtigung der Restriktionen bezüglich JModelica. Die gemeinsame Schnittstelle beider ist Python, über die damit auch die Kommunikation mit den Hardwarekomponenten der Heizungsteuerung erfolgen muss/soll.

Bild Hardware — Software Interface Python, da Software darauf angewiesen ist.

3.5 Umsetzung der Anlage

3.6 Inbetriebnahme und Ansteuerung der Anlage

4 Modellbildung des Raumes

4.1 Das einfache Raummodell

Das Modell soll zunächst so simpel wie möglich gestaltet werden um eine Optimierung mit Hilfe von MPC zu ermöglichen. Dessen Verfahren zur Optimierung sind gradientenbasiert und erfordern damit die Erzeugung von stetigen Ableitungen bis zum zweiten Grad. Daher soll die Komplexität des Modells zunächst sehr gering gehalten werden und dann Stück für Stück erhöht werden und die damit die Genauigkeit des Modells erhöht werden

Systemgrenzen/modell

Die Abgrenzung bzw Wahl der Grenzen zur Bilanzierung eines thermodynamischen Systems erfolgt nach dem gesuchten Zustand und der gesuchten Zustandsgröße, der Raumtemperatur im Raum K004b. Der gesuchten heißt zu berechnenden/unbekannten

Dazu lässt sich das thermodynamische System in drei Teile gliedern. Zum einen in den zu untersuchenden Raum, der durch die Außenwände des Raumes begrenzt wird und innerhalb dessen Grenzen die zu bestimmende Raumtemperatur vorherrscht. Zum anderen die Teilsysteme Gebäude und die Umgebung, innerhalb deren Grenzen jeweils auch eine charakterisierende Temperatur vorherrscht. Die Systemgrenzen des Raumes werden als geschlossen angesehen, dass heißt das Öffnen und schließen von Fenstern und Türen wird nicht explizit berücksichtigt sondern kann nur implizit als Störgröße berücksichtigt werden. Die Grenzen zwischen den Teilsystemen

Im Raummodellfall ändert sich also immer der GG-Zustand bezogen auf die Temperatur vom Raum und wird durch die wechselnde Temperatur der äußeren Umgebung bedingt. ref erfahrungssatz

4.2 Erweiterung durch Sonneneinstrahlung

4.3 Erweiterung durch Heizkörper

4.4 Validierung des Modells

4.5 Anpassung des Modells mit Parameterschätzung

*„Knowing where things are, and why, is essential to
rational decision making.“*

— JACK DANGERMUND, Esri

5 Schlussbetrachtung

5.1 Fazit

5.2 Ausblick und Ansatzpunkte für weitere Arbeiten

Literaturverzeichnis

- (1996). Iso 7498-1: Information technology – open systems interconnection – basic reference model: The basic model. Iso 7498-1 standard, International Organization for Standardization, Genf, Switzerland.
- (2006a). Modbus messaging on tcp/ip implementation guide v1.0b. Technical report, Modbus Organization, Hopkinton, USA.
- (2006b). Modbus over serial line specification and implementation guide v1.02. Technical report, Modbus Organization, Hopkinton, USA.
- (2012). Modbus application protocol specification v1.1b3. Technical report, Modbus Organization, Hopkinton, USA.
- Baehr, H. and Kabelac, S. (2012). *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 15. auflage 2012 edition.
- Böckh, P. v. and Wetzels, T. (2014). *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 5. überarbeitete und erweiterte auflage 2014 edition.
- Schnell, G. and Wiedemann, B. (2006). *Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik : Grundlagen, Systeme und Trends der industriellen Kommunikation*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 6. überarbeitete und aktualisierte auflage edition.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Kandel, den 7. März 2016

Daniel Johannes Mayer