

Anwendung nichtlinearer Regelungstechnik und intelligenter Sensorik zur Effizienzsteigerung in Gebäuden

ARIS

G. Zucker, T. Ferhatbegovic,
T. Pflügl, W. Timelthaler,
B. Kodré, H. Baldauf

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

32/2017

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Anwendung nichtlinearer Regelungstechnik und intelligenter Sensorik zur Effizienzsteigerung in Gebäuden

ARIS

Gerhard Zucker, Tarik Ferhatbegovic, Antonio Garrido Marijuan,
Milos Sipetic, Andreas Sporr, Martin Litzenberger, Bernhard Kohn,
Stephan Schraml, Muhammad Umar Mir
Austrian Institute of Technology

Thomas Pflügl, Wolfgang Timelthaler, Wolfgang Reichl,
Daniel Kürnsteiner, Heiko Höllwirth, Humer Markus,
Zagar Philipp, Gritzner Helmut
E+E Elektronik

Bernhard Kodré, Hermann Baldauf
automationX

Wien, April 2017

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des bmvit publiziert und elektronisch über die Plattform www.HAUSderZukunft.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	9
Abstract.....	12
Starting point/Motivation	12
1 Einleitung.....	14
1.1 Aufgabenstellung.....	14
1.2 Stand der Technik.....	15
1.3 Verwendete Methoden.....	19
2 Ergebnisse	26
2.1 Belegungsschätzung	26
2.2 Druckabfallsmodell der Lüftungsanlage	26
2.3 Sensortechnologien	27
2.4 Modellbasierte Regelung	28
2.5 Validierung der Testphase durch Nutzerbefragung	30
3 Schlussfolgerungen	32
4 Ausblick und Empfehlungen	37
5 Verzeichnisse	39
5.1 Abbildungsverzeichnis	39
5.2 Literaturverzeichnis.....	39

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Gebäude samt den Energiesystemen für Heiz-, Kühl- und Lüftungszwecke (HKL), gehören global zu den größten Energieverbrauchern. Die konventionellen, industriell eingesetzten Steuer- und Regelungskonzepte für die HKL- und Gebäudeprozesse, basieren zumeist auf empirischen Überlegungen, gehen jedoch dabei in ihrer Grundstruktur, nicht auf die Problematik der Energieeffizienz im laufenden Betrieb, ein.

Die Regelziele sind dabei üblicherweise starr ausgeführt und zielen lediglich auf die Stabilisierung des eigentlichen HKL Prozesses ab. Dabei ist das physikalische Verhalten der geregelten HKL- und Gebäudeprozesse der entscheidende Faktor, für einen sicheren und energieeffizienten HKL- und Gebäudebetrieb, worauf die konventionellen Steuerungen und Regelungen keinen Bedacht im Betrieb nehmen.

Modellbasierte Regelungskonzepte (MBR) zeigen in dieser Hinsicht bemerkenswerte Vorteile gegenüber anderen, konventionellen und in der Regel empirischen Steuer- und Regelansätzen von heute. Dabei wird die Dynamik der geregelten HKL Energiesysteme sowie die Bauphysik des Gebäudes auf der Grundlage eines mathematischen Modells formuliert und für innovative, fortgeschrittene Steuer- und Regelalgorithmen in ARIS verwendet.

Inhalte und Zielsetzungen

Konventionelle Methoden für die Energiemanagementsystemführung nehmen keine Rücksicht auf einen energieeffizienten und nachhaltigen Betrieb der HKL Systemkomponenten. Neue Methoden und Strategien zur intelligenten Gebäudeautomation, Steuerung, Regelung sowie intelligenten, interaktiven Systemüberwachung der HKL Systeme, bilden das Hauptergebnis der Forschungsaktivitäten in diesem Vorhaben.

Diese, in Feldtests validierten Ansätze, sollen in der Lage sein, die Vorteile der neuen, holistischen Lösung zu demonstrieren, um die angestrebten Ziele der höheren Energieeffizienz, bei minimalinvasivem Aufwand systematisch und nachhaltig zu erreichen.

Die angestrebte Systemlösung von ARIS setzt sich aus bestehenden und neuen Sensortechnologien und den dafür erforderlichen Kommunikationsschnittstellen, die die Basis für eine integrierte, zielorientierte Regelung bilden, zusammen. Durch modellbasierte, nichtlineare Steuerung und Regelung wird ein Energiemanagement entwickelt, das vorgegebene Ziele bezüglich Energieeffizienz selbstständig durch kontinuierliche Optimierung im Betrieb erreicht.

Methodische Vorgehensweise

In diesem Forschungsunterfangen werden vereinfachte Modelle anvisiert, die die aus der Sicht der Steuerung und Regelung notwendigen Dynamiken der Heizungs-, Lüftungs-, und Klimasysteme (HLK) sowie der Gebäudelasten beschreiben. Dabei wird die implementierte

(konventionelle) Steuerung und Regelung der Energiesysteme und Gebäudelasten mit einem Optimierungsalgorithmus überlagert, der als Ziel den energieeffizienten Betrieb verfolgt.

Aus der Sicht der Optimierung, ist es daher notwendig die wesentlichen Dynamiken des Gebäudes mathematisch zu erfassen. Die modellbasierte Steuerung und Regelung wird über ein Optimierungsproblem gelöst. Anvisiert werden Modellformulierungen in nichtlinearer Zustandsraumdarstellung, die das physikalische Verhalten der geregelten Systeme und Lasten bestmöglich beschreiben.

Der reduzierten Modellkomplexität (Zustandsreduktion ohne Informationsverlust) wird besondere Aufmerksamkeit geschenkt um einen Optimierungsprozess zur Laufzeit des Systems, direkt im Gebäudemanagementsystem, ablaufen zu lassen. Die Einbettung von intelligenter Sensorik (Kombination von Modellen und realer Sensorik) war ein wesentlicher Bestandteil dieses Forschungsvorhabens um hat die Regelung insgesamt effizienter gestaltet.

Die Methodik wurde anhand eines Lüftungssystems für die Frischluftzufuhr für Seminar- und Aufenthaltsräume einer Fachhochschule, eingebettet in einem Passivhausbürogebäude (ENERGYbase, Giefinggasse 6, 1210 Wien), in realen Tests validiert.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die in ARIS vorgestellte Methodik der Modellierung und des systematischen, modellbasierten Reglerentwurfs, zeigt nicht nur in Simulationen gute Ergebnisse, sondern erweist sich im Feldtest als eine echte Alternative zu den konventionellen Regelstrategien für Lüftungssysteme im Gebäudebereich. Die Einhaltung des gewünschten Komforts und die direkte Möglichkeit, auf den Energieverbrauch während des Betriebs Einfluss zu nehmen, waren die Schlüsselargumente für den Nachweis des Erfolgs der ARIS Methodik. Die ausschließlich softwarebasierte Lösung hilft bedarfsorientiert und systematisch in den Gebäudeprozessbetrieb einzugreifen und diesen energieoptimal zu führen. Die Erweiterung der modellbasierten Regelung mit einem Personenschätzungsalgorithmus, der aus ohnehin für die konventionelle Regelung benötigten Messdaten die Anzahl der Personen zur Laufzeit des System berechnet, macht den ARIS Ansatz robuster gegenüber konventionellen, industriellen Regelungsansätzen. Die Verwendung von Prozessabbildern in Form von mathematischen Modellen ergibt zusätzlich die Möglichkeit das Prozessverhalten zu präzisieren und auch auf Störungen und äußere Prozesseinflüsse rechtzeitig zu reagieren.

ARIS lieferte eine solide Basis dafür, die Vorteile der fortgeschrittenen Methoden der Regelungstechnik im Bereich der Gebäudeprozesse zu demonstrieren und die Regelungsstrategien innerhalb der Gebäudeautomation nachhaltig zu verändern. Fakt ist, konventionelle Regelungsmethoden der Gebäudeindustrie können und sollen weiter entwickelt werden, um Energiemanagement von komplexen gebäudetechnischen Systemen zu etablieren. Der Appell den Gebäudebereich energieeffizienter zu gestalten, hat dazu geführt sich den Regelungsalgorithmen mit Nachdruck zu widmen, zumal auch die Rechenleistung gängiger Leittechniksysteme in den letzten Jahrzehnten enorm zugelegt hat. Aus hardwaretechnischer Sicht steht daher dem Gebäudesystemintegrator großes Potential zur Verfügung, das genutzt werden sollte. Die Forschungsarbeiten im Bereich der

mathematischen Modellierung von Gebäudeprozessen sollten daher fortgesetzt werden – der Fokus sollte allerdings mehr auf die datengetriebene Modellierung künftig gerichtet werden, was ganz im Sinne der nächsten europäischen Forschungsziele ist – nämlich der Digitalisierung. ARIS stellt aus österreichischer Sicht die Weichen bereits rechtzeitig.

Ausblick

Cyber-Physical Systeme sind in aller Munde. Auch ARIS liefert mit den Ergebnissen einen Beitrag zu diesem innovativen Forschungsthema. Die hier verwendete Methodik der virtuellen (cyber) Systeme anhand von mathematischen Modellen ist eine vielversprechende, die auch für künftige Forschungsvorhaben in unterschiedlichen Domänen zum Einsatz kommen wird (Industrieprozesse, Smart Grids, Energiewirtschaft, usw.). ARIS setzt auf eine Kombination von physikalischer und datenbasierter Modellierung sowie auf die Einbettung von optimierungsbasierter Prozessführung. Hier steckt noch viel Forschungspotential und wird in zahlreichen Projekten künftig weiter untersucht werden.

Abstract

Starting point/Motivation

Buildings and energy systems for heating, ventilation and air conditioning purposes (HVAC) belong to the group one of the largest energy consumers globally. Conventional, industrially used control concepts for the HVAC and building processes are based on empirical considerations mostly. Nevertheless these conventional control methods have little and a mostly non transparent impact on the energy efficient building operation. The control objectives are usually designed to be rigid and only aim at stabilizing the actual HVAC process taking energy efficiency into consideration only little. The physical behavior of the controlled HVAC and building processes is the key factor for reliable and energy-efficient HVAC and building operation which is addressed by conventional building control concepts in no way whatsoever. However, advanced model-based control concepts (MBC) show remarkable advantages in this respect over conventional and usually empirical control approaches of nowadays. The dynamics of the controlled HVAC energy systems and the physics of the building is formulated on the basis of suitable, resource-efficient mathematical models and further processed for the development of innovative, advanced control algorithms in ARIS.

Contents and Objectives

Conventional methods for the energy management in buildings have no systematic interaction on the energy efficient and sustainable operation of the HVAC system components and buildings as loads. The development of new methods and strategies for building automation and control as well as the deployment of intelligent, interactive system monitoring of HVAC equipment, represent the main goals of research activities in this project. The innovative control approaches are implemented and validated in selected buildings and further used to demonstrate the advantages of this new, holistic solution to systematically and sustainably achieve the desired objectives of improved energy efficiency with minimally invasive effort. The desired system solution of ARIS is composed of existing as well as new sensor technologies (measurement of CO₂ concentration for higher comfort levels for the occupants, measurement of temperatures in HVAC circuits for process control purposes, measurement of temperatures in the building zones and building spaces for optimal comfort of building users), different communication interfaces to gather sensor data and to select accordingly. Furthermore advanced model-based nonlinear control techniques are developed for the systematic and efficient energy management.

Methods

In these research activities, the development of simplified models is targeted which best describe the dynamics of HVAC energy systems and building loads, which are necessary from the point of view of control and regulation. In doing so, the implemented (conventional) control of energy systems and building loads is superimposed with an optimization algorithm, which is aimed at energy-efficient operation. From the viewpoint of optimization, it is therefore necessary to capture the essential dynamics of the building mathematically. The model-based

control is solved by means of an optimization problem. Model formulations in non-linear state space representation, which describe the physical behavior of the controlled systems and loads as far as possible, are targeted. The reduced model complexity (state reduction without loss of information) is given special attention in order to allow an optimization process to run at the runtime of the system, directly linked to the building management system. The embedment of intelligent sensor systems (combination of models and real sensor systems) has been an essential part of this research project. The methodology was tested successfully in a real test using a ventilation system for the fresh air supply for seminar and meeting rooms of a university of applied sciences, embedded in a passive house office building (ENERGYbase, Giefinggasse 6, 1210 Vienna).

Results

The methodology of modeling and the systematic, model-based controller design, presented in ARIS, did not only show good results in simulations, but also proved to be a real alternative to the conventional control strategies for ventilation systems in the building sector in the field test. Compliance with the desired comfort and the direct possibility to influence the energy consumption during the operation were the key arguments for the success of the ARIS methodology. The exclusively software-based solution helps to systematically access the building process operation in a need-oriented manner and to guide it an energy-efficient way. The extension of the model-based control with a person-estimation algorithm, which calculates the number of persons at the runtime of the system using measurement data that is anyway required for conventional control makes the ARIS approach more robust than conventional industrial control approaches. The use of process images in the form of mathematical models additionally gives the opportunity to predict the process behavior and also to respond to disturbances and external process influences in a timely manner. ARIS therefore provided the perfect basis for demonstrating the advantages of the advanced methods of control engineering in the field of building processes and for a lasting change in the control strategies within building automation. From the point of view of hardware engineering, therefore, the building system integrators have great potential herewith which should be used in future applications. The research work in the area of mathematical modeling of building processes should therefore be continued - the focus, however, should be focused more on data-driven modeling in the future – which is fully compliant with European research goals of digitalization. From the Austrian point of view, ARIS has set the course already.

Prospects / Suggestions for future research

Cyber-physical systems are on everyone's lips. ARIS provides a contribution to this innovative research topic with its results. The methodology of the virtual (cyber) systems used here is based on mathematical models, which is also promising for future research projects in different domains (industrial processes, smart grids, energy management, etc.). ARIS relies on a combination of physical and data-based modeling as well as on the embedding of optimization-based process management. There is still much research potential here and will be further investigated in numerous projects in the future.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Gebäude haben den größten Anteil am weltweiten Gesamtenergieverbrauch [7, p. 7]. Nach Angaben der „International Energy Agency (IEA)“, ist der Energiebedarf für Wohn- und Gewerbegebäude in den Mitgliedsstaaten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), mit etwa 35% des gesamten Endverbrauchs, bemessen [7, p. 10]. Aus der Sicht der Europäischen Union, hatten Gebäude¹ einen Anteil von etwa 35% des Gesamtenergieverbrauchs [50]. Die Senkung des Energieverbrauchs in Gebäuden ist mit einer erheblichen Reduktion der Treibhausgasemissionen verbunden und macht die Baubranche daher, hinsichtlich Energieeinsparungsvorhaben, sehr attraktiv und leistet damit insgesamt einen Beitrag zum Klimaschutz (vgl. z.B.: [51]).

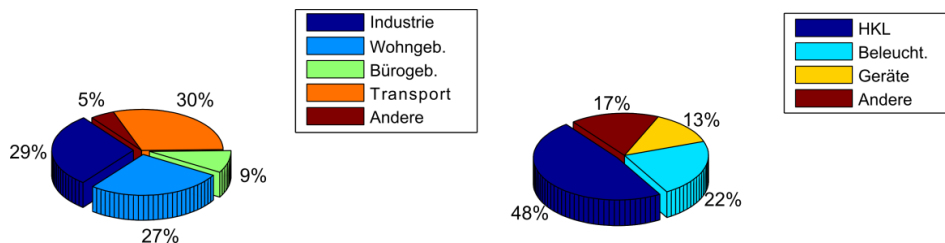


Abbildung 1: Darstellung des Endenergieverbrauchs nach Sektor (links) [16] und Verbraucher in Gebäuden (rechts) [52] in der Europäischen Union.

Wie in [50, p. 396] dargestellt, entfallen etwa 48% des gesamten Energieverbrauchs in Gebäuden auf Heizungs-, Kühlung- und Lüftungssysteme (HKL), siehe dazu auch Abbildung 1. Damit stellen diese die größten Energieendverbraucher in Wohn- als auch Bürogebäuden dar. Der Bausektor wächst rasant, was nicht nur die Folge des enormen Bevölkerungswachstums ist, sondern kann auch als Auswirkung des Anstiegs des Energieverbrauchs zu sehen ist. Die Tatsache, dass Menschen mehr als 80% ihres Lebens in Gebäuden verbringen [53, p. 1247], macht den Bausektor, hinsichtlich der Reduzierung des Energieverbrauchs, sehr attraktiv. Geht man noch einen Schritt weiter, und wirft einen Blick auf die Verteilung der Endenergieverbraucher in Gebäude, kommt man zu dem Schluss, dass HKL Energiesysteme die Klasse der Endenergieverbraucher vertreten, die mit dem größten Endenergieverbrauch in Bürogebäuden, verbunden ist [50, p. 396].

Im Forschungsprojekt ARIS werden neue Ansätze entwickelt und bereits vorhandene weiterentwickelt um den Betrieb von Lüftungsanlagen mittels minimalinvasiver Methoden zu optimieren und zu verbessern. Dabei werden im Rahmen von ARIS mathematische Methoden der fortgeschrittenen Regelungstechnik auf ihre Tauglichkeit für die Gebäudeautomation –

¹ Gebäude für Wohnzwecke und öffentliche Gebäude. Gebäude aus dem Industriesektor sind hier nicht beachtet.

insbesondere für das erweiterte Energiemanagement - im realen Gebäudebetrieb geprüft. Angefangen mit Ansätzen der mathematischen Modellierung (physikalisch, datenbasiert, hybrid), über Simulation, dem modellbasierten Steuer- und Reglerentwurf bis hin zu Betriebstests, sollen diese Methoden in den realen Gebäudebetrieb sukzessive einfließen. Der Komfort der Gebäudenutzer stellt dabei eine wesentliche Nebenbedingung da, und darf auf Grund ausgewählter Methoden zu keiner Zeit verletzt werden. Geeignete Simulationsumgebungen bieten die notwendige Plattform, um Modelle und Regler vorab zu testen und zu tunen. Die so entwickelten Algorithmen werden auf ihre Tauglichkeit, Robustheit und Stabilität geprüft. Damit soll eine koordinierte, bedarfsgeführte Regelung der Frischluftzufuhr realisiert werden und eine Basis für die Steuerung des Energieverbrauchs geschaffen werden.

1.2 Stand der Technik

41% des gesamten Energieverbrauchs im Jahr 2010 entfielen allein auf Gebäude [6],[7]. Im Jahr 2009, wurde der Endenergieverbrauch für Heizsysteme, sowie Warmwasserbereitung in Österreich mit 28% ermittelt [8]. Dabei sind über 80% der heutigen Bausubstanz dringend sanierungsbedürftig, da deren Heizwärmebedarf bis zu 300 kWh/m²a beträgt [9]. Auf Grund des geringen Neubauanteils sind Verbesserungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden, die den Energiebedarf dominieren, besonders wichtig [10]. Diese können sowohl durch Sanierungsmaßnahmen als auch durch Verbesserungen des Gebäudebetriebs realisiert werden. Während bei Sanierungen in der Regel mit hohen Investitionskosten auch hohe Einsparungen erzielt werden können, sind wesentlich geringere Investitionen notwendig, um den Gebäudebetrieb zu verbessern. Dies ist eine gute Voraussetzung, um Gebäudebetrieboptimierungen nachhaltig anzuwenden und so einen nennenswerten Beitrag zu Energieeinsparungen im Gebäudebereich zu leisten. Eine Klimastudie von McKinsey [11] kommt zum Schluss, dass die größten CO₂-Vermeidungspotenziale im Bereich Gebäude bis 2020 im Bereich des Anlagenbetriebs liegen. Explizit werden dort die Effizienzsteigerung von Lüftungsanlagen und der Einsatz von verbesserten Energiemonitoring- und Energiemanagementsystemen genannt. Der Energieverbrauch ist dabei verbunden mit den Nutzeranforderungen an den Komfort. Im Idealfall wird der gewünschte Komfort mit einem Minimum an Energie bereitgestellt. In der Praxis werden Gebäude jedoch oft weit entfernt von diesem Optimum betrieben, so dass entweder die Komfortanforderungen oder die Zielwerte für den Energieverbrauch verfehlt werden. Insbesondere bei Nichtwohngebäuden ist ein hohes Einsparpotential vorhanden. Allein durch Änderungen der Betriebsführung können hier bis zu 30 % der Energie eingespart werden [12],[13].

Die Entwicklung eines fortgeschrittenen, intelligenten Energiemanagementkonzepts ist ein notwendiges Unterfangen, das auch die Anforderungen an die Minimalinvasivität der Lösung erfüllt - die Nachfrage ist dementsprechend sehr groß [14],[15],[16],[17],[18]. Dabei ist zu bedenken, dass es sich bei Energiesystemen in Gebäuden um komplexe Systeme handelt, die von vielen Parametern beeinflusst werden. In der zunehmend automatisierten Haustechnik werden verschiedenste Steuer- und Regelungsparameter angegeben, die oft lediglich

erfahrungsbasiert vorgegeben werden. Anpassungen werden in der Regel nur vorgenommen, um einen störungs- und beschwerdefreien Betrieb zu erreichen [19]. Durch unübersichtliche gegenseitige Abhängigkeiten werden Energiesparpotentiale oft nicht erkannt. Vielfach ist das Bedienpersonal mit dieser Situation überfordert, für Verbesserungsbemühungen stehen nur geringe zeitliche und finanzielle Ressourcen zur Verfügung [20]. Eine starre Regelung der heutigen Gebäudemanagementsysteme (d.h.: die in erster Linie auf Prozessstabilisierung zielt: starre Temperaturregelung, starre Druckregelung, usw.) ist hierbei wenig sinnvoll, da sich der Gebäudebetrieb dynamisch gestaltet, mit einem stark variierenden Betriebsbereich, und in der Regel auch die Gebäudenutzung in der Lebensdauer stark variiert [15]. Zur Reduzierung des Endenergieverbrauchs und Steigerung der Energieeffizienz sind daher Modernisierungsmaßnahmen an Gebäuden sowie an deren Ausstattung von großer Bedeutung. Die Erhöhung der Energieeffizienz der bestehenden Heiz-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK), sowie die Senkung des Energieverbrauchs und der Betriebskosten sind von zentraler Bedeutung [5]. Zusätzlich kann eine kontinuierliche oder regelmäßige Betriebsüberwachung häufig nicht stattfinden, weil die Mess-Infrastruktur fehlt. So wird z. B. beim Bau aus Kostengründen häufig auf die Installation von ursprünglich vorgesehenen Wärmemengenzählern verzichtet, da sie für den Gebäudebetrieb nicht unmittelbar notwendig sind [21]. Dasselbe gilt für die Speicherung von Messwerten, die ebenfalls zusätzliche Kosten verursacht. Dadurch wird auch bei Neubauten kein energieoptimierter Betrieb erreicht. Viele Gebäude werden deshalb weitab ihres energetisch / ökonomischen Optimums betrieben, obwohl bei der Betriebsführung ein Einsparpotential von bis zu 50 % liegt [20],[19].

Sensorenintelligenz sowie die Steuerung und Regelung sind hier entscheidenden Komponenten zur Erzielung einer höheren Systembetriebseffizienz. Um auch dazu einen energieeffizienten HLK-Betrieb zu erreichen, müssen Steuer- und Regelalgorithmen auf die physikalischen Eigenschaften des Gebäudes, die durch Sensoreninformationen zur Verfügung gestellt sind, angepasst werden. Es soll eine integrierte Lösung zur optimierten Abstimmung von HLK-Prozessen auf den tatsächlichen Bedarf, basierend auf integrierter Sensorik, ermittelt und mit Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen der Gebäude kombiniert werden.

Energieeffiziente Gebäude und Gebäudeautomation

Der optimale Betrieb von Gebäuden ist nur durch eine optimale Konfiguration der Energiesysteme für Heiz-, Kühl- und Lüftungszwecke (HKL), zu gewährleisten [22, p. 1403]. Die Heizsubsysteme zum Beispiel werden so betrieben, dass sie Bereiche in Gebäuden mit thermischer Energie versorgen, um in erster Linie die Wärmeverluste (z.B.: durch Wärmeabgabe an die Umgebung) zu kompensieren und um eine gewünschte Temperatur für Heizzwecke auf einem vorgegebenem Niveau (oder alternativ in einem Band) zu halten [14, p. 14]. Gebäude weisen Einzigartigkeit, in Bezug auf die Art wie sie konzipiert sind und ihrer operativen Spezifikation, auf. Attribute, wie zum Beispiel die Lage des Gebäudes, die betrieblichen Anforderungen, sowie Umgebungsbedingungen, Architektur oder akustische Probleme, induzieren die Notwendigkeit einer gesonderten Behandlung des Gebäudekomplexes und der gewählten Konfiguration der darin sich befindlichen HKL Energiesysteme. Die Notwendigkeit zur Energieeinsparung, gemeinsam mit den Anforderungen für die Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit und einer guten

Luftqualität in Gebäuden, haben zu wesentlichen Verbesserungen von HKL Komponenten in den vergangenen Jahren geführt (vgl. [18],[23],[24]). Die Wahl der optimalen HKL Systemkonfiguration (für Heizung, Kühlung und Lüftung), zusammen mit einem optimierten Steuer- und Regelkonzept², unter Berücksichtigung von Informationen über das Wetter, sowie der inneren Einflussgrößen (z.B.: Nutzer), haben einen entscheidenden Einfluss auf die Verfolgung der Energieeinsparungsziele (vgl. [25, pp. 1.1–1.9] und [26, p. 2]). HKL Systemregelkreise sind meist nichttrivialer Natur aufgebaut und verlangen ein hohes Maß an Erfahrung von Seiten der HKL Systeminstallateure und folglich auch der Gebäudetechniker. HKL Systeme werden im Allgemeinen dynamisch betrieben, was in erster Linie, auf Grund von (rapiden) Wetterveränderungen, (dynamischen) Veränderungen der Energienachfrage, usw., auch von Nöten ist. Ferner hat man im Gebäudebetrieb oftmals mit einem Systemverhalten zu tun, welches besondere Anforderungen an die heutigen HKL Regelkreise stellt. Nichtsdestotrotz, müssen die HKL Regelung „...*Behaglichkeit, bei minimalem Energieverbrauch und Kostenaufwand*...“ liefern (vgl. [27, p. 1]). Die thermische Behaglichkeit muss daher zu jeder Zeit durch Heizen, Kühlen und Lüften, unabhängig von störenden Effekten und veränderlichen äußeren Bedingungen, gewährleistet werden [14, p. 18].

Durch ein energieeffizientes Gebäudemanagementsystem (engl. *building management system* (BMS)), lässt sich eine gesamtheitliche Überwachung aller Regelkreise und Subsysteme in HKL Kreisen gewährleisten. In Abhängigkeit des BMS Anwendungsbereiches, werden die nachfolgenden Konzepte, laut [28, p. 39.15], in BMS implementiert: (1) Gebäudeautomatisierung, (2) Gebäudemanagement, (3) Energiemanagement. Die heutzutage implementierten Steuer- und Regelkonzepte innerhalb der Gebäudeautomation, haben grundlegende Auswirkungen auf den energieeffizienten Betrieb von Gebäuden und Heiz-, Kühl- und Lüftungsanlagen (HKL), sind allerdings meist heuristische Ansätze (siehe EN15232 [11, p. 18]), ohne einen systematischen und damit nachvollziehbaren Hintergrund, und berufen sich meist auf eine jahrelange Erfahrung der Anwender in der HKL Systembranche. Die Steuerung samt Regelung ist hier sehr starr ausgeführt (nach Regeln, Zeitplänen, Kennlinien), und ist meist nur für einen bestimmten Betriebspunkt ausgelegt [29, pp. 163–166]. Die Forschung und Entwicklung muss daher hier mit aller Macht ansetzen, da hierin das meiste Potential für Energieeffizienzverbesserungen steckt, weil Gebäude und die zugehörigen Energiesysteme kaum in starren Betriebspunkten geregelt werden, sondern einen sehr hohen Grad an Betriebsaktivität innerhalb großer, ausgedehnter Systemgrenzen, aufweisen.

Modellbasierte, mathematisch motivierte Steuer- und Regelansätze, arbeiten hier systemnah und bieten dadurch diverse Möglichkeiten, HKL Systeme optimal zu nutzen. Modellbasierte, prädiktive Gebäudeautomation nutzt Prognosedaten, um ein Gebäude vorausschauend auf die Parameter Lufttemperatur, Anzahl der Personen im Raum, Luftfeuchte, CO₂ Konzentration einzustellen [29]. Bei der modellbasierten, prädiktiven Regelung (MPC) handelt es sich um eine mathematische Methode, um komplexe dynamische Prozesse durch Voraussagen von Zuständen zu regeln [30]. Mit den aktuellen Eingangssignalen werden zukünftige Zustände

² z.B.: Optimierung hinsichtlich Energieeffizienz.

prädiziert und mittels Prädiktion, aus Basis einer mathematischen Beschreibung des geregelten Systems, folglich geeignete Eingangssignale für den weiteren Verlauf gewählt. Für jeden Zeitschritt werden Berechnungen für die zukünftigen Zustände berechnet (Zeithorizont) [14],[31],[32],[33]. Das Berechnen der Stellgrößen erfolgt durch das Lösen eines Optimierungsproblems mit Beschränkungen (Nebenbedingungen). Es ist bewiesen, dass mit systematischen und leicht reproduzierbaren modellbasierten prädiktiven Ansätzen, Verbesserungen des energieeffizienten Systembetriebs erreicht werden können [14],[33],[34],[32],[35]. Simulationsstudien mit der modellprädiktiven Regelung zeigen klare Verbesserungen der Energieeffizienz zwischen 15% und 28% im Vergleich zu Regelstrategien mit konventionellen Reglern [1],[3],[36].

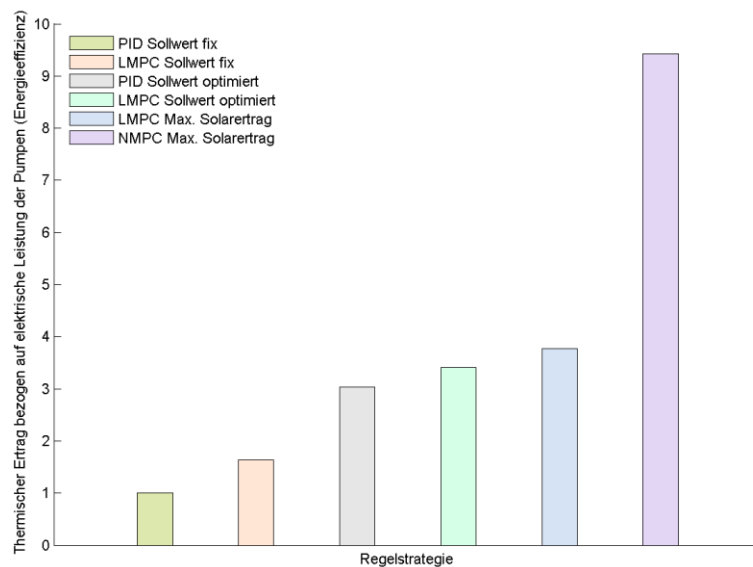


Abbildung 2: Simulationsstudie

Erweiterungen der linearen MPC-Regelung sind nichtlineare Verfahren, die bei stark nichtlinearen Prozessen eingesetzt werden können, wie sie etwa bei Schaltvorgängen (z. B. Zuschalten von Heizregistern oder Wegschalten thermischer Zonen) auftreten. Die industrielle Verbreitung nichtlinearer MPC-Verfahren ist heute noch relativ gering, da deren Anwendung in der Regel viel Verständnis für den zu regelnden Prozess und darauf abgestimmte MPC-Optimierungsverfahren erfordern [37],[38],[39]. Darin steckt allerdings das meiste Potential für Energieeffizienzverbesserungen, da Gebäude und die zugehörigen Energiesysteme kaum in starren Betriebspunkten geregelt werden, sondern weisen einen sehr hohen Grad an Betriebsaktivität innerhalb großer, ausgedehnter Systemgrenzen. Ein Einsatz nichtlinearer Methoden für Steuer- und Regelungszwecke ist daher ein unabdingbares Unterfangen, um auch das Gesamtpotential der Regelungssysteme innerhalb der Gebäudeautomation vollkommen auszuschöpfen. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Regelstrategien aus [14] (konventionell, modellbasiert linear und modellbasiert nichtlinear) in einer umfassenden Studie, wo die Vorteile des modellbasierten, nichtlinearen Steuer und Regelansatzes mit Hinblick auf die Energieeffizienzsteigerung der HKL Gewerke des Gebäudebetriebs, klar aufgezeigt worden sind. Sie stellt Benchmark-Daten zum Zweck des Vergleichs von verschiedenen Regelstrategien für ein solarthermisches System samt Speicher

dar: (1) mit konventioneller PID Prozessregelung auf Sollwert (bei Verwendung von festen und zeitvariablen Sollwerten); (2) linearer modellprädiktiver Regelung LMPC auf Sollwert (bei Verwendung von festen und zeitvariablen Sollwerten) und auf maximalen Solarertrag; (3) nichtlinearer modellprädiktiver Regelung NMPC auf maximalen Solarertrag. Die NMPC zeigt die besten Ergebnisse hinsichtlich des thermischen Solarertrags. Für die Analyse wurden mit Messdaten validierten Modelle verwendet, sowie echte Wetterdaten und Lastprofile [14, p. 122].

Sensorik in Gebäuden

Kombinierte Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage verbrauchen fast 50% der gesamten Energie in Gebäuden [6],[7],[40],[41]. In Österreich wurde etwa im Jahr 2009 für Heizung und Warmwasserbereitung im privaten Wohnungsbau bis zu 28% des Endenergieverbrauchs verwendet [8],[42],[43]. Studien zeigen, dass 15% bis 25% Energie durch eine bedarfsgeregelte Lüftung bei Teilbelegung des Raums eingespart werden kann [44]. Derzeit arbeitet die Mehrzahl der HLK Anlagen mit maximaler Belegung während der normalen Arbeitszeit und wird nachts abgeschaltet. Dies ist ineffizient, da die Energie beispielsweise für 30 Personen verwendet wird, auch wenn nur 10 Personen im Raum sind [45]. Deswegen ist ein verlässliches System zur Erfassung der Belegung notwendig (z.B. mit agent-basierten Steuerungsmethoden [46]). Zwar gibt es mehrere Methoden, um die Belegung in modernen Gebäuden zu ermitteln, diese haben aber Einschränkungen. Passiv-Infrarot (PIR) Sensoren, die zur Steuerung von Licht verwendet werden, ermitteln Raumbellegung und haben das Potenzial, zwischen 10% und 15% Energie einzusparen [5]. Sie liefern aber keine Information darüber, wie viele Personen im Raum sind. Wojek et al. [47] verwenden Kameras und omnidirektionale Mikrofone, um die Menschen in Büros und Labors zu beobachten. Damit konnte erkannt werden, ob die Leute an Sitzungen teilnehmen, diskutieren, Telefonate führen, oder das Büro einfach leer war. Monitoring-Studien an state-of-the-art Installationen haben gezeigt, dass die Regelung sehr oft eine signifikante Schwachstelle bei der Effizienz von Lüftungssystemen ist. Damit kommt der Untersuchung und Entwicklung verbesserter und neuer Regelungsstrategien unter Einbindung integrierter Sensorik eine entscheidende Rolle zu. Um einen effizienten Betrieb zu ermöglichen, sind neue Strategien nötig, die insbesondere Informationen bezüglich der zukünftigen Randbedingungen verarbeiten können [48]. Durch Modellierung der CO₂ Konzentration, die neben integrierter Sensorik auch mit den Erzeugungs- und Verbrauchsprognosen der Gebäude kombiniert wird, wird eine entsprechende Energieverbrauchsoptimierung möglich [49].

1.3 Verwendete Methoden

Zunächst sollen die zu optimierenden Lüftungsprozesse mathematisch modelliert werden. Konkret bedeutet das, dass die interessierenden Parameter wie Druckverhältnisse im Lüftungssystem, Luftvolumenströme, CO₂ Konzentrationen in den Seminar- und Aufenthaltsräumen sowie die Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse modelltechnisch beschrieben werden. In ARIS wurde der grey-box Ansatz gewählt, bei dem die wesentlichen Prozessdynamiken in Form von Differentialgleichungen beschrieben werden. Die

unbekannten Parameter werden in Form Messdaten geschätzt oder mittels gängigen Standards und Normen berechnet.

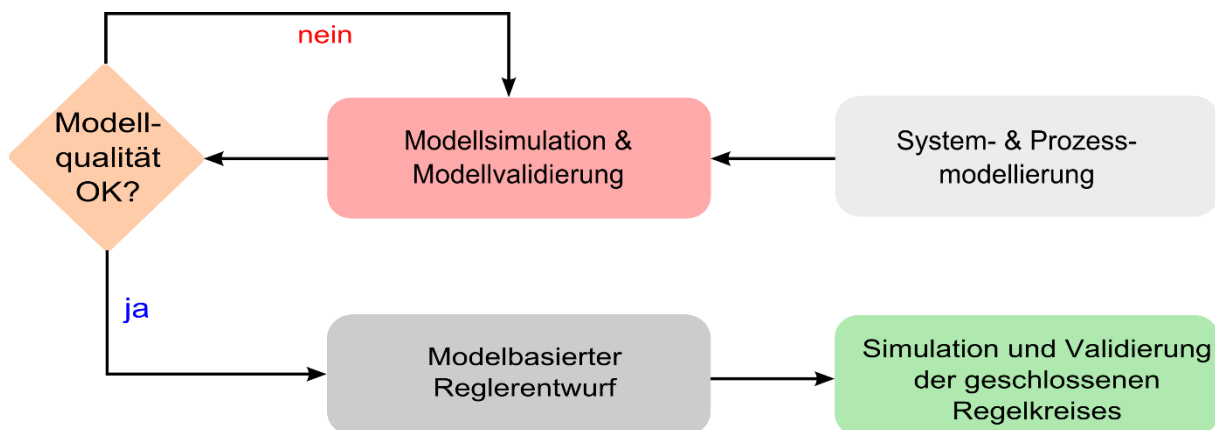


Abbildung 3: Entwicklung der modellbasierten Regelung in ARIS - Schritt für Schritt.

Mit Hilfe von realen Daten werden die Modelle insgesamt validiert und damit sichergestellt, dass eine solide Grundlage für den anschließenden Entwurf der modellbasierten Regelung gegeben ist. Innerhalb einer geeigneten Simulation werden die Modelle genauer eingestellt um auch die Modellgüte hochzuhalten und damit dem realen Prozessverhalten näher zu kommen und auch damit die Regelgüte weiter zu verbessern. Die Regelziele und etwaige Prozessbeschränkungen (Komfort) werden mathematisch in einer Kostenfunktion zusammengefasst, und einem Optimierungsalgorithmus übergeben, der unter anderem auch sicherstellen soll, dass im erreichten Optimum neben dem Komfort auch der Energieverbrauch optimal ist.

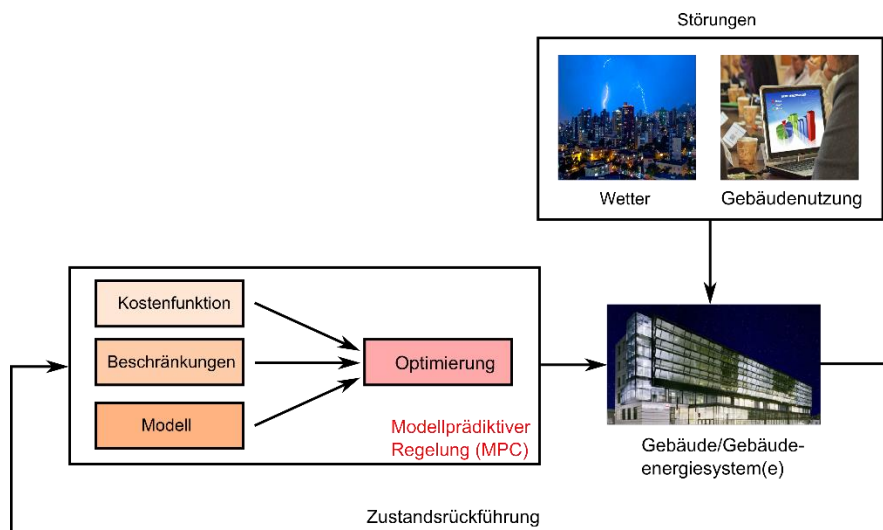


Abbildung 4: Schematische Darstellung der in ARIS gewählten Methodik - Modellbasierte Regelung für Gebäudeenergiesysteme

Was sich insgesamt ergibt, ist ein multiobjektives Optimierungsproblem, das zur Laufzeit des Systems gelöst werden soll. Die Abbildung 4 zeigt hierzu schematisch das für ARIS angewandte Konzept – modellbasierte Regelung unter Einbindung von System-/Prozessbeschränkungen.

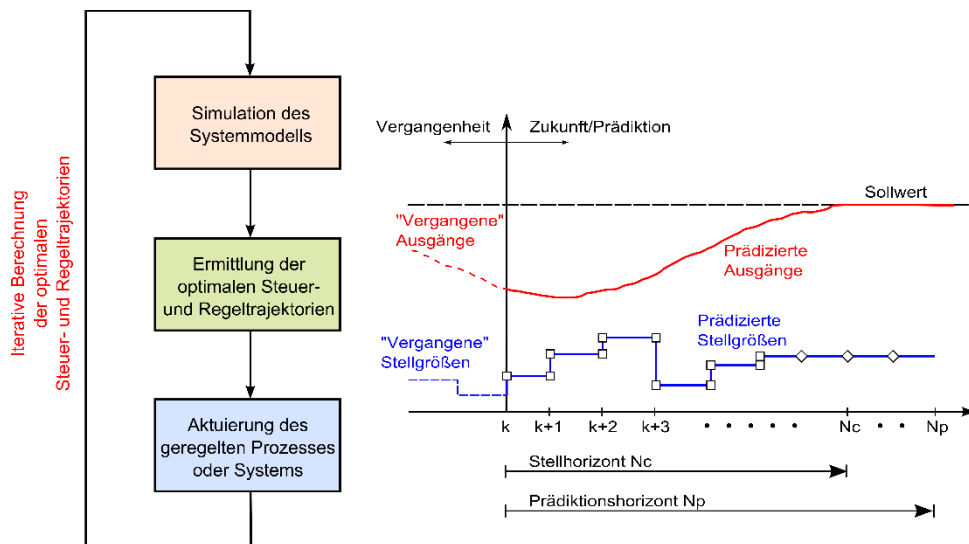


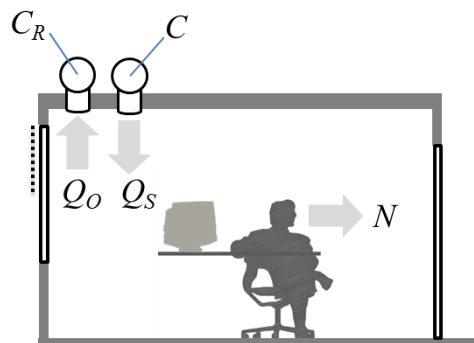
Abbildung 5: Optimale Regelung - Implementierung fortgeschrittener Methoden der Regelungstechnik für ARIS

Die optimale Regelung (hier als modellprädiktive Regelung ausgeführt) bildet das Kernstück des ARIS Konzepts. Dabei wird mit Hilfe der mathematischen Modelle das zukünftige Prozessverhalten geschätzt. Auf Basis der Modellsimulation wird die optimale Trajektorie bestimmt. Damit ergibt sich eine Trajektorie die bereits auf künftige Veränderungen (z.B.: bedingt durch äußere Einflüsse auf den Prozess) voreingestellt ist. Damit ist gewährleistet, dass der Optimierungsalgorithmus quasi „auf Kurs“ ist und nur bedingt die Trajektorie neu ausrichten muss. Der Vorteil liegt auf der Hand: der Bedarf an Rechenpower sinkt– die Optimalität (Kosten, Energie) bleibt stets gewahrt – die Prozessbeschränkungen werden eingehalten.

Ein weiteres Highlight des Projekts stellt die entwickelte Belegungsschätzung dar. Hier wurde mittels intelligenter Algorithmen ein virtueller Sensor entwickelt der es ermöglicht aus den Daten der bereits im Gebäude vorhandener CO₂- und Lüftungs-Sensorik, alleine durch den Einsatz von Software, die Personenanzahl in Räumen zu schätzen. Die Belegungsschätzung anhand des CO₂-Bilanzmodells wurde erfolgreich in 5 Seminarräumen der Fachhochschule Technikum-Wien, in der ENERGYbase, validiert und erzielte eine Genauigkeit von typisch 10% - 20% des Personenerfassungsvermögens bei Raumgrößen von 10 bis ca. 60 Personen. Dies erlaubt eine Klassifizierung der Raumbelugung, ohne Entstehung von Zusatzkosten für Sensorinstallationen, die für die Energie-Optimierung von HKL-Anlagen oder aber auch die Nutzung für das Raummanagement bei großen Organisationen, wie z.B. in Universitäten.

Für die Schätzung der Raumbelugung wurde aus für jeden Raum vorhandenen Messparametern, nämlich der CO₂-Konzentration und dem Volumenstrom der Lüftungsanlage, eine Bilanzgleichung aufgestellt in welchen der menschliche Körper als CO₂ Quelle modelliert wurde (Abbildung 6). Die zunächst unbekannte Anzahl der Personen im Raum wurde unter bestimmten Annahmen (z.B. CO₂-Generation pro Person pro Stunde) unter Nutzung dieser Parameter geschätzt.

Bilanzgleichung CO₂



$$\frac{v(C_R(t) - C_R(t - \Delta t))}{\Delta t} = Q_s(t)C(t) - Q_o(t)C_R(t) + N(t)$$

Wobei

$$\begin{aligned} N(t) &= \text{CO}_2 - \text{Generationsrate in L/min} \\ C(t) &= \text{Aussenluft CO}_2 - \text{Konzentration in L/m}^3 \\ C_R(t) &= \text{Raumluft CO}_2 \text{ Konzentration zum Zeitpunkt } t \\ \Delta t &= \text{Zeitschrittgröße des Modells} \\ v &= \text{Luftvolumen d. Raums in m}^3 \\ Q_s(t) &= \text{Zuluft Volumenstrom in m}^3/\text{sec} \\ Q_o(t) &= \text{Abluft Volumentstrom in m}^3/\text{sec} \end{aligned}$$

Abbildung 6: Bilanzgleichung für die CO₂-Konzentration in einem Raum zur Belegungsschätzung

Die Bilanzgleichung wurde in Matlab/Simulink-Umgebung als Raummodell implementiert. Das Raummodell wird dazu so in eine Rückkopplungsschleife integriert dass der Schätzwert für die Anzahl der Personen im Raum so von einem Regelalgorithmus adaptiert wird, dass die gemessene CO₂-Konzentration zu jeder Zeit der modellierten Konzentration entspricht. Die Raumbelegungsschätzung wird noch über einen Ausgabefilter geglättet und als gerundete, ganze Zahl als Ausgabewert ausgegeben. Das entsprechende Blockdiagramm ist in der Abbildung 7 dargestellt.

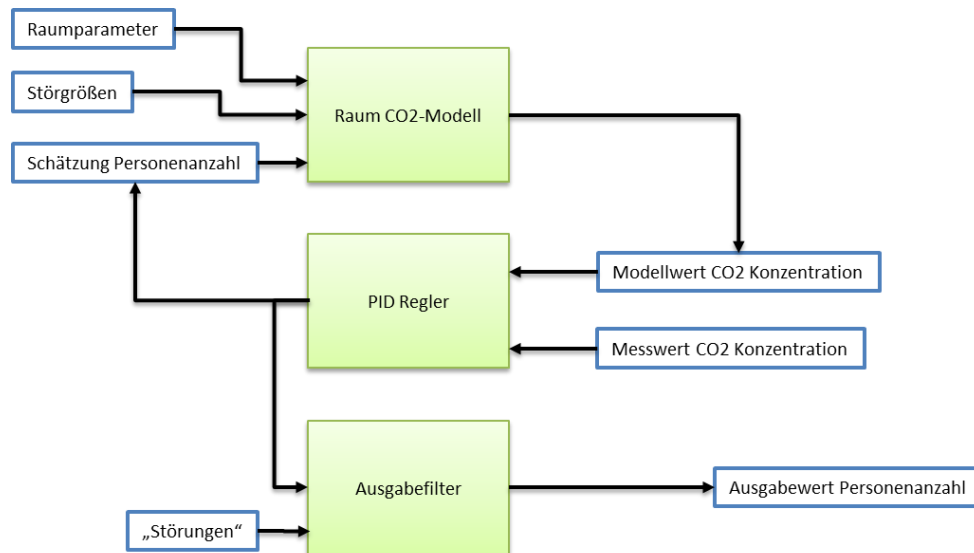


Abbildung 7: Blockdiagramm des Algorithmus zur Belegungsschätzung

Der Algorithmus wurde im Dezember 2016 an einem Testtag in 5 Seminarräumen der FH Technikum Wien validiert. Die Anzahl der anwesenden Personen wurden dazu jeweils zu den Seminarbeginnen punktuell manuell erfasst und mit dem in Echtzeit laufenden Belegungsschätzer verglichen. Der Belegungsschätzer ermittelt periodisch im Abstand von 15 Minuten neue Schätzwerte aus der gemessenen CO_2 -Konzentration und den Luftwechselraten. Die Abbildung 8 zeigt die Messdaten und Verlauf des Schätzwerts während zweier Seminare, einmal mit 3, dann mit 12 anwesenden Personen, bei einem gesamten Fassungsvermögen (Sitzplätze) von 20 Personen (oberste Kurve; Es ist anzumerken dass das zweite Seminar über die geplante Dauer hinaus andauerte. Da hierzu keine Personenerfassung vorhanden war, wurden diese Daten nicht in die Validierung miteinbezogen). Die mittleren Kurven der Abbildung zeigen den CO_2 -Messwert und den CO_2 -Modellwert, wobei zu erkennen ist dass das Modell in der Lage ist den Messwert beinahe exakt zu reproduzieren. Die unteren Kurven der Abbildung zeigen den Verlauf des Zu- und Abluftvolumenstroms („ A_I “ bzw. „ A_O “) aus welchen die Werte Q_s und Q_o für die Bilanzgleichung errechnet werden. Aus dem Verlauf der mittleren Kurven der CO_2 Werte ist ebenfalls zu erkennen, dass eine Auswertung der CO_2 -Konzentration alleine, ohne entsprechendes Bilanz-Modell nicht ausreicht um eine Personenzahl zu schätzen: Die CO_2 -Konzentration bleibt nach dem Seminarende auf erhöhtem Niveau und würden somit zu einer Überschätzung der Personenzahl im Raum führen. Das maximale Fassungsvermögen dieses Raums beträgt 20 Sitzplätze. Es ist zu beachten, dass die manuelle Erfassung nur zu Beginn der beiden Seminare durchgeführt wurde und die Referenzwerte für die geplante Dauer des Seminars fortgeschrieben wurden. Das Seminar dauerte jedoch über die geplante Dauer hinaus.

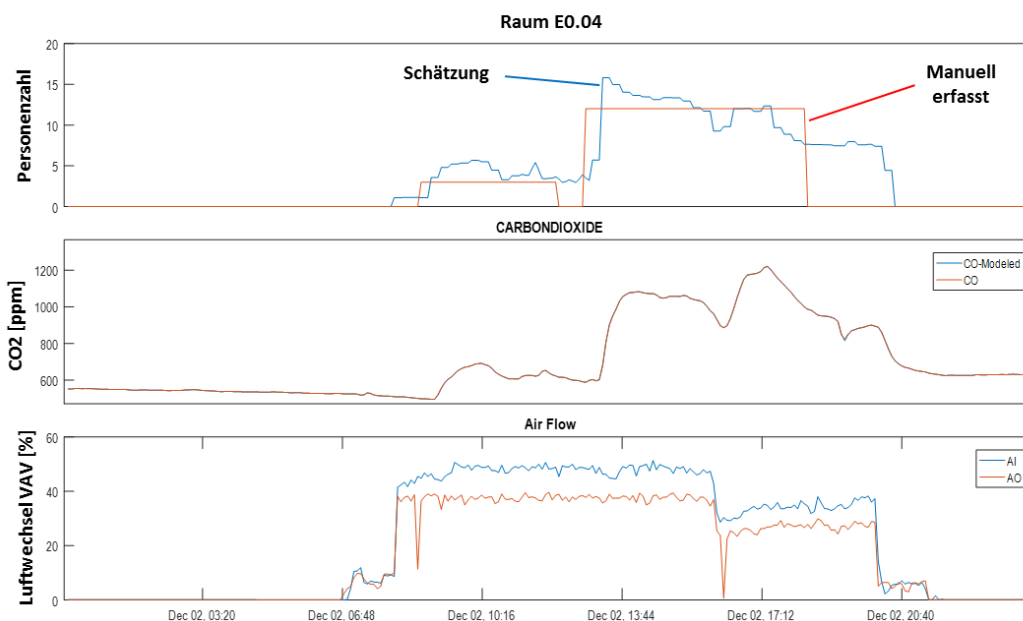


Abbildung 8: Beispiel eines Ergebnisses der Belegungsschätzung im Vergleich zur manuellen Erfassung in einem Seminarraum der FH-Technikum Wien, im ENERGYbase Gebäude.

Der Schätzalgorithmus wurde in einem Testlauf im Dezember 2016 erfolgreich in 5 Seminarräumen der Fachhochschule Technikum-Wien, in der ENERGYbase, validiert und dort weiter für ca. 5 Monate im Echtzeitbetrieb mit einer Taktung von 15 Minuten betrieben. Ein erfolgreicher Test des an den Räumen der ENERGYbase entwickelten virtuellen Sensors an den Daten des Bürogebäudeneubaus von Industriepartner E+E Elektronik, demonstrierte die einfache Übertragbarkeit des Schätzalgorithmus die für eine erfolgreiche Verwertung wesentlich ist. Abbildung 9 zeigt ein Beispiel eines Ergebnisses der Belegungsschätzung im Vergleich zur geplanten Belegung laut Raumreservierungskalender in einem Besprechungsraum des Bürogebäudeneubaus von Projektpartner E+E Elektronik über 4 Tage mit Daten aus dem März 2016 ausgewertet.

Ansätze dieselbe Schätzung wie mit dem CO₂-Modell auch mit der Wärmebilanz oder der Luftfeuchtebilanz eines Raumes zu realisieren wurden im Projekt ebenfalls untersucht. Hier zeigte sich jedoch, dass für keinen Raum des Testgebäudes erfolgreich ein solches Modell validiert werden konnte. Als mögliche Ursachen beim Luftfeuchtemodell kommt der komplexe Zusammenhang zwischen Wasserdampfgeneration durch den menschlichen Körper und äußeren Parametern wie Lufttemperatur, Luft-Feuchte, Kleidung, Gewicht und die allgemeine körperliche Kondition der Person in Frage. Bei der Wärmebilanz der Einfluss der Sonneneinstrahlung in Zusammenhang mit Fensterausrichtung und der, zum Teil manuell bedienter, Einstellung der Beschattung (Jalousien), sowie anderer Beschattungsquellen (Bäume, Nachbargebäude) und des Sonnenwinkels.

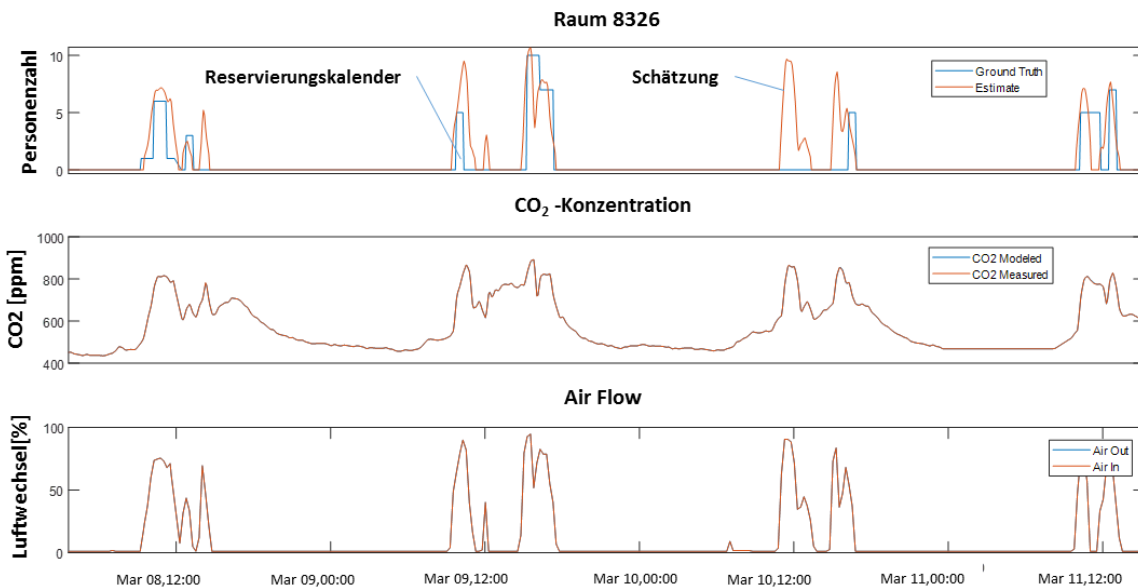


Abbildung 9: Ergebnis der Belegungsschätzung

Der Vorteil dieses Hybridbetriebs (d.h.: modellbasierter Regler + Personenschätzer) ist damit leicht erkennbar – Einflüsse auf den Prozess (durch Personen) können direkt in die Regelung eingebunden werden, womit das Gesamtkonzept mit zusätzlicher Information bedient wird und damit auch die Ermittlung der optimalen Trajektorien an Qualität gewinnt.

Die in Simulationsstudien geprüften Algorithmen wurden zusätzlich in Feldtests untersucht. Anhand von Messdatenanalysen sowie von Umfragen der am Experiment teilgenommenen Zielgruppe (Studenten), wurde der Nachweis über die Qualität der in ARIS entwickelten, innovativen Regelung erbracht. Die Auswirkungen auf die Nutzerinnen und Nutzer wurden gleichzeitig mit dem Testlauf des Experiments mittels Fragebogen ermittelt, es wurden quantitative Aussagen über Veränderungen durch das Experiment von den Nutzerinnen und Nutzern abgefragt, um die subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen zu identifizieren.

Leitend für die Entwicklung der Vorgehensweise für die Befragung war einerseits die Anforderung, das Benutzer-Feedback vergleichbar zu machen, andererseits von möglichst allen BenutzerInnen Feedback zu bekommen, um valide Daten zu erhalten, auf deren Basis zuverlässige Aussagen zu den Wirkungen des neuen Systems getroffen werden können. Ziel der Befragung war es, während der Testphase im Testgebäude ENERGYbase die Auswirkungen und Veränderungen in der Wahrnehmung der sich in den Räumen befindlichen Personen zu untersuchen. Alle in den Testräumen zum Testzeitpunkt anwesenden Personen sollten befragt werden.

Im Projekt wurde ebenfalls untersucht denselben Ansatz für die Schätzung mit dem CO₂-Modell auch auf die Wärmebilanz oder die Luftfeuchtbilanz im Raum anzuwenden. Hier zeigte sich jedoch, dass für keinen Raum des Testgebäudes erfolgreich ein solches Modell für die Schätzung der Belegung validiert werden konnte, da die zugrundeliegenden Modelle einer zu großen von Anzahl von störenden Einflüssen unterworfen sind (z.B. die Sonneneinstrahlung beim Temperaturmodell).

2 Ergebnisse

2.1 Belegungsschätzung

Für die Schätzung der Raumbelugung wurde aus mehreren, für jeden Raum einfach zugänglichen Messparametern, eine Bilanzgleichung aufgestellt in welchen der menschliche Körper eine Quelle der untersuchten Größe darstellt. Die zunächst unbekannte Anzahl der Personen im Raum wurde unter bestimmten Annahmen (z.B. CO₂ Erzeugung pro Person pro Stunde) unter Nutzung dieser Parameter geschätzt. Hierzu wurden 3 grundlegende Modelle erstellt (Ausschreibungsziel „Stadt der Zukunft“: *Praxistaugliche Werkzeuge für energie- und ressourceneffizientes Design von Gebäuden in Simulation, Entwurf und Gebäudebewertung*).

Die Bilanzgleichung für die Modellierung der CO₂-Konzentration wurde in Matlab/Simulink-Umgebung als Raummodell implementiert. Das Raummodell wurde nun so in eine Rückkopplungsschleife integriert dass der Schätzwert für die Personen im Raum so von einem PI-Regler adaptiert wird, dass die gemessene CO₂ Konzentration zu jeder Zeit der Modellierten entspricht. Die Raumbelugungsschätzung wird noch über einen Ausgabefilter geglättet und als gerundete, ganze Zahl als Ausgabewert ausgegeben.

2.2 Druckabfallsmodell der Lüftungsanlage

Für die modellbasierte Regelung (Abschnitt 2.4) ist eine Modellierung der geregelten Strecke erforderlich, die unter anderem aus dem Lüftungssystem und den Lüftungsclappen als wesentliche Aktuatoren bestehen. Bei der Modellierung des Lüftungssystems und damit bei der Verteilung der Frischluft sowie der Absaugung der Abluft, muss die Druckverteilung im Lüftungsschacht modelliert werden. Insbesondere ist dabei die praktische Realisierung der Prozessregelung, die im Fall der Lüftungsanlage LA03 der Fachhochschule (Standort ENERGYbase) über zwei entkoppelte PI Regelkreise ausgeführt ist. Dabei wird jeweils ein Sollruck für den Betrieb vorgegeben – zweistufig und damit nicht kontinuierlich verstellbar.

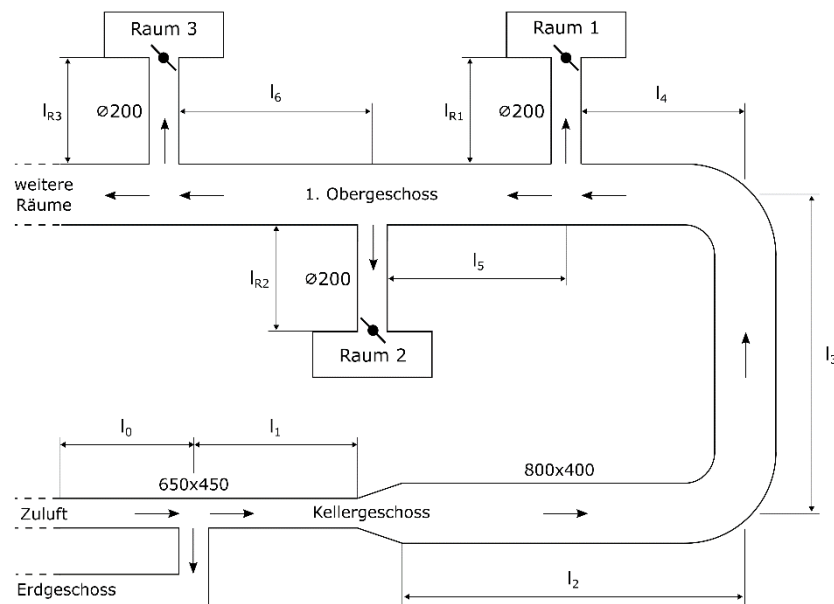


Abbildung 10: Modellsynthese für die Differenzdruckverteilung - Differenzdrücke für die einzelnen Abschnitte und Volumenströme werden prozedural gerechnet.

Abbildung 10 zeigt schematisch, wie beim Modellieren vorgegangen wird. Die einzelnen Abschnitte werden nach Form, Länge und Querschnitt in Kategorien aufgeteilt und in einem Simulationsframework entsprechend kodiert. Dadurch ist eine prozedurale Differenzdrucksynthese möglich, die ohne weiteres auch auf andere Systeme in der Form übertragbar ist. Für all diese Bereiche existieren unterschiedliche Druckabfallsberechnungen, die Volumenstromregler wurden hingegen datenbasiert modelliert. Hierzu wurden Werte für die Volumenströme aus dem Gebäudemanagementsystem mit manuell ausgelesenen Werten der Luftklappenstellung kombiniert. Die entsprechenden Druckabfälle wurden mit physikalischen Modell ermittelt. Zur Laufzeit wurde damit mit Hilfe der Gleichungen und Daten das Modell so gefittet, dass sich numerisch die richtigen Größen für den Volumenstrom, Druckabfall und Luftklappenstellung ergaben. Dieser Ansatz war notwendig um insgesamt eine bessere Modellgüte für das Gesamtdruckabfallsmodell zu erzielen.

2.3 Sensortechnologien

Industriepartner E+E Elektronik hat verfügbare Sensorschnittstellen und Sensor-Technologien im Sinne der Projektfragestellungen analysiert und die technischen Vor- und Nachteile zusammengefasst, sowie durch Rückmeldungen von Gebäudeausrüstern und Betreibern unterstützt. Erste Erfahrungen bzw. Ergebnisse der Prototypenumsetzung einer modernen Schnittstelle auf Basis Alljoyn wurden durchgeführt. Abbildung 11 zeigt die Grundstruktur dieses prototypischen Sensornetzwerks. Es konnte einerseits festgestellt werden, dass sich das System Alljoyn durchaus als brauchbare und sehr universelle Schnittstelle im gehobenen Gebäudemanagement etablieren könnte. Andererseits zeigte sich, dass das System seine endgültige und notwendige Reife und Markttauglichkeit noch nicht erreicht hat. Es fehlen z.B. noch Integrationsbeispiele für Fremdsysteme, Erfahrungen und Tests in deutlich größeren Systemen bzw. Gebäuden und ein ausreichendes Nutzerfeedback.

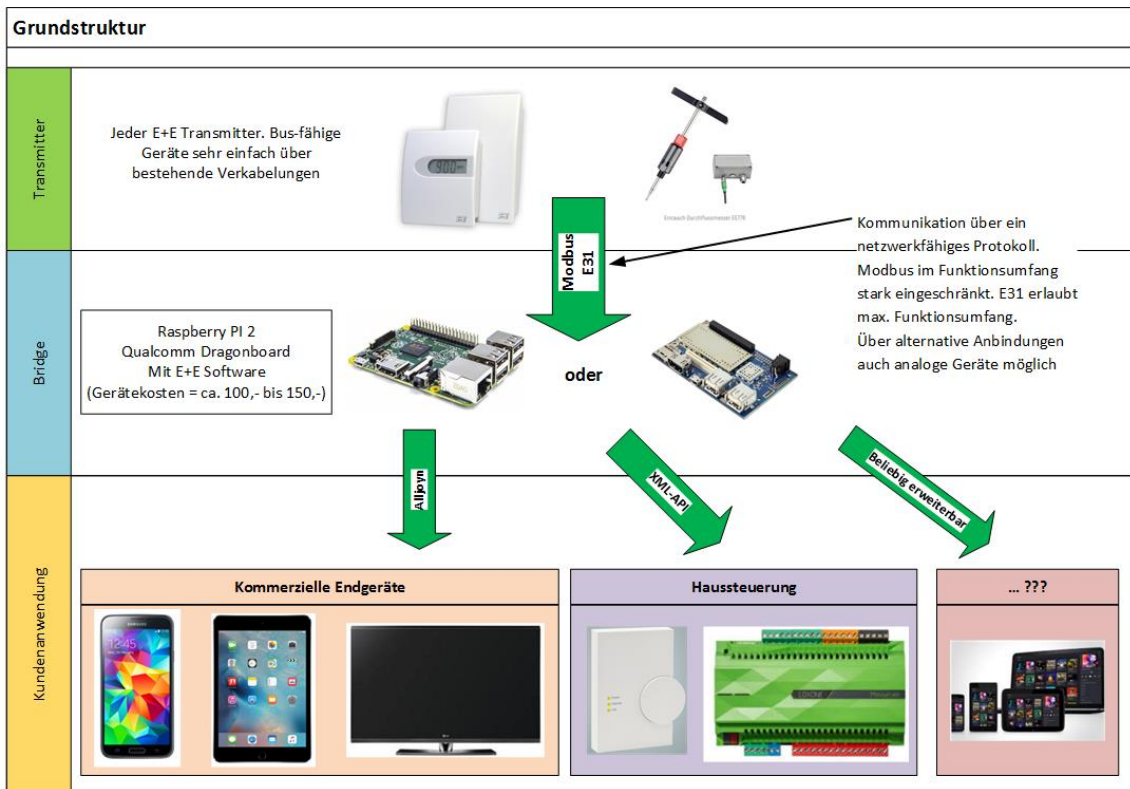


Abbildung 11 Übersicht über die prototypische Implementierung eines Sensornetzwerks auf Basis von Alljoyn

2.4 Modellbasierte Regelung

Der entwickelte Prototyp eines modellbasierten Reglers für Heizungs-, Lüftungs-, und Klimaregelung (HLK) ermöglicht es, den Energieverbrauch an den Bedarf und die vorhandenen Ressourcen im laufenden Gebäudebetrieb anzupassen und damit die Energieeffizienz des Gebäude bei Einhaltung der Komfortgrenzen zu steigern. Damit wird insgesamt Optimierung von Gebäuden, mit einem minimalinvasiven Aufwand, gefördert. Das im Reglerentwurf verwendete mathematische Modell basiert auf einem rigorosen Prozessentwurf. Dieser unterteilt den Prozess in drei Subsysteme, ein Modell für die Raumluftqualität mit der Zielgröße CO₂ Konzentration sowie der Stellgröße Zuluft - Volumenstrom, ein Modell für die Druckverluste im Gebäude-Rohrleitungssystem sowie einem Modell für die Lüftungsklappenstellung.

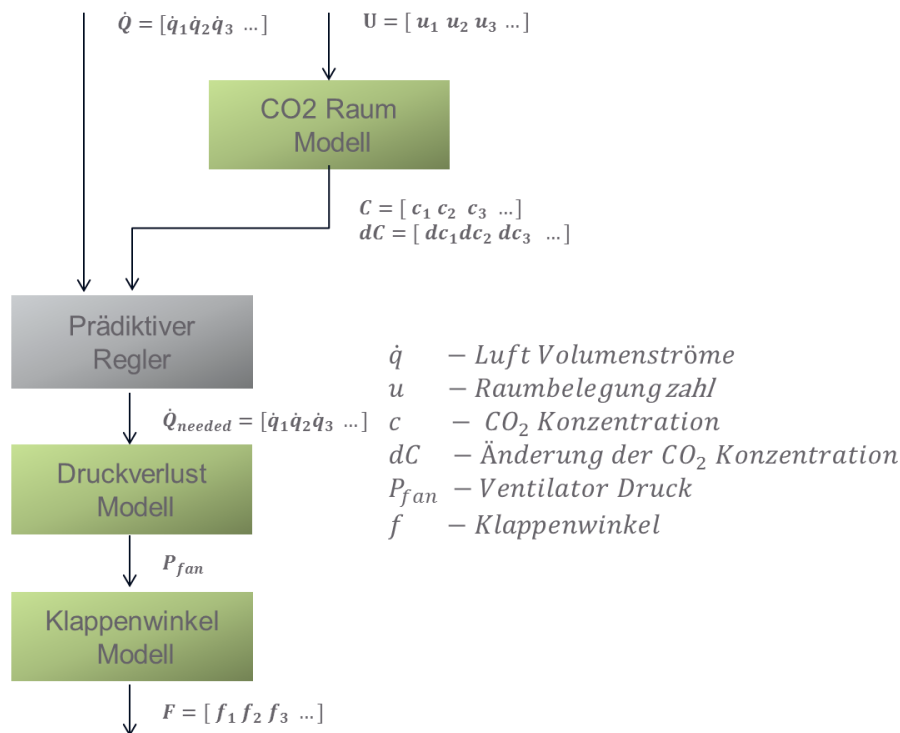


Abbildung 12: Regler Struktur – Einbettung der Teilmodelle des rigorosen Prozessmodells und Signalflussplan.

Gemeinsam bilden sie den Kern des modellprädiktiven Reglers. Dieser vereint in der implementierten Zielfunktion das Bestreben die optimale Lösung in Bezug auf Komfort (Güte der Raumluft) als auch in Bezug der Energieeffizienz (minimale elektrische Leistung des Zuluft Ventilators) zu finden. Die Balance zwischen diesen sich widersprechenden Anforderungen kann über eine Gewichtungsmatrix parametrisiert werden.

Aufgrund des stark nichtlinearen physikalischen Zusammenhangs der im Modell verwendeten Größen wurden im Regelalgorithmus unterschiedliche Solver zur Lösung des quadratischen Gütefunktionalen implementiert und in Simulationsstudien validiert. Es wurden sowohl die Regelgüte als auch der Komplexität und die Rechenzeit in Offlinestudien gegenübergestellt.

Nach Auswahl des bestgeeigneten Solvers wurde dieser in einer Online- Variante auf dem AutomationX Zielsystem aX5 implementiert. Die Zielkonfiguration umfasst sieben Seminar/Schulungsräume. Jeder Raum kann individuell über eigene Parametersätze optimiert und geregelt werden. Als messbare Störgröße dient die geschätzte Raumbelegungszahl je Raum und Stunde. Diese Information wird dem Regelalgorithmus prädiktiv als Raumbelengungs- Trajektorie zur Verfügung gestellt. Abbildung 13 zeigt die entwickelte Benutzeroberfläche für den Hardware-in-the-loop (HIL) Testlauf an der ENERGYbase.

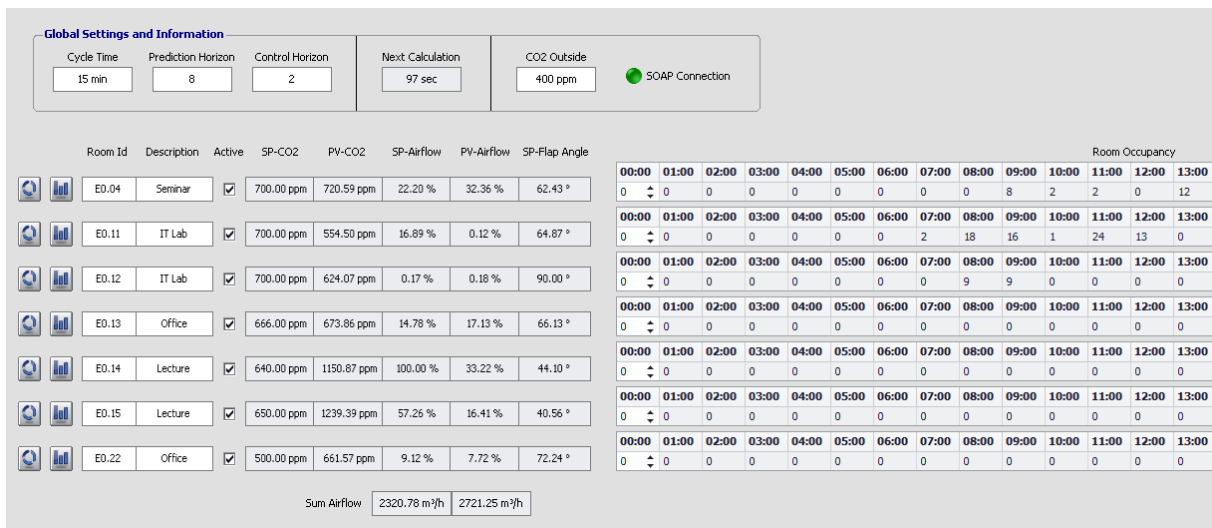


Abbildung 13: Bedienoberfläche für den ENERGYbase HIL Testlauf

2.5 Validierung der Testphase durch Nutzerbefragung

Eine Vollerhebung wurde angestrebt, um eine möglichst hohe Datenvalidität zu erreichen. In der ENERGYbase waren am Testtag in den Testräumen etwas über 100 Personen anwesend. Aufgrund dieser hohen Fallzahl konnten keine persönlichen Interviews durchgeführt werden. Ein schriftlicher teilstrukturierter Fragebogen wurde entwickelt (s. Anhang), der von den Testpersonen selbst ausgefüllt werden konnte. Der Fragebogen enthält standardisierte quantitative Fragen zur Beurteilung der Luftqualität und der Temperatur, um skalierbare und vergleichbare Aussagen über die diesbezüglichen Wahrnehmungen der Testpersonen zu erhalten. Zusätzlich wurden jeweils die Begründungen der quantitativen Beurteilungen in Form von offenen Fragen gestellt, um die den Beurteilungen zugrundeliegenden Wahrnehmungen genauer und tiefergehend zu verstehen.

Die Befragung wurde am Tag der Testung durchgeführt. Die Testpersonen wurden befragt, nachdem sie einen längeren Zeitraum in dem jeweiligen Testraum verbracht hatten. Hierbei wurden in erster Linie StudentInnen befragt. Sie hielten sich zumindest eineinhalb Stunden in den jeweiligen Testräumen im Rahmen ihrer Lehrveranstaltungen auf. Am Ende der Lehrveranstaltungen wurde der Fragebogen zum Selbstauffüllen verteilt und anschließend wieder eingesammelt. Damit wurde eine hohe Teilnehmerate sichergestellt. Zusätzlich zu den Lehrveranstaltungen fanden Befragungen der MitarbeiterInnen zweier Büroräume statt.

Insgesamt wurden in der ENERGYbase am Testtag 109 Personen befragt: FH-StudentInnen, LektorInnen und FH-MitarbeiterInnen. Der Großteil der Befragten war männlich (87%), 11% der Befragten waren Frauen, 2 Personen machten keine Angabe. Der größte Teil der TeilnehmerInnen war jung, 55% waren unter 25 Jahre alt, ein Viertel der Befragten zwischen 26 und 30 Jahren. Das Bildungsniveau war hoch, alle Befragten hatten zumindest Matura. Zwei Drittel der Befragten waren StudentInnen des Master-Studiengangs.

Eine gute Luftqualität war allen Befragten wichtig (20%) bzw. sehr wichtig (78%). Dies zeigt sich auch im Lüftungsverhalten zuhause: ein Viertel (24%) der Befragten stimmten der

Aussage "zuhause lüfte ich häufig" sehr zu, 51% stimmten dieser Aussage eher zu. Zwei Drittel der Befragten meinten, dass die Luftqualität in der ENERGYbase generell gut wäre.

Im Folgenden ist die Beurteilung der Luftqualität im Testzeitraum für den Raum, in dem man sich zum Testzeitpunkt aufhielt, dargestellt:

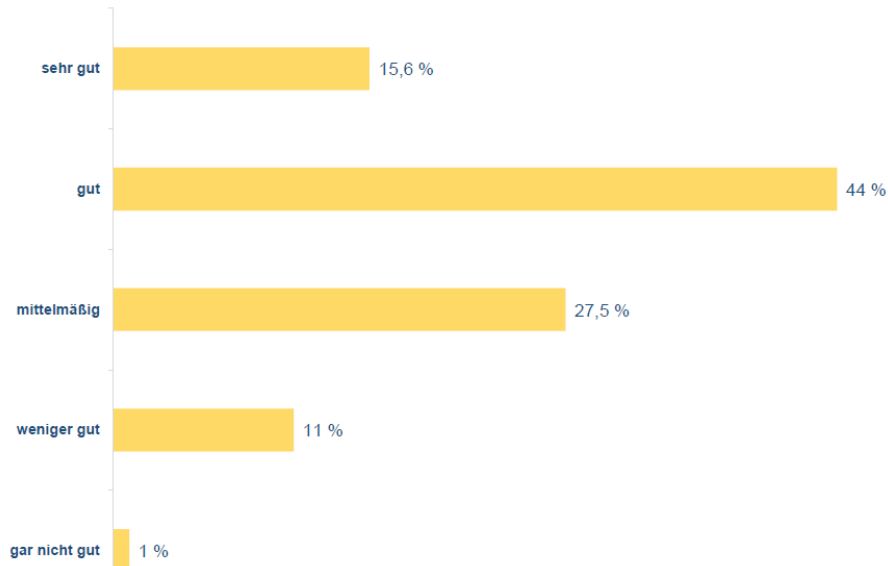


Abbildung 14 Beurteilung der Luftqualität zum Testzeitpunkt, n=109

60% der befragten Personen gaben an, dass die Luftqualität sehr gut bzw. gut war. Als Begründung bzw. Wahrnehmung wurde in erster Linie angegeben, die Luft sei "frisch", "nicht stickig" und "wie gelüftet", einige Personen spürten einen Luftzug.

Die Personen, die mit der Luftqualität weniger zufrieden waren, führten an, die Luft sei "stickig" und "trocken". Im Folgenden ist die Beurteilung der Luftfeuchtigkeit für den Raum, in dem man sich zum Testzeitpunkt aufhielt, dargestellt:

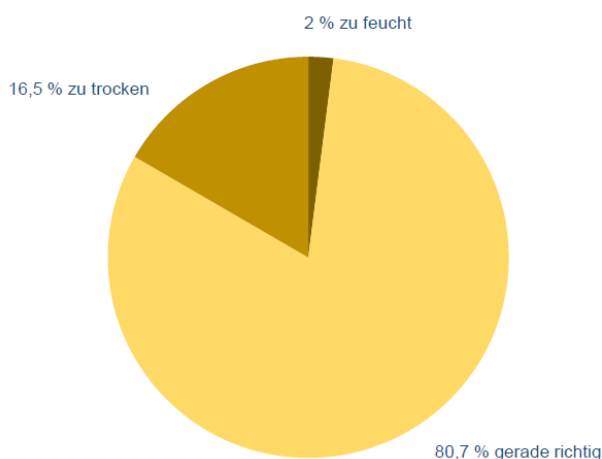


Abbildung 15 Beurteilung der Luftfeuchtigkeit zum Testzeitpunkt, n=109

Der größte Teil (80%) der befragten Personen gab an, dass die Luftfeuchtigkeit gerade richtig war. 17% waren der Meinung, dass die Luft zu trocken wäre, zu feucht war sie nur für 2%.

Die Testpersonen wurden gefragt, inwieweit sie eine Veränderung der Luftqualität gegenüber anderen Zeitpunkten (z.B. früheren Lehrveranstaltungen) in diesem Raum bemerkt hatten.

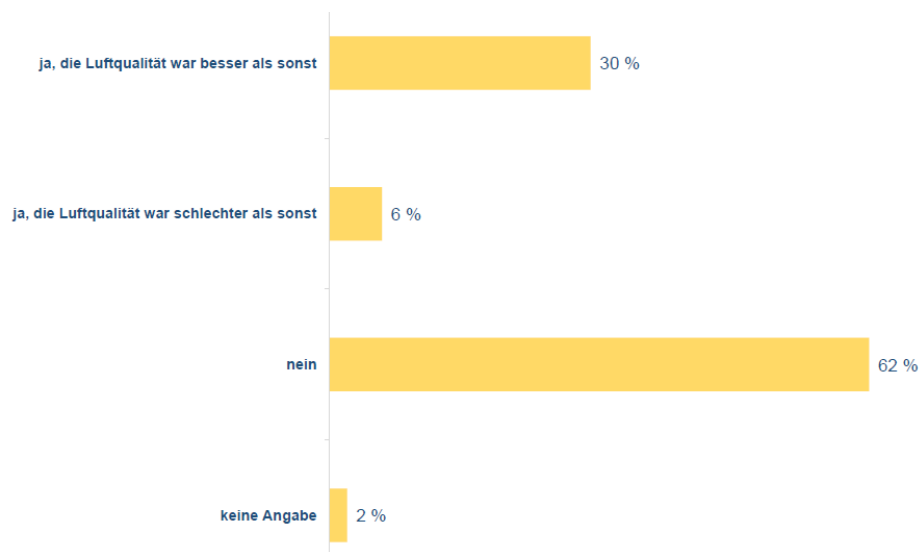


Abbildung 16 Beurteilung der Luftqualität gegenüber anderen Zeitpunkten, n=109

3 Schlussfolgerungen

Das Projekt zeigt, dass moderne Gebäude eine Fülle an Daten zur Verfügung stellen, die hauptsächlich für die Betriebsführung verwendet werden und direkt in die Regelung und Automation eingebunden sind. Sensorik in Anlagen und in den genutzten Zonen liefern die wesentlichen Informationen, mit denen Energieeffizienz und Komfort gewährleistet werden. Ein hoher Grad an Sensorikausstattung scheint sinnvoll und erforderlich, um komplexe Gebäude in Richtung von Komfort- und Effizienzzielen betreiben zu können. Darüber hinaus bietet die Sensorik in Kopplung mit der Modellierung die Möglichkeit, abgeleitete Informationen für den Gebäudebetrieb nutzbar zu machen. Der hier entwickelte Belegungsschätzer baut auf die Luftqualitätsmessung sowie die Volumenstrommessungen auf, um daraus die Raumbelugung für das technische Facility Management zur Verfügung stellen zu können.

Das in ARIS vorgestellte Konzept der modellbasierten Regelung ist ein Projekt zum Zwecke der Vertiefung in die fortgeschrittenen Methoden der Regelungstechnik sowie deren Implementierung in den laufenden Betrieb von Gebäuden. Die ARIS Ansätze sind für die Wirtschaft von besonderem Interesse, zumal diese minimalinvasiven Charakters sind und damit viel Potential aufweisen. Einen Prozess (konkret in diesem Projekt einen Gebäudeprozess – Lüftung) von „außen“ kosten-/energie-/zeitoptimal zu führen ist eine besondere Herausforderung. Die Praxis bedient sich oftmals pragmatischer Ansätze, die aus der Sicht der Energieeffizienz nicht immer erfolgreich zu werten sind. Oftmals sind es konventionelle Regelkreise (klassische Regelungstechnik) mit festvorgegebenen Ziel-/Sollwerten, die den Prozess bedienen – frei nach dem Motto: „einmal eingestellt und nie wieder verstellt“. Gebäudeprozesse werden in der Regel jedoch dynamisch beeinflusst/gestört (d.h.: durch Personen, elektrische Lasten, Sonneneinstrahlung, usw.) und bedürfen einer stetigen „Neuausrichtung“, um den Charakter eines energieeffizienten Betriebs zu wahren –

dies geschieht schließlich über die Regelkreise. Allerdings ist es undenkbar, dass das Gebäudemanagement den Gebäudebetrieb beispielsweise alle 15 Minuten „neu ausrichtet“ und die Ziel-/Sollwerte der am Prozess teilnehmenden Regelkreise neu einstellt. Auch stellt sich die Frage, nach welchen Überlegungen dies geschehen sollte. Schließlich ist die Erfahrung des Gebäudemanagements nicht immer zielführend. Die Forschung ist hier daher gefragt, Methoden anzudenken, die keinen großen Umbau der vorhandenen Infrastruktur fordern, zugleich aber die Ziele der Energieeffizienzsteigerung verfolgen – alles unter Einhaltung oder im allerbesten Fall einer Erhöhung des Komforts.

ARIS fasst die obig genannten Ziele mathematisch in Form von Modellen zusammen und drückt sie in Form von sogenannten Kostenfunktionen aus. Die Neuausrichtung des Prozesses geschieht auf Basis von Prozessabbildern, die dazu dienen das Prozessverhalten zur „Jetztzeit“ und in der Zukunft zu bewerten. Auf Basis dieser Simulation lässt sich schließlich der Prozess im Sinne des energieeffizienten Betriebs optimal ausrichten (d.h.: es wird vorausgesetzt, dass auf den Prozess Einfluss genommen werden kann). Damit lassen sich auch künftige, in der Regel bekannte Störungen (z.B.: Personen die einen Raum belegen, Wetter, usw.) in die Prozessoptimierung einbinden. Da ARIS nur fütierend auf die ohnehin vorhandenen Regelkreise einwirkt, ist damit auch der ursprünglich stabile Prozessbetrieb (gewährleistet durch die konventionelle Regelungstechnik) gewährleistet.

Wie man unschwer erkennen kann, ist der (modellbasierte) Prozessbetrieb von der Qualität des verwendeten Modells sowie der Verwendung von Optimierungsalgorithmen abhängig. Das Ziel ist daher, hohe Modellgüte zu erzielen. Des Weiteren können auch unterschiedliche Optimierungsalgorithmen geprüft werden. Für ARIS wurden physikalisch basierte Modellierungsansätze gewählt, wo die wesentlichen (und bekannten) Prozessdynamiken über Differential- und algebraische Gleichungen beschrieben werden. Die Validierung dieser Modelle mittels Prozessdaten stellte sicher, dass auch die Modellgüte passt. Allerdings wurden diesen Ansätzen die Grenzen aufgezeigt – nicht alle Prozesseffekte ließen sich hiermit einfangen und das hatte konsequenterweise einen Einfluss auf die Güte der Modelle. Auch ein Fine-Tuning der Modelle (die sich beispielsweise aus mehreren Teilmodellen zusammensetzen, wie das bei der Modellierung des Druckverlaufs des Lüftungssystems der Fall war) war aufgrund fehlender Sensorik (und damit ist in der Praxis immer zu rechnen) nicht immer möglich. Allerdings konnte trotz aller Schwierigkeiten eine gute Übereinstimmung mit dem realen Verhalten getroffen werden. Auch unterschiedliche Optimierungsalgorithmen wurden geprüft (d.h.: auf Gradienten basierende Methoden), deren Output stark vom Initialwert (die erste Vermutung für das Optimum) abhängig ist. Sicherlich sind auch evolutionäre Algorithmen eine Option, allerdings ist die Dauer bis zur Konvergenz dieser wesentlich länger als jene der Gradientenverfahren. Aus der Sicht der Echtzeitoptimierung stellen sie daher nicht wirklich eine Alternative dar. Der Vorteil ist dabei allerdings, dass die diese Methoden zum globalen Optimum hin konvergieren, die Gradientenverfahren zum lokalen Optimum.

Für künftige Projekte sollten daher auf Basis der in ARIS gesammelten Erkenntnisse sowie auch der Erkenntnisse aus Vorprojekten folgende Überlegungen getroffen werden:

- (1) Wie groß ist das Potential für den Einsatz vom modellbasierten Gebäudeenergiemanagement?
- (2) Steht ein rein physikalisch motivierter Modellierungsansatz dem Ertrag durch diesen Ansatz positiv gegenüber (Personalaufwand für Modellierung und Validierung vs. Ertrag)?
- (3) Wäre ein rein datenbasierter Modellierungsansatz sinnvoller (d.h.: kein Bezug zur eigentlich Funktionsweise des Prozesses von Interesse), sofern die notwendige Sensorik vorhanden wäre?
- (4) Wie sieht das Verhältnis zum Ertrag einer rein datenbasierten Modellierung aus, wo auch ein Nachrüsten mit weiterer Sensorik notwendig wäre?
- (5) Ist auch eine Kombination von datenbasierter und physikalisch motivierter Modellierung denkbar (d.h.: Hybridmodelle)?

Die ARIS Projektergebnisse richten sich in erster Linie an Gebäudeautomatisierungsfirmen sowie HKL Systemintegratoren, für die es denkbar wäre, diese Ansätze in ihr Produktportfolio aufzunehmen bzw. dieses erweitern möchten. Da das ARIS Konzept auf Modelle setzt, könnten diese auch mit einigen wenigen Veränderungen/Anpassungen durchaus auch für andere Zwecke eingesetzt werden (z.B.: Beobachterkonzepte, Predictive Maintenance). Für HKL Anlagenbetreiber wäre dies ein guter Ansatz Fehler frühzeitig zu erkennen und zu reagieren. Auch könnten die in ARIS entwickelten Algorithmen im Rahmen eines Softwaretools zur unterstützenden Betriebsführung genutzt werden. Dadurch hätte der Anlagenbetreiber die Möglichkeit die „vorgeschlagenen“ Prozessführungstrajektorien zu akzeptieren oder einfach zu ignorieren, falls die Berechnung dieser nicht seinen Vorstellungen/Erfahrungen entspricht. Zusätzliche ergäbe sich allerdings die Möglichkeit, dass auch der Anlagenbetreiber dadurch „mitlernt“ und damit ein „out-of-the-box“ Denken für den Prozessbetrieb gefördert wird. Weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben sich für die Prozesse der energieintensiven Industrie, für welche eine ähnliche Methodik anvisiert werden kann, sowie Teilmodelle verwendet werden könnten. Lüftungsprozesse unter der Zuhilfenahme von Modellen für Smart Grid Anwendungen wären ebenso denkbar (z.B.: Lastverschiebungszwecke, Power-2-X).

Das Prinzip in ARIS basiert auf einem virtuellen Abbild des realen Betriebs, womit der Betriebsbereich mathematisch mit hoher Güte abgebildet werden kann. Damit ergibt sich die Möglichkeit voranzuplanen und rechtzeitig den Prozess auszurichten sowie rechtzeitig und damit energie- und kostengünstig den Prozess in die „richtige Richtung zu führen“. Die Qualität dieser kostengünstigen Prozessführung hängt maßgeblich von der Qualität der Modellierung ab. Ein besseres Modell führt konsequenterweise zu einem besseren Prozessführungsverhalten. Bei dem hier vorgestellten Ansatz handelt es sich um eine Option mit minimalinvasiven Aufwand direkt in den Betrieb eines Gebäudes einzugreifen. Aus der Sicht der Implementierung bedeutet es, dass neben Softwarelizenzen, mit einem geringen IT Aufwand (Server) zu rechnen ist sowie mit Personalkosten für die Einrichtung der Regelungsalgorithmen (Anpassung an das zu optimierende Gebäudesystem). Auch Teile des ARIS Konzepts können eigenständig vermarktet werden. So ist beispielsweise das Differenzdruckmodell, das einen wesentlichen Anteil am Gesamtregelkonzept ausmacht, vom Gesamtkonzept unabhängig einsetzbar (z.B.: als Tool für die minimalinvasive Kontrolle und

Beobachtung des Druckabfalls anhand von gemessenen Volumenströmen in den unterschiedlichen Zweigen des Lüftungssystems). Insbesondere für Gebäudemanager kann dies ein nützliches Werkzeug sein, die aktuelle Lage des Lüftungssystems besser zu bewerten und gegebenenfalls zur Laufzeit anzupassen. Die weiteren Teile (Belegungsschätzung, modellbasierte Regelung) vervollständigen und automatisieren damit die Ertragskontrolle des Lüftungssystems.

Die Verwertung der Projektergebnisse besteht hauptsächlich in der Bereitstellung von entwickelten, innovativen Energiemanagement-Lösungen für die Gebäudetechnik. Verbesserte Regelungen für kommerzielle HLK-Gewerke können dazu beitragen, dass insbesondere der Lüftungsbetrieb entsprechend der Gebäudebelegung effektiv angepasst werden kann. Die Weiterentwicklung des Energiemanagements durch Low-Cost-Leistungsverbesserungen, kann zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den Mitbewerbern führen. Der Return on Investment (ROI) wird auf der Grundlage von Erfahrungswerten und Ergebnissen, die sich aus künftigen Kunden- und Forschungsprojekten mit der Industrie ergeben. Für eine erste Abschätzung des ROIs – ein Rechenbeispiel:

Im Gesamtgebäudebestand beträgt der Energieverbrauch durchschnittlich 280 kWh/m² (in ganz Europa für Nichtwohngebäude); eine mögliche Kosteneinsparungen im Lüftungssystemen von 15% und durchschnittlichen 40% des Gesamtenergieverbrauchs für die Belüftung, berechnet sich somit für ein typisches Bürogebäude mit 5.000 m² als angenommenes Modellgebäude zu $(280 \text{ kWh/m}^2 \times 40\% \times 15\% \times 5.000 \text{ m}^2) = 84.000 \text{ kWh}$ Einsparpotential - unter der Annahme der durchschnittlichen Kosten pro kWh von 0,06 € würde dies in 5.040 € Einsparungen jährlich resultieren. Bei einer 3-Jahres-Amortisation, sind es rund 15.120 € die dem Bauherren schlussendlich für Sanierungszwecke zur Verfügung stehen. Ausgehend von diesen Werten kann der Implementierungsaufwand einer solchen Regelung gegenübergestellt werden.

Aus vergleichbaren Projekten und dem Lizenzmodell für modellbasierte Regelsysteme sind die Kosten bekannt und können auf die angeführte Gebäude- und damit Projektgröße umgelegt werden. Bei der Betrachtung des ROI wird allerdings davon ausgegangen, dass bereits ein bestehendes Gebäudeleitsystem vorhanden ist oder im Rahmen einer Modernisierung ohnehin eingebaut wird und somit nur der Zusatzaufwand für die modellbasierte Regelung betrachtet wird. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass ein modernes Gebäudeleitsystem über eine Datenbank zur Aufzeichnung und Archivierung der Daten und über Standardschnittstellen (z.B. OPC UA, BACnet oder Datenbankschnittstellen) verfügt, damit die Ist- und Stellwerte zum modellbasierten Regler übertragen werden können. Darüber hinaus unterliegt die Betrachtung der Annahme, dass der modellbasierte Regler weitgehend allgemeingültig ist und durch Variation der Parameter an das jeweilige Gebäudemodell anpassbar ist.

Softwarekosten:

- Lizenz: € 7.500.- (Basislizenz + Regler)
- Schnittstelleninstallation: € 2.500.-

Dienstleistungskosten:

- Parametrierung Regler / Modellanpassung: € 16.000.-
- HIL Test, IBN: € 6.400.-
- Unter den o.a. Annahmen würde sich ein ROI von 6,4 Jahren ergeben.

Die Berechnung zeigt auch, dass eine rasche Amortisation nur dann gegeben ist, wenn sowohl die Sensoren bereits vorhanden sind (oder diese ohnehin im Rahmen einer Modernisierung eingebaut werden und damit nicht in die Betrachtung des Returns of Investment (ROI) eingehen) als auch das Gebäudeleitsystem auf dem Stand der Technik ist.

Ist das nicht der Fall, so müssen diese Faktoren nicht zusätzlich betrachtet werden:

Software:

- Zusatzlizenzen und Einrichtung der Schnittstellen beim bestehenden Gebäudeleitsystem: € 15.000.-

Hardware:

- Server mit Datenbank: € 5.000.-
- Sensoren: Material: € 180 pro Sensor (ohne Einbau und Verkabelung), bei 100 Räumen: € 18.000.-

Anhand dieser Zahlen ist bereits ersichtlich, dass ein sinnvoller ROI dann gegeben ist, wenn die modellbasierte Regelung als Add-on zu bereits bestehenden modernen Systemen und vollausgestatteten Räumen hinzukommt.

Als Einspareffekt bei den Errichtungskosten für das o.a. Modellgebäude kann allerdings noch angeführt werden, dass durch die Nutzung der modellbasierten Regelung die Verwendung von Motorklappen in der Lüftungsanlage obsolet werden und damit Minderkosten von ca. € 11.000.- gegengerechnet werden können. Damit können im Fall einer Nachrüstung die Investitionskosten der Sensoren nahezu kompensiert werden.

Die Befragungen der NutzerInnen der ENERGYbase zeigen, dass mit dem ARIS Regler Verbesserungen in der Luftqualität des Testgebäudes erzielt werden konnten. Ein Faktor, der die diesbezügliche subjektive Zufriedenheit der NutzerInnen besonders beeinflusst, ist die Personendichte in einem Raum: je höher, desto schwerer konnte eine zufriedenstellende Luftqualität über einen längeren Zeitraum hergestellt werden.

Die wahrgenommene Raumtemperatur ist stark von individuellen Faktoren bestimmt und wird sehr unterschiedlich bewertet. Durch das ARIS System wurde in der ENERGYbase nur zu einem geringen Ausmaß die Zufriedenheit mit der Raumtemperatur erhöht.

Aus den Rückmeldungen der Benutzer ergab sich, dass 30% der Befragten eine verbesserte Luftqualität durch das Experiment im Vergleich zur üblichen Luftqualität wahrgenommen haben. Dies deckt sich mit den Aufzeichnungen aus der Gebäudeleittechnik bezüglich der verteilten Volumenströme (siehe Deliverable D5.2 „Evaluierungsbericht“): der ARIS Regler ist wesentlich besser in der Lage, die Luftströme angepasst an die Anforderungen zu verteilen und dabei noch den Gesamtvolumenstrom zu optimieren als das ein klassischer linearer Regler vermag.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Entwicklungen im Projekt ARIS haben einen starken Schwerpunkt in der Modellierung: sowohl für die Regelung bzw. das Energiemanagement als auch für die Belegungsschätzung ist eine Mischung aus physikalischer und datengetriebener Modellierung erforderlich. Es hat sich gezeigt, dass eine modellbasierte Regelung klare Vorteile gegenüber klassischer Regelungen hat, einerseits weil die Effizienz erhöht werden kann, andererseits aber auch, weil eine modellbasierte Regelung dem Nutzer (z. B. dem Facility Manager) ganz andere Möglichkeiten zur Steuerung des Gebäudebetriebs bieten. Eine globale Vorgabe über den Gesamtenergieverbrauch ist mit modellbasierter Regelung über die Definition einer Zielfunktion möglich; der unterlagerte Optimierer versucht dann selbstständig, diese Vorgabe bestmöglich zu erfüllen, ohne dass weitere Eingriffe des Nutzers erforderlich sind. In klassischen Regelungen ist die Effizienz intrinsisch in Regelstrategien gegeben, kann aber nicht explizit beeinflusst werden.

Die Einführung von virtuellen Sensoren wie dem Belegungsschätzer zeigt, was mit den bereits heute vorhandenen Daten durch die Verwendung von Sensor Fusion möglich ist: durch Modellierung und Weiterverarbeitung kann ein zusätzlicher Sensor ohne Installations- oder Hardwareaufwand hinzugefügt werden. Das Konzept ist erweiterbar und bietet interessante neue Informationsquellen für das Facility Management.

Durch die Modellierung der Druckverhältnisse im Lüftungssystem und das daraus resultierende Druckabfalls-Modell für Lüftungsanlagen wurde gezeigt, dass die Modellierung direkte Auswirkung auf die Gestehungs- und Installationskosten der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) hat: ist der Druckabfall im Lüftungssystem bekannt, kann dadurch die Regelung der Luftströme in die Räume durch kostengünstigere Motorklappen anstatt von Volumenstromreglern erfolgen, was etwa die Hälfte der Hardwarekosten für diese Komponenten einspart.

Das Projekt hat allerdings auch gezeigt, dass der größte Aufwand in der mathematischen Modellierung des zu optimierenden Prozesses liegt, und dass dieser Aufwand im derzeitigen Bauprozess kostenmäßig schwer abzubilden ist. Hieraus ergeben sich zwei weitere Forschungsrichtungen. Zum einen ist ein Übergang von physikalischer Modellierung (white box) auf rein datengetriebene Modellierung (black box) – bzw. eine Mischform aus beiden (grey box) – eine Möglichkeit, den Modellierungsaufwand zu begrenzen. Die aufgezeichneten Betriebsdaten müssen dafür bereinigt und aufbereitet werden, sodass sie einer teilautomatischen Modellierung (fitting) zugeführt werden können.

Zum anderen spielt die Etablierung des Building Information Model (BIM) im Bauprozess eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung von Daten. Das Ziel sollte sein, die Daten des Gebäudes, die bei der Planung anfallen, auch für die TGA und den Betrieb des Gebäudes weiter zu nutzen und den Gebäudebetrieb in Richtung Computer Aided Facility Management zu treiben. Für die Modellierung würde diese bedeuten, dass die geometrischen Daten der Lüftungsanlage direkt aus den 3D-Plandaten entnommen und für Regelung und Modellierung verwendet werden können. Im Weiteren können dann auch Komponentenparameter

(Leistungen, Temperaturen) im BIM hinterlegt werden, bis hin zu einer Abbildung der Betriebsdaten des Gebäudes und einer Verknüpfung mit den BIM-Daten.

Die gezeigten Methoden sind geeignet, in Demonstrationsvorhaben eingesetzt zu werden, um deren Anwendbarkeit zu belegen. Zu klären ist hierbei, wie sie in den Planungs-, Bau-, und Betriebsprozess einzugliedern sind, welche Kompetenzen hier zusätzlich erforderlich sind und ob sich die Methoden tatsächlich wirtschaftlich abbilden lassen.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung des Endenergieverbrauchs nach Sektor (links) [16] und Verbraucher in Gebäuden (rechts) [52] in der Europäischen Union.	14
Abbildung 2: Simulationsstudie.....	18
Abbildung 3: Entwicklung der modellbasierten Regelung in ARIS - Schritt für Schritt.	20
Abbildung 4: Schematische Darstellung der in ARIS gewählten Methodik - Modellbasierte Regelung für Gebäudeenergiesysteme	20
Abbildung 5: Optimale Regelung - Implementierung fortgeschrittener Methoden der Regelungstechnik für ARIS	21
Abbildung 6: Bilanzgleichung für die CO ₂ -Konzentration in einem Raum zur Belegungsschätzung	22
Abbildung 7: Blockdiagramm des Algorithmus zur Belegungsschätzung	23
Abbildung 8: Beispiel eines Ergebnisses der Belegungsschätzung im Vergleich zur manuellen Erfassung in einem Seminarraum der FH-Technikum Wien, im ENERGYbase Gebäude.	24
Abbildung 9: Ergebnis der Belegungsschätzung.....	25
Abbildung 10: Modellsynthese für die Differenzdruckverteilung - Differenzdrücke für die einzelnen Abschnitte und Volumenströme werden prozedural gerechnet.	27
Abbildung 12 Übersicht über die prototypische Implementierung eines Sensornetzwerks auf Basis von Alljoyn	28
Abbildung 10: Regler Struktur – Einbettung der Teilmodelle des rigorosen Prozessmodells und Signalfussplan.	29
Abbildung 11: Bedienoberfläche für den ENERGYbase HIL Testlauf	30
Abbildung 14 Beurteilung der Luftqualität zum Testzeitpunkt, n=109.....	31
Abbildung 15 Beurteilung der Luftfeuchtigkeit zum Testzeitpunkt, n=109	31
Abbildung 16 Beurteilung der Luftqualität gegenüber anderen Zeitpunkten, n=109	32

5.2 Literaturverzeichnis

- [1] J. Laustsen, „Energy Efficiency Requirements in Building Codes, Energy Efficiency Policies for New Buildings“, S. 85, 2008.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, und C. Pout, „A review on buildings energy consumption information“, *Energy Build.*, Bd. 40, Nr. 3, S. 394–398, 2008.
- [3] IPCC, *Climate Change 2007 - Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, 2007.
- [4] E. Commission, *Europe’s energy position: markets & supply*. Publications Office of the European Union 2010., 2010.
- [5] L. Halonen, E. Tetri, und P. Bhusal, Hrsg., *Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings*. Espoo 2010, 2010.

- [6] A. Dounis und C. Caraiscos, „Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment-A review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 13, S. 1246–1261, 2009.
- [7] „Energy efficiency trends in buildings in the EU – lessons from the ODYSSEE MURE project Enerdata“. 2012.
- [8] „Federal Ministry of Economy, Family and Youth; , Energiestatus Österreich 2011“ .
- [9] B. Schwarze, „Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bauwesen“. ESPAN, 30-März-2010.
- [10] L. Itard, *Building Renovation and Modernisation in Europe : State of the art review ERABUILD Final Report*. Delft, The Netherlands, 2008.
- [11] McKinsey & Company, „Kosten und Potentiale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“. Sektorperspektive Gebäude, 2007.
- [12] S. Katipamula und M. R. Brambley, „Review Article: Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems—A Review, Part I“, *HVACR Res.*, Bd. 11, Nr. 1, S. 3–25, 2005.
- [13] uponor, *Praxishandbuch der technischen Gebäudeausrüstung (TGA): Band 2: Gebäudezertifizierung, Raumluft- und Klimatechnik, Energiekonzepte mit thermisch aktiven Bauteilsystemen, Geplante Trinkwasserhygiene*. Beuth Verlag, 2013.
- [14] T. Ferhatbegović, „Model Based Control for Building Management Systems“, Vienna University of Technology, Vienna, 2012.
- [15] G. Zucker, T. Ferhatbegović, und D. Bruckner, „Building automation for increased energy efficiency in buildings“, in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2012*, 2012, S. 1191–1196.
- [16] G. Escrivá, I. Segura-Heras, und M. Alcázar-Ortega, „Application of an energy management and control system to assess the potential of different control strategies in HVAC systems“, *Energy Build.*, Bd. 42, Nr. 11, S. 2258–2267, 2010.
- [17] F. K. Fong, V. I. Hanby, und T. T. Chow, „HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming“, *Energy Build.*, Bd. 38, Nr. 3, S. 220–231, 2006.
- [18] C. Legris, N. Milesi Ferretti, und D. Choinière, „Commissioning Overview, a Report of Cost-Effective Commissioning of Existing and Low Energy Buildings“. 10-Jän-2010.
- [19] D. F. I. F. Jacob, „Gebäudebetrieboptimierung Verbesserung von Optimierungsmethoden und Optimierung unter unsicheren Randbedingungen“, Fraunhofer-Verl., Stuttgart, 2012.
- [20] C. Neumann, „Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Deutschland, 2011.
- [21] H. Hens, „Thermal comfort in office buildings: Two case studies commented“, *Build. Environ.*, Bd. 44, Nr. 7, S. 1399–1408, 2009.
- [22] G. Wenqi und M. Zhou, „Technologies toward thermal comfort-based and energy-efficient HVAC systems: A review“, *IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, S. 3883–3888, 2009.
- [23] A. P. Wemhoff und M. V. Frank, „Predictions of energy savings in HVAC systems by lumped models“, *Energy Build.*, Bd. 42, Nr. 10, S. 1807–1814, 2010.
- [24] Ashrae, *2008 ASHRAE Handbook : HVAC systems and equipment*. Atlanta Ga.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers., 2008.
- [25] M. Ali und V. Vuković, „Methodology for Automated Optimization of HVAC System Configurations“, *41st Int. Congr. Heat. Refrig. Air Cond. Belgrade*, 2010.
- [26] C. P. Underwood, *HVAC Control Systems: Modelling, Analysis and Design*. Spon Press, 1999.
- [27] Ashrae, *2007 ASHRAE Handbook : HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers., 2007.
- [28] T. Ferhatbegovic, G. Zucker, und P. Palensky, „An unscented Kalman filter approach for the plant-model mismatch reduction in HVAC system model based control“, in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, S. 2180 –2185.

- [29] T. Ferhatbegović, G. Zucker, und P. Palensky, „Model Based Predictive Control for a Solar-Thermal System“, in *Proceedings of 10th IEEE AFRICON*, 2011.
- [30] G. Zucker, P. Palensky, F. Judex, C. Hettfleisch, R.-R. Schmidt, und D. Basciotti, „Energy aware building automation enables Smart Grid-friendly buildings“, *E Elektrotechnik Informationstechnik*, Bd. 129, Nr. 4, S. 271–277, 2012.
- [31] A. Afram und F. Janabi-Sharifi, „Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC)“, *Build. Environ.*, Bd. 72, S. 343–355, Feb. 2014.
- [32] J. Cigler, D. Gyalistras, J. Siroky, V.-N. Tiet, und L. Ferkl, „Beyond theory: the challenge of implementing Model Predictive Control in buildings“, gehalten auf der Proceedings of the 11th REHVA World Congress Clima 2013, Prague, Czech Republic, 2013.
- [33] J. Hu und P. Karava, „Model predictive control strategies for buildings with mixed-mode cooling“, *Build. Environ.*, Bd. 71, S. 233–244, Jän. 2014.
- [34] M. Avci, M. Erkoç, A. Rahmani, und S. Asfour, „Model predictive HVAC load control in buildings using real-time electricity pricing“, *Energy Build.*, Bd. 60, S. 199–209, Mai 2013.
- [35] J. Siroký, F. Oldewurtel, J. Cigler, und S. Prívvara, „Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system“, *Appl. Energy*, Bd. 88, Nr. 9, S. 3079–3087, Sep. 2011.
- [36] F. Oldewurtel u. a., „Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control“, *Energy Build.*, Bd. 45, S. 15–27, Feb. 2012.
- [37] J. D. Álvarez, J. L. Redondo, E. Camponogara, J. Normey-Rico, M. Berenguel, und P. M. Ortigosa, „Optimizing building comfort temperature regulation via model predictive control“, *Energy Build.*, Bd. 57, S. 361–372, Feb. 2013.
- [38] V. Adetola, D. DeHaan, und M. Guay, „Adaptive model predictive control for constrained nonlinear systems“, *Syst. Control Lett.*, Bd. 58, Nr. 5, S. 320–326, Mai 2009.
- [39] R. Díaz-Mendoza und H. Budman, „Structured Singular Valued based robust nonlinear model predictive controller using Volterra series models“, *J. Process Control*, Bd. 20, Nr. 5, S. 653–663, Juni 2010.
- [40] L. Grüne und J. Pannek, *Nonlinear Model Predictive Control*. London: Springer-Verlag, 2011.
- [41] R. Bartlett, M. A. Halverson, und D. L. Shankle, „Understanding Building Energy Codes and Standards“, *Pac. Northwest Natl. Lab.*, 2003.
- [42] V. Vakiloroyaya, B. Samali, A. Fakhari, und K. Pishghadam, „A review of different strategies for HVAC energy saving“, *Energy Convers. Manag.*, Bd. 77, S. 738–754, Jän. 2014.
- [43] A. Holzmann, H. Adensam, K. Kratena, und E. Schmid, „Decomposing final energy use for heating in the residential sector in Austria“, *Energy Policy*, Bd. 62, S. 607–616, Nov. 2013.
- [44] L. Kranzl u. a., „Renewable energy in the heating sector in Austria with particular reference to the region of Upper Austria“, *Energy Policy*, Bd. 59, S. 17–31, Aug. 2013.
- [45] C. F. McQuiston, *Heating, Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design*. Wiley, 2004.
- [46] V. L. Erickson, M. A. Carreira-Perpinan, und A. E. Cerpa, „OBSERVE: Occupancy-based system for efficient reduction of HVAC energy“, in *10th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2011, S. 258–269.
- [47] M. Merdan, M. Vallee, W. Lepuschitz, und A. Zoitl, „Monitoring and diagnostics of industrial systems using automation agents“, *Int. J. Prod. Res.*, Bd. 49, Nr. 5, S. 1497–1509, 2011.
- [48] The Climate Group, „Smart Report 2020. Enabling the low carbon economy in the information age“. 2008.
- [49] C. Wojek, K. Nickel, und R. Stiefelhagen, „Activity Recognition and Room-Level Tracking in an Office Environment“, in *2006 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2006, S. 25–30.

- [50] Y. Ma, A. Kelman, A. Daly, und F. Borrelli, „Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage: Modeling, Stimulation, and Experiments“, *IEEE Control Syst.*, Bd. 32, Nr. 1, S. 44–64, 2012.
- [51] S. Soucek und G. Zucker, „Current developments and challenges in building automation“, *E Elektrotechnik Informationstechnik*, Bd. 129, Nr. 4, S. 278–285, Juni 2012.