

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die optimale Regelung von Heizkreisläufen untersucht. Ein wichtiges Anliegen hierbei stellt die Anwendbarkeit im Kontext von Retrofit-Maßnahmen an bestehenden Wohn- und Arbeitsgebäuden dar. Es wird ein Konzept angestrebt, bei dem neben den kommerziellen Auswirkungen auch die bautechnischen Erfordernisse gering gehalten um so möglichst vielen Gebäudeeigentümern ein regelungstechnisches Retrofit zu ermöglichen. Diese Zielsetzung hat gesellschaftliche Relevanz, da so nicht nur die Konsumenten bzgl. Energiekosten entlastet, sondern gleichzeitig der Energiebedarf insgesamt gesenkt werden kann. Zweifelsohne gibt es noch effizientere Regelungskonzepte, welche allerdings erhebliche Umbauten und Gebäudeautomation erfordern und somit nicht mehr für alle Gebäudeeigentümer umsetzbar sind.

Zunächst wird ein regelungstechnisches Modell eines Heizkreislaufs hergeleitet. Die Modellierung beinhaltet explizit die in der Realität messbare Vorlauftemperatur und den Volumenstrom als Bindeglied zum hydraulischen System. Der Gebäudemodellierung folgt eine Störsignalmodellierung. Im Fokus steht hierbei die Prädiktion der Raumnutzung anhand von historischen Daten. Außerdem wird eine Strategie zur Parameteridentifikation der veränderlichen Gebäudeparameter eingeführt.

Basierend auf dem entwickelten Modell wird vollständige Beobachtbarkeit nachgewiesen und ein Zustands- sowie Sollwertbeobachter entworfen. Durch die geglückte Zustandsrekonstruktion kann die konventionelle, kennlinienbasierte Vorlauf- gegen eine optimale Raumtemperatur-Regelung ersetzt werden. Mit dem Zugewinn eines Freiheitsgrades können sowohl Brenner- als auch Pumpenleistung, bei gleichzeitiger Einhaltung des Sollwertes, minimiert werden. Weiterhin wird ein Entwurf basierend auf einer Systemseparation durchgeführt. Hierbei wird mit Methoden der modell-prädiktiven Regelung eine optimale Wärmefluss-Trajektorie im thermischen Systemteil bestimmt. In einer nichtlinearen Steuerung werden schließlich die Stellsignale unter Berücksichtigung aller Beschränkungen berechnet und implementiert.

Es stellt sich heraus, dass gegenüber dem Stand der Technik erhebliches Einsparpotenzial in Bezug auf die Pumpenleistung besteht. In Bezug auf die Brennerleistung kann Bedarfsgerechtigkeit erreicht werden. Insgesamt stellt die modellbasierte Ermittlung der Raumtemperatur und deren Sollwert den eigentlichen Schlüssel zur Optimierung dar.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Heizkreisläufe für Wohn- und Arbeitsgebäude stellen zumeist einfache thermo-hydraulische Systeme dar. Die eingesetzte Technik ist historisch gewachsen und durchläuft gerade eine digitale Transformation. Es gibt zahlreiche Ansätze zur Optimierung durch den Einsatz von modernen Geräten, Kommunikationstechnik und Regelungsverfahren. Viele Hausbesitzer müssen sich aktuell mit Fragen zur Umrüstung bzw. Modernisierung bestehender Anlagen befassen. Hierzu besteht derzeit eine große Auswahl an Alternativen. Neben den verschiedenen Ausführungen von Wärmepumpen spielt noch immer die Gas-Brennwerttechnik eine wichtige Rolle, insbesondere bei Modernisierungsprojekten. Durch die nahezu stufenlos regelbare Brennerleistung und den Einsatz von drehzahlgeregelten Kreiselpumpen können Heizkreisläufe deutlich effizienter und gleichzeitig bedarfsgerechter betrieben werden als bei älteren Systemen. Hier stellen vor allem die unflexible Zwei-Punkt-Regelung des Brenners sowie die konstante Drehzahl der Kreiselpumpe das größte Verlustpotential dar. Hinzu kommt, dass gerade die Messung hydraulischer Größen an der Kreiselpumpe einerseits wichtig für eine optimale Regelung, andererseits aber praktisch unbeliebt weil kostenintensiv ist.

In der vorliegenden Arbeit werden Optimierungsverfahren vorgeschlagen, welche lediglich einfache, gerätetechnische Erweiterungen bestehender Heizkreisläufe voraussetzen. Die Regelungsverfahren sind hingegen komplexer als beim Stand der Technik.

Es werden hauptsächlich Gas-Brennwert-Heizungen in der Anwendung betrachtet. Im Kontext der Energiewende soll allerdings darauf hingewiesen werden, dass methodisch Heizungssysteme mit beliebiger, lokaler Primär-Energiequelle durch die zu erarbeitenden Methoden optimierbar sein sollen.

1.2 Datenakquise

Zum Erstellen der vorliegenden Arbeit wurden aus den folgenden Quellen Daten zu physikalischen Parametern, Kennlinien und Messreihen zusammengetragen:

1. Objektorientiertes Einraummodell simuliert in der Umgebung *Modelica/Dymola* von Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm et al., Lehrstuhl für Strömungsmaschinen, Universität Rostock. [Wur15]
→ Das Modell entstand im Rahmen der Forschungstätigkeiten des Erstellers und wurde mit realen Messungen an einem Prüfstand abgeglichen. Es diente in frühen Phasen der mathematischen Modellierung gemäß den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.3 zur Verifikation. Insbesondere wurde die Ventilkennlinie des Thermostats gemäß Abbildung 2.3 aus dem Modell heraus identifiziert. Weiterhin wurden zu Simulationszwecken Gebäudeparameter, wie sie in (2.17) bis (2.20) vorkommen, aus dem Modell entnommen.
2. Messungen aus dem hydraulischen System eines Bürogebäudes, KSB AG [KSB17]
→ Die Firma KSB steuerte Messungen aus dem hydraulischen System eines Bürogebäudes bei. Leider konnte das Gebäude selbst nicht in seinen Parametern identifiziert werden.
3. Blindleistungsmessungen, Mittelhessen Netz GmbH [Mit23]
→ Der Netzbetreiber Mittelhessennetz GmbH steuerte Messdaten zur historischen Blindleistungsentwicklung bei. Diese Daten dienen als weiteres Anwendungsbeispiel für die Prädiktion repetitiver Signale.

1.3 Stand der Technik und wissenschaftliches Umfeld

1.3.1 Konventioneller Heizkreislauf

Betrachtet wird ein Heizkreislauf gemäß Abbildung 1.1. Entgegen der eigentlichen Bestimmung wird nicht die Raumtemperatur ϑ_R , sondern die Vorlauftemperatur ϑ_{VL} mit Hilfe der Brennerleistung P_B geregelt. Hierfür kommen bei älteren Anlagen Zwei-Punkt-Regler zum Einsatz. Bei modernen Gas-Brennwert-Heizungen kann die Heizleistung im Kessel stufenlos geregelt werden. Im einfachsten Fall wird die Pumpe lediglich mit konstanter Drehzahl n_P betrieben, sodass die im Kessel erzeugte Leistung zum Heizkörper transportiert wird. Der Sollwert für die Vorlauftemperatur $\vartheta_{VL,ref}$ wird grob über eine Heiz-Kennlinie definiert, welche eine bestimmte Vorlauftemperatur ϑ_{VL} in Abhängigkeit der Außentemperatur ϑ_A vorgibt. In Abbildung 1.2 ist eine typische Heiz-Kennlinie dargestellt. Sie kann als eine Art statisches Gebäudemodell interpretiert werden. Mit Hilfe der Vorlauftemperatur-Regelung wird ungefähr eine Raumtemperatur von $\vartheta_R = 20$ °C angesteuert. Wird über den Thermostatkopf eine höhere Soll-Raumtemperatur $\vartheta_{R,ref}$ eingestellt, steigt der Volumenstrom $q(t)$ an. Die Vorlauftemperatur-Regelung reagiert mit einer Leistungserhöhung und wenig später fließt ein größerer Wärmestrom vom Heizkörper

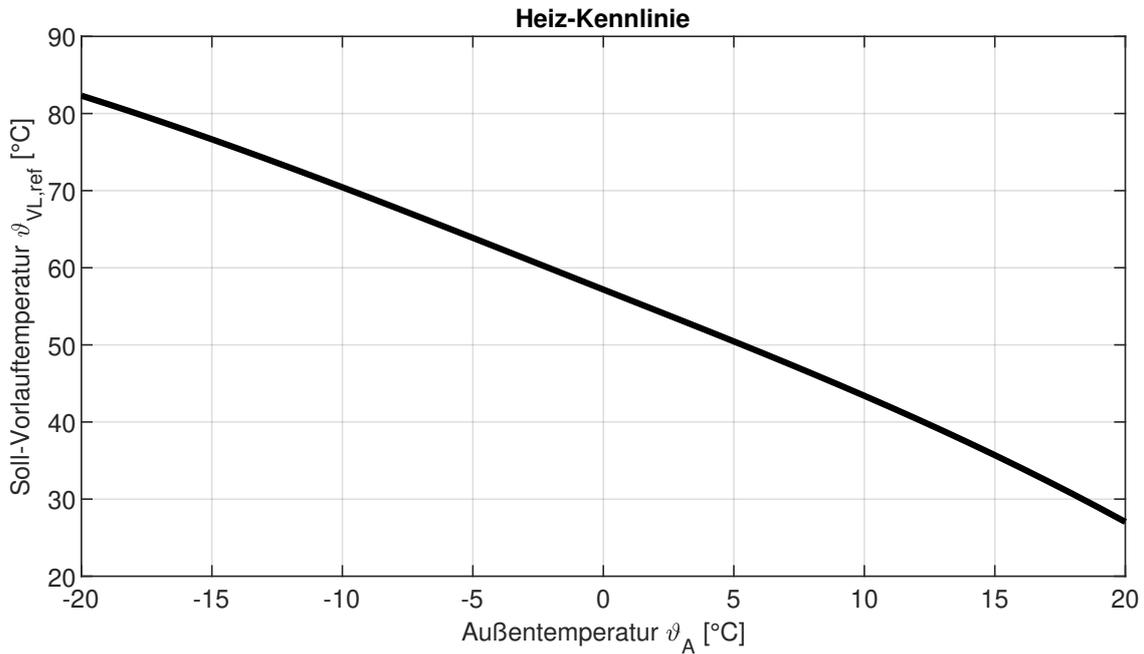


Abbildung 1.2: Typische Heiz-Kennlinie eines Wohngebäudes gemäß [Wur15]

In den Abbildungen 1.4 und 1.5 sind typische Trajektorien der Vorlaufemperatur-Regelung für unterschiedlich parametrisierte P-Regler dargestellt:

$$P_B = K(\vartheta_{VL,ref} - \vartheta_{VL}) \quad (1.1)$$

Für die Anlagen- und Raumparameter sind in der Simulation ebenfalls die Werte aus [Wur15] zu Grunde gelegt. Man kann erkennen, dass die stationäre Genauigkeit nicht gut ist. Für $K = 100$ W/K wird der neue Raumtemperatur-Sollwert $\vartheta_{R,ref} = 24$ °C nicht erreicht. Hingegen wird für $K = 200$ W/K bereits zu viel Leistung im Kessel erzeugt, so dass die Raumtemperatur ϑ_R über der Soll-Raumtemperatur von $\vartheta_{R,ref} = 20$ °C liegt. Die Regelung benötigt für $K = 200$ W/K insgesamt eine größere Leistung P_B , doch die größere Leistung P_B führt leider nicht zu einer verbesserten Regelgüte. Als Nebenergebnis muss auch vermerkt werden, dass bei Überversorgung ($\vartheta_{R,ref} > \vartheta_R$) das Thermostatventil den Durchfluss stark drosselt, damit über die Vorlaufemperatur-Regelung weniger Leistung im Kessel erzeugt wird. Dieser Zustand im hydraulischen System sollte weitestgehend vermieden werden, da so hydraulische Verluste entstehen und die Pumpe mit einer höheren Leistung betrieben werden muss. Die beiden gekoppelten Regelkreise sind in Abbildung 1.3 dargestellt.

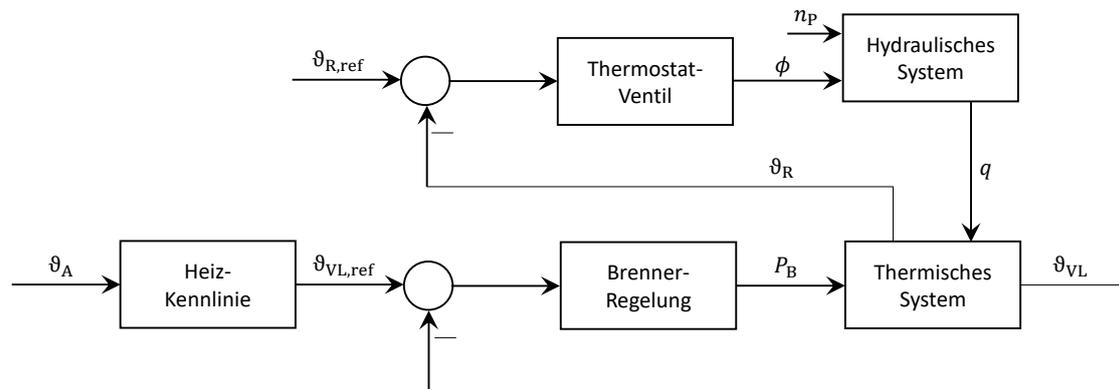


Abbildung 1.3: Gekoppelte Regelkreise entsprechend dem Stand der Technik

Die Regelung eines Heizkreislaufs kann man dann als optimiert bezeichnen, wenn

1. die Raumtemperatur bedarfsgerecht zur Verfügung steht und
2. gleichzeitig die Primärleistung P_B sowie die Sekundärleistung P_P kleinstmöglich sind.

Unter Bedarfsgerechtigkeit soll hierbei verstanden werden, dass der am Thermostatkopf eingestellte Raumtemperatur-Sollwert erreicht wird. Dies stellt vor allem in Wohngebäuden eine wesentliche Anforderung dar. Natürlich stehen bereits eine Vielzahl an Optimierungen gerätetechnischer Art zur Verfügung. Unter dem Begriff Smarthome tummeln sich mehr oder weniger gute Ansätze zur energetischen Optimierung. Zum Beispiel gibt es programmierbare Thermostate, Energiesparpumpen, intelligente Beschattungssysteme und vieles mehr. Auch sind generelle Optimierungsverfahren mit einem hohen Automatisierungsgrad des Heizkreislaufs vorhanden, jedoch bedarf es hier mehr Sensorik und Kommunikationstechnik. Das Umrüsten auf solche Anlagen kann mit erheblichen Kosten verbunden und somit für viele Gebäudeeigentümer nicht umsetzbar sein. Zu den beiden oben genannten Punkten gesellt sich also ein Dritter:

3. Die Optimierung eines Heizkreislaufs soll mit möglichst geringem baulichen und gerätetechnischem Aufwand erfolgen.

Tatsächlich ist Punkt 3. in der Priorität an erster Stelle zu nennen. Modernste energieoptimierte Regelungen können nur dann den Weg in die Praxis finden, wenn die Investitionskosten für die allermeisten Gebäudeeigentümer tragbar sind.

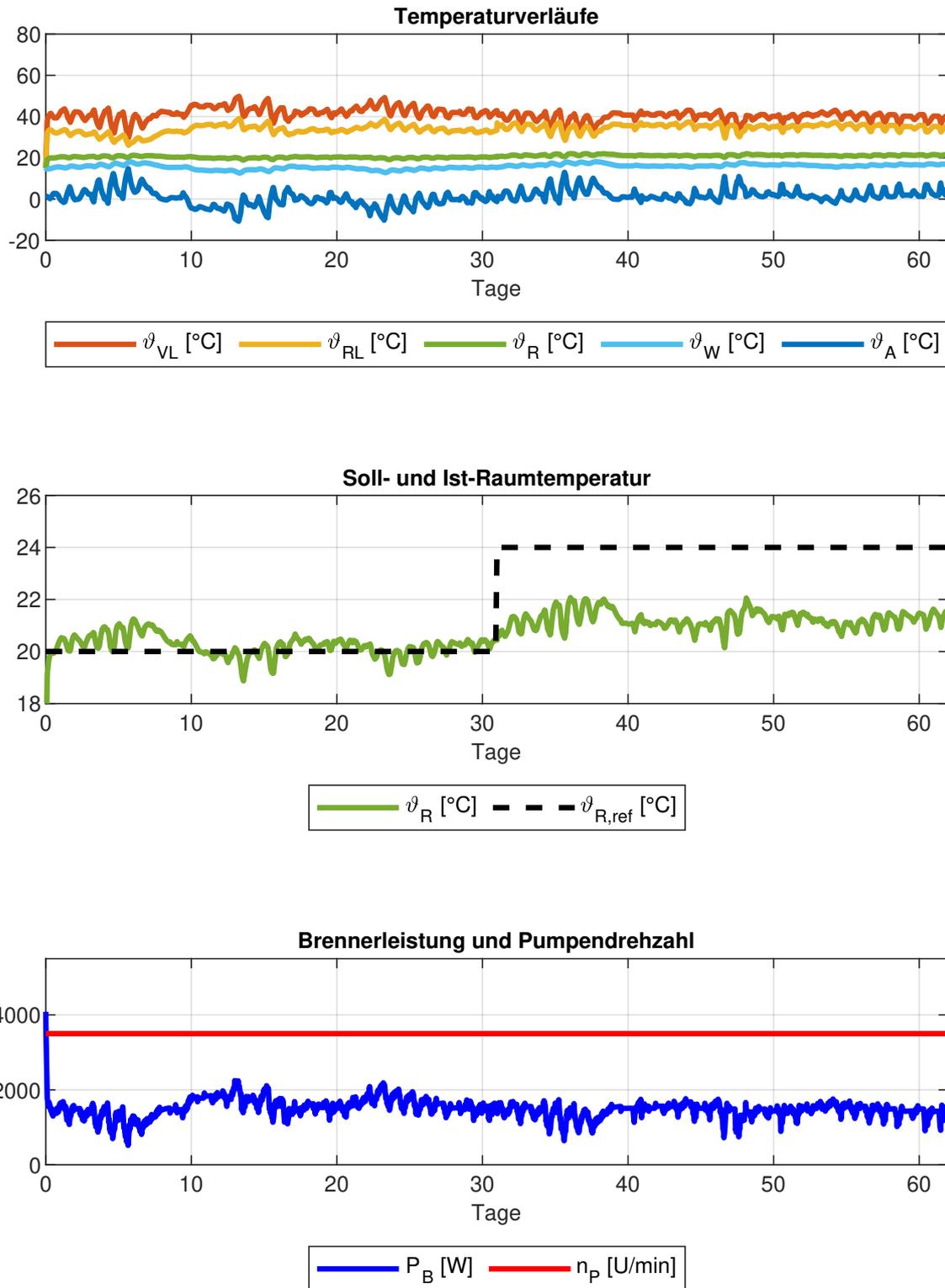


Abbildung 1.4: Konventionelle Vorlauftemperatur-Regelung mit $K = 100 \text{ W/K}$ simuliert mit den Modellparametern gemäß [Wur15]

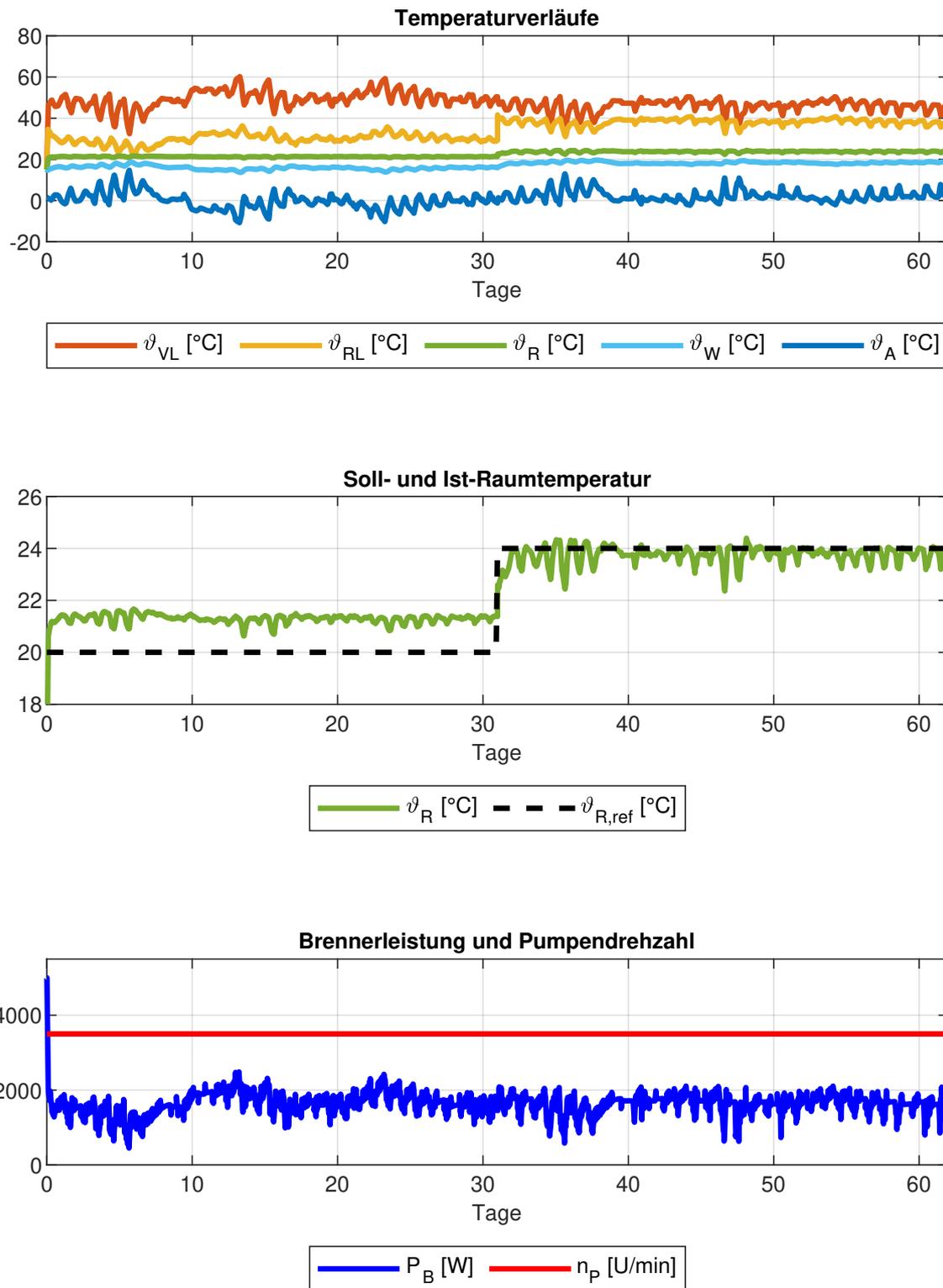


Abbildung 1.5: Konventionelle Vorlauftemperatur-Regelung mit $K = 200$ W/K simuliert mit den Modellparametern gemäß [Wur15]

1.3.2 Wissenschaftliches Umfeld

In den vergangenen Jahren hat sich im regelungstechnischen Bereich vor allem die modell-prädiktive Regelung (MPR) etabliert und kann aus wissenschaftlicher Sicht als anerkanntes Paradigma eingestuft werden. Hingegen steckt die Übertragung der Erkenntnisse in die reale Welt nach wie vor in den Kinderschuhen. Im Überblicksartikel [DAF⁺20] wird der Stand der Wissenschaft im Bereich MPR für Heizsysteme in Wohn- und Arbeitsgebäuden wiedergegeben. Ein Blick auf Abbildung 1 in [DAF⁺20] lässt die Vielzahl der Rahmenbedingungen bzw. Restriktionen erkennen. Die Autoren nennen sechs wesentliche Herausforderungen beim Technologietransfer in die Industrie bzw. zum Konsumenten:

” ...

1. Availability of appropriate hardware and software infrastructure with compatible communication interfaces.
2. User-friendly, control-oriented, accurate, and computationally efficient building modeling.
3. Automated design, tuning, and deployment of MPC.
4. Plug-and-play implementation, and robust operation of MPC.
5. Privacy and cyber-security issues and the user trust.
6. Trained personnel to handle commissioning, and maintenance of MPC in practice.

...” [DAF⁺20]

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen die Autoren des Überblicksartikel [SFC⁺18], nämlich dass die Peakmenge an wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich MPR bereits überschritten ist. Auf den Punkt wird es in der Publikation [KK16] gebracht, in der kurz und prägnant zehn oft diskutierte Fragen zur MPR für Heizsysteme in Wohn- und Arbeitsgebäuden beantwortet werden. Von großer Bedeutung sind hierbei die vierte und sechste Frage:

” ...

- 2.4. How can conflicting control goals be resolved?

...

- 2.6. Are the necessary measurement signals already available in modern buildings?

...” [KK16]

Obwohl beide Fragen aus dem MPR Diskurs heraus gestellt werden, müssen sie unabhängig von der Regelungsmethode beantwortet werden.

Bei Frage 2.4. geht es darum, was eine Soll-Raumtemperatur sein könnte und mit wie viel Energieeinsatz diese erreicht bzw. gehalten werden kann. Es muss nicht tiefgründig erläutert werden, dass eine niedrigere Raumtemperatur während der Heizperiode mit einem geringeren Energieverbrauch verbunden ist und umgekehrt. Grundsätzlich lohnt es sich, eine grobe Unterscheidung in Wohn- und Arbeitsgebäude vorzunehmen. Bei Arbeitsgebäuden muss der Arbeitgeber in den meisten Industrieländern im Rahmen des Arbeitsschutzes für eine der Arbeit förderlichen Atmosphäre sorgen. Hierzu gehört unter anderem auch die Raumtemperatur und relative Luftfeuchtigkeit am Arbeitsplatz. Solche Anforderungen werden unter dem Sammelbegriff Indoor Environmental Quality (IEQ) zusammengefasst. Ein Beispiel für eine normative Anforderung stellt DIN EN 16 798-1 dar. Zuletzt in 2022 aktualisiert, wird in der Norm ein Behaglichkeitsfenster auf einem Luftfeuchte-Temperatur-Diagramm aufgetragen. Vielerorts ist die Gebäudeautomation alleine aus solchen Arbeitsschutzerwägungen bereits fortgeschritten. Teilweise ist es Angestellten nicht mehr möglich, ein Fenster zu öffnen oder an einem Thermostat zu drehen. Anders ist die Situation bei Privathaushalten. Hier sind ausschließlich die Bewohner für den Sollwert der Raumtemperatur zuständig. In diesem Zusammenhang liegen Forschungsergebnisse aus dem psychologischen Umfeld vor, welche auf unterschiedliche Empfindungen der verschiedenen Personengruppen eingehen. Zu nennen sind hier zum Beispiel [Fan73] und [SMLL⁺10].

Quintessenz: Auf der einen Seite stehen empirisch erforschte Metriken zur Klassifikation der IEQ, auf der anderen Seite eine einfache, durch den Benutzer beeinflussbare, Sollwertvorgabe in Form von Thermostatventilen. Neben den unterschiedlichen Behaglichkeiten der Bewohner kommt erschwerend hinzu, dass gemäß Abschnitt 1.3.1 mit den Heizkreisläufen dem Stand der Technik entsprechend keine stationäre Genauigkeit erreicht wird.

Frage 2.6. bezieht sich explizit auf *moderne* Gebäude und schließt somit die allermeisten Gebäude in privater Hand aus. Doch selbst für moderne Gebäude bejahen die Autoren die Frage nicht pauschal. Auch hier wird mit ähnlichen Argumenten wie bei Frage 2.4. argumentiert, nämlich dass sich eine Unterscheidung in Wohn- und Arbeitsgebäude lohnt. Für Wohngebäude verneinen die Autoren, dass die erforderliche Messtechnik zur Verfügung steht. Der Einsatz von Funknetzwerken wird in diesem Kontext als vielversprechender Ansatz eingestuft.

Der letztgenannte Punkt motiviert einen Blick über den Tellerrand der Regelungstechnik hinaus. In bauingenieur-wissenschaftlichen Untersuchungen wird aktuell unter dem Sammelbegriff Retrofit intensiv an Modernisierungsstrategien geforscht. Der Artikel [RFHM23] erlaubt einen interessanten Überblick zu Modernisierungsroadmaps in Abhängigkeit limitierter Ressourcen. Es wird die Methode des Life Cycle Assessment (LCA)

verwendet, um Entscheidungen zu Umbauten an Gebäuden zielgerecht zu planen. In der Publikation [WHS22] kritisieren die Autoren, dass Modellannahmen bei der Retrofit-Entscheidung nicht genug hinterfragt werden. Ob der Vielzahl an Gebäudemodellierungen schlagen die Autoren die Einführung eines robusten LCA vor.

Eine Beschreibung aktueller Arbeitsgebiete der Energie Management Systeme (EMS) mit mathematisch physikalischen Hintergrund wird im Überblicksartikel [ZVB22] aufgeführt. Der Stand zur semantischen Interoperabilität verschiedener Sensor-Aktor-Systeme wird in [BR18] dargelegt. Welche Ausmaße entsprechender Einsatz von Sensoren in Smart-buildings nehmen kann, wird im Artikel [LTWZ23] ersichtlich.

Im Artikel [KHS22] wird dargelegt, welchen Einfluss Energieflexibilität von Gebäuden auf das Stromnetz hat. Die Autoren der Publikation [OUP⁺10] schlagen eine MPR zur Regelung in Abhängigkeit des Strompreises vor. Hierzu wird zunächst ein Vorhersagemodell für den Strompreis am Standort Zürich ermittelt und in der Gebäuderegulierung berücksichtigt. Es wird gezeigt, dass es aus Kostengründen vorteilhaft sein kann, die Heizung schon in den frühen Morgenstunden zu aktivieren, obwohl insgesamt mehr Energie benötigt wird. Welchen Einfluss eine solche Regelungsstrategie bei einem weitverbreiteten Einsatz auf den Strompreis haben könnte, wird nicht thematisiert. Einen verwandten Ansatz zeigen die Autoren des Artikels [KB11].

Die Besprechung des wissenschaftlichen Kontexts ist in diesem Abschnitt allgemein gehalten. In den folgenden Kapiteln mit den wesentlichen Beiträgen dieser Arbeit wird erneut eine zielgerichtete Literaturbesprechung durchgeführt.

1.3.3 Verwandte wissenschaftliche Arbeiten

In der Dissertation [Pan16] wird das Produkt aus Volumenstrom und Temperaturdifferenz ebenso berücksichtigt wie in der vorliegenden Arbeit. Der Autor modelliert das Heizungssystem in einer zeitinvarianten Tensorarstellung. Der Approximationsschritt erfolgt durch Tensordekomposition, womit der Rang des Systems reduziert wird. Die Modellierung beinhaltet auch die Vor- und Rücklauftemperatur, jedoch ist das Ventil als lineares Glied mit Sättigung approximiert. Das Modell ist nicht mit Vorblick auf einen Beobachterentwurf entworfen. Als Anwendung wird ein Heizkreislauf mit drei Kesseln und einer Kreislumpumpe betrachtet.

In der Dissertation [Pen19] wird die bedarfsgerechte Regelung einer Wohnanlage thematisiert. Hierzu wurde eine Vielzahl an Sensoren verbaut, um das Nutzungsverhalten der Bewohner besser verstehen zu können. Der Autor geht allerdings nicht auf hydraulische Aspekte ein. Ein interessantes Ergebnis der Arbeit ist, dass beim Einsatz einer lernfähigen Regelung nachweislich der Nachjustierungsbedarf durch die Bewohner gesenkt wurde. Je nach Regelungsmethode werden zwischen 4 bis 21 % Primärenergie eingespart.

Als Lernalgorithmus wird K-nearest neighbor (KNN) zur Prädiktion des Occupant Behaviour (OB) vorgeschlagen und erprobt.

1.4 Zielsetzung und Beiträge dieser Dissertation

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin

1. mit möglichst wenig baulichem und gerätetechnischem Aufwand,
2. eine bedarfsgerechte,
3. energie-optimierte

Regelungsstruktur für einen Heizkreislauf mit Einraummodell zu erarbeiten. Ein wichtiges Anliegen hierbei stellt die Anwendbarkeit im Kontext von Retrofit-Maßnahmen an bestehenden Wohn- und Arbeitsgebäuden dar. Neben den kommerziellen Auswirkungen sollen auch die bautechnischen Erfordernisse gering gehalten werden um so möglichst vielen Gebäudeeigentümern ein regelungstechnisches Retrofit zu ermöglichen. Konkret bedeutet dies, dass ausschließlich Nachrüstungen im Heizungskeller, nicht aber in anderen Gebäudeteilen erfolgen sollen. Erforderliche Nachrüstungen müssen sorgfältig ausgewählt und möglichst durch Softwarelösungen realisiert werden.

Es werden hauptsächlich Gas-Brennwert-Heizungen in der Anwendung betrachtet. Im Kontext der Energiewende in Deutschland soll allerdings darauf hingewiesen werden, dass methodisch Heizungssysteme mit beliebiger, lokaler Primär-Energiequelle durch die zu erarbeitenden Methoden optimierbar sein sollen. Diese Zielsetzungen haben gesellschaftliche Relevanz, da so nicht nur die Konsumenten bzgl. Energiekosten entlastet, sondern gleichzeitig der Energiebedarf insgesamt gesenkt werden kann.

Kapitel 2

Zunächst wird ein regelungstechnisches Modell eines Heizkreislaufs hergeleitet. Die Modellierung beinhaltet explizit die in der Realität messbare Vorlauftemperatur und den Volumenstrom als Bindeglied zum hydraulischen System. Der thermische und thermo-hydraulische Systemteil wird dynamisch, der hydraulische Teil statisch modelliert. Sowohl im hydraulischen als auch im thermo-hydraulischen Teil werden zweckmäßige Vereinfachungen vorgenommen um ein praktikables, regelungstechnisches Modell zu erhalten. Als Resultat ergibt sich je nach Interpretation entweder ein lineares, zeitvariantes (LZV) Single Input, Single Output (SISO) System oder ein nichtlineares, zeitvariantes Multiple Input, Single Output (MISO) System.