

Optimierung der Gebäudeenergieeffizienz durch modellbasierte Energiestrom- analyse mit non-invasiver Sensorik

OptiMAS

F. Wenig, C. Seidl, B. Derler,
D. Rixrath, C. Heschl,
A. Treytl, S. Cerimovic,
T. Glatzl, G. Kovacs, T. Sauter,
L. Krammer, K. Diwold,
D. Lechner, D. Molnar,
S. Tkauz, S. Cejka, A. Lugmaier

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

6/2021

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

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

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

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Optimierung der Gebäudeenergieeffizienz durch modellbasierte Energiestromanalyse mit non-invasiver Sensorik

OptiMAS

Florian Wenig, Christian Seidl, Bernhard Derler,
Doris Rixrath & Christian Heschl
Forschung Burgenland GmbH, Fachhochschule Burgenland

Albert Treytl, Samir Cerimovic, Thomas Glatzl,
Gabor Kovacs & Thilo Sauter
Dept. für Integrierte Sensorsysteme, Donau-Universität Krems

Lukas Krammer, Konrad Diwold, Daniel Lechner,
David Molnar, Simon Tkauz, Stephan Cejka & Andreas Lugmaier
Siemens Aktiengesellschaft Österreich

Pinkafeld/Wr. Neustadt/Wien, September 2020

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). 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 BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.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 Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	8
1. Ausgangslage	9
2. Projektinhalt	11
2.1. Non-invasive Temperaturmessung	11
2.1.1. Systematischer Fehler der non-invasiven Temperaturmessung	11
2.1.2. Charakterisierung der Temperatur-Abweichungen	12
2.1.3. Numerische Parameterstudien	13
2.1.4. Korrekturalgorithmen der non-invasiven Temperaturmessung	16
2.1.5. Laborprüfstand an der FH Burgenland	18
2.1.6. Feldtests im Testgebäude Energetikum	19
2.2. Non-invasive Durchflussmessung mittels thermischen Messverfahrens	22
2.2.1. Messkonzept auf Basis von Sensorfusion	22
2.2.2. Simulation rein thermisch basierter Durchflussmessung	23
2.2.3. Schlussfolgerung aus Simulationsergebnissen	26
2.3. Systemarchitektur	27
2.3.1. Sensor-Layer	27
2.3.2. Edge-Layer	28
2.3.3. Cloud-Layer	28
2.4. Fehlererkennungs- und Diagnose-Verfahren	29
2.4.1. Schwingungserkennung	30
2.4.2. Soll-/Istwert Vergleich	31
2.4.3. Analyse der Wärme/Kälteabgabe	31
2.4.4. Analyse der Betriebszeit	31
2.4.5. Identifizierung von Netzwerkausfällen	31
2.4.6. Identifizierung von Sensorausfällen	32
3. Ergebnisse	33
3.1. Evaluierungen in Laborumgebung	33
3.1.1. Non-invasive Temperaturmessung	33
3.1.2. Non-invasive Durchflussmessung	36
3.2. Evaluierungen in Testgebäuden	42

3.2.1.	Non-invasive Temperaturmessung	43
3.2.2.	Non-invasive Durchflussmessung.....	45
3.2.3.	Fehlererkennungs- und Diagnose-Verfahren	50
3.3.	Ökonomische Konzeptbeurteilung.....	55
3.3.1.	Zielsetzung.....	55
3.3.2.	Randbedingungen und Parametervariation.....	56
3.3.1.	Ergebnisse.....	57
3.4.	Ökologische Konzeptbeurteilung	59
3.4.1.	Ziel und Untersuchungsrahmen	59
3.4.2.	Datenerhebung.....	60
3.4.3.	Berechnung der Umweltauswirkungen.....	61
3.4.4.	Ergebnisse der Wirkbilanz	61
4.	Schlussfolgerungen.....	64
5.	Ausblick und Empfehlungen.....	65
6.	Verzeichnisse.....	67
6.1.	Abbildungsverzeichnis.....	67
6.2.	Tabellenverzeichnis	70
6.3.	Literaturverzeichnis.....	71
7.	Anhang.....	73

Kurzfassung

Gebäudetechnische Anlagen laufen oft jahrelang unbemerkt in suboptimalen Betriebszuständen und verursachen dadurch erhebliche Betriebskosten und Ressourcenverschwendung. Mit Ausnahme des Totalversagens von Systemen (z.B. Raum wird nicht mehr geheizt) bleiben Optimierungspotentiale weitgehend unbemerkt. Aufgrund des hohen Anteils des Gebäudesektors am Gesamtenergieverbrauch der europäischen Union, bietet ein intelligentes Monitoring- und Analysesystem zur Erkennung von ineffizienten Betriebszuständen ein enormes Potential zur Erreichung der gesellschaftspolitischen Ziele in Bezug auf Ressourceneinsparungen und Emissionsreduktion.

OptiMAS verfolgt den Ansatz, bestehende Gebäude, die bereits mit gebäudetechnischen Anlagen ausgestattet sind, unabhängig von den darin verwendeten Automationskomponenten zu überwachen, die erfassten Daten zu analysieren und Parameter für eine Optimierung des Gebäudebetriebs abzuleiten. Das entwickelte Konzept kombiniert eine non-invasive Messung der Energieströme in hydraulischen Leitungen mit intelligenten Algorithmen zur Messdateninterpretation und Bewertung sowie einer flexiblen, cloudbasierten Systemarchitektur zur Datenübertragung, -auswertung und -bereitstellung.

Im Zuge des Projektes konnten dabei wertvolle Beiträge zur Methodenentwicklung und Einsatzfähigkeit von non-invasiver Sensorik zur Messung von Temperatur und Durchfluss in hydraulischen Leitungen generiert werden. Durch die Entwicklung von Kompensations-Algorithmen für Temperatur-Anlegesensoren konnte beispielsweise der Fehler in Bezug auf die invasive Fluidtemperatur maßgeblich reduziert und das Einsatzspektrum auch auf Kunststoffrohre erweitert werden. Ergänzend wurde ein aktiv beheizter, kostengünstiger und non-invasiver Strömungssensor entwickelt, für den eine relative Genauigkeit von unter 3 % unter Laborbedingungen nachgewiesen werden konnte. Zudem wurden sensorgestützte und modellbasierte Fehlererkennungs- und Diagnoseverfahren entwickelt und in Feldtests prototypisch demonstriert. Abschließend erfolgte eine multidimensionale Evaluierung des entwickelten Konzeptes im Rahmen einer Wirtschaftlichkeits- und Nachhaltigkeitsanalyse. Die untersuchten Szenarien zeigen, welchen Einfluss etwa Gebäudegröße, Energieverbrauch oder der Installationsumfang auf die ökonomische Amortisation des Systems haben. Für die wirtschaftlichen Varianten ist jedenfalls auch eine ökologische Amortisation sichergestellt, d.h. die Umweltauswirkungen für Herstellung, Betrieb und Entsorgung des Monitoring- und Analysesystems werden durch die Ressourceneinsparungen beim Gebäudebetrieb kompensiert.

Einfach nachrüstbare Monitoring-Konzepte, das teilautomatisierte Engineering solcher Systeme und die Kombination mit nachgeschalteten Fehlererkennungs- und Diagnosemethoden haben das Potential, die theoretisch vorhandenen Ressourceneinsparungen beim Betrieb von Bestandsgebäuden in der praktischen Anwendung umzusetzen. Diese Entwicklung sollte daher auch weiterhin durch Innovationsimpulse aus ähnlich gelagerten Forschungsprojekten gestärkt werden.

Abstract

Technical building facilities are often operating in unnoticed suboptimal operating conditions for years, causing substantial operating costs and waste of resources. With the exception of the total failure of systems (e.g. room is no longer heated), optimisation potentials remain largely unnoticed. Due to the high share of the building sector in the total energy consumption of the European Union, an intelligent monitoring and analysis system for the detection of inefficient operating conditions offers enormous potential for achieving the socio-political goals of resource savings and emission reduction.

OptiMAS follows the approach to monitor existing buildings, which are already equipped with building services installations, independently of the automation components used in them, to analyse the collected data and to derive parameters for an optimisation of the building operation. The developed concept combines a non-invasive measurement of energy flows in the hydraulic pipes with intelligent algorithms for the interpretation and evaluation of measurement data (with an appropriate correction algorithm) and a flexible cloud-based system architecture for data transmission, evaluation and provision.

In the course of the project, valuable contributions to method development and applicability of non-invasive sensor technology for the measurement of temperature and flow rates in hydraulic pipes could be generated. By developing compensation algorithms for surface temperature sensors, for example, the error relating to the invasive fluid temperature could be significantly reduced and the range of applications extended to include plastic pipes. In addition, an actively heated, low-cost non-invasive flow sensor was developed for which a relative accuracy below 3 % under laboratory conditions was proven. In addition, sensor-supported and model-based fault detection and diagnostic procedures were developed and prototypically demonstrated in field tests. Finally, a multidimensional evaluation of the developed concept was carried out within the framework of an economic and sustainability analysis. The scenarios examined show the influence that the size of the building, energy consumption or the scope of installation have on the economic amortisation of the system. For the economic variants, an ecological amortisation is also guaranteed, i.e. the environmental effects for production, operation and disposal of the monitoring and analysis system are compensated by the resource savings in building operation.

Retrofittable monitoring concepts, the semi-automated engineering of such systems and the combination with fault detection and diagnosis methods have the potential to put the theoretical resource savings in the operation of existing buildings into practice. This development should therefore be further strengthened by innovation impulses from similar research projects.

1. Ausgangslage

Nach der überarbeiteten EU-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden 2018/844/EU (2018) verursacht der Gebäudebestand rund 36 % aller CO₂-Emissionen innerhalb der Europäischen Union. Daher wird eine Senkung des Energieverbrauchs und damit einhergehend eine Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor gefordert.

Gebäudetechnische Anlagen laufen oft jahrelang unbemerkt in suboptimalen Betriebszuständen und verursachen dadurch erhebliche Betriebskosten und Ressourcenverschwendung. Mit Ausnahme des Totalversagens von Systemen (z.B. Raum wird nicht mehr geheizt) bleiben Optimierungs- und damit geforderten Effizienzsteigerungspotentiale weitgehend unbemerkt. Für Energiedienstleistungen, z.B. in Form des Einspar-Contractings, ist sowohl eine Quantifizierung der Effizienzsteigerung als auch die Identifikation von Optimierungsmöglichkeiten und damit einhergehenden Kosteneinsparungen unumgänglich. In den EU-Richtlinie 2018/844/EU wird dabei die Gebäudeautomatisierung und das elektronische Monitoring bei Bestandsgebäuden als wesentlich erachtet. Es wird sogar vorgeschlagen, das elektronische Monitoring als Alternative zur Inspektion von Heizungs- und Kühlanlagen einzusetzen und dadurch den Gebäudeenergiebedarf zu senken.

Innerhalb von Stadtteilen, Arealen und Gebäuden erfolgt der Transport und die Verteilung der Energie für Heiz- und Kühlzwecke fast ausschließlich auf Basis von hydraulischen Systemen. Fehlerhaftes Verhalten von einzelnen technischen Anlagen und Komponenten sowie ineffiziente Betriebsstrategien spiegeln sich in den dynamischen Zeitverläufen der Energieverteilung innerhalb des hydraulischen Netzes wider. Diese Energieverteilungssysteme sind daher, unabhängig von den konkret installierten gebäudetechnischen Anlagen, der ideale Ausgangspunkt zur Identifikation von Effizienzsteigerungspotentialen.

Zur Bestimmung des dabei transportierten Energiestroms ist die Grundvoraussetzung eine Messung des Volumen- bzw. Massenstroms sowie einer charakteristischen Temperaturdifferenz (im Allgemeinen zwischen Vor- und Rücklauf) notwendig. Bei Messungen an hydraulischen Systemen kann zwischen invasiven, mit Fluid-Kontakt, und non-invasiven Methoden, ohne direktem Kontakt mit dem Fluid, unterschieden werden. Konventionelle invasive Monitoring- oder Automationssysteme werden typischerweise bei der Errichtung von Gebäuden eingebaut. Werden diese nachträglich installiert, kommen neben den eigentlichen Kosten des Systems noch Installationskosten für die Änderungen am Hydrauliksystem hinzu, was neben erheblichen Kosten (abhängig von der konkreten Installation) auch rechtliche Aspekte (z.B. Gewährleistungsansprüche, Haftungen für Umbauten) nach sich zieht. Im Gegensatz dazu sind die Installationskosten für non-invasive Sensoren wesentlich geringer. Auch die rechtlichen Folgen sind besser abschätzbar, da kein Eingriff in ein Hydrauliksystem notwendig ist. Ein umfassendes und kosteneffizientes, non-invasives Monitoring-System für Gebäude ist derzeit nicht verfügbar und soll im Rahmen des Projekts erstmalig realisiert werden.

Die aktuellen Entwicklungen in der drahtlosen Datenübertragung und ortsunabhängigen Datenspeicherung begünstigen die kosteneffiziente und einfache Installation des Monitoring-Systems und sind daher als ideale Ergänzung zur non-invasiven Messdatenerfassung zu sehen. OptiMAS greift diese Entwicklungen auf und beschäftigt sich daher auch mit der Frage einer optimalen Datenakquise- und Speicherarchitektur, um beispielsweise die Messdaten der non-invasiven Sensorik mit eventuell verfügbaren, bestehenden Daten einer Gebäudeautomation zusammenzuführen und diese strukturiert zur Verfügung zu stellen.

Darauf aufbauend sind nicht zuletzt auch semiautomatisierte Analyseverfahren notwendig, welche die vorhandenen Fehlfunktionen in den gebäudetechnischen Anlagen aufzeigen und die theoretischen Energie- und Ressourceneinsparungen in die praktische Umsetzung bringen, um das übergeordnete Ziel, eine Reduktion des Gebäudeenergiebedarfs, zu erreichen. Die Entwicklung von derartigen Analysemethoden der Fehlererkennung und Diagnose sollen die Interpretation der erfassten Datengrundlage vereinfachen und nur mehr die wesentlichen, aufbereiteten Informationen für einen effizienten Gebäudebetrieb zur Verfügung stellen.

2. Projektinhalt

Im folgenden Abschnitt werden die in OptiMAS untersuchten Kernthemen zur Umsetzung eines non-invasiven Monitoring- und Analysesystems beschrieben. Die Forschungstätigkeit beinhaltete unter anderem mehrere Methodenentwicklungen zur non-invasiven Temperatur- und Durchflussmessung, die Ausarbeitung einer Systemarchitektur zur Sensorfusion und Datenakquise sowie die Entwicklung von Fehlererkennungs- und Diagnosealgorithmen zur Identifizierung von Effizienzsteigerungspotentialen im laufenden Gebäudebetrieb.

2.1. Non-invasive Temperaturmessung

Das Konzept der non-invasiven Temperaturmessung in Form von Anlegefühlern an Rohrleitungen oder Wärmespeichern ist speziell in der Gebäudetechnik aber auch in anderen technischen Disziplinen, vor allem für Anwendungsfälle mit geringen Anforderungen an die Genauigkeit der Temperaturmessung, historisch weit verbreitet. Anstatt der direkten, invasiven Messung der Fluidtemperatur erfolgt beispielsweise an Rohrleitungen eine Messung der Oberflächentemperatur, deren Messergebnis als mittlere Temperatur des strömenden Mediums interpretiert wird. Das Konzept ist einfach und damit kostengünstig in der Installation, druckbehaftete hydraulische Systeme bleiben unbeeinflusst, potentielle Leckagen sowie ein temporärer Ausfall von Systemen während der Installationsphase und Unklarheiten in Bezug auf Haftungsfragen werden vermieden. Dies gilt insbesondere für die nachträgliche Ausrüstung von Anlagen mit Temperaturmessstellen, die im Fokus des OptiMAS Projektes stehen.

2.1.1. Systematischer Fehler der non-invasiven Temperaturmessung

Trotz der offensichtlichen Vorteile bleibt ein konzeptbedingter systematischer Fehler, der je nach Anwendungsfall maßgeblich für den Gesamtfehler der Fluidtemperaturmessung sein kann. In Abbildung 1 ist die exemplarische Installation zweier handelsüblicher Rohranlegetemperatursensoren (Non-invasive Sensor) aus Messing (BRA) und Aluminium (ALU) dargestellt. Die weiße Wärmeleitpaste verringert den thermischen Kontaktwiderstand zwischen Sensor und Rohroberfläche und eine Wärmedämmung begrenzt die Wärmeverluste an die Umgebung. Wie nachfolgend erläutert, verringern beide Maßnahmen die Abweichung zwischen Fluid- und gemessener Sensortemperatur. Die verbleibende Abweichung ist in den Diagrammen der Temperaturverläufe der beiden Anlegesensoren T_s sowie dem Verlauf des invasiven Temperatursensors T_f ersichtlich.

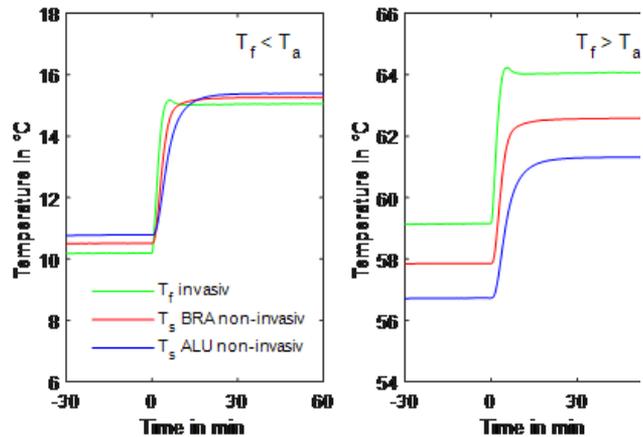
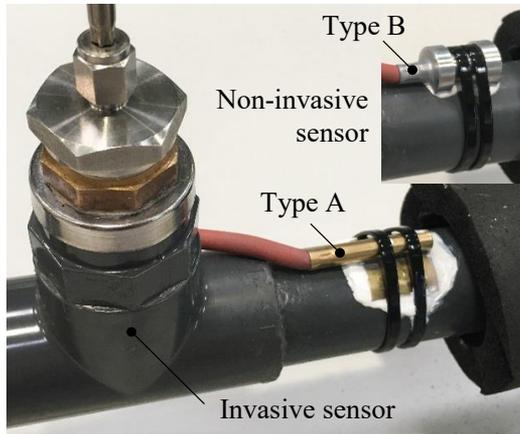
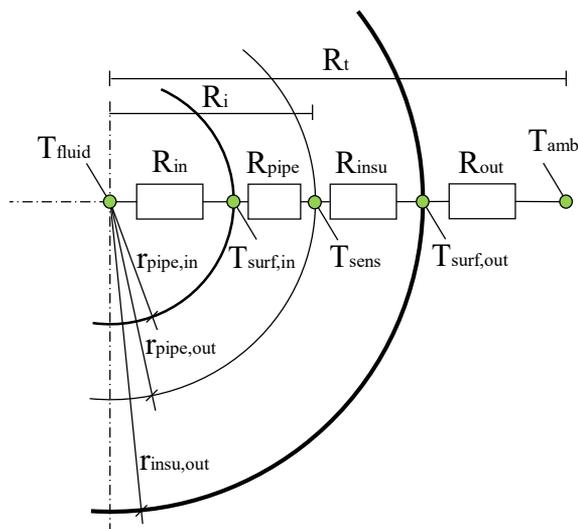


Abbildung 1: Links: Exemplarische Installation eines invasiven Vergleichssensors zur Bestimmung der Fluidtemperatur T_f und zwei non-invasiven Temperatursensoren aus Messing (T_s BRA) und Aluminium (T_s ALU) vor Isolierung an einer Kunststoffleitung. Rechts: Gemessene Temperaturverläufe der Sensoren unterhalb und oberhalb der Umgebungstemperatur T_a .



$$R_{in} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{pipe,in} \cdot h_{in}} \quad (1)$$

$$R_{pipe} = \frac{\log \frac{r_{pipe,out}}{r_{pipe,in}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{pipe}} \quad (2)$$

$$R_{insul} = \frac{\log \frac{r_{insul,out}}{r_{pipe,out}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{insul}} \quad (3)$$

$$R_{out} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{insul,out} \cdot h_{out}} \quad (4)$$

Abbildung 2: Thermisches Widerstandsmodell des Wärmetransports zwischen der Fluidtemperatur T_{fluid} und der Umgebungstemperatur T_{amb} an einem wärme-gedämmten Rohr.

- T Temperaturen in °C (v. l. n. r.: Fluid, Oberfläche Innen, Sensor, Oberfläche Außen, Umgebung)
- R Thermischer Widerstand in (mK)/W (v. l. n. r. Innen, Rohr, Isolierung, Außen, gesamt Innen R_i , gesamt R_t)
- r Radius in m (v. o. n. u. Rohr Innen, Rohr Außen, Isolierung Außen)
- h Wärmeübergangskoeffizient in W/(m²K) (Rohrinnenseite h_{in} , Rohraußenseite h_{out})
- λ Wärmeleitkoeffizient in W/(mK) (Rohrmaterial λ_{pipe} , Isolierung λ_{insul})
- π Kreiszahl

2.1.2. Charakterisierung der Temperatur-Abweichungen

Für die Charakterisierung der auftretenden Abweichung sind Methoden der klassischen Fehlerbeschreibung mit absoluten oder relativen Angaben nicht zielführend, da sowohl die absolute Abweichung als auch das Vorzeichen vom Verhältnis der Fluidtemperatur zur Umgebungstemperatur T_a ab-

hängt – vgl. Abbildung 1. Daher wurde in Wenig et al. (2017) eine temperaturunabhängige Beschreibung des systematischen Fehlers der Fluidtemperaturmessung mittels Anlegesensoren an Rohrleitungen vorgeschlagen. Die Beschreibung basiert auf einem vereinfachten, stationären Wärmetransportmodell zwischen der Fluid- und der Umgebungstemperatur laut Abbildung 2 und kann aus Serienschaltung der thermischen Widerstände in Gleichung (1) bis (4) interpretiert werden.

Unter Annahme von stationären Verhältnissen kann die Temperaturabweichung zwischen T_{fluid} und T_{sens} bezogen auf den Temperaturunterschied zwischen T_{fluid} und T_{amb} durch das näherungsweise temperaturunabhängige Widerstandsverhältnis R_i/R_t in Gleichung (5) umgeformt werden. Dabei werden die Widerstände innerhalb des Sensors zu R_i und der Gesamtwiderstand zu R_t zusammengefasst.

$$\frac{R_i}{R_t} = \frac{R_{\text{in}} + R_{\text{pipe}}}{R_{\text{in}} + R_{\text{pipe}} + R_{\text{insu}} + R_{\text{out}}} = \frac{(T_f - T_s)}{(T_f - T_a)} \quad (5)$$

Die Widerstände R_{pipe} und R_{insu} werden aus geometrischen Informationen und Materialeigenschaften abgeleitet und können im betrachteten Temperaturbereich als temperaturunabhängig angesehen werden. Der Widerstand R_{in} beschreibt den Wärmeübergang innerhalb des Rohres aufgrund von erzwungener Konvektion, die ebenfalls nahezu unabhängig von der Fluidtemperatur ist. An der Außenfläche der Konstruktion berücksichtigt R_{out} die natürliche Konvektion zur Umgebungsluft und den Strahlungsaustausch zu den umgebenden Oberflächen. Der Wärmeübergangskoeffizient für natürliche Konvektion, als auch der Strahlungsaustausch hängen von der Temperaturdifferenz zwischen der Außenfläche und der Umgebungsluft bzw. den Umgebungsflächen ab. Bei ausreichender Wärmedämmung der Messstelle und Annahme von weitgehend konstanten Umgebungstemperaturverhältnissen im Inneren von Gebäuden ist ein weitgehend konstanter Widerstand anzunehmen. Neben den erwähnten Vereinfachungen in Bezug auf Linearität und den temperaturabhängigen Parametern erfasst das Modell auch keine dreidimensionalen Wärmeübertragungseffekte oder die Fehler der Oberflächentemperaturmessung selbst. Das vorgeschlagene Charakterisierungsschema erlaubt jedoch eine nahezu temperaturunabhängige Spezifikation in einer universellen Formulierung.

2.1.3. Numerische Parameterstudien

Ausgehend von den Überlegungen zur modellbasierten Charakterisierung wurde im Rahmen von OptiMAS eine umfangreiche numerische Parameterstudie durchgeführt, um das beschriebene Widerstandsverhältnis für eine Vielzahl an Randbedingungen aus berechneten Temperaturverhältnissen zu bestimmen. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Randbedingungen für zwei typische Installationsrohre aus Vollkunststoff und Kupfer in einer vergleichbaren Dimension aufgelistet.

Tabelle 1: Randbedingungen der Parameterstudie

Parameters		Unit	Value
T_{fluid}		$^{\circ}\text{C}$	60
T_{amb}		$^{\circ}\text{C}$	20
Cond.	λ_{plastic}	W/mK	0.5
	λ_{copper}	W/mK	395
	λ_{insu}	W/mK	0.035
Convection	λ_{fluid}	W/mK	0.641
	λ_{amb}	W/mK	0.02514
	ν_{fluid}	m^2/s	$4.746 \cdot 10^{-7}$
	ν_{amb}	m^2/s	$1.356 \cdot 10^{-5}$
	ρ_{fluid}	kg/m^3	983.2
	ρ_{amb}	kg/m^3	1.188
	g	m/s^2	9.81
Rad	ε	-	0.95
	σ	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$	$5.67 \cdot 10^{-8}$

Die resultierenden Widerstandsverhältnisse für unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten und Dämmstärken sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellt.

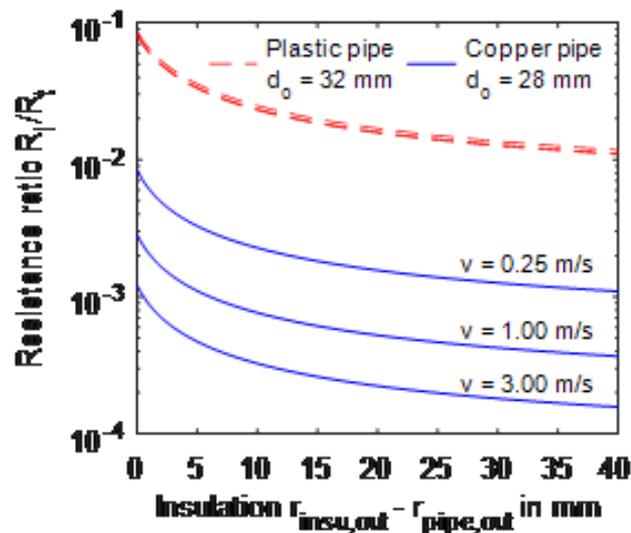


Abbildung 3: Berechnete Widerstandsverhältnisse ausgewählter, repräsentativer Rohrdimensionen, -materialen, Fließgeschwindigkeiten und Wärmedämmstärken.

Die Resultate zeigen, dass bei Vernachlässigung des thermischen Kontaktwiderstandes und den angenommenen Modellvereinfachungen der konzeptionelle Temperaturfehler durch die Verwendung von Anlegesensoren zur Bestimmung der Fluidtemperatur, bei Rohren mit hoher Wärmeleitfähigkeit, wie etwa Kupferrohren, den Gesamtfehler der Temperaturmessung nicht maßgeblich erhöht und im Bereich von 0,1 bis 1 % der Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Umgebung liegt. Eine Wärmedämmung reduziert die Temperaturabweichung in jedem Fall erheblich, während für das Kupferrohr theoretisch brauchbare Werte für unkritische Anwendungen auch ohne Wärmedämmung erreicht werden können. Bei Kunststoffrohren tritt mindestens der zehnfache Fehler im Vergleich zu Kupferrohren auf, wobei hier eine hohe Dämmstärke notwendig ist, um überhaupt auf das Fehler-Niveau eines unge-

dämmten Kupferrohres zu kommen. Der Einfluss der Durchflussrate bzw. der mittleren Durchflussgeschwindigkeit, die den konvektiven Wärmeübergang im Rohrrinneren bestimmt, ist nur für niedrige R_i/R_t -Werte von Bedeutung. Bei höheren Widerstandsverhältnissen der Kunststoffrohre hat die Fließgeschwindigkeit einen geringen Einfluss.

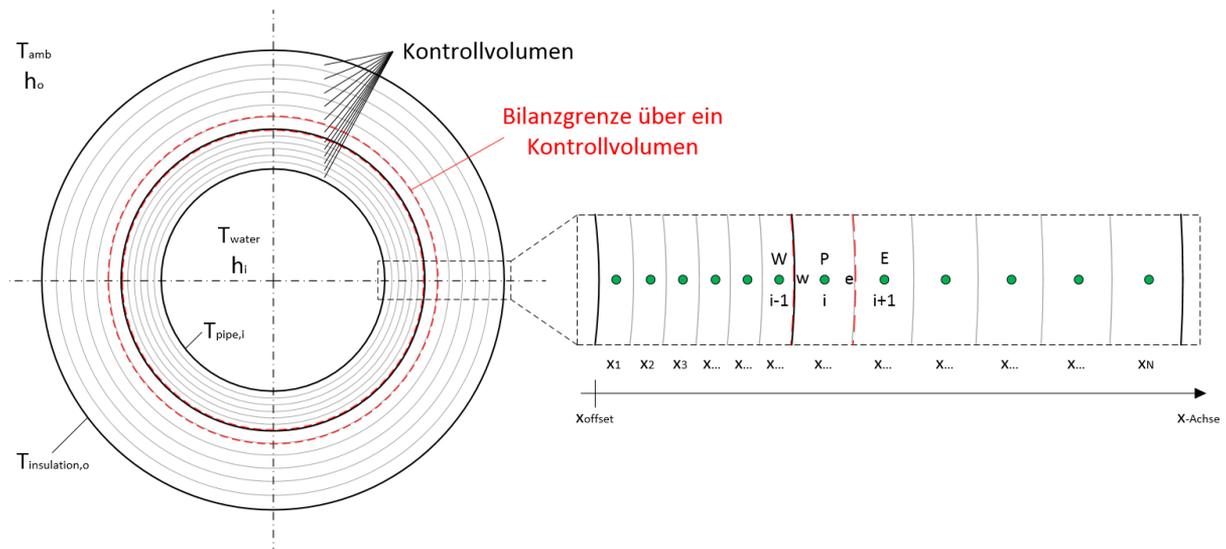


Abbildung 4: Diskretisiertes, zweidimensionales Finite-Volumen-Modell zur stationären Berechnung der Oberflächentemperatur an der Rohraußenseite

Neben den stationären Betrachtungen umfasst die Parameterstudie ebenso eine Beurteilung der instationären Effekte durch die non-invasive Temperaturmessung mittels Anlegefühlern an Rohrleitungen. Dazu wurde das in Abbildung 4 skizzierte, zweidimensionale Finite-Volumen-Modell der wärmegeprägten Rohrleitung entwickelt und eine Vielzahl an Parametervariationen bei sprunghafter Änderung der Fluid- bzw. Wassertemperatur simuliert. Das Modell berücksichtigt wiederum keine dreidimensionalen Effekte der Wärmeübertragung und der thermische Kontaktwiderstand des Anlege-temperatursensors sowie dessen Wärmekapazität werden vernachlässigt. Die Oberflächentemperatur an der Rohraußenseite wird als gemessene Sensortemperatur interpretiert.

Die Simulationsergebnisse von mehreren ausgewählte Parametersätzen eines wärmegeprägten Kupferrohres und eines wärmegeprägten Kunststoffrohres aus PVC-U in Abbildung 5 zeigen für einen sprunghaften Anstieg der Wassertemperatur T_{WASSER} von 20 auf 40 °C quantitative Unterschiede in den Dynamiken der Rohroberflächentemperatur T_2 . Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s beträgt die Zeitkonstante T_{90} (Zeit für 90 % der Temperaturänderung bei sprungförmiger Änderung der Fluidtemperatur) beim Kupferrohr ca. 4 Sekunden, während bei einem vergleichbaren Kunststoffrohr die Zeitkonstante bei knapp 100 Sekunden liegt. Dynamische Änderungen der Fluidtemperatur werden daher an Rohren mit geringer Wärmeleitfähigkeit wesentlich langsamer detektiert.

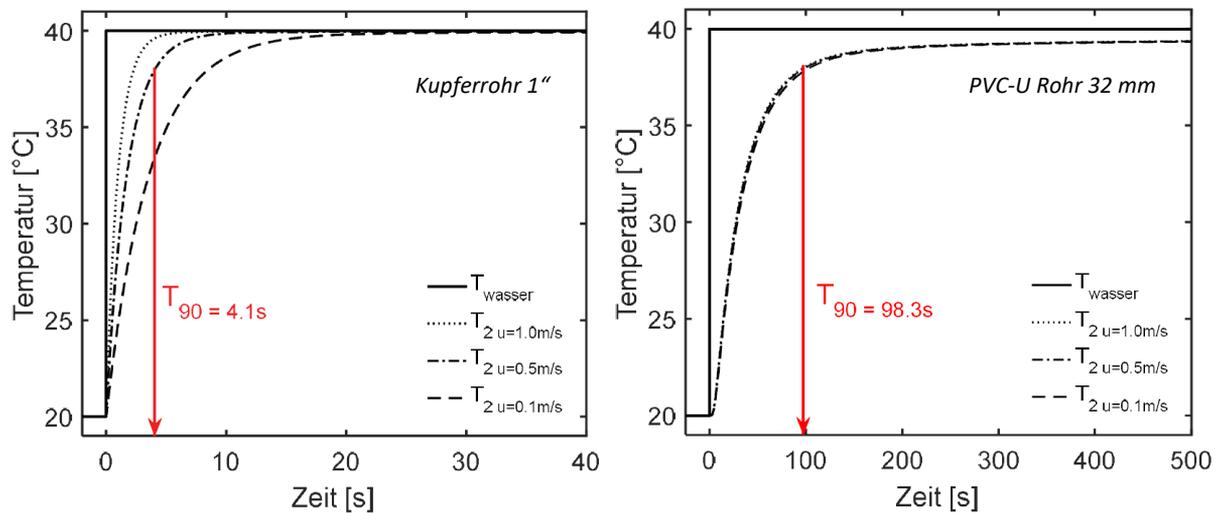


Abbildung 5: Berechneter Verlauf der äußeren Rohroberflächentemperatur T_2 bei sprungförmiger Änderung der Fluidtemperatur T_{wasser} von 20 auf 40 °C in einem wärmegeprägten Kupfer- (links) und Kunststoffrohr (rechts).

Die aufgezeigten dynamischen Fehler des non-invasiven Messkonzeptes sind insbesondere für die Verwendung der Messstelle in regelungstechnischen Aufgaben und der intelligenten Datenanalyse bei den in OptiMAS beinhalteten Verfahren der automatisierten Fehlererkennung und Diagnose von Relevanz.

Zusammenfassend ist die historisch bedingte, weite Verbreitung von Anlegetemperaturfühlern bei Metallrohren mit hoher Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials zumindest für unkritische Anwendungen durchaus nachvollziehbar und begründbar. Insbesondere in der Gebäudetechnik geht der Trend bei den installierten Rohrmaterialien jedoch in Richtung Kunststoff- bzw. Kunststoff-Verbund-Rohren. Nach Hix & Seydel (2016) liegt der Anteil nichtmetallischer Rohre in den aktuell ausgeführten österreichischen Warm- und Kaltwasserinstallationen bei ca. 70 % und in den österreichischen Heizungs- und Sanitärinstallationen bei ca. 80 %. Zu den nichtmetallischen Rohren zählen Kunststoffmaterialien wie Polyethylen und Polypropylen sowie Mehrschicht- und Verbundrohre, die hauptsächlich aus Kunststoffmaterialien und einer dünnen Aluminiumschicht bestehen. Diese Rohre weisen eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit als Metallrohre aus Kupfer, Stahl oder Edelstahl auf, was zu einer höheren Temperaturabweichung führt, wenn die Fluidtemperatur durch eine non-invasive Messung bestimmt wird.

2.1.4. Korrekturalgorithmen der non-invasiven Temperaturmessung

Um dem Trend zu Kunststoff- und Verbundrohren Rechnung zu tragen und die nachträgliche Installation von Monitoring-Systemen bzw. die Aufrüstung bestehender Gebäudeautomationssysteme auch zukünftig in Bestandsgebäuden zu ermöglichen, wurden aus den Überlegungen zur Charakterisierung und anschließenden Modellierung der non-invasiven Temperaturmessung im Rahmen von OptiMAS Methoden entwickelt, um die gemessene Temperatur von Rohranlegefühlern rechnerisch zu korrigieren und damit die reale Fluidtemperatur genauer abschätzen zu können. Die Korrekturalgorithmen basieren im Wesentlichen auf vereinfachten Modellannahmen der Wärmeübertragung und erlauben bei hinreichend genauer Kalibrierung eine präzise Angabe der Fluidtemperatur durch Messung der Rohroberflächentemperatur und Messung bzw. Annahme der Umgebungstemperatur. Die Modellstrukturen von zwei Varianten mit stationärem und instationärem Ansatz sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt.

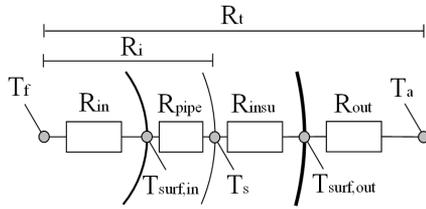


Abbildung 6: Stationäres Modell

$$T_s = \left(1 - \frac{R_i}{R_t}\right) \cdot T_f + \frac{R_i}{R_t} \cdot T_a \quad (6)$$

$$T_f(T_s, T_a) = \frac{1}{(1 - R_i/R_t)} \cdot T_s - \frac{R_i/R_t}{(1 - R_i/R_t)} \cdot T_a \quad (7)$$

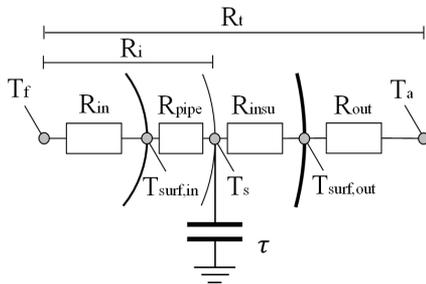


Abbildung 7: Instationäres Modell

$$\tau \cdot \frac{dT_s}{dt} + T_s = \left(1 - \frac{R_i}{R_t}\right) \cdot T_f + \frac{R_i}{R_t} \cdot T_a \quad (8)$$

$$T_f(T_s, T_a, t) = \frac{\tau}{(1 - R_i/R_t)} \cdot \frac{\Delta T_s}{\Delta t} + \dots + \frac{1}{(1 - R_i/R_t)} \cdot T_s - \frac{R_i/R_t}{(1 - R_i/R_t)} \cdot T_a \quad (9)$$

- T Temperaturen in °C (v. l. n. r: Fluid, Oberfläche Innen, Sensor, Oberfläche Außen, Umgebung)
- R Thermischer Widerstand in (mK)/W (v. l. n. r. Innen, Rohr, Isolierung, Außen, gesamt Innen R_i , gesamt R_t)
- τ Zeitkonstante des instationären Modells in s
- t Zeit in s

Gleichung (6) beschreibt die stationäre Sensortemperatur als Oberflächentemperatur auf der Außenseite der Rohrleitung T_s für konstante Widerstandsverhältnisses R_i/R_t in Abhängigkeit der aktuellen Fluidtemperatur T_f und Umgebungstemperatur T_a . Durch Umformen der Gleichung kann ein statischer Korrekturalgorithmus in (7) abgeleitet werden, der bei bekanntem Widerstandsverhältnis R_i/R_t die stationäre Fluidtemperatur bei ebenso bekannter Sensor- und Umgebungstemperatur bestimmt. Wird das Widerstandsverhältnis vorab für eine bestimmte Sensorkonfiguration aus gemessenen Daten bestimmt, werden bspw. die thermischen Kontaktwiderstände der Oberflächentemperaturmessung auch bei Vernachlässigung in der Modellformulierung im Korrekturalgorithmus berücksichtigt. Dies gilt generell für viele vereinfachende Annahmen in der Modellstruktur. Die Grenzen der Anwendbarkeit werden daher nachfolgend in experimentellen Untersuchungen evaluiert.

Da durch die Anwendung der non-invasiven Temperaturmessung auch dynamische Fehler entstehen, kann das statische Widerstandsmodell durch Einführung eines einzelnen Speicherterms in Abbildung 7 auf eine instationäre Modellbeschreibung in Gleichung (8) erweitert werden. Die daraus resultierende Differentialgleichung beinhaltet zur Berücksichtigung von transienten Vorgängen neben dem bereits bekannten statischen Parameter R_i/R_t zusätzlich eine Zeitkonstante τ als zweiten konstanten Parameter, der ebenfalls für die Kalibrierung des Korrekturalgorithmus experimentell bestimmt wird. Durch Umformen von (8) in (9) und Berücksichtigung der zeitdiskreten Messung der Temperatursignale kann ein dynamischer Korrekturalgorithmus in Form einer Differenzgleichung angeschrieben werden. Für den Fall, dass aus den Messdaten ein aussagekräftiger Temperaturgradient bestimmt werden kann, korrigiert der Algorithmus in (9) zusätzlich zu der statischen Abweichung ebenso die dynamischen Fehler der non-invasiven Temperaturmessung, zumindest in dem Umfang, den die einfache Modellstruktur erlaubt.

2.1.5. Laborprüfstand an der FH Burgenland

Zur experimentellen Charakterisierung, Modell-Validierung, Kalibration und Evaluierung von Korrekturalgorithmen der non-invasiven Temperaturmessung an Rohrleitungen mittels Anlegefühler wurde an der FH Burgenland am Campus Pinkafeld ein Laborprüfstand aufgebaut und umfangreiche messtechnischen Untersuchungen durchgeführt. Die Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau mit einem Prozessthermostat (Unistat 510 – Huber Control) und einem Drei-Wege-Regelventil (HT 24-SR-T – Belimo), in dem sowohl Durchflussmenge als auch Durchflusstemperatur in flexibel austauschbaren Rohrstücken automatisiert über Zeiträume von mehreren Tagen vorgegeben werden können. Der Prüfstand ist mit mehreren Referenzsensoren wie einem Coriolis Massenstrommessgerät (Promass 300 – Endress+Hauser) und mehreren kalibrierten, invasiven und non-invasiven Temperaturmessstellen (4-Leiter Pt100) ausgestattet. Die Datenakquise (cRIO CX 9067 – National Instruments) erfüllt mit Blick auf die Anwendung die Echtzeitanforderung und kann Abstraten im Bereich von Millisekunden realisieren. Die Rohr- oder Messstrecken sind anhand von Schraubverbindungen mit Überwurfmutter an den im Laborprüfstand vorgesehenen Stellen beliebig installierbar. Als Rohrmaterial wurden Kupfer, Kunststoff und Mehrschichtverbund jeweils in mehreren praxisnahen Dimensionen untersucht.

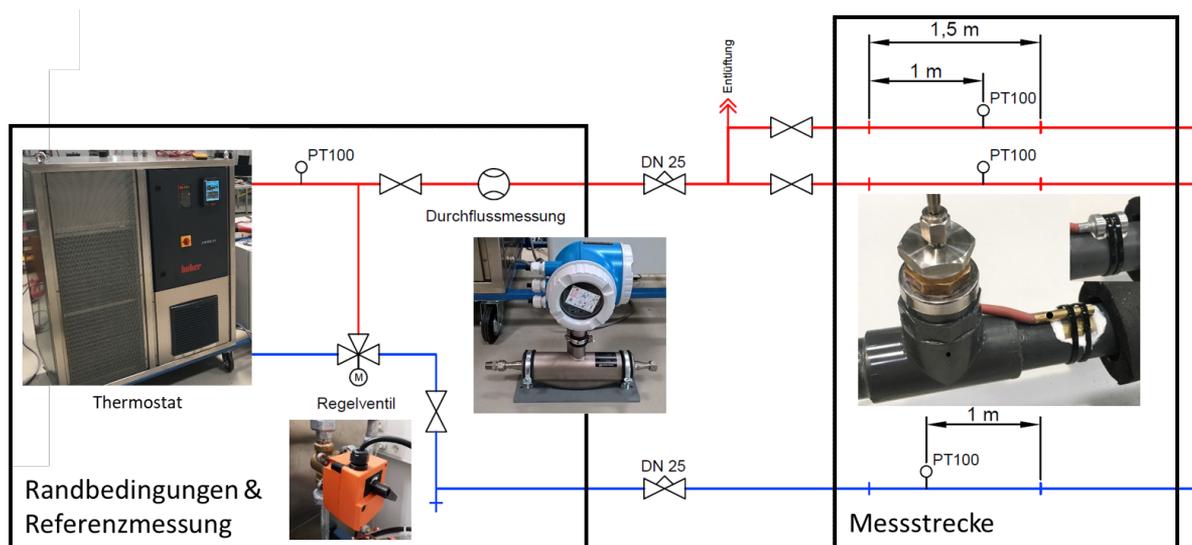


Abbildung 8: Schematischer Aufbau des Laborprüfstands an der FH Burgenland zur experimentellen Charakterisierung, Modell-Validierung, Kalibration und Evaluierung von Korrekturalgorithmen der non-invasiven Temperaturmessung an Rohrleitungen mittels Anlegefühler.

Am Prüfstand erfolgte die experimentelle Validierung der im Rahmen des OptiMAS Projekts vorgeschlagenen temperaturunabhängigen Charakterisierung non-invasiver Temperatur-Sensorik durch Gleichung (5) bzw. generell eine Evaluierung und Kalibrierung des vereinfachten statischen Modellierungsansatzes in Gleichung (6). Bei kontinuierlichem Monitoring der Umgebungstemperatur T_a wurde die mit einem invasiven Sensor gemessene Fluidtemperatur T_f in mehreren Schritten stufenweise von nahe 0 °C bis ca. 70 °C variiert und die Messwerte T_s von mehreren gedämmten Anlegesensor- und Rohrkombinationen aufgezeichnet. Für die beiden Sensortypen aus Messing (BRA) und Aluminium (ALU) auf einem PVC-U Kunststoffrohr (vgl. Abbildung 1) sind die Ergebnisse in Abbildung 9 zusammengefasst.

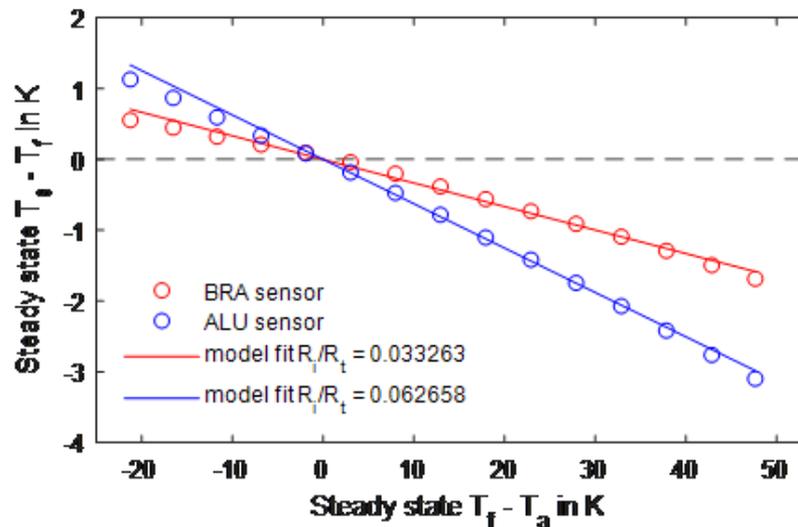


Abbildung 9: Experimentell ermittelte stationäre Temperaturdifferenz zweier Anlegetemperatursensoren aus Messing (BRA) und Aluminium (ALU) T_s an einem Kunststoffrohr zur invasiv gemessenen Fluidtemperatur T_f aufgetragen über die Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Umgebung T_a , jeweils im Vergleich zum linearen Modell nach Gleichung (6).

In Abbildung 9 werden die stationären Abweichungen zwischen den Anlegesensoren und der Fluidtemperatur der Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Umgebung gegenübergestellt. Für Fluidtemperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur sind diese Abweichungen positiv, für Fluidtemperatur über der Umgebungstemperatur negativ. Das jeweilige vereinfachte lineare Modell laut Gleichung (6) wird durch eine Parameterschätzung des thermischen Widerstandverhältnisses an die verfügbaren stationären Daten optimal angepasst und zeigt eine weitgehende Übereinstimmung mit den Messdaten. Eine Linearitätsabweichung ist nur bei Fluidtemperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur beobachtbar. Diese Abweichung kann durch eine Änderung der Wärmeübertragungscharakteristik aufgrund von Kondensat-Bildung im Bereich der Sensorkonstruktion begründet werden, welche im einfachen Modellierungsansatz nicht berücksichtigt wurde.

Die gezeigte experimentelle Untersuchung wurde für idente Sensorkonfigurationen mehrmalig durchgeführt, um die Abhängigkeit eines einzelnen Installationsvorganges auf den stationären Parameter R_i/R_t zu überprüfen. Die Ergebnisse zeigen hierbei durchaus Variationen im ermittelten Zahlenwert, die Modellgenauigkeit an sich war jedoch für alle untersuchten Varianten sehr hoch. Für die Anwendung der Modellstruktur in Form eines Korrekturalgorithmus kann die Variation von R_i/R_t problematisch sein, da eine robuste Korrekturrechnung ohne spezifische Kalibration der einzelnen Konstruktion nicht gewährleistet ist.

Die generell gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und Modellierungsansatz bestätigt zumindest die Vorgehensweise zur temperaturunabhängigen Fehlercharakterisierung von non-invasiven Temperaturmessungen. Bei Vorliegen eines repräsentativen statischen Parameters R_i/R_t kann damit auch von einer sehr genauen Fehlerkompensation über einen weiten Temperaturbereich ausgegangen werden, da die Korrekturalgorithmen jeweils direkt von den zu Grunde liegenden Modellen abgeleitet werden.

2.1.6. Feldtests im Testgebäude Energetikum

Neben der experimentellen Analyse an Laborprüfständen war in OptiMAS auch eine Evaluierung in realitätsnaher Umgebung in Form von Feldtests vorgesehen. Zum großen Teil erfolgten diese im „Living

Lab“ Testgebäude „Energetikum“ der Forschung Burgenland am Campus der FH Burgenland in Pinkafeld. Das in Abbildung 10 dargestellte Gebäude verfügt über eine Vielzahl an gebäudetechnischen Systemen zur Wärme- und Kälte-Bereitstellung, -Speicherung, -Verteilung und -Übertragung, teilweise in mehrfacher Ausführung. Im Vergleich zur Gebäudegröße ist das hydraulische System daher überdurchschnittlich umfangreich und komplex, sodass ideale Voraussetzungen zur Evaluierung der in OptiMAS entwickelten Konzepte vorliegen.

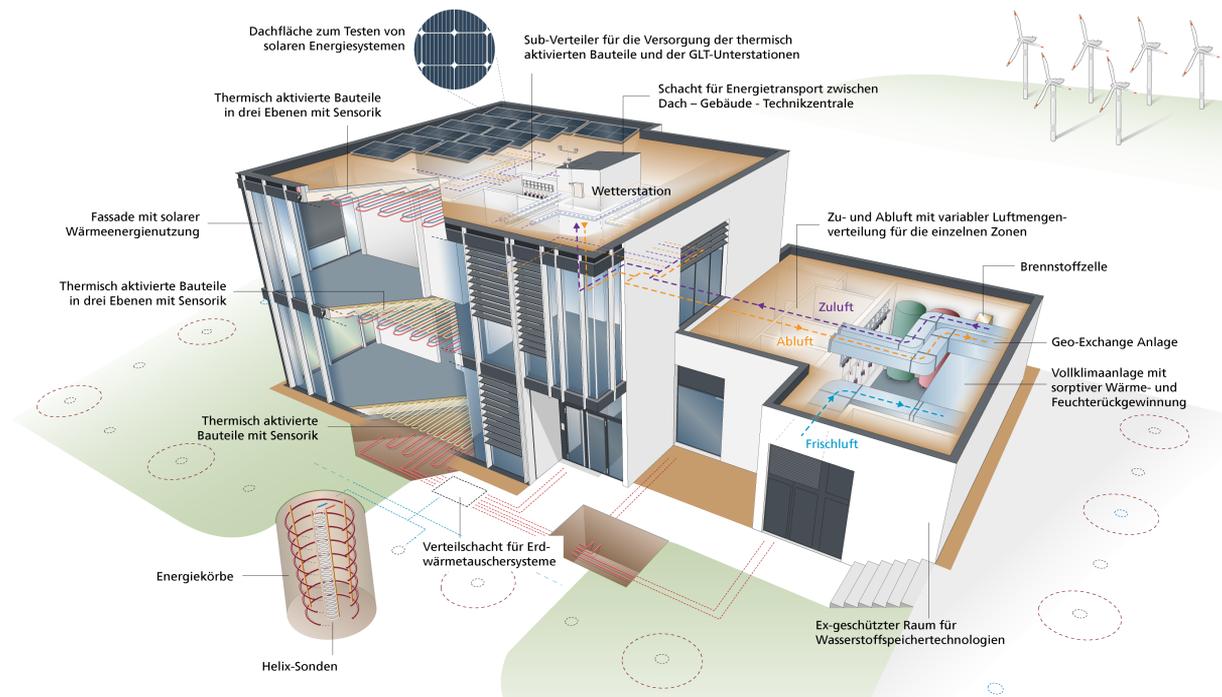


Abbildung 10: Living Lab Energetikum als Testgebäude innerhalb des OptiMAS Projektes (Forschung Burgenland, 2016)

Die Messdatenakquise für OptiMAS erfolgt dabei aus einer Kombination von Sensordaten aus den bestehenden Gebäudeautomatisierungssystem und Messdaten aus nachträglich installierten, funkbasierten Systemen zur Integration non-invasiver Sensoren an neuralgischen Punkten innerhalb des hydraulischen Versorgungssystems eines Gebäudes. Das Konzeptschema ist nachfolgend in Abbildung 11 dargestellt.

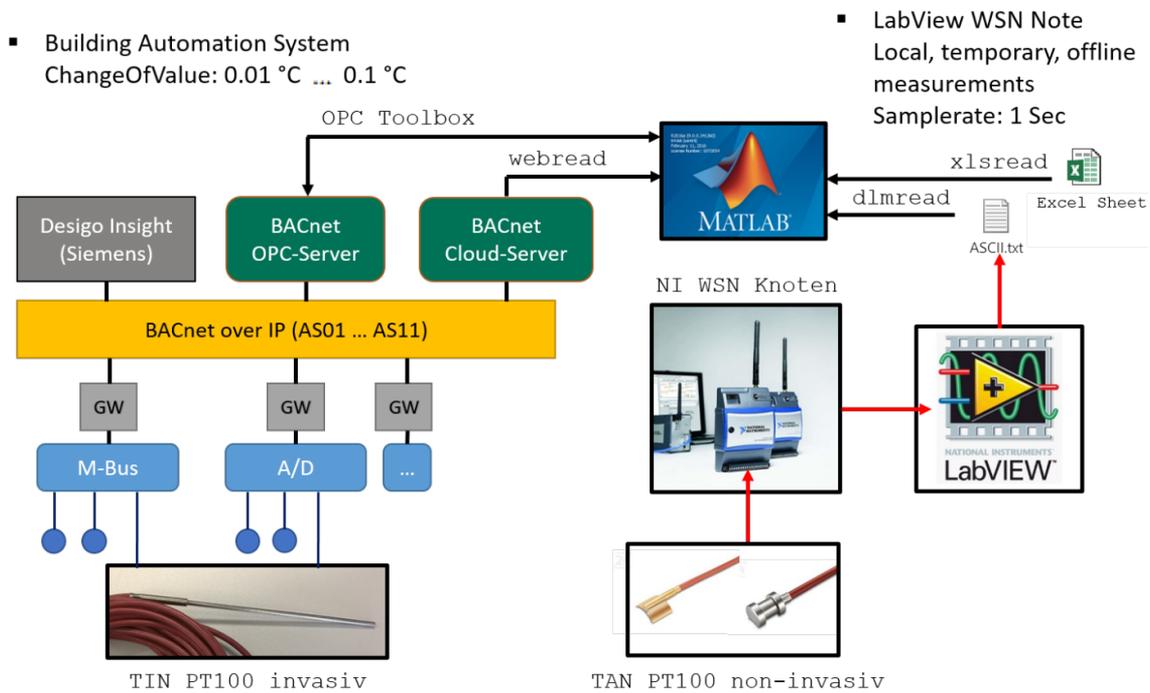


Abbildung 11: Konzept der Messdatenerfassung für Feldtests aus Kombination von Live-Daten der Gebäudeautomation mit ortsunabhängiger, drahtloser und nachträglich installierbarer non-invasiver Temperatur-Sensorik im Sinne von OptiMAS

In Abbildung 12 ist eine exemplarisch ausgewählte Sensorinstallation zur non-invasiven Überwachung der Fluidtemperaturen an einem Teilsystem des hydraulischen Netzes vor Anbringung der Wärmedämmung dokumentiert. Die Sensoren messen die Vorlauftemperaturen innerhalb eines Fußbodenheizungssystems einer Regelzone und sind auf Alu-Verbundrohren installiert.

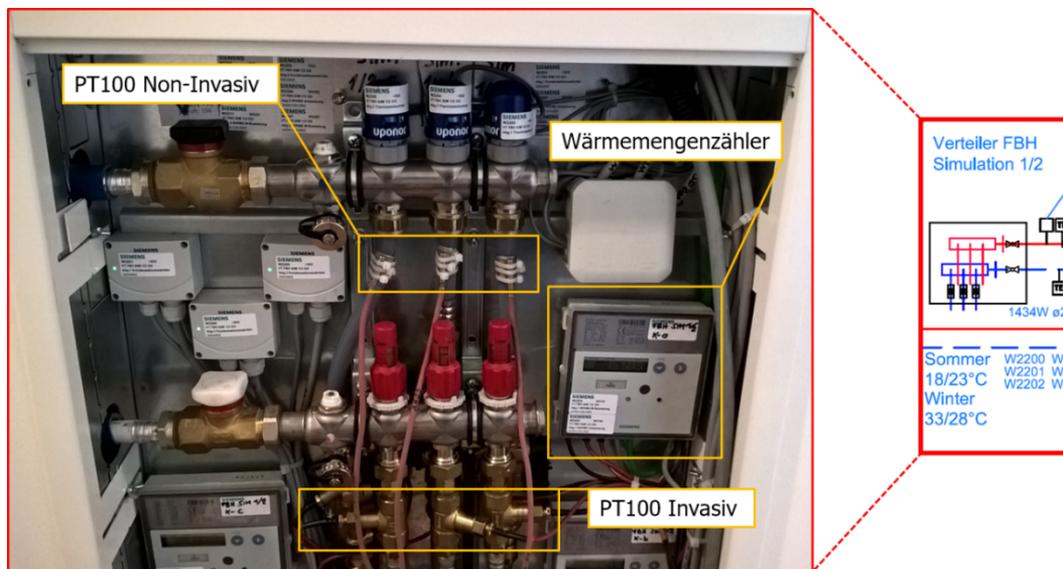


Abbildung 12: Exemplarisches non-invasives Temperatur-Monitoring einer Fußbodenheizung vor Anbringung der Dämmung

Die Ergebnisse der experimentellen Evaluierungen für die modellbasierte Korrekturrechnung von non-invasiven Temperaturmessungen am Laborprüfstand und im Testgebäude sind im Abschnitt 3.1.1 und 3.2.1 zusammengefasst.

2.2. Non-invasive Durchflussmessung mittels thermischen Messverfahrens

Für die non-invasive Messung von Durchflussmengen werden typischerweise Ultraschallsensoren eingesetzt. Anders als zu Antragstellung erwartet, haben sich günstige Ultraschallanlegesensoren nicht durchgesetzt und die wenigen Produkte sind vom Markt verschwunden. Kosten von über 2000 € pro Messpunkt, beschränkte Rohrdurchmesser und Limitierung in den Rohrwandmaterialien sind weiters zu berücksichtigen. Ultraschallanlegesensoren haben für die Anwendung in OptiMAS damit das Problem, dass die Kosten für die geplanten Anwendungen im Gebäude und die hohe Anzahl an Messpunkten zu hoch sind.

Als „low-cost“ Alternative wurde im Projekt OptiMAS mittels FEM-Simulationen (*Finite-Elemente-Methode*) untersucht, ob zur Durchflussmessung auch thermischen Anlegesensoren herangezogen werden können.

2.2.1. Messkonzept auf Basis von Sensorfusion

Thermische Strömungssensoren (invasiv und non-invasiv) werden in drei Hauptgruppen unterteilt (Elwenspoek M., 1999):

- Hitzdraht- bzw. Heißfilmsensoren
- kalorimetrische Sensoren
- TOF (Time Of Flight) Sensoren

Diese drei Hauptarten sind in Abbildung 13 illustriert, wobei jeweils ein schematischer Querschnitt durch ein mit Fluid durchströmtes Rohr und die notwendigen Temperatursensoren (grün) und Heizelemente (rot) dargestellt werden.

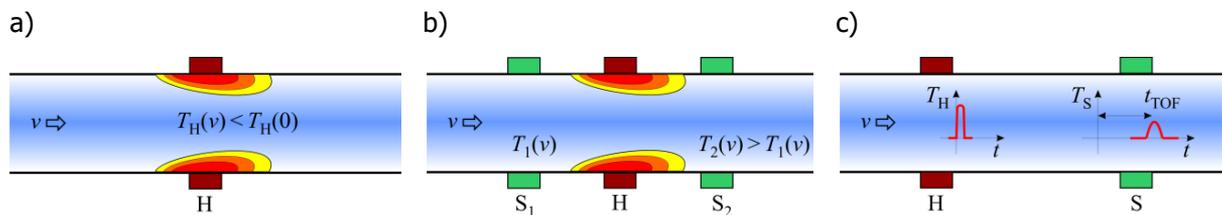


Abbildung 13: Hauptarten thermischer Strömungssensoren a) Heißfilmsensor, b) kalorimetrischer Sensor und c) TOF-Sensor

Ein Heißfilmsensor (Abbildung 13a) besteht im einfachsten Fall nur aus einem Heizer (H), der mit konstanter Heizleistung betrieben wird. Die höchste Heizertemperatur wird bei Abwesenheit der Strömung erreicht ($T_H(0)$). Durch Fluidströmung wird der Heizer konvektiv abgekühlt und seine Temperatur sinkt. Daher kann die Heizerübertemperatur (die Differenz zwischen der Heizer- und Fluidtemperatur $\Delta T_H = T_H - T_F$) als Maß für die Strömungsgeschwindigkeit herangezogen werden.

Beim kalorimetrischen Strömungssensor (Abbildung 13b) befinden sich im gleichen Abstand stromauf- und -abwärts vom Heizer zwei Temperatursensoren (S_1 und S_2). Der Heizer wird im einfachsten Fall mit konstanter Leistung betrieben. Die stromaufwärts gelegene Messstelle wird durch die Strömung stärker abgekühlt als ihr stromabwärts positioniertes Gegenstück. Somit ist die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_2 - T_1$ ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit.

Sowohl Heißfilm- als auch kalorimetrischer Strömungssensor werden mit kontinuierlicher Heizleistung betrieben. Um nennenswerte Übertemperaturen erzielen zu können, sind bei metallischen Rohren Leistungen in der Größenordnung von 10 W notwendig.

Niedrigere mittlere (!) Leistungen sind nur im gepulsten Betriebsmodus möglich, bei dem die volle Heizleistung nur für kurze Zeit eingeschaltet wird. Dies wird mit dem TOF-Sensor (Abbildung 13c) realisiert. Er besteht aus einem Heizer und einem stromabwärts gelegenen Temperatursensor. Am Heizer wird ein Leistungspuls erzeugt, der durch die Strömung mitgetragen wird und sich per Diffusion durch das Fluid ausbreitet, wobei die Diffusionszeitkonstante von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Zusätzlich ist eine Diffusion durch die Rohrwand zu berücksichtigen. Nach einer strömungsabhängigen Verzögerungszeit tritt am Temperatursensor das Signalmaximum auf. Diese Ansprechzeit wird in Abbildung 13c als t_{TOF} bezeichnet und kann zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit herangezogen werden.

Um die Zeitkonstanten sowie die notwendige Heizleistung für die messtechnisch verlässlich auswertbare Temperaturdifferenz abschätzen zu können, wurde das physikalische Sensorverhalten mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM) im Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics simuliert.

2.2.2. Simulation rein thermisch basierter Durchflussmessung

Die erste Simulationsreihe wurde unter der Annahme laminarer Strömung im Rohr durchgeführt. In diesem Fall wird das Strömungsfeld durch folgende Gleichung vorgegeben (Holman J. P., 2009)

$$\vec{v}(r) = -2v_0 \left[1 - \frac{\rho^2}{R^2} \right] \cdot \vec{e}_z \quad (10)$$

und braucht nicht mit dem Navier-Stokes-Modul von COMSOL berechnet zu werden. Dies verkürzt die notwendige Rechenzeit, was insbesondere bei Simulationen von langen transienten Vorgängen von Bedeutung ist. Außerdem reicht es aufgrund der Axialsymmetrie, nur einen 2D-Ausschnitt zu betrachten, wobei sich das vollständige Temperaturfeld durch die Rotation um die z-Achse ergibt. In der Gleichung (10) bezeichnen v_0 die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Kanal und \vec{e}_z den Einheitsvektor in z-Richtung. R ist der Rohrradius, während ρ die Radialkoordinate darstellt.

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Abmessungen sind identisch einem kommerziell erhältlichen Kupferrohr, welches später beim Prototypenbau eingesetzt wurde (Innendurchmesser 16 mm, Rohrwandstärke 1 mm). Berücksichtigt wurde ein 20 cm langes Rohrstück, an dessen Außenwand sich ein kreisförmiger Kupferheizer befindet. Die Querschnittsabmessungen des Heizers betragen 1 mm x 1 mm. Die Simulationsergebnisse in Abbildung 14a zeigen das Temperaturfeld im stationären Fall bei einer konstanten Heizleistung von 10 W und einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s. Aufgrund der Axialsymmetrie werden Zylinderkoordinaten verwendet, wobei nur ein 2D-Ausschnitt (entspricht $\varphi = 0$) berücksichtigt wird. 3D-Simulationsergebnisse werden erhalten, wenn das 2D-Temperaturfeld um die z-Achse rotiert wird (Abbildung 14b).

Die ganze rechte Randschicht (die Außenrohrwand und der Heizer) wird als thermisch isoliert betrachtet (adiabatische Randbedingung). Beim Einlass ($z = 10$ cm) tritt 60 °C heißes Wasser ein, während der Auslass ($z = 10$ cm) als Fläche mit konduktivem Wärmefluss modelliert wird. Laut Gleichung (10) hat das Strömungsprofil in 2D-Darstellung die Form einer Parabel, was in Abbildung 14a durch rote Pfeile

angedeutet wird. Bei den FEM-Simulationen sind vor allem die Temperatur stromauf- und -abwärts vom Heizer sowie die Heizertemperatur selbst von Interesse (diese Stellen sind in Abbildung 14a mit schwarzen Pfeilen markiert).

In der ersten Simulationsreihe wurden die stationären Sensorsignale untersucht. Dabei wird eine konstante Leistung im Heizer aufgeprägt und die Temperatur an der Außenwand des Rohres 5 cm stromauf- (T_{UP}) bzw. -abwärts (T_{DOWN}) vom Heizer bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten und einer Wassertemperatur von $T_F = 60\text{ °C}$ betrachtet.

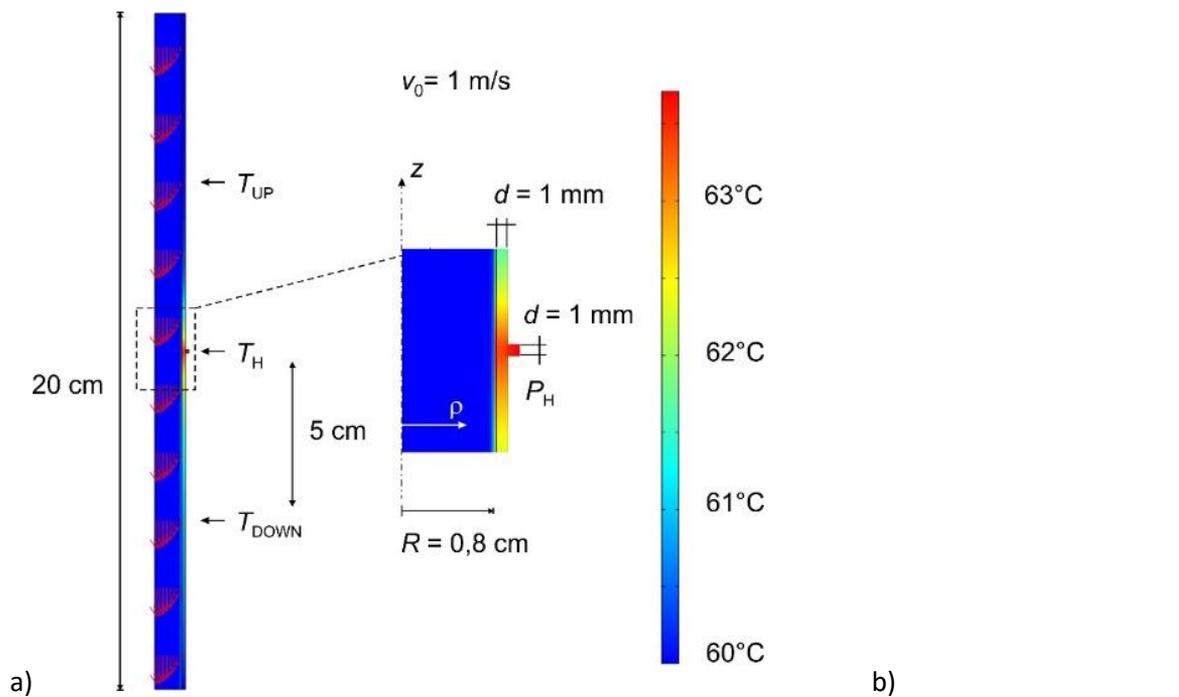


Abbildung 14: FEM-Simulationsmodell. Im Heizer wird für diese Simulation eine konstante Heizleistung von $P_H = 10\text{ W}$ eingestellt. Die roten Pfeile deuten das Geschwindigkeitsfeld an, das im Querschnitt einem parabolischen Profil entspricht. Dargestellt sind die stationären Simulationsergebnisse. Durch Rotation um die z-Achse entsteht aus dem axialsymmetrischen 2D-Modell (a) eine 3D-Darstellung (b).

Um den Einfluss schwankender Wassertemperaturen zu eliminieren, wird als Ausgangssignal die Temperaturdifferenz zweier Messstellen $\Delta T = T_{DOWN} - T_{UP}$ herangezogen. Während die stromaufwärts liegende Messstelle (T_{UP}) deutlich abgekühlt wird, erfährt ihr stromabwärts liegendes Gegenstück (T_{DOWN}) eine deutliche Temperaturerhöhung. Als zweites Ausgangssignal wird die Heizertemperatur untersucht, d.h. die Temperaturdifferenz zwischen der Heiz- und Fluidtemperatur $\Delta T_H = T_H - T_F$. Abbildung 15a zeigt die entsprechenden Simulationsergebnisse bei einer Heizleistung von $P_H = 11\text{ W}$.

In der zweiten Simulationsreihe wurden die transienten Vorgänge nach einem Sprung der Heizleistung untersucht. Dabei wurde die aufgeprägte Leistung im Heizerbereich P_H sprunghaft von 0 W auf 11 W geändert und bei konstanter mittlerer Strömungsgeschwindigkeit die Temperatur an den oben genannten Stellen betrachtet. Abbildung 15b illustriert einen typischen zeitlichen Verlauf der Temperaturdifferenz $T_{DOWN} - T_{UP}$ sowie der Heizertemperatur ΔT_H bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $0,5\text{ m/s}$. Die Heizertemperatur als Ausgangssignal reagiert schneller auf Änderungen der Heizleistung als die Temperaturdifferenz $T_{DOWN} - T_{UP}$. Die 10-90 % Anstiegszeit t_r ist bei der letzteren um einen Faktor 3 größer als bei ΔT_H . Darüber hinaus gibt es bei der Heizertemperatur auch keine Totzeit t_t . Die stationären Endwerte ΔT_{∞} , die in Abbildung 15b nach etwa 30 Sekunden erreicht werden, entsprechen den Werten, die in Abbildung 15a für $v_0 = 0,5\text{ m/s}$ eingezeichnet sind.

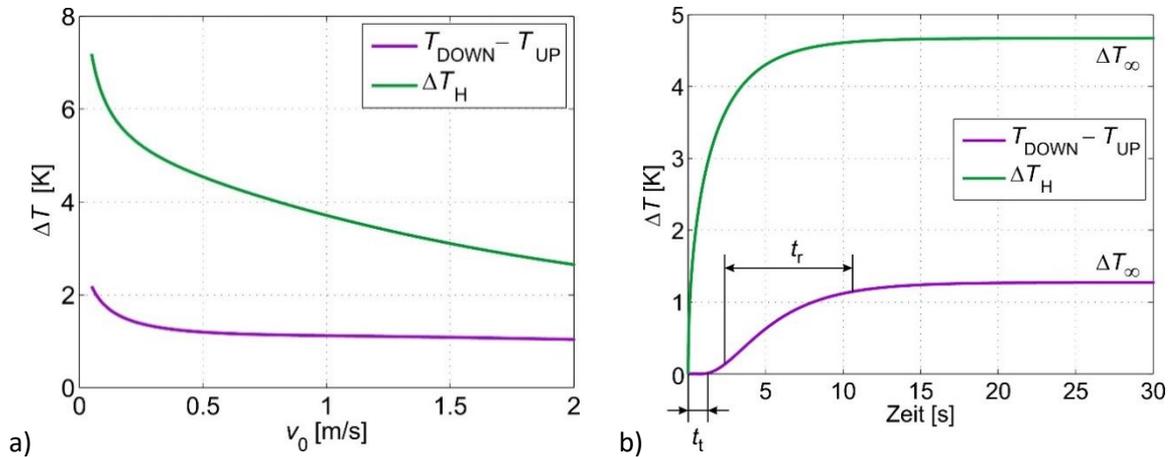


Abbildung 15: (a) Temperaturdifferenz $T_{DOWN} - T_{UP}$ im Abstand von 5 cm vom Heizer sowie die Heizerübertemperatur $\Delta T_H = T_H - T_f$ als Funktion der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_0 bei einer konstanten Heizleistung von 11 W. (b) Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenz $T_{DOWN} - T_{UP}$ sowie der Heizerübertemperatur ΔT_H bei einem Heizsprung von 0 W auf 11 W und $v_0 = 0,5$ m/s.

Die oben ausgeführten Simulationsergebnisse wurden unter der Annahme erhalten, dass die Strömung im Rohr laminar ist. Dies ist jedoch nur für sehr kleine Strömungsgeschwindigkeiten der Fall. Das Kriterium für eine laminare Strömung im Rohr ist, dass die Reynolds-Zahl nach Gleichung 11 unter dem kritischen Wert von $Re_{krit} = 2300$ bleibt (Schlichting, Gersten, 2006).

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta} \quad (11)$$

In der Gleichung (11) bezeichnen ρ und η die Dichte und die dynamische Viskosität des Fluids, L und v sind eine für die Kanalgeometrie charakteristische Länge bzw. charakteristische Geschwindigkeit. Bei Rohrströmungen werden als charakteristische Größen üblicherweise der Innendurchmesser $L = D = 2R$ und die über den Querschnitt gemittelte Geschwindigkeit $v = v_0$ herangezogen. Nimmt man Wasser ($\rho = 983$ kg/m³, $\eta = 0.467$ mPas bei 60 °C) als Fluid sowie einen (in Gebäuden typischen) Rohrdurchmesser von $D = 16$ mm an, so ergibt sich aus der Bedingung $Re < Re_{krit}$ eine laminare Strömung nur für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit unter etwa $v_{0krit} = 7$ cm/s. Wenn die Wassertemperatur sinkt, nimmt die Viskosität zu und v_{0krit} verschiebt sich etwas in Richtung höherer Geschwindigkeiten, bzw. umgekehrt für eine steigende Wassertemperatur. Weil die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in Warmwasserheizungsanlagen in der Größenordnung von m/s liegen, ist anzunehmen, dass die Strömungen meist turbulent sind. Daher ist es notwendig, auch diesen Fall durch entsprechende Simulationen zu berücksichtigen.

Durch die Turbulenzen ändert sich das mittlere Geschwindigkeitsprofil im Kanal, was sich wiederum auf die Temperaturverteilung auswirkt. Dies wird in der Abbildung 16 für eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 10 cm/s verdeutlicht. Bei laminarer Strömung ergibt sich ein parabelförmiges Strömungsprofil (vergl. Gleichung (10)), bei dem die maximale Geschwindigkeit von $2v_0$ in der Mitte des Kanals erreicht wird, während sie an der Kanalwand gleich null ist (die sogenannte "no-slip"-Randbedingung). Bei turbulenter Strömung errechnet das Simulationsprogramm für die sehr dünne Grenzschicht unmittelbar an der Kanalwand einen Anfangswert mittels einer Wandfunktion (Abbildung 16a, blaue Charakteristik bei $\rho = 8$ mm) und das Profil entlang des Radius verläuft etwas flacher. Daher wird

die Kanalwand stärker abgekühlt als im laminaren Fall, sodass die maximal erreichbare Übertemperatur sinkt. Gleichzeitig steigt die Dicke der Temperaturgrenzschicht, d. h. die Änderung der Übertemperatur reicht weit in den Kanal hinein (Abbildung 16b).

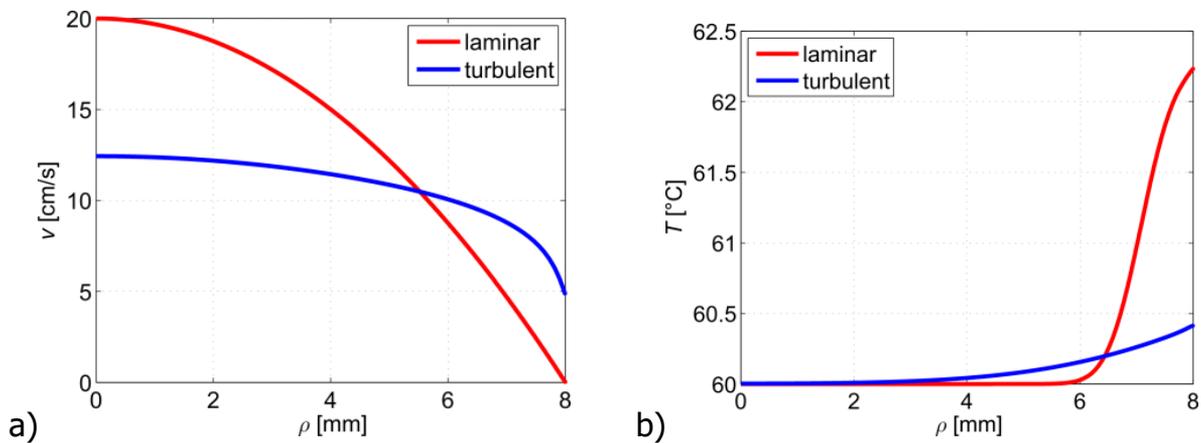


Abbildung 16: Geschwindigkeit (a) und Temperatur (b) als Funktion der Radialkoordinate ρ simuliert im Abstand 5 cm stromabwärts vom Heizer bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v_0 = 10$ cm/s, Wassertemperatur von $T_F = 60$ °C und konstanter Heizleistung von 11 W. (Die wandnahe Grenzschicht wird im turbulenten Fall im Bereich der Approximation mittels Wandfunktion nicht dargestellt.)

Die Simulationsergebnisse im Falle turbulenter Strömung sind qualitativ sehr ähnlich jenen, die für die laminare Strömung erhalten wurden (vergl. Abbildung 15a) – die absoluten Werte sind aufgrund der stärkeren konvektiven Abkühlung jedoch niedriger. Gleichzeitig sinken auch die Zeitkonstanten, d.h. die jeweiligen Ansprechzeiten werden kürzer (vergl. Abbildung 15b).

2.2.3. Schlussfolgerung aus Simulationsergebnissen

Im vorherigen Abschnitt wurde mittels FEM-Simulationen der Einsatz thermischer Strömungssensoren zur non-invasiven Durchflussmessung untersucht. Der angestrebte Sensor besteht aus einem ringförmigen Heizer sowie mehreren Temperatursensoren, die entweder direkt am Heizer oder im fixen Abstand stromauf- und -abwärts positioniert sind.

Laut Abbildung 15a würde die Übertemperatur bei kontinuierlicher Heizung in der Größenordnung von einigen Kelvin beim Heißfilmsensor (ΔT_H als Ausgangsgröße) bzw. unter einem Kelvin beim kalorimetrischen Sensor (Temperaturdifferenz $T_{DOWN} - T_{UP}$ als Ausgangsgröße) liegen. Im gepulsten Heizerbetrieb (TOF-Sensor) ist zu erwarten, dass die Übertemperaturen je nach Heizpulshöhe nur etwa 100 mK erreichen würde. Ein kalorimetrischer oder gar TOF-Sensor wäre deshalb nur mit sehr aufwendiger Signalverstärkung und Filterung möglich bzw. würde sehr störanfällige Messergebnisse liefern.

Aufgrund dieser Simulationsergebnisse wurde das Forschungsaugenmerk auf den Heißfilmsensor als technisch sinnvollste Art der thermischen Strömungssensoren gerichtet. Um die mittlere Heizleistung zu senken, kann diese Sensorart ebenfalls mit einem Pulssignal betrieben werden - der Heizer bleibt nur solange eingeschaltet, bis alle transienten Vorgänge abgeschlossen sind und ein (quasi-)stationärer Ausgangswert zur Verfügung steht. Anschließend folgt eine Phase, in der der Heizer ausgeschaltet ist und keine Messwerterfassung stattfindet. Dieser Ablauf wird über die Betriebsdauer periodisch fortgesetzt. Dieser Betriebsmodus, der ebenfalls im Laufe des Projekts näher untersucht wurde, ist besonders geeignet, wenn es um die Überwachung kontinuierlicher Prozesse geht.

2.3. Systemarchitektur

Die Gesamtarchitektur des OptiMAS-Systems folgt einem hierarchischen Ansatz und kann, wie in Abbildung 17 dargestellt, in mehrere Schichten bzw. Layer unterteilt werden. Die einzelnen Ebenen werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher beschrieben.

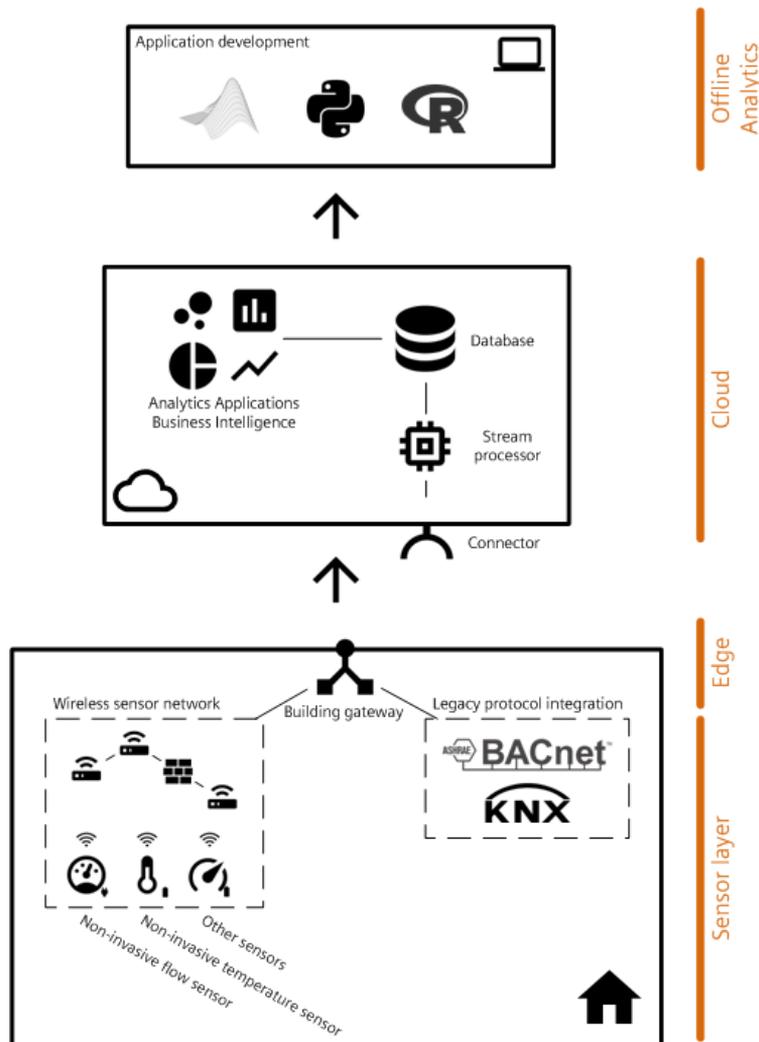


Abbildung 17: OptiMAS-System Architektur (Krammer et al., 2017)

2.3.1. Sensor-Layer

Der Sensor-Layer stellt die Interaktion zwischen den physikalischen Geräten des Gebäudes (Sensoren und Aktoren) mit der Kommunikationsinfrastruktur sicher, was die Kopplung dieser Geräte mit einem lokalen Gebäude-Gateway ermöglicht. Da diese Schicht in jedem Gebäude implementiert werden muss, ist ein einfacher und kostengünstiger Aufbau dieser eine Schlüsselanforderung. Die Prozessdaten werden mit kostengünstigen, non-invasiven Sensoren gemessen, die leicht an den Zielobjekten montiert werden können. Die Kommunikation wird automatisch durch ein selbstorganisierendes und drahtloses Mesh-Netzwerk verwaltet, welches die Daten zum Gateway des Gebäudes bringt und eine Fernkonfiguration und -wartung ermöglicht. Für die Integration bestehender Gebäudeautomations-systeme über Legacy-Protokolle (wie BACnet oder KNX) wird ein Low-Engineering-Ansatz eingesetzt, der lediglich eine physikalische (z.B. Verkabelung) und logische (z.B. durch eine Firewall) Verbindung zwischen dem bestehenden Automationssystem und dem Gateway erfordert. Passives „Sniffing“ und

aktive „Discovery“ Mechanismen (z.B. BACnet-Discovery) werden zur Identifizierung und Integration von Automationssystem-Informationen in das Gesamtsystem verwendet.

2.3.2. Edge-Layer

Der Edge-Layer verbindet den Sensor-Layer vertikal mit dem Cloud-Layer. Er besteht aus einer Verarbeitungseinheit (Gebäude-Gateway, siehe Skizze in Abbildung 18) mit einem kleinen lokalen Speicher und geringer Rechenleistung bei niedrigem Energieverbrauch. Der lokale Speicher ermöglicht es dem Gerät, eine kleine Datenmenge zu aggregieren und mehrere Messungen zu sammeln, um die Anzahl der ausgehenden Nachrichten zu reduzieren und dadurch Bandbreite zu sparen. Darüber hinaus wird dieser Speicher als Puffer verwendet, um kurzfristige Netzausfälle zu bewältigen. Die untere Schnittstelle stellt eine Verbindung zum drahtlosen Sensornetzwerk und zum bestehenden Gebäudeautomationssystem her, um Messungen zu empfangen. Über die obere Schnittstelle ist das Gerät mit dem Internet verbunden. Wie jedes andere mit der Cloud verbundene IoT-Gerät besitzt es eine einzige ausgehende Verbindung zu dem in der Cloud befindlichen IoT-Konnektor. Zusätzlich zu seiner Funktion als vertikales Gateway sollten Analyse- und Kontrollmethoden auf niedriger Ebene in der Randschicht gehostet werden. Solche Methoden sollten Cloud-getriggerte Anfragen und Steuersignale an die entsprechenden Legacy-Geräte weiterleiten sowie Fallback-Gebäudesteuerungsdienste bereitstellen, wenn das Gebäude offline (nicht mit der Cloud verbunden) ist. Um ein skalierbares System aufzubauen, sollten Edge-Geräte leicht konfigurierbar und nahtlos zulässig sein. Neben den funktionalen Aspekten ist der Edge-Layer für die Durchsetzung und Aufrechterhaltung der Datenschutzaspekte der Gebäudenutzer verantwortlich.

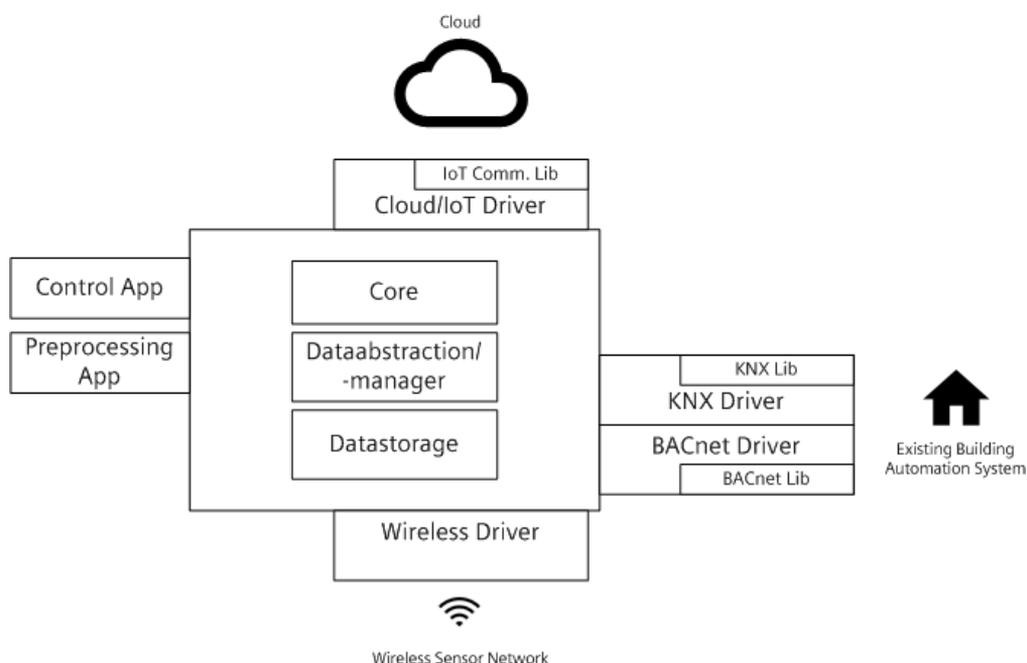


Abbildung 18: Edge-Layer der OptiMAS Gebäude-Gateway-Architektur (Krammer et al., 2017)

2.3.3. Cloud-Layer

Der Cloud-Layer fungiert als Datenspeicher und Online-Analysetool. Aufgrund ihrer Beschaffenheit ist diese Schicht leicht skalierbar und kann daher für alle Gebäude verwendet werden, die von einem Facility-Management-Unternehmen betreut werden. Die verwendeten Komponenten und der Datenfluss innerhalb der Cloud sind in der Abbildung 17 (mittlere Schicht) skizziert. Gebäudedaten gelangen

über den IoT-Konnektor, der als Endpunkt fungiert und die Nachrichten von den Gebäude-Gateways empfängt, in die Cloud. Anschließend müssen die Daten vorverarbeitet werden, damit sie in ein bestimmtes Datenbankschema passen. Auf der Grundlage der aufgezeichneten Daten können verschiedene Methoden der Datenanalyse angewendet werden, um z.B. Effizienzsteigerungspotentiale aufzudecken. Die Art und das Design der Datenbank hängen dabei von den Zielen und Methoden der Datenanalyse ab – vgl. Abschnitt 2.4.

Die in der Cloud-Datenbank gespeicherten Daten sind nicht nur für Cloud-Anwendungen zugänglich, sondern können auch für Offline-Analysen heruntergeladen werden. Diese Funktion wird hinzugefügt, um die einfache Nutzung der gesammelten Daten durch Datenanalyseexperten zu fördern, damit diese die Daten mit ihrer bevorzugten Anwendungsumgebung wie Matlab, R oder Python analysieren und neue Cloud- oder Edge-Anwendungen im Kontext des Gebäudeenergiemanagements etablieren können.

2.4. Fehlererkennungs- und Diagnose-Verfahren

Im Rahmen von OptiMAS befasst sich die Gebäudeüberwachung mit der Identifizierung signifikanter Prozesse innerhalb des Gebäudes sowie mit der Klassifizierung von Ereignissen, um atypisches Verhalten der gebäudetechnischen Anlagen zu erkennen. Ein Anwendungsfall ist die Ableitung des raumbezogenen Energieverbrauchs auf der Grundlage begrenzter Informationen (z.B. Temperatur in den Räumen und Gesamtenergieverbrauch des Gebäudes). Ein anderer Anwendungsfall ist die Erkennung atypischen Heizverhaltens von Räumen auf der Grundlage der bisherigen Heizgeschichte eines Raumes und seiner Nachbarräume.

Wärmeverluste in Gebäudesegmenten, Defekte in verschiedenen Teilen des Hydrauliksystems oder ein sinkender Wirkungsgrad eines Subsystems sind einige Beispiele, die als potenzielle Ursache für Energieverschwendung in Gebäuden identifiziert werden können. Eine schnelle Identifizierung und folglich rechtzeitige Behebung solcher Probleme kann zu einem geringeren Energieverbrauch führen. Beispielsweise können folgende Mängel und Defekte in der Gebäudehydraulik identifiziert werden: Schwingungen der Vorlauftemperatur, anormale Betriebszeit der Hydraulikkreise, anormale Wärmeabgabe der Hydraulikkreise, extreme Abweichung von der Solltemperatur, Netzwerkausfälle, Sensorausfälle.

Das Ziel eines Fehlererkennungs- und Diagnose-Systems (aus dem Englischen „Fault Detection and Diagnosis“ FDD), ist die Früherkennung von System- und Komponentenfehlern und die Diagnose der erkannten Fehler. Der erste Schritt von FDD ist die Überwachung des Systems, um Probleme im System erkennen zu können. Wenn ein Fehler erkannt wird, ist die Diagnose dafür verantwortlich, die Ursache dieses Fehlverhaltens zu ermitteln. In der generischen Anwendung wird im darauffolgenden Schritt der erkannte Fehler hinsichtlich der Schwere des Problems bewertet, worauf operative Entscheidungen folgen. Ein weiteres Merkmal des FDD Systems ist die Prognose, die als Entscheidungshilfe für die Instandhaltung dienen soll. Die vorausschauende Instandhaltung identifiziert potenzielle System- und Komponentenausfälle auf der Grundlage historischer Daten. Sie versucht, die Zeit bis zum Ausfall einer Komponente vorherzusagen.

In der Literatur finden sich mehrere Möglichkeiten, FDD-Methoden und -Konzepte zu gruppieren:

Quantitativ modellbasiert, qualitativ modellbasiert, prozesshistorisch fundiert (Katipamula & Brambley, 2005): Modellbasierte Ansätze nutzen a priori Wissen, um ein Modell aufzubauen, das als Grundlage für die Identifizierung von Diskrepanzen zwischen erwarteten und gemessenen Werten verwendet werden kann. Im Gegensatz dazu leiten datengetriebene Ansätze Modelle aus historischen Daten ab, so dass kein a priori Wissen über das System erforderlich ist. Quantitative und qualitative Modelle nutzen das Wissen über die Physik des zugrunde liegenden Systems. Die Ergebnisse dieser Analysen werden verwendet, um Konsequenzen für bestimmte Probleme im System zu ziehen.

Regelbasiert, modellbasiert, datengesteuert (Frank, 2016): Beim regelbasierten FDD werden die Messungen mit einem vordefinierten Satz von Regeln verglichen. Die Verletzung von Regeln löst einen Alarm aus. Diese Methode ist zeitaufwändig und erfordert ein hohes Maß an Expertenwissen. Die Definition des Regelsatzes ist nicht trivial und lässt sich auf jede Art von Gebäuden hart anwenden. Modellbasierte FDDs erfordern ein Modell zur Ableitung von Informationen über Fehler des Systems. Dieses Modell wird als Grundlage für die Erkennung von Diskrepanzen zwischen Vorhersagen und gemessenen Systembedingungen verwendet. Dieses Konzept setzt die Kenntnis des untersuchten Systems voraus; daher kann es nicht auf jede Art von Gebäuden angewendet werden. Darüber hinaus hängen die Ergebnisse eines solchen Ansatzes stark von der Qualität des Modells ab. Mit diesem Ansatz kann jedoch eine hohe Genauigkeit bei der Fehlerklassifizierung erreicht werden. Datengetriebene Methoden erfordern keine Modelle und nur eine geringe Kenntnis des zugrundeliegenden Systems. Sie setzen gemessene Inputs mathematisch in Beziehung zu gemessenen Outputs. Signifikante Diskrepanzen zwischen Ein- und Ausgängen oder zwischen den Messungen der Sensoren weisen auf einen Fehler in den Systemkomponenten hin. Die Qualität einer solchen Methode hängt von der Qualität und Quantität der Daten ab und kann Fehler, die bereits im Datensatz vorhanden sind, nicht erkennen.

Es gibt weitere Möglichkeiten, FDD-Methoden zu klassifizieren. Im Rahmen von OptiMAS werden jedoch die vorgestellten Methoden herangezogen. Aufgrund einer Analyse der Problemstellung und Definition der Anforderungen werden regelbasierte und datengetriebene Ansätze kombiniert, um Fehler im System zu erkennen und deren Ursache zu diagnostizieren. In den nachfolgenden Abschnitten werden ausgewählte Anwendungsfälle von in OptiMAS untersuchten FDD Methoden vorgestellt und beschrieben.

2.4.1. Schwingungserkennung

Schwingungen mit hoher Frequenz und Amplitude z.B. von Temperatursignalen können auf ein fehlerhaftes Verhalten von Hydrauliksystemkomponenten hinweisen. Ein möglicher Grund für ein solches Fehlverhalten ist die gleichzeitige Anforderung von Warm- und Kaltwasser. Um einen Schwingungsdetektor zu entwerfen und zu implementieren, der in der Lage ist, Schwingungen mit unterschiedlichen Formen (Frequenz und Amplitude) zu erkennen, wird ein naiver, differenzbasierter Algorithmus implementiert.

Der Algorithmus berechnet die erste Ableitung des Signals und führt anschließend eine „Rolling window“ Analyse durch. Basierend auf der Konfiguration des Algorithmus werden Datenpunkte gefiltert, wobei ein Fenster die entsprechende Anzahl von Datenpunkten mit der konfigurierten Amplitude enthält. Die ermittelten Datenpunkte werden im Originaldatensatz annotiert und an die Visualisierungskomponente weitergegeben. Die visuelle Darstellung des ausgewählten Datensatzes bildet einen Anhaltspunkt für das Wartungspersonal, um das anormale Komponentenverhalten zu lokalisieren.

2.4.2. Soll-/Istwert Vergleich

Die Zieltemperatur für eine hydraulische Regelkomponente ist der vom Hydrauliksystem eingestellte Wert, den die Wassertemperatur idealerweise erreichen sollte. Eine Abweichung von der Zieltemperatur kann auf eine unzureichende Regelstrategie oder einen Komponentenausfall hindeuten. Die Abweichung der gemessenen Sensordaten von diesen Zieltemperaturen zeigt, ob sich eine Komponente korrekt verhält oder nicht. Als Maß für die Abweichung der gemessenen Werte von den geschätzten Werten wird der mittlere quadratische Fehler (Mean Square Error, MSE) angewandt. MSE misst den Mittelwert der Fehlerquadrate. Dann werden Ausreißer der MSE-Werte erkannt und als fehlerhafte Signale annotiert.

2.4.3. Analyse der Wärme-/Kälteabgabe

Die Berechnung der abgegebenen Wärmemenge in einem Hydraulikkreislauf ist nicht trivial und mit geringem Ingenieuraufwand kaum möglich. Da der Projektansatz nur einen moderaten Ingenieuraufwand vorsieht, wird davon ausgegangen, dass die Oberfläche der hydraulischen Kreisläufe gleich groß ist. Der Algorithmus berechnet die Temperaturdifferenzen zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur eines hydraulischen Kreislaufs gewichtet mit dem Volumenstrom in der entsprechenden Messeinheit für eine bestimmte Zeitspanne. Es werden nur Datenpunkte mit Durchflussmenge berücksichtigt, d.h. die Heizung ist in Betrieb. Anschließend werden die ermittelten Energieeinheiten für die Datenpunkte aufsummiert und bilden die Grundlage für die Wärmeabgabeanalyse. Diese Ergebnisse werden für einzelne Sensoren über mehrere Tage analysiert und auch für hydraulische Kreisläufe gegeneinander getestet. Zur Ermittlung der Ausreißer wird die Abweichung von der Standardabweichung untersucht.

2.4.4. Analyse der Betriebszeit

Die Analyse der Betriebszeit von Hydraulikkomponenten eignet sich zur Identifizierung ineffizienter Systemkomponenten. Eine anormale Abweichung von der durchschnittlichen Betriebszeit deutet auf ein mögliches, zukünftiges Anlagenversagen hin. Zur Ermittlung von Ausreißern werden durch einen Algorithmus die Standardabweichungen der historischen Betriebszeiten analysiert.

2.4.5. Identifizierung von Netzwerkausfällen

Ein häufiger Fehler bei der Datenerfassung in den Gebäuden ist der Ausfall des Netzwerks. Wenn keine Internetverbindung verfügbar ist oder ein interner Fehler in der Datenakquise auftritt, werden keine Daten an die Cloud gesendet, was zu "Lücken" in der Zeitreihe führt. Diese Fehler sollten keine Auswirkungen auf die Topologie-Ermittlung und Gebäudeanalysen haben und müssen von der Software erkannt und behoben werden. Wenn das gesamte Netzwerk ausfällt, werden keine Daten mehr gesendet. Wenn das Netzwerk wieder online geht, werden neue Daten an die Cloud gesendet. Die durch diesen Ausfall verursachten Datenlücken werden in einem Resampling-Manager interpoliert und aufgefüllt. Diese Sensorwerte spiegeln jedoch nicht das korrekte Systemverhalten wider und müssen daher identifiziert und entsprechend gekennzeichnet werden. Wenn die Daten aller Sensoren nach mehreren Zeitpunkten gleichbleiben, kann man davon ausgehen, dass es sich um einen Netzwerkfehler handelt. Mit geeigneten Funktionen und „Rolling window“ Analysen kann dieses konstante Verhalten der Datenpunkte erkannt werden. Der Resampling-Manager setzt für die Generierung von synthetischen Datenpunkte eine zeitliche Auflösung von 10 Minuten an, weshalb die „Rolling window“ Analysen auf zwei Datenpunkte beschränkt werden, d.h. wenn sich in zehn Minuten kein Sensorwert ändert,

kann ein Netzwerkausfall erkannt werden. Die detektierten Zeitintervalle müssen markiert werden und sind in nachfolgenden Analysen als irrelevante Daten zu behandeln.

2.4.6. Identifizierung von Sensorausfällen

Der Ausfall eines Sensors kann auf die gleiche Weise wie ein Netzwerkausfall beschrieben werden. Wenn ein Sensor keine Daten sendet, aber die übrigen Sensoren korrekte Daten liefern, kann der Sensor defekt sein. Das Erkennen des Ausfalls eines einzelnen Sensors ist nicht so trivial wie das Erkennen eines Netzwerkfehlers. Aufgrund der oben beschriebenen Kommunikationsarchitektur gibt es mehrere Gründe für den Mangel an eingehenden Daten von einem Sensor. Da das Datenaufzeichnungssystem nur die Änderungen der Messwerte aufzeichnet, ist es möglich, dass sich der Messwert an der Messstation nicht geändert hat. Da Messwerte zusätzlich oft nur mit einer (oder keiner) Nachkommastelle aufgezeichnet werden, können geringfügige Messwertänderungen vom Datenaufzeichnungssystem nicht detektiert werden. In diesem Fall werden keine Daten an die Cloud gesendet. Eine weitere Möglichkeit für den Ausfall der Messwertübertragung besteht darin, dass der Heizkreislauf abgeschaltet wird und sich die Daten kaum verändern. Dieser Fall wird durch die Einstellung der Vorbedingung, dass jeder Heizkreis in Betrieb sein muss, ausgeschlossen. Zur Erkennung von echten Sensordefekten bzw. -ausfällen wird wieder eine „Rolling window“ Analyse analog zum Ausfall des gesamten Netzes durchgeführt. Die Größe des Zeitintervalls, in dem keine Messwertänderungen zulässig sind, wird manuell bestimmt und empirisch ausgewertet. Sendet ein Sensor bspw. innerhalb einer Stunde keine Änderung, wird davon ausgegangen, dass der Sensor defekt ist. Dies gilt jedoch nur dann, wenn die anderen Sensoren in der Regel parallel zu diesem Zeitraum Daten senden, d.h. es handelt sich nicht um einen Netzwerkausfall. Diese identifizierten Zeiträume sind wie bei einem Netzwerkausfall als entsprechend unzuverlässig zu kennzeichnen.

3. Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Ergebnisse des OptiMAS Projektes vorgestellt. Die Auswahl fokussiert dabei auf die praktische Umsetzung in Laborumgebungen und bei Evaluierungen im Rahmen von Feldtests. Die Dokumentation beinhaltet Ergebnisse der non-invasiven Temperaturmessung, der non-invasiven Durchflussmessung und der Fehleridentifikation und Diagnose bei der Anwendung mit realen Felddaten. Abschließend wird das von OptiMAS angedachte Monitoring- und Analysesystem einer ökonomischen und ökologischen Konzeptbeurteilung unterzogen.

3.1. Evaluierungen in Laborumgebung

Die Evaluierungen in Laborumgebung fanden im Wesentlichen in den Labor-Räumlichkeiten der Projektpartner Forschung Burgenland in Pinkafeld und Donau Universität Krems in Wiener Neustadt statt. Zur Durchführung der Experimente wurden in der ersten Projektphase jeweils eigene Teststände entwickelt und aufgebaut.

3.1.1. Non-invasive Temperaturmessung

Die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Algorithmen zur Abschätzung der Fluidtemperatur durch eine Messung der Oberflächentemperatur an einer Rohrleitung wurden in Laborstudien auf ihre Tauglichkeit überprüft und für den Einsatz bei gebäudetechnischen Anlagen evaluiert. Abbildung 19 zeigt dazu Ergebnisse einer Korrekturrechnung mit dem stationären Korrekturverfahren nach Gleichung (7) angewandt auf bereits bekannten stationären Messdaten aus Abbildung 9. Die stationäre Abweichung der Oberflächentemperaturmessung T_s gegenüber der invasiven Temperaturmessung T_f ist der Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Umgebung T_a gegenübergestellt. Die Darstellung beinhaltet zwei Versuchsdurchführungen mit einem Anlegesensor aus Messing (BRA) und einem aus Aluminium (ALU) angebracht jeweils an einem wärme gedämmten Kunststoffrohr – vgl. Abbildung 1.

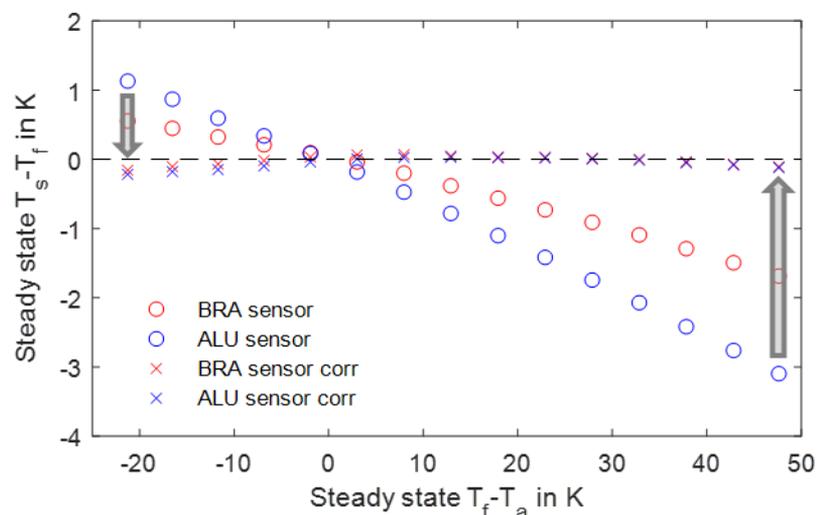


Abbildung 19: Stationäre Temperaturdifferenz zweier Anlegesensoren aus Messing (BRA) und Aluminium (ALU) an einem Kunststoffrohr zur invasiv gemessenen Fluidtemperatur (sensor) im Vergleich zu den Temperaturwerten nach Anwendung des statischen Korrekturalgorithmus (sensor corr) in Gleichung (7)

Nach Anwendung des Korrekturalgorithmus, dargestellt mit Kreuzen und dem Zusatz „corr“, reduzieren sich die stationären Abweichungen für beide Sensortypen von bis zu 3 K auf $< 0,2$ K für 97 % und $<$

0,1 K für 77 % aller 30 stationären Werte. Die Korrektur liefert für den gesamten dargestellten Bereich von 20 K unter bis 50 K über der Umgebungstemperatur zufriedenstellende Ergebnisse und berücksichtigt zudem den physikalisch bedingten Vorzeichenwechsel aufgrund der Änderung der Wärmestromrichtung entlang des Rohrradius.

Die statische Korrektur kann auch direkt auf Zeitreihen von Temperaturmessungen angewandt werden, dargestellt in Abbildung 20 im linken Diagramm. Zum Vergleich wird im rechten Diagramm die Anwendung der dynamischen Korrekturrechnung aus Gleichung (9) für die idente Zeitreihe demonstriert. Die gemessenen Signale sind jeweils durchgezogen dargestellt, die korrigierten Signale mit strichlierten Linien eingetragen.

Die statische Korrektur ist in der Lage, die Abweichungen von ca. 1 K für den Messingsensor und ca. 2 K für den Aluminiumsensor für quasistationäre Signalverläufe sehr gut auszugleichen. Im transienten Übergangsbereich, bei zeitlicher Änderung der Fluidtemperatur von 59 °C auf 64 °C wird die Abweichung immer noch wesentlich verringert, die konkrete Dynamik der Fluidtemperatur mit leichtem Überschwingen kann die statische Korrektur jedoch nicht abbilden. Die instationäre Korrekturrechnung ist generell nur eine Erweiterung der stationären Struktur, weshalb der Ausgleich in den quasistationären Bereichen ident ist. Im transienten Übergangsbereich kann durch die zusätzliche Beurteilung des Temperaturgradienten die Korrekturqualität gesteigert und auch das Überschwingen der Fluidtemperatur zum Teil abgebildet werden.

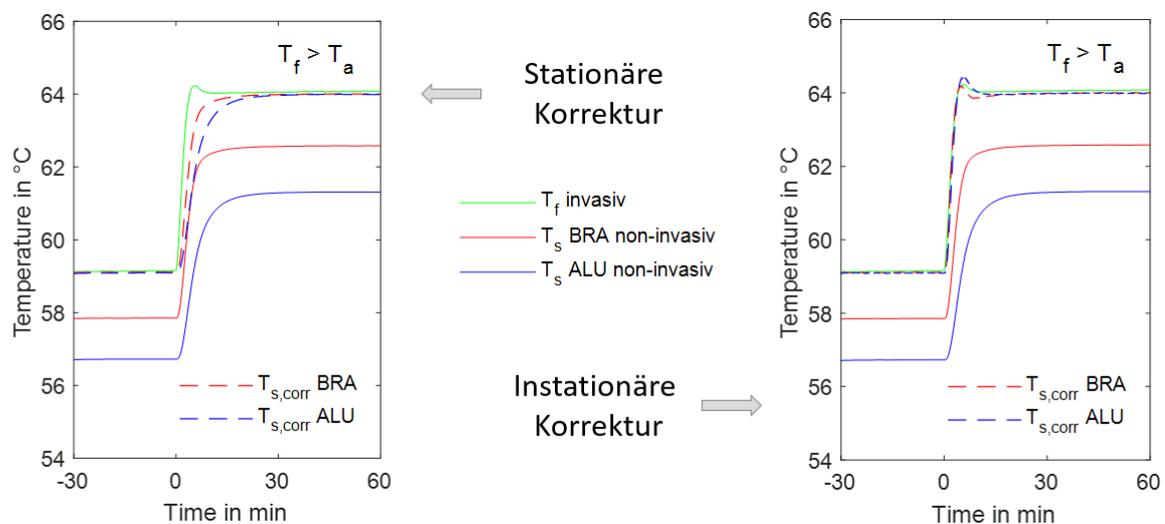


Abbildung 20: Anwendung des statischen (links) und dynamisch Korrekturalgorithmus (rechts) nach Gleichung (7) und (9) für einen Temperaturverlauf aus dem Laborexperiment mit durchgezogener Darstellung für gemessenen und strichliertem Darstellung für korrigierte Signale

Der instationären Korrektur bekommt insbesondere beim Temperaturmonitoring von hochgradig transienten Temperaturverläufen in Rohrleitungen besondere Bedeutung zu. Das kontinuierliche Ein-/Aus-schalten von Anlagen bzw. das Aufschwingen von hydraulischen Regelstrecken ist in den meisten Fällen suboptimal für die Anlageneffizienz und Haltbarkeit der Komponenten, dies ist jedoch in der Praxis häufig zu beobachten. Gerade für den in OptiMAS angedachten Einsatz der Temperaturmessungen zur Lokalisierung von Effizienzsteigerungspotentialen und kontinuierlicher Anlagenüberwachung ist daher eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Fluidtemperaturverläufe mit hohem zeitlichen Änderungsgrad essentiell.

In der Laborumgebung wurde daher der in Abbildung 21 gezeigte hochgradig dynamische Verlauf der Fluidtemperatur in einem PVC Kunststoffrohr erzeugt und durch invasive (TIN) und non-invasive (TAN) Sensoren aufgezeichnet. Nach Anwendung des instationären Korrekturalgorithmus im unteren Diagramm werden die zum Teil beträchtlichen dynamischen Abweichungen zwischen invasiven und non-invasiven Temperatursensoren im oberen Diagramm weitgehend reduziert. Für diesen Anwendungsfall spielt neben der Identifizierung des stationären Parameters R_i/R_t vor allem eine optimale Auswahl der Zeitkonstante τ eine wesentliche Rolle, um für die jeweilige Aufgabenstellung eine ausreichende Korrekturqualität zu erreichen.

Im gezeigten Experiment wurden neben der kontinuierlichen Änderung der Fluidtemperatur auch der Durchfluss bzw. die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 5 Stunden stufenweise erhöht (siehe blau strichlierte Linie in Abbildung 21). Für das untersuchte Kunststoffrohr haben die getesteten Strömungsgeschwindigkeiten offensichtlich keinen Einfluss auf die Korrekturqualität. Dieser Sachverhalt konnte nach den in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** angestellten theoretischen Überlegungen für den stationären Parameter R_i/R_t bereits vermutet werden und ist laut den experimentellen Beobachtungen - zumindest für die gewählten Randbedingungen - auch für die Zeitkonstante τ gültig.

Die im vorliegenden Bericht gezeigten Demonstrationen der Korrekturalgorithmen wurden bei optimalen Bedingungen für die vorgelagerte Parameteridentifikation durchgeführt und zeigen damit das maximale Potential für die Anwendung der entwickelten Methoden. Bei einer finalen Produktentwicklung ist daher besonderes Augenmerk auf eine effiziente und praxisgerechte Bestimmung der Parametersätze für die jeweilig angedachten Sensorinstallationen zu legen. Im Rahmen von OptiMAS wurden dazu nur initiale Überlegungen angestellt, eine direkte Umsetzung der Verfahren in der Praxis ist daher nur bedingt möglich. Um jedoch die generelle Ausführung der non-invasiven Temperaturmessung in realitätsnaher Umgebung im Sinne des Gesamtkonzeptes in OptiMAS zu evaluieren, wurden Feldtests im Living Lab Testgebäude der Forschung Burgenland durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse sind in nachfolgenden Abschnitt 3.2.1 dokumentiert.

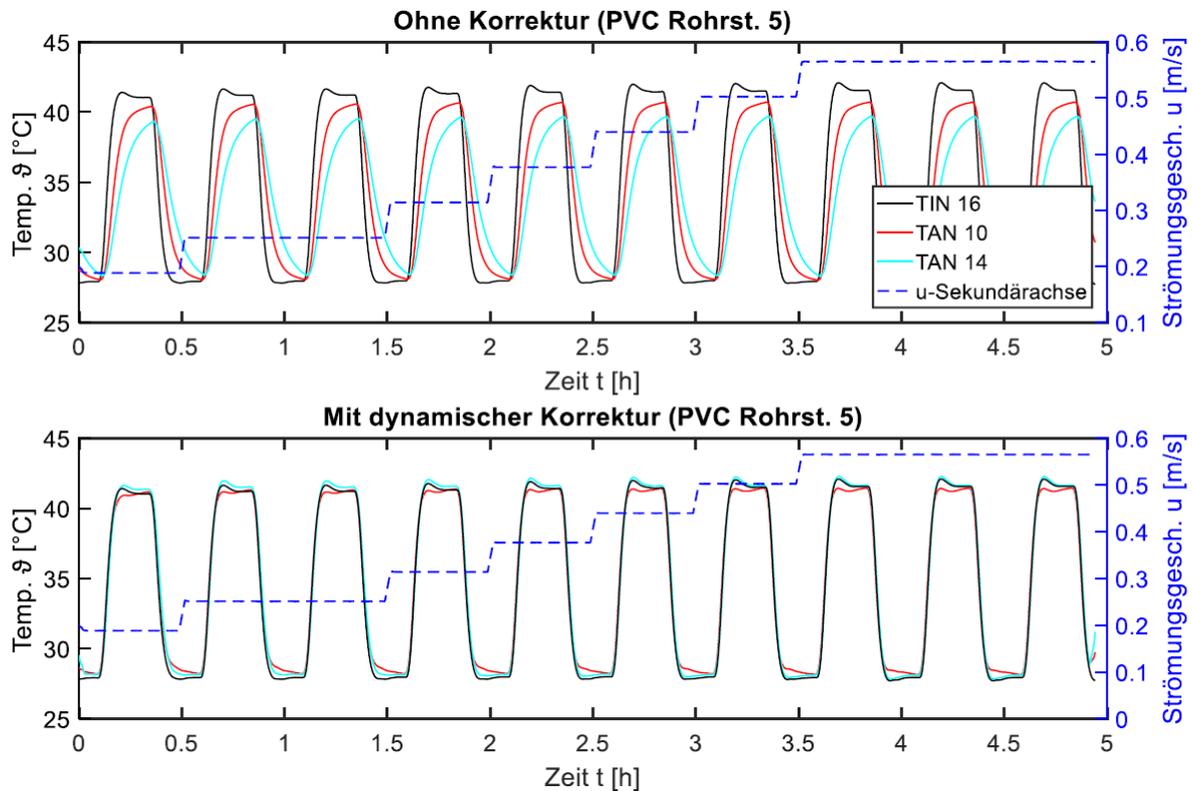


Abbildung 21: Messung der Fluidtemperatur in einem PVC-Kunststoffrohr bei hohem zeitlichen Temperaturgradienten und variierendem Durchfluss mit einem invasiven Temperatursensor (TIN 16) und zwei non-invasiven Temperatursensoren (TAN 10 und TAN 14) vor (oben) und nach (unten) der Anwendung des dynamischen Korrekturalgorithmus nach Gleichung (9)

3.1.2. Non-invasive Durchflussmessung

Die numerischen Simulationen der thermisch basierten Durchflussmessung in Abschnitt 2.2 haben ergeben, dass der Heißfilmsensor die technisch sinnvollste Art der thermischen Strömungssensoren für die angedachte Anwendung darstellt.

Übliche Heißdraht- oder Heißfilm-Strömungssensoren bestehen typischerweise nur aus einem aktiven Element – dem Heizer (in Form eines dünnen Drahtes oder einer dünnen Folie), der gleichzeitig als Wärmequelle und Temperatursensor dient. Für die konkrete Anwendung fiel die Entscheidung, Pt100-Elemente als Temperatursensoren zu verwenden, während eine Kupferdrahtwicklung als effiziente Wärmequelle dienen soll. Die genannten Pt100-Temperatursensoren sind in vielen verschiedenen Formen im Handel erhältlich und weisen im Vergleich zu Heizern aus Kupferdraht einen viel höheren elektrischen Widerstand und schnellere Reaktionszeiten auf. Der so konzipierte Sensorprototyp kann als modifizierter Heißfilmwandler beschrieben werden, da Pt100-Elemente zur Erfassung der konvektiven Abkühlung eines Heißfilms verwendet werden, anstatt allein den Heißfilm als Wärmequelle und zugleich als Temperatursensor einzusetzen.

Das grundlegende Funktionsprinzip lässt sich am besten anhand des in Abbildung 22a dargestellten schematischen Sensorquerschnitts erklären. Der Sensor besteht aus einem Heizer und zwei Pt100-Elementen, die die ungefähre Fluidtemperatur T_F sowie die Heizertemperatur T_H messen. Das im Rohr fließende Fluid kühlt den Heizer ab, wodurch die Differenz dieser beiden Temperaturwerte (auch die Heizerübertemperatur $\Delta T_H = T_H - T_F$ genannt) von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v abhängt. Anschließend wird die Heizerübertemperatur mit einer weiter unten beschriebenen Signalaufbereitungsschaltung in ein geeignetes Spannungssignal umgewandelt. Für einen ersten Sensorprototyp

wurden handelsübliche, miniaturisierte Pt100-Elemente verwendet. Ein Exemplar ist in Abbildung 22b dargestellt.

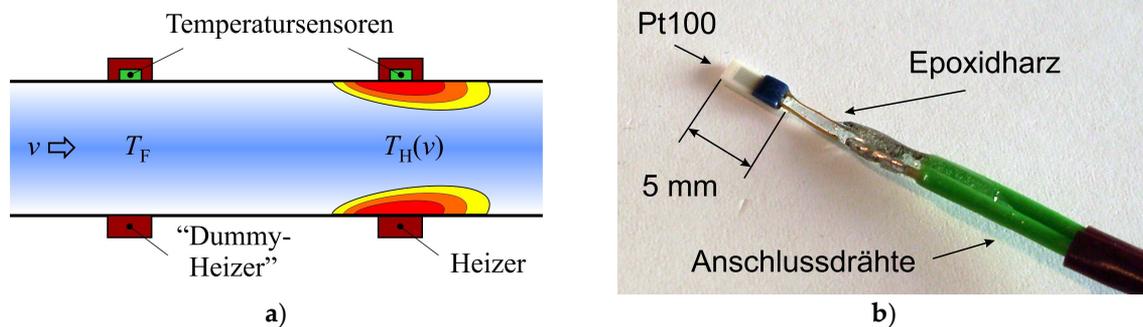


Abbildung 22: (a) Schematischen Querschnitts des Sensors; (b) Pt100-Element, für den Bau des ersten Sensorprototyps.

Abbildung 23 zeigt schrittweise den Aufbau des ersten Sensorprototyps, der für den experimentellen Nachweis des Wirkkonzepts verwendet wurde.

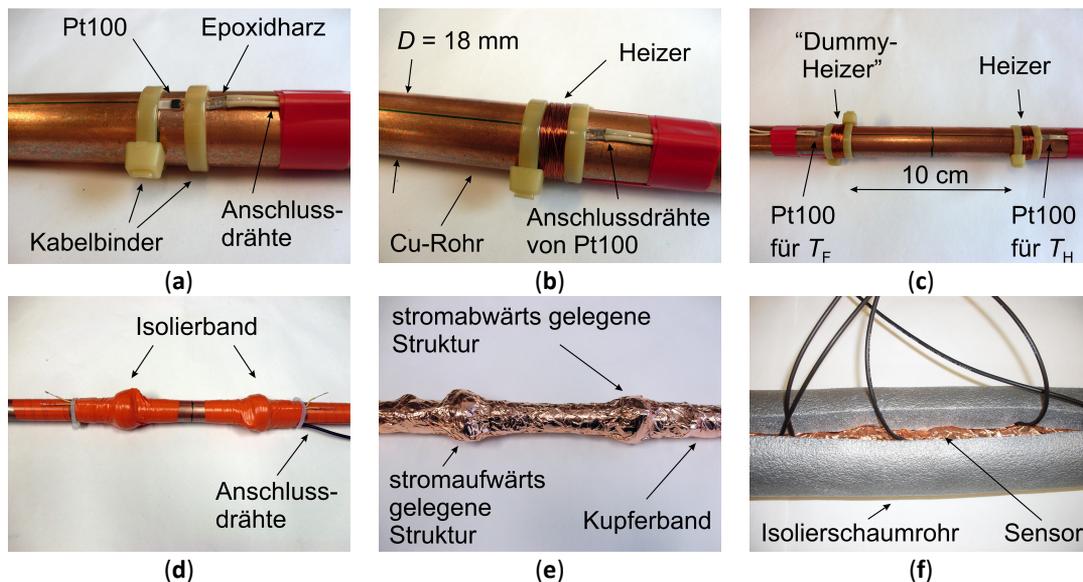


Abbildung 23: Konstruktionsschritte des ersten Sensorprototyps: (a) Befestigung des Pt100-Element am Kupferrohr (Innendurchmesser 16 mm, Außendurchmesser 18 mm); (b) Eine Kupferwicklung um den Pt100-Temperatursensor dient als Heizer; (c) Die gleiche Struktur als "Dummy-Heizer" wird 10 cm stromaufwärts angeordnet, um die Fluidtemperatur T_F zu messen; (d) Beide Strukturen werden zuerst mit elektrischem Isolierband wärmegeämmt; (e) Kupferband dient als weitere Isolierung und Abschirmung; (f) Die letzte Isolierschicht besteht aus einem 2 cm dicken Polyethylenrohr.

Das erste Pt100-Element, das die Heizertemperatur T_H messen soll, wird direkt auf die Kupferrohroberfläche gelegt und mit Kabelbindern befestigt (Abbildung 23a). Anschließend wird er mit einem 0,2 mm dünnen und 10 m langen Kupferdraht umgewickelt. Diese Kupferwicklung dient als Heizer, der im Betrieb mit einem konstanten elektrischen Strom versorgt wird (Abbildung 23b). Der elektrische Widerstand einer solchen Heizung beträgt bei Raumtemperatur ungefähr 11Ω . Dies stellt sicher, dass der zur Erreichung der angestrebten Heizleistung im Bereich von 5 bis 10 W erforderliche elektrische Strom aus praktischen Gründen den Wert von 1 A nicht überschreitet. Das zweite Pt100-Element wird in einem Abstand von 10 cm von dem ersten Heizer positioniert, um einen ungefähren Wert der Fluidtemperatur T_F zu messen. Wenn dieser Abstand zu gering gewählt wird, beeinflusst die Heizung die Temperaturmessung. Die erforderliche Entfernung wurde daher unter Verwendung eines einfachen 2D-FEM-Modells geschätzt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Oberflächentemperatur mit zunehmendem Abstand vom Heizer schnell abnimmt. Ab einem Abstand von ca. 10 cm kann der Einfluss des Heizers auf die gemessene Fluidtemperatur vernachlässigt werden.

Die gleiche Heizerstruktur soll auch um das strömungsaufwärts gelegene Pt100-Element herum aufgebaut werden. Im Gegensatz zur ersten Kupferwicklung wird sie nicht mit elektrischem Strom versorgt (Abbildung 23c). Daher beeinflusst dieser „Dummy-Heizer“ das Temperaturfeld nicht, reduziert jedoch im erheblichen Maß die Dauer der Einschwingzeit nach plötzlichen Schwankungen der Fluidtemperatur, da die beiden Strukturen ungefähr die gleiche thermische Masse aufweisen. Für eine zuverlässige Signalumwandlung müssen alle Sensorelemente thermisch von der Umgebung isoliert werden. Zu diesem Zweck werden sie zuerst mit Mullverband und abschließend mit elektrischem Isolierband umgewickelt (Abbildung 23d). Neben der Wärmedämmung verhindert der Mullverband auch den direkten Kontakt des klebrigen Kunststoffbandes mit der heißen Oberfläche des Heizers. Zur elektrischen Abschirmung wird außerdem ein dünnes Kupferband aufgebracht (Abbildung 23e), das auch dazu beiträgt, die Auswirkungen von Temperaturgradienten zu verringern, wenn sie in der Umgebung des Wandlers auftreten. Schließlich wird der gesamte Sensor mithilfe eines Polyethylenrohrs thermisch von der Umgebung isoliert (Abbildung 23f). Das Isolierschaumrohr wird anschließend mit Kabelbindern festgezogen.

Um den Sensorprototyp in einer realistischen Umgebung experimentell zu charakterisieren, wurde ein spezieller Messaufbau entwickelt und umgesetzt (Abbildung 24).

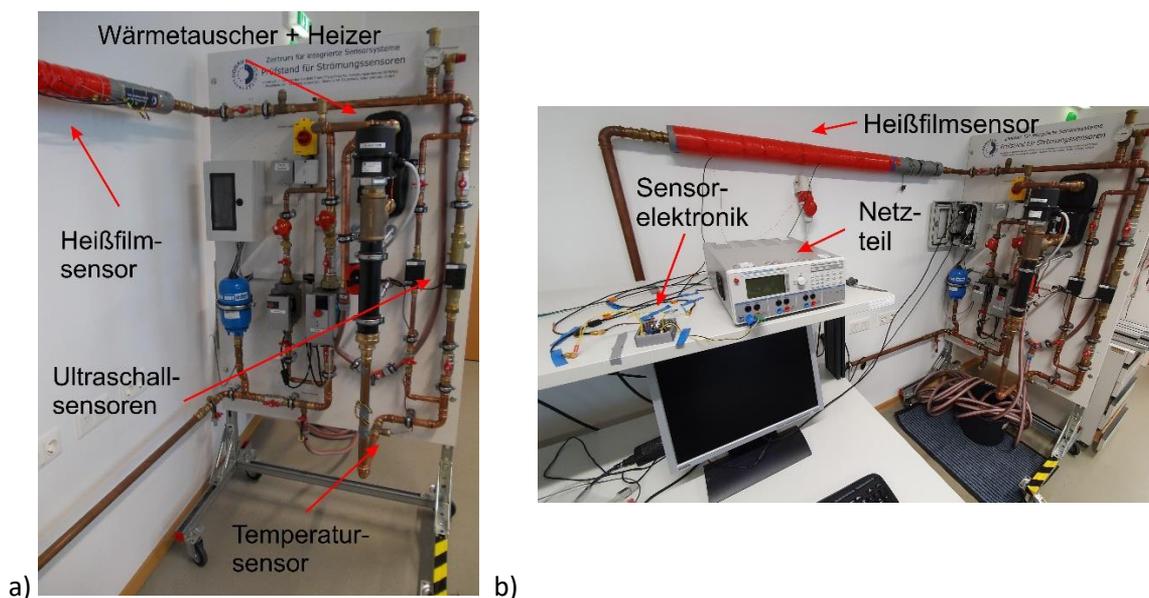


Abbildung 24: (a) Prüfstand zur experimentellen Charakterisierung der thermischen Strömungssensoren; (b) Sensorprototyp im geschlossenen hydraulischen Kreislauf. Sichtbar ist außerdem die für die Signalaufbereitung verwendete Sensorelektronik samt passendem Netzteil.

Dieser besteht aus einem geschlossenen hydraulischen Kreislauf, der neben dem Sensorprototyp auch zwei Wasserpumpen, Druckausgleichseinrichtung sowie einen Wärmetauscher in Kombination mit einem Heizer beinhaltet. Mit den beiden letzteren ist es möglich, die Wassertemperatur stufenlos und in einem breiten Temperaturbereich einzustellen. Um den thermischen Strömungssensor kalibrieren zu können, beinhaltet der Prüfstand eine Reihe von Sensoren, wie invasive Pt100-Temperatursensoren sowie nichtinvasive Ultraschallsensoren, die den Referenzwert für den Durchfluss zur Verfügung stellen (vergl. Abbildung 24a).

In Abbildung 24b sind neben dem Prüfstand und dem Heißfilmsensor auch die verwendete elektronische Schaltung für die Signalaufbereitung (Sensorelektronik) sowie das passende Netzteil, das den für den Betrieb notwendigen elektrischen Strom in der Größenordnung von 1 A liefert, dargestellt.

Abbildung 25 illustriert das schematische Diagramm der Signalaufbereitungsschaltung. Sie besteht aus einer Wheatstone-Brücke, welche die beiden Pt100-Temperatursensoren mit Strom versorgt, sowie zwei Verstärkern (A_1 und A_2) mit optionaler Offsetkorrektur. Der elektrische Strom durch die Pt100-Elemente beträgt nur etwa 1 mA, was gewährleistet, dass die Selbsterwärmungseffekte vernachlässigbar klein sind. Wenn die Offsetkorrektur des ersten Instrumentenverstärkers A_1 ausgeschaltet wird, korreliert sein Ausgangssignal U_1 mit der in Abbildung 15a dargestellten Übertemperatur des Heizers (grüne Charakteristik). Dieses Signal enthält eine Offset-Spannung (in Abbildung 25 als Offset_1 bezeichnet), die sich aus der inhärent hohen Differenz zwischen der Heizertemperatur und der Temperatur des strömungsaufwärts gelegenen Pt100-Sensors ergibt. Sie muss kompensiert werden, um eine weitere Verstärkung des strömungsabhängigen Anteils des Signals (ΔU) zu ermöglichen. Das offsetkorrigierte Signal wird dann vom zweiten Verstärker A_2 so verstärkt, dass das Ausgangssignal einen bestimmten Spannungsbereich abdeckt. Dieser Bereich wird von dem Analog-Digital-Konverter (ADC) des verwendeten Mikrocontrollers definiert. Auf diese Weise wird die beste Empfindlichkeit der Signalaufbereitungsschaltung erreicht.

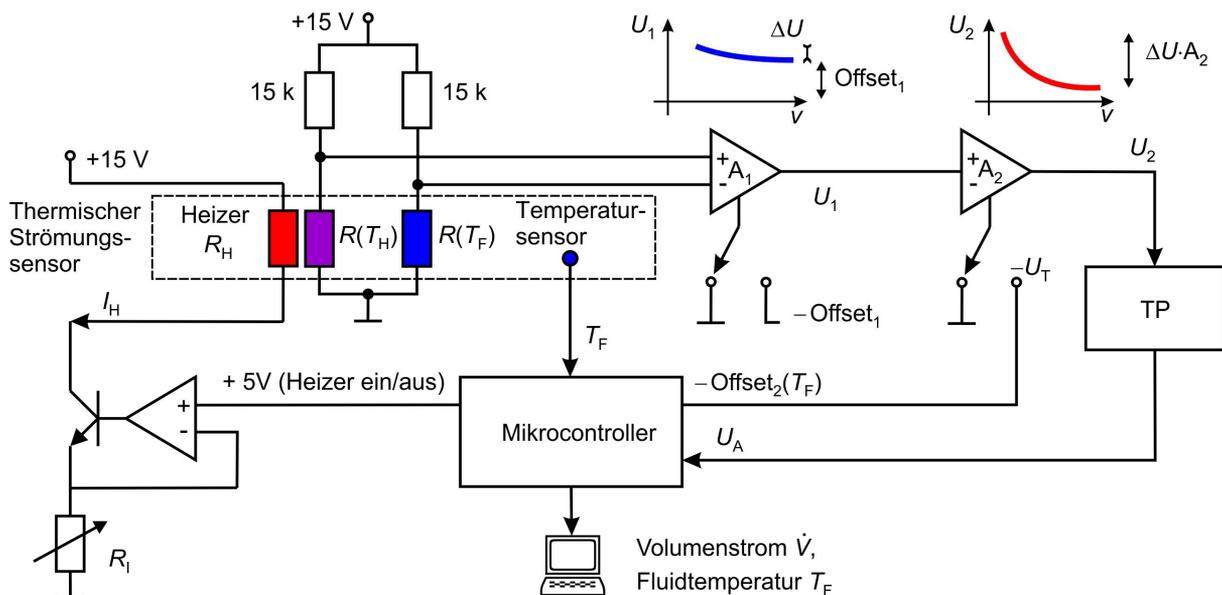


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Signalaufbereitungsschaltung. $R(T_H)$ und $R(T_F)$ bezeichnen die Pt100-Elemente, die sich unterhalb bzw. stromaufwärts vom Heizer befinden. Durch den Offset des zweiten Verstärkers kann die Temperaturabhängigkeit des Ausgangssignals berücksichtigt werden. Vor der Abtastung durch einen Mikrocontroller wird das Ausgangssignal durch ein Tiefpassfilter (TP) gefiltert.

Zusätzlich hängt das Ausgangssignal des zweiten Verstärkers U_2 auch von der Fluidtemperatur T_F ab. Die genaue Temperaturabhängigkeit ist eine Funktion verschiedener Faktoren wie Materialparameter des Fluids, des Rohrs und des Heizers oder der Gesamtverstärkung ($A_1 \cdot A_2$) und muss experimentell bestimmt werden (siehe weiter unten). Dies kann berücksichtigt werden, indem die Fluidtemperatur T_F mit einem separaten, non-invasiven Temperatursensor gemessen und am zweiten Verstärker ein geeigneter temperaturabhängiger Offset eingestellt wird (in Abbildung 25 als Offset_2 oder U_T bezeichnet). Alternativ kann die Fluidtemperatur auch mit dem strömungsaufwärts gelegenen Pt100-Element des Sensors ermittelt werden. Um das Rauschen zu reduzieren, wird das offsetkorrigierte Ausgangssignal U_2 durch ein Tiefpassfilter gefiltert. Im linken Teil von Abbildung 25 ist außerdem das schematische Diagramm der verwendeten Stromquelle zu sehen. Der konstante Heizstrom I_H wird stufenlos durch den variablen Widerstand R_I eingestellt.

Ein Mikrocontroller wird verwendet, um das Ausgangssignal U_A abzutasten und aktuelle Messergebnisse anzuzeigen. Er überwacht außerdem die Wassertemperatur T_F und legt die entsprechende Temperaturkorrekturspannung U_T an den zweiten Verstärker an. Schließlich schaltet er auch die Heizung ein und aus.

Im Laufe des Projekts wurden mehrere Prototypen der Sensorelektronikschaltung entwickelt und getestet. Abbildung 26a zeigt die finale miniaturisierte Version, aufgebaut mit SMD-Bauteilen (Surface Mounted Device), die eine Integration mit dem IoT-Gateway (Internet of Things) erlaubt. Neben der Stromquelle und den Verstärkern ist auch der Mikrocontroller auf der gleichen Platine untergebracht und der Formfaktor soweit reduziert, dass ein Einsatz in der Anwendung möglich wäre. Der Mikrocontroller errechnet anhand der gemessenen Spannungen die entsprechenden Werte für den Volumenstrom und Fluidtemperatur und speichert diese für die weitere Verarbeitung. Außerdem ist er für die Kommunikation mit dem IoT-Gateway mit einer I²C-Schnittstelle ausgerüstet. Die Kommunikation erfolgt bidirektional – auf der einen Seite liefert der Mikrocontroller die aktuellen Messwerte an das IoT-Gateway während auf der anderen Seite der Mikrocontroller über geeignete Befehle durch das Gateway getestet (Selbsttest) und konfiguriert werden kann. Für die Platine wurde ein geeignetes Gehäuse entworfen und mit einem 3D-Drucker hergestellt (Abbildung 26b).

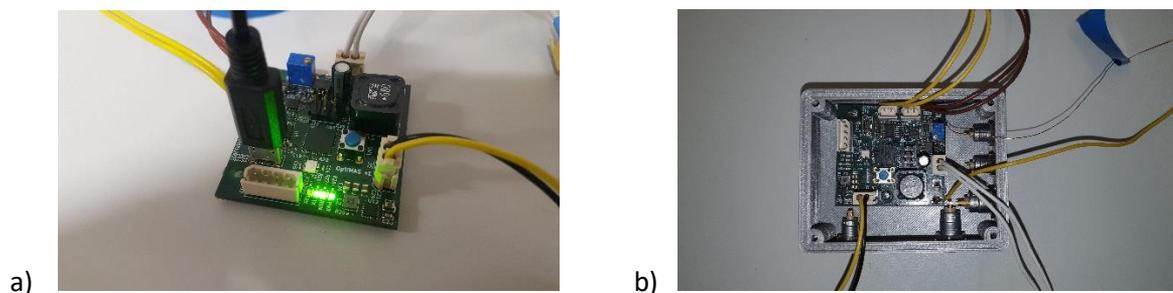


Abbildung 26: (a) Sensorelektronikschaltung aufgebaut mit SMD-Technologie; (b) Die miniaturisierte Platine untergebracht in einem mittels 3D-Druck hergestellten Gehäuse.

Für die Charakterisierung des ersten Sensorprototyps betrug der Heizstrom 730 mA, wodurch sich eine Heizleistung im Bereich zwischen 6,3 W und 6,4 W ergab. Die Gesamtverstärkung und der Offset₁ wurden so gewählt, dass sich das Ausgangssignal über den Spannungsbereich zwischen 0 und 5 V erstreckt, damit der ADC des Mikrocontrollers optimal genutzt werden kann.

Die gemessene Ausgangscharakteristik ist in Abbildung 27a dargestellt. Die Umwandlung des Volumenstromes in die Ausgangsspannung ist am effektivsten bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit sättigt das Signal und die Empfindlichkeit nimmt ab. Die dargestellte Ausgangscharakteristik wurde bei einer Referenzfluidtemperatur von $T_{\text{ref}} = 25 \text{ °C}$ gemessen und wird als Referenzkennlinie $U_{A,\text{ref}}$ für den Mikrocontroller verwendet. Mit einer Änderung der Fluidtemperatur verschiebt sich diese Charakteristik, d.h. das Ausgangssignal erhält einen Offset. Wenn bekannt ist, wie stark dieser ausfällt, kann er leicht kompensiert werden, indem beim zweiten Verstärker einen entsprechenden „Gegenoffset“ eingestellt wird. Zu diesem Zweck wurde in weiteren Versuchen die Fluidtemperatur T_F für drei repräsentative Werte des Volumenstroms (am Beginn, in der Mitte und am Ende des Strömungsbereichs) zwischen 10 °C und 50 °C variiert. Abbildung 27b zeigt die Abweichung der gemessenen Ausgangsspannung $U_A(T_F)$ vom Referenzwert $U_{A,\text{ref}} = U_A(T_{\text{ref}})$ als Funktion der Temperaturdifferenz $T_F - T_{\text{ref}}$.

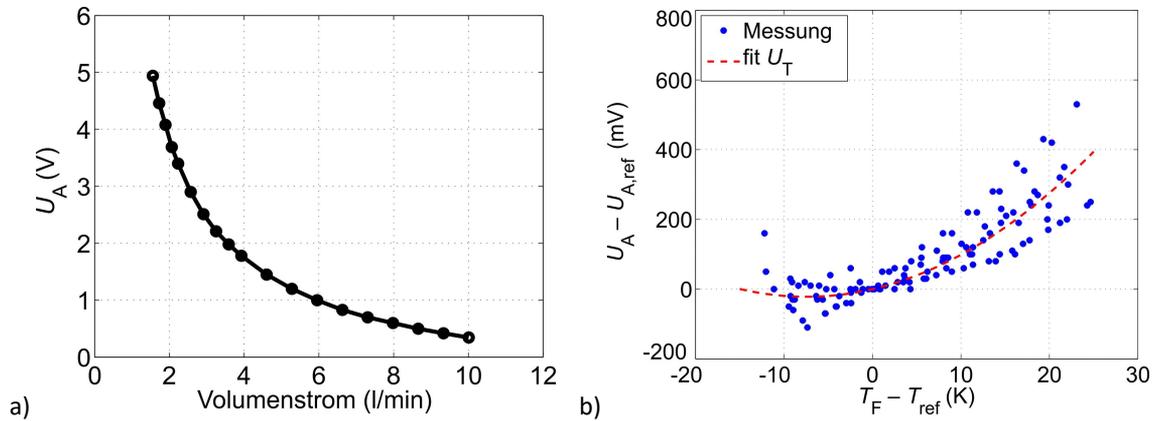


Abbildung 27: (a) Ausgangskennlinie des ersten Sensorprototyps. Während der Messung lag die Wassertemperatur um den Referenzwert von 25 °C; (b) Differenz zwischen der Ausgangsspannung U_A (gemessen bei der aktuellen Fluidtemperatur T_F) und dem Referenzwert $U_{A,ref}$ (gemessen bei der Referenzfluidtemperatur $T_{ref} = 25$ °C) als Funktion der Temperaturdifferenz $T_F - T_{ref}$. Bei der Messung wurde T_F bei verschiedenen konstanten Werten des Volumenstroms zwischen 10 °C und 50 °C für Niedertemperaturheizungen variiert.

Die Spannungsdifferenz $U_A - U_{A,ref}$ hängt nicht nur von der Fluidtemperatur T_F ab, sondern auch von der Strömungsgeschwindigkeit und der Art und Weise, wie T_F geändert wird (d.h. ob die Fluidtemperatur während der Messung zunimmt oder abnimmt). Infolgedessen weisen die aufgenommenen Messwerte eine signifikante Streuung auf. Als Korrekturfunktion U_T wird daher der Least-Square-Fit (rote gestrichelte Linie in Abbildung 27b) herangezogen. Im Sensorbetrieb überwacht der Mikrocontroller die Fluidtemperatur T_F und berechnet daraus den nötigen Offset $U_T(T_F)$ des zweiten Verstärkers. Dadurch liegt am Eingang des Mikrocontrollers stets die offsetkorrigierte Ausgangsspannung $U_1 \cdot A_2 - U_T$. Diese wird vom ADC des Mikrocontrollers abgetastet und durch Anwendung der Umkehrfunktion, der in Abbildung 27a dargestellten Referenzkennlinie, in einen Volumenstrom umgerechnet und gespeichert bzw. an ein IoT-Gateway weitergeleitet.

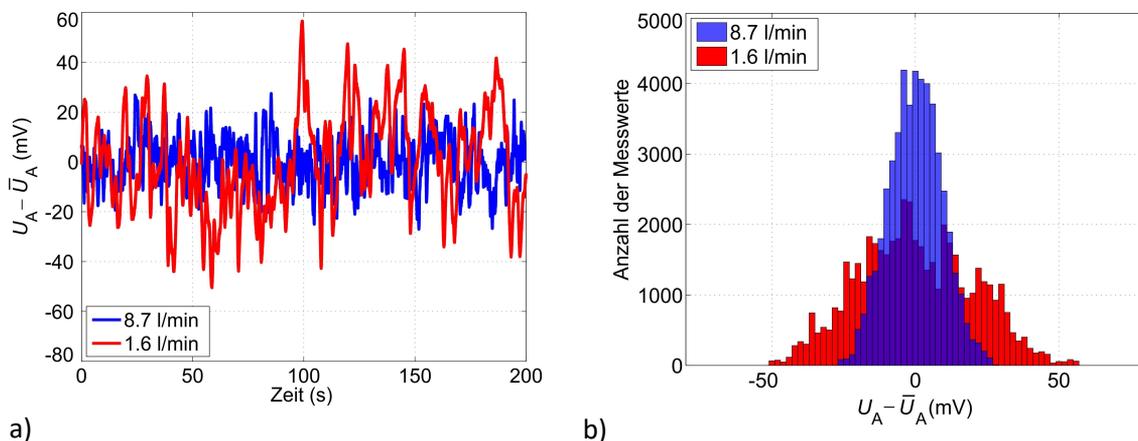


Abbildung 28: (a) Oszillogramme und (b) entsprechende Histogramme der mittelwertfreien Ausgangsspannung ($U_A - \bar{U}_A$, wobei \bar{U}_A den Mittelwert der Ausgangsspannung bezeichnet) aufgenommen bei zwei verschiedenen Werten des Volumenstroms. Die Oszillogramme wurden bei einer Abtastrate von 250 Hz aufgenommen, für die Histogramme wurden 50.000 Messwerte herangezogen.

Um die Genauigkeit des Sensorsystems bzw. den maximalen Messfehler abzuschätzen, muss das Rauschen des Messsignals untersucht werden. Zu diesem Zweck wird das stationäre Ausgangssignal nach dem Tiefpassfilter U_A mit einem digitalen Oszilloskop aufgenommen. Abbildung 28a zeigt beispielhaft 200 s lange Oszillogramme aufgenommen bei einem hohen und einem niedrigen Wert des Volumenstroms. Aus solchen Aufnahmen lassen sich Histogramme erstellen, die auf eine Gauß-Verteilung des Rauschens hindeuten (Abbildung 28b). Charakteristische Größe dabei ist die Standardabweichung der

Ausgangsspannung σ_U , die mit dem beschriebenen Verfahren für ausreichend viele Werte des Volumenstroms, verteilt über den ganzen Geschwindigkeitsbereich, ermittelt werden soll. Unter Heranziehung der Steigung S der in Abbildung 27a abgebildeten Ausgangscharakteristik wird daraus die Standardabweichung des gemessenen Volumenstroms \dot{V} errechnet $\sigma_{\dot{V}} = \sigma_U/S$. Wie Abbildung 29b zeigt, ist diese stark von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig.

Etwa 99,7 % der aus einer Normalverteilung entnommenen Werte liegen innerhalb eines Intervalls von ± 3 Standardabweichungen um den Mittelwert. Unter der Annahme einer Normalverteilung für den gemessenen Volumenstrom (vergl. Abbildung 28b) kann daher der maximale, relative Fehler $E_{r,\max}$ nach Gleichung (12) abgeschätzt werden, wobei $\sigma_{\dot{V}}$ die gemessene Standardabweichung bei einem bestimmten Wert des Volumenstroms \dot{V} darstellt.

$$|E_{r,\max}| = \frac{3\sigma_{\dot{V}}}{\dot{V}} \cdot 100\% \quad (12)$$

Der maximale, relative Fehler als Funktion der Reynolds-Zahl ist in Abbildung 29 dargestellt. Anhand der Reynoldszahl lässt sich aussagen, ob eine Strömung laminar oder turbulent erfolgt. Im Bereich $2.000 < Re < 4.000$ findet der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung statt und die gemessene Standardabweichung des Volumenstroms steigt überproportional stark an. Aus diesem Grund nimmt der relative Fehler in Abbildung 29 mit steigender Reynolds-Zahl zu. Nachdem die Strömung vollständig turbulent geworden ist ($Re > 4.000$, Holman J. P., 2009), steigt die Standardabweichung nur noch proportional zum Volumenstrom an und der relative Fehler bleibt daher ab diesem Wert der Reynolds-Zahl annähernd konstant. Der maximale relative Fehler liegt jedoch für alle untersuchten Werte des Volumenstroms stets unter 3 %.

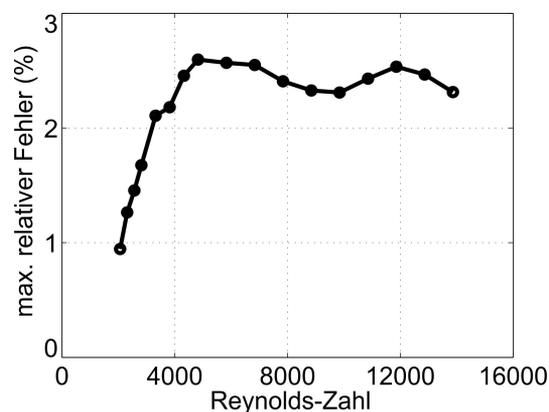


Abbildung 29: Abschätzung des maximalen, relativen Fehlers nach Gleichung (12) als Funktion der Reynolds-Zahl.

3.2. Evaluierungen in Testgebäuden

Die zur Evaluierung des in OptiMAS angedachten Monitoring- und Analysekonzeptes in Frage kommenden Testgebäude müssen bestimmte Anforderung erfüllen. Zum einen sollten die Gebäude repräsentative, gebäudetechnische Anlagen enthalten. Zum anderen sollte im Idealfall eine ausreichende Anzahl bereits vorhandener Referenzsensoren installiert sein. Darüber hinaus muss die Zugänglichkeit zumindest zu den technischen Anlagen sowie die Kooperationsbereitschaft der Gebäudeeigentümer

zur Zusammenarbeit mit dem Projektteam vorhanden sein. Die entwickelten Methoden stellen zudem jeweils spezifische Anforderung an die Evaluierungsumgebung, sodass innerhalb des Projektteams die prototypische Installation in insgesamt zwei Testgebäuden festgelegt wurde. Diese sind das „Living Lab“ Energetikum am Campus der FH Burgenland in Pinkafeld, vgl. Abschnitt 2.1.6, sowie ein Einfamilienhaus mit gebäudetechnischen Anlagen in Kompaktbauweise, wie sie dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen.

3.2.1. Non-invasive Temperaturmessung

Die Evaluierung der non-invasiven Temperaturmessung an Rohrleitungen mittels Anlegefühlern im Testgebäude Energetikum der Forschung Burgenland hatte vorrangig zwei Ziele. Zum einen wurde überprüft, ob die vielversprechenden Ergebnisse aus der Evaluierung in Laborumgebung auch in einem realitätsnahen Umfeld reproduziert werden können. Zum anderen sollte generell die praktische Umsetzung des Verfahrens, das Installationsprozedere sowie die Integration in die von OptiMAS vorgesehene Architektur zur Datenakquise und Datenverarbeitung überprüft werden, um bis dato nicht aufgetretene Problemstellungen im Rahmen der Gesamtsystemumsetzung aufzuzeigen.

Für das exemplarisch ausgewählte Temperaturmonitoring eines Fußbodenheizungssystems (vgl. Abbildung 12) ist der Vorlauftemperaturverlauf eines Einschaltvorgangs in Abbildung 30 dargestellt.

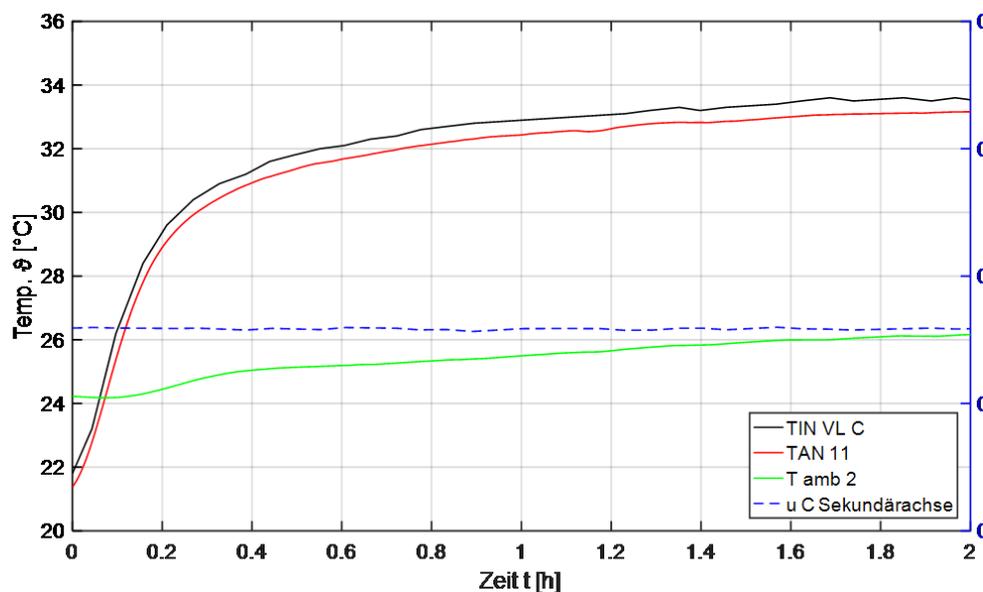


Abbildung 30: Verlauf der Vorlauftemperatur einer Fußbodenheizung im Testgebäude bei einem Einschaltvorgang für einen invasiven Vergleichssensor TIN VL C, einen wärmegeprägten Anlegesensor TAN 11 und dargestellter Umgebungstemperatur im Fußbodenheizungsverteiler T amb 2. Ergänzend in blau die Strömungsgeschwindigkeit im Kunststoffrohr.

Durch die Installation der Sensorik im Fußbodenheizungs-Verteilerkasten relativiert sich die ursprüngliche Annahme einer weitgehend konstanten Umgebungstemperatur für die Anwendung der Korrekturalgorithmen. Der in vielen Fällen nicht wärmegeprägte Verteiler verursacht erhebliche Wärmeeinträge, die innerhalb des Verteilerkastens zu erhöhten Temperaturverhältnissen im Vergleich zum restlichen Gebäude führen und darüber hinaus Schwankungen des Mikroklimas am Installationsort verursachen. Bei den ohnehin niedrigen Temperaturen in Flächenheizsystemen ist ein Einfluss der lokalen Umgebungstemperatur auf die Performance der Korrekturalgorithmen daher nicht auszuschließen und ein zusätzliches Monitoring der Umgebungstemperatur sowie die Einbindungen dieser Daten

in die Korrektur-Rechnung ist empfehlenswert. In Abbildung 30 ist daher auch die Umgebungstemperatur im Verteilerkasten grün dargestellt sowie ergänzend die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in blau.

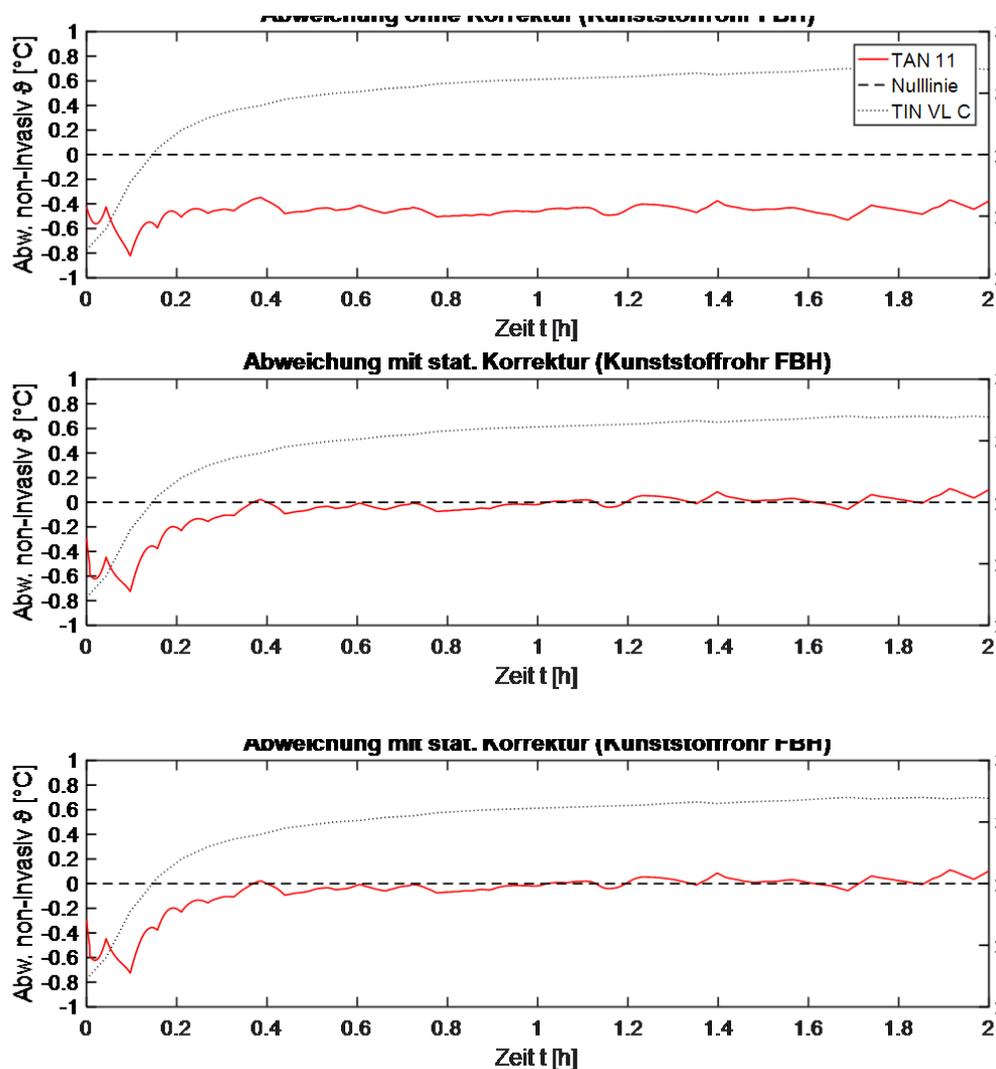


Abbildung 31: Abweichung der Temperaturmessung des Anlegesensors TAN 11 vom invasiven Vergleichssensor TIN VL C ohne (oben) und mit Anwendung des statischen (mittig) bzw. des dynamischen Korrekturalgorithmus (unten)

Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus sind in der Abbildung 31 direkt die Abweichungen des non-invasiven Sensors gegenüber dem invasiven Sensor in Rot dargestellt. Trotz Wärmedämmung und Verwendung von Wärmeleitpaste misst der non-invasive Sensor eine um ca. 0,6 K geringere Temperatur (Abbildung 31, oben). Nach Anwendung des statischen Korrekturalgorithmus laut Gleichung (7), in der Abbildung 31 mittig, wird die Abweichung im Zeitbereich mit geringem Temperaturgradienten ab ca. 0,4 h auf annähernd Null reduziert. Im Zeitraum mit vergleichsweise hohem zeitlichem Gradienten bleibt die Abweichung erhöht. Erst durch die Anwendung der dynamischen Korrekturrechnung laut Gleichung (9) wird auch im Zeitraum bis 0,4 h die Abweichung reduziert, es verbleibt jedoch eine Restunsicherheit von ca. +/- 0,2 K.

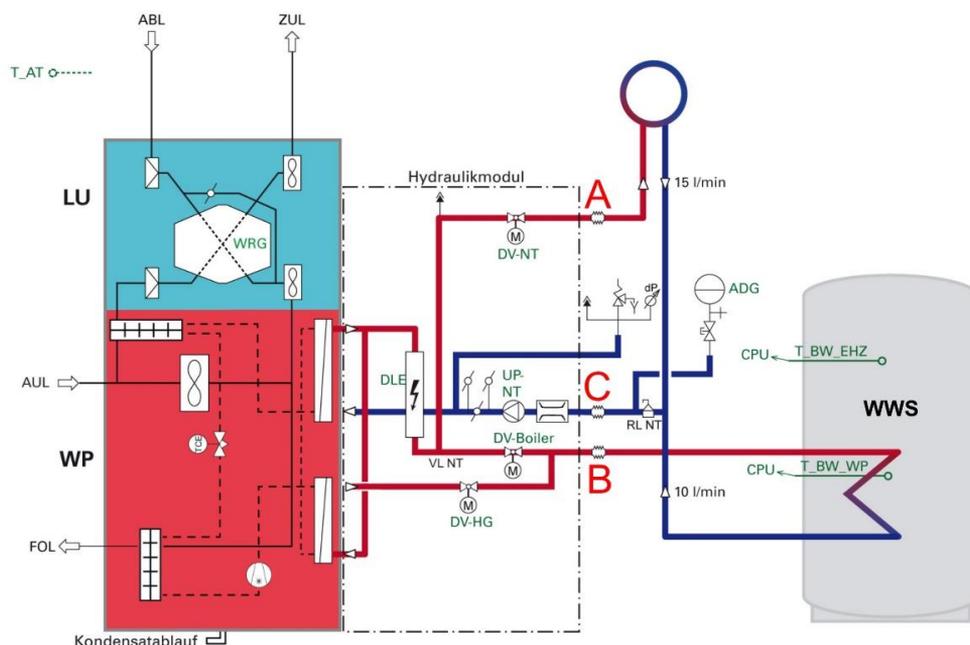
Das aus den Laborexperimenten bekannte hohe Niveau der Korrekturqualität konnte auch in mehreren Evaluierungs-Szenarien im Testgebäude bestätigt werden. Aufgrund der optimalen Bedingungen für die vorgelagerte Parameteridentifikation können auch diese Ergebnisse nur als maximales Potential für die Anwendung der Methode interpretiert werden. Die Versuche im Testgebäude zeigen zudem

anwendungsspezifische Problemstellungen in der Installation und der Durchführung der Messungen, die vor finaler Umsetzung einer Produktentwicklung bearbeitet werden sollten. Das Potential der in OptiMAS entwickelten modellbasierten Methodik ist dennoch vielversprechend und rechtfertigt weitere Forschungs- und insbesondere Entwicklungsaktivitäten.

3.2.2. Non-invasive Durchflussmessung

In Ergänzung zu experimentellen Untersuchungen in den Laboreinrichtungen der Projektpartner wurden zur finalen Evaluierung der non-invasiven Durchflussmessung mittels aktiver Beheizung der Rohroberfläche Feldtests in einem Einfamilienhaus durchgeführt. Das Einfamilienhaus wurde dem Projektteam während der Projektlaufzeit für Messungen zur Verfügung gestellt.

Die Heizungsanlage des Hauses beinhaltet ein Kompaktgerät vom Typ x²A9 der Firma Drexel und Weiss für Heizung, Wohnraumlüftung sowie Warmwasserbereitung. Dieses besteht aus einem Lüftungsmodul, einer Wärmepumpe und einem Hydraulikmodul. Angeschlossen sind ein externer Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 300 l sowie ein Niedertemperatur-Heizkreis für die Fußbodenheizung, der aus insgesamt 17 separaten Kreisen an drei Stockwerksverteiltern besteht und eine Nutzfläche von 200 m² beheizt. Die Heizungsregelung erfolgt zentral, außentemperaturgesteuert und mit einem Raumthermostat in einem Führungsraum. Das Hydraulikschema einer Heizung mit einfacher Regelung (wie auch vor Ort installiert) ist in Abbildung 32 dargestellt.



- | | |
|--|---|
| ADG.....Ausdehnungsgefäß | DV-NTDurchgangsventil Nieder-
temperatur-Heizkreis |
| DLE.....Durchlauferhitzer | RLRücklauf |
| DV-BoilerDurchgangsventil Spei-
cherkreis | T_.....Temperaturfühler |
| DV-HGMotor-Kugelventil Heizgas-
nutzung | UP-NTUmwälzpumpe NT (Boiler) |
| | VLVorlauf |

Abbildung 32: Schematische Darstellung des Kompaktgerätes x²A9 bestehend aus einem Lüftungsmodul (LU), einer Wärmepumpe (WP) sowie einem Hydraulikmodul. An das Gerät sind ein Warmwasserspeicher (WWS) und der Kreislauf einer Niedertemperatur-Heizung angeschlossen. Nichtinvasive Temperatursensoren werden an beiden Vorlaufleitungen (A und B) sowie an der gemeinsamen Rücklaufleitung (C) installiert. An letzterer wird auch der nichtinvasive thermische Strömungssensor angebracht. (nach Drexel und Weiss, 2019)

An das Hydraulikmodul werden drei Leitungen angeschlossen (Abbildung 33a): Vorlaufleitung für den Heizkreis (gekennzeichnet mit dem roten Buchstaben A in Abbildung 32 und Abbildung 33), Vorlaufleitung für den Warmwasserspeicher (B) sowie die gemeinsame Rücklaufleitung (C). Wegen geringerer Temperaturschwankungen des Fluids wird der thermische Strömungssensor vorzugsweise an letzterem angebracht. Die Montage erfolgt direkt auf der Oberfläche des Kupferrohres. Zuvor musste der vorhandene Isolierschlauch gestaut und fixiert werden, sodass die Rohroberfläche auf eine Länge von mindestens 30 cm zugänglich wird. In Abbildung 33b ist das freigelegte Rücklaufrohr zu sehen, während sich links und rechts davon die Vorlaufleitungen für Heizung und Warmwasserspeicher befinden.

a)



b)



Abbildung 33: (a) Die Lage der beiden Vorlaufleitungen (A und B) sowie der gemeinsamen Rücklaufleitung (C) im Keller des Testgebäudes.

Der Heizer des ersten Sensorprototyps beschrieben in Abschnitt 3.1.2 wurde als eine Kupferdrahtwicklung realisiert. Im Gegensatz dazu besteht der für das Testgebäude entwickelte Sensorprototyp aus zwei Pt100-Elementen und zwei Drahtheizern, die alle in selbstklebenden Folien eingebettet sind und ohne aufwendige Umwicklung auf das Rohrstück angebracht werden können. Aufgrund dieser modifizierten Bauart ist eine schnelle und unkomplizierte Montage (auch an relativ unzugänglichen Stellen eines hydraulischen Kreislaufs) möglich. Diese erfolgt in mehreren Schritten, die in Abbildung 34 illustriert sind.

Die passende Montagestelle wird von Oxyd- und Fettrückständen gereinigt und das erste Pt100-Element angebracht (Abbildung 34a). Um diesen Temperatursensor wird die Heizfolie so gewickelt, dass sie das ganze Pt100-Element abdeckt (Abbildung 34b). In 10 cm Abstand stromaufwärts wird ein zweites Pt100-Element mit dem darüber gewickelten „Dummy-Heizer“ positioniert (Abbildung 34c). Beide Strukturen werden mit Mullbinde und Isolierband thermisch von der Umgebung isoliert (Abbildung 34d). Darauf kommt eine dünne Schicht selbstklebender Kupferfolie, die für die elektrische Abschirmung sorgt (Abbildung 34e). Abschließend wird über den Sensor noch ein konventioneller (thermischer) Isolierschlauch angebracht (Abbildung 34f).

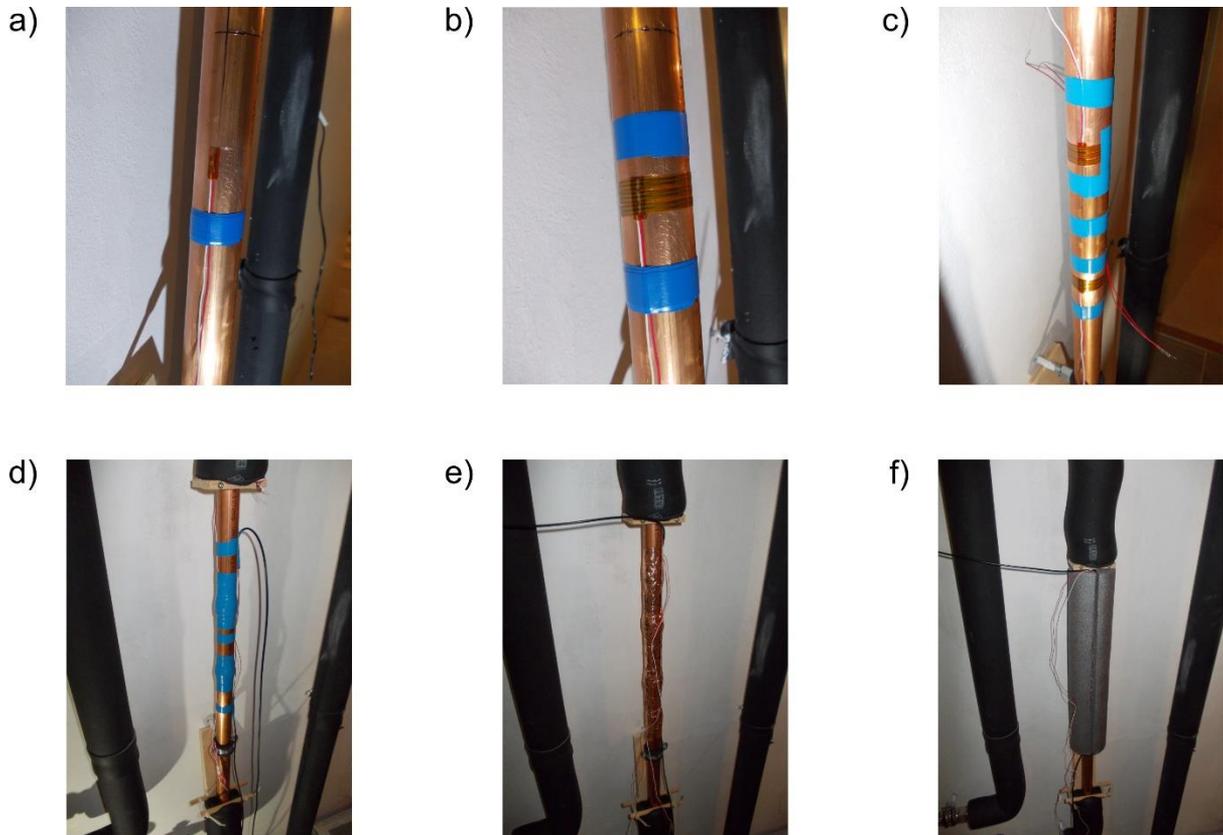


Abbildung 34: Montageschritte des nichtinvasiven thermischen Strömungssensors. (a)-(c) Das Anbringen von Pt100-Elementen und Heizerfolien. (d)-(f) Thermische Isolierung und elektrische Abschirmung des Sensors.

Als Referenz und Kalibrierungsnormal dient ein non-invasiver (clamp-on) Ultraschall-Sensor. Dieser wird stromabwärts nach dem thermischen Strömungssensor auf dem verbleibenden freigelegten Stück der Rücklaufleitung, wie in Abbildung 35a dargestellt, montiert. Außerdem werden im hydraulischen System noch drei non-invasive Temperatursensoren integriert. Es handelt sich um die Bauteile LM335 in TO-92-Gehäuse, die (versehen mit der Wärmeleitpaste) direkt an das Kupferrohr angelegt und abschließend mit Klebeband fixiert werden. Zwei davon werden an die Vorlaufleitungen gleich am Beginn der Kupferrohre unter dem Isolierschlauch montiert (Abbildung 35b und c). Der dritte Sensor wird auf der gemeinsamen Rücklaufleitung stromaufwärts von dem thermischen Strömungssensor montiert, sodass er nicht vom dessen Heizer beeinflusst wird (nicht abgebildet). Die Kenntnis der Temperatur des Fluids, dessen Strömungsgeschwindigkeit der thermische Sensor misst, ist notwendig, um die Temperaturabhängigkeit des Sensors zu berücksichtigen bzw. das Ausgangssignal des Sensors entsprechend korrigieren zu können.



Abbildung 35: (a) An der Rücklaufleitung wird neben dem thermischen Strömungssensor auch ein Ultraschall (US)-Strömungssensor zur Referenz montiert. (b) Lage des Temperatursensors an der Vorlaufleitung zum Warmwasserspeicher (Stelle B in Abb. 33). (c) Lage des Temperatursensors an der Vorlaufleitung der Niedertemperatur-Heizung (Stelle A in Abb. 33).

Für den Dauerbetrieb ist der alternierende Betriebsmodus am besten geeignet. In diesem wird der Heizer am Sensor zuerst 7,5 Minuten lang eingeschaltet, wodurch gewährleistet wird, dass alle transienten Vorgänge abklingen und sich ein stabiler Ausgangswert einstellen kann. Am Ende dieser Heizperiode werden die drei Temperaturen sowie die Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Dabei werden jeweils 50 Messwerte über einen Zeitraum von 30 Sekunden aufgenommen. Eine Mittelwertbildung unterdrückt Messrauschen erheblich. Neben dem Mittelwert werden zur Selbstdiagnose aber auch die Standardabweichungen berechnet – eine zu hohe Standardabweichung deutet auf starke Schwankungen des Messsignals während der Aufnahme hin. Demgegenüber kann eine Standardabweichung gleich Null auf einen Sensordefekt hinweisen. Nachdem die Messungen abgeschlossen sind, wird der Heizer des Sensors für die nächsten 7,5 Minuten ausgeschaltet. Somit erhält man in diesem Betriebsmodus alle 15 Minuten einen Messwert, die mittlere Heizleistung sinkt im Vergleich zum Betrieb mit kontinuierlicher Heizung jedoch um die Hälfte (Duty-cycle von 50 %). Der Heizwiderstand beträgt ungefähr $R_H = 8 \Omega$, wobei der Heizer mit einem Gleichstrom von $I = 0,8 \text{ A}$ versorgt wird. Dadurch ergibt sich eine Spitzenheizleistung von etwa $P_H = 5 \text{ W}$ ($P_H = I^2 R_H$) sowie eine mittlere Heizleistung von nur $2,5 \text{ W}$, was um etwa 20 % weniger ist, als es bei den ersten Sensorprototypen der Fall war.

Nach der Messwertaufnahme werden die errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen mit einem Zeitstempel versehen und zwischengespeichert. Für die künftige Datenanalyse können sie außerdem auch in die Cloud hochgeladen werden. In Abbildung 36 ist beispielhaft ein siebentägiger zeitlicher Verlauf der Temperaturen sowie des Gesamtdurchflusses dargestellt. Die Langzeitaufnahmen über mehrere Monate hinweg können helfen, die Anlagen zu optimieren und eventuelles Fehlverhalten zu detektieren. Aufgrund der non-invasiven Montageweise wird der bestehende hydraulische Kreislauf dabei nicht gestört.

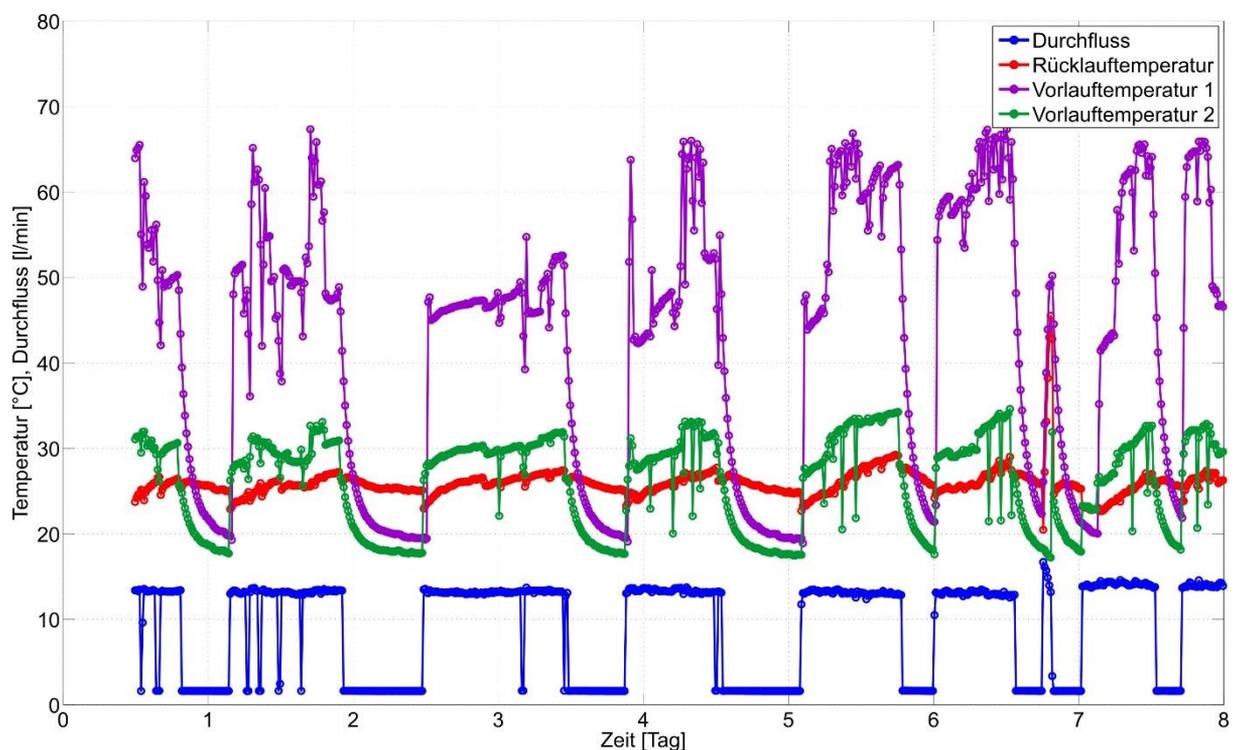


Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf des Durchflusses, der Temperatur der Rücklaufleitung, der Temperatur der Vorlaufleitung zum Warmwasserspeicher (Vorlauftemperatur 1) und der Temperatur der Vorlaufleitung zum Heizkreis (Vorlauftemperatur 2) während eines Zeitraumes von einer Woche.

Für die Aufnahme des zeitlichen Verlaufs aus Abbildung 36 wurde alle 15 Minuten ein Messwert aufgenommen. Es ist anzunehmen, dass diese langen Messwertintervalle für das Monitoring des sich relativ langsam ändernden Durchflusses ausreichend sind – für das vollständige Erfassen von schnellen Temperaturänderungen in den Vor- und Rücklaufleitungen sind sie jedoch unzulänglich, wie das aus Abbildung 36 ersichtlich ist (scharfe Spitzen und Einbrüche bei den Temperaturverläufen). Um dieser Problematik Rechnung zu tragen, wurde das Messprozedere entsprechend geändert.

Mit einem zweiten Messmodus werden die Temperaturwerte nicht nur einmalig alle 15 Minuten gemessen, sondern kontinuierlich und unabhängig von der Durchflussmessung im Minutentakt erfasst. Wiederum werden dabei in einem Zeitraum von 30 Sekunden 50 Temperaturmesswerte aufgenommen und daraus der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Auf diese Weise liefert das Sensorsystem jede Minute einen Temperaturwert für die Rücklauf- sowie die beiden Vorlaufleitungen. Abbildung 37 zeigt beispielhaft einen 24-stündigen Verlauf. Die sprunghaften Temperaturänderungen, vor allem bei den Vorlaufleitungen, sind nun zeitlich ausreichend gut aufgelöst, sodass ein eventuell kurzfristig auftretendes Fehlverhalten der Anlage problemlos diagnostiziert werden kann. Auch die langen Abkühlphasen mit der Zeitkonstante in der Größenordnung von 5 Stunden sind aus der Abbildung 37 klar ersichtlich.

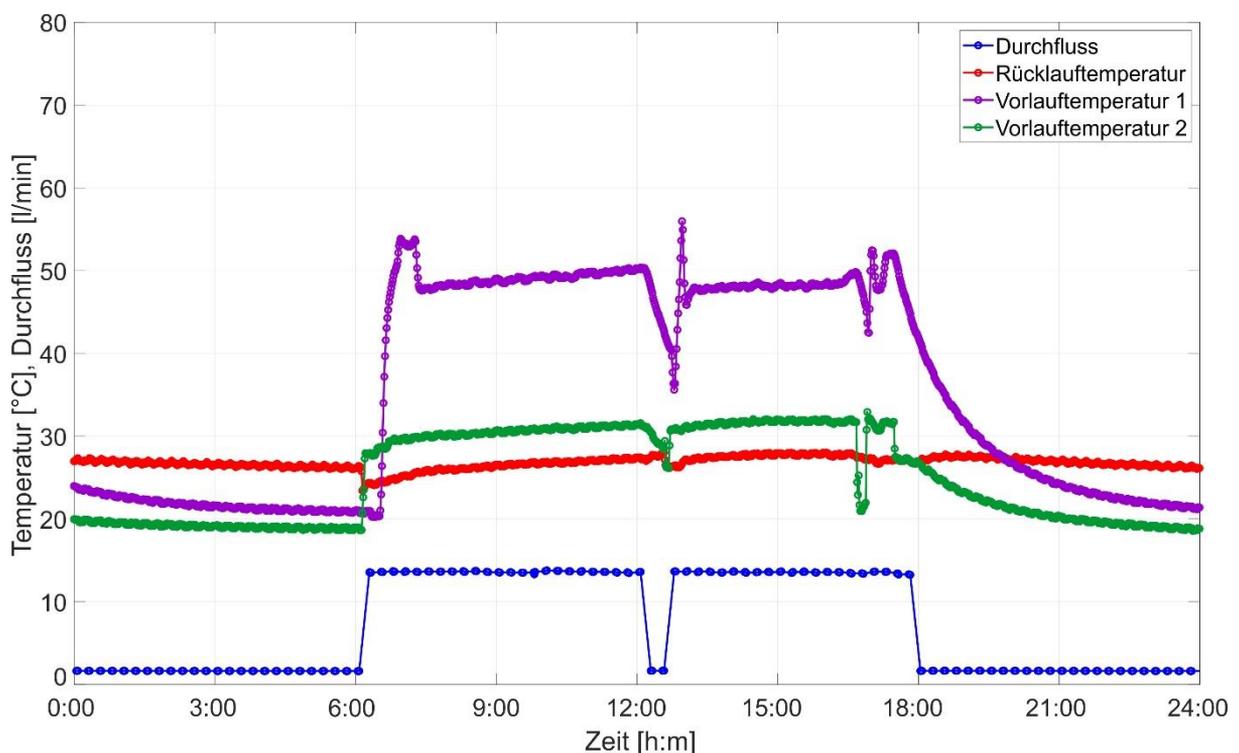


Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf des Durchflusses und der Vor- und Rücklauftemperaturen während eines Zeitraumes von einem Tag, wobei die Temperaturwerte jede Minute aktualisiert wurden.

Für die Messung des Durchflusses wird die Heizung analog zu Modus 1 für 7,5 Minuten eingeschaltet. Nach einer 5-minütigen Pause (Ramp-Up) wird wie bei den Temperaturmessungen verfahren, d.h. Aufnahme von 50 Messwerten während 30 Sekunden Messzeit, gefolgt von einer Pause von weiteren 30 Sekunden. In den letzten 2,5 Minuten der Heizphase können somit drei Durchflusswerte gemessen werden. Abschließend wird der Heizer ausgeschaltet und es folgt eine 7,5 Minuten lange Heizpause. Somit beträgt der Duty-Cycle wie beim ersten Betriebsfall 50 % und die mittlere Leistung ebenfalls nur 2,5 W.

Bei der Durchflussmessung ist es nicht möglich, während der ganzen 7,5-minütigen Heizperiode Messwerte zu erfassen. Mindestens 5 Minuten müssen verstreichen, bis transiente Vorgänge abklingen und sich ein stabiler Ausgangswert einstellen kann – erst danach ist eine Messung sinnvoll. Somit ergeben sich bei diesem Betriebsfall 3 Messwerte alle 15 Minuten, wobei die Messwerte einen Zeitraum von 2,5 Minuten abdecken. In Abbildung 37 fallen diese Werte zusammen und ergeben einen identischen Verlauf (blaue Kurve), da es zu keinen Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit kommt. Weichen diese drei Messwerte signifikant voneinander ab, ist dies ein Indikator für auftretende schnelle Änderungen und ein Anhaltspunkt für eine nähere Systemanalyse. In diesem Fall muss der Heizer in den Dauerbetrieb geschaltet werden, um ohne den initialen Einschwingvorgang in den ersten Minuten die Strömungsgeschwindigkeit hochauflösend zu erfassen.

3.2.3. Fehlererkennungs- und Diagnose-Verfahren

Im folgenden Abschnitt werden die entwickelten Verfahren zur Lokalisierung von Optimierungspotentialen und zur Effizienzsteigerung anhand von Daten aus den Feldtests evaluiert und die praktische Anwendbarkeit überprüft.

Nach der Anwendung des Algorithmus zur **Schwingungserkennung** auf die experimentellen Daten wird beobachtet, dass die Konfiguration des Algorithmus entscheidend ist, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Um die gewünschte Art von Schwingungen zu erkennen, müssen die Parameter des Algorithmus genau konfiguriert werden. Nach einigen Testläufen gelang es, die gewünschten Teile des Signals hinsichtlich ihrer Amplitude und Frequenz zu annotieren. Der Algorithmus ist in der Lage, mit unterschiedlichen Datenaufösungen zu arbeiten, ohne dass die Parameter angepasst werden müssen. In Abbildung 38 ist das annotierte Temperatur-Signal zur Beladung eines Wärmespeichers dargestellt. Die vom Algorithmus identifizierten Bereiche mit hochfrequenten Schwingungen sind rot markiert und beispielhaft vergrößert.

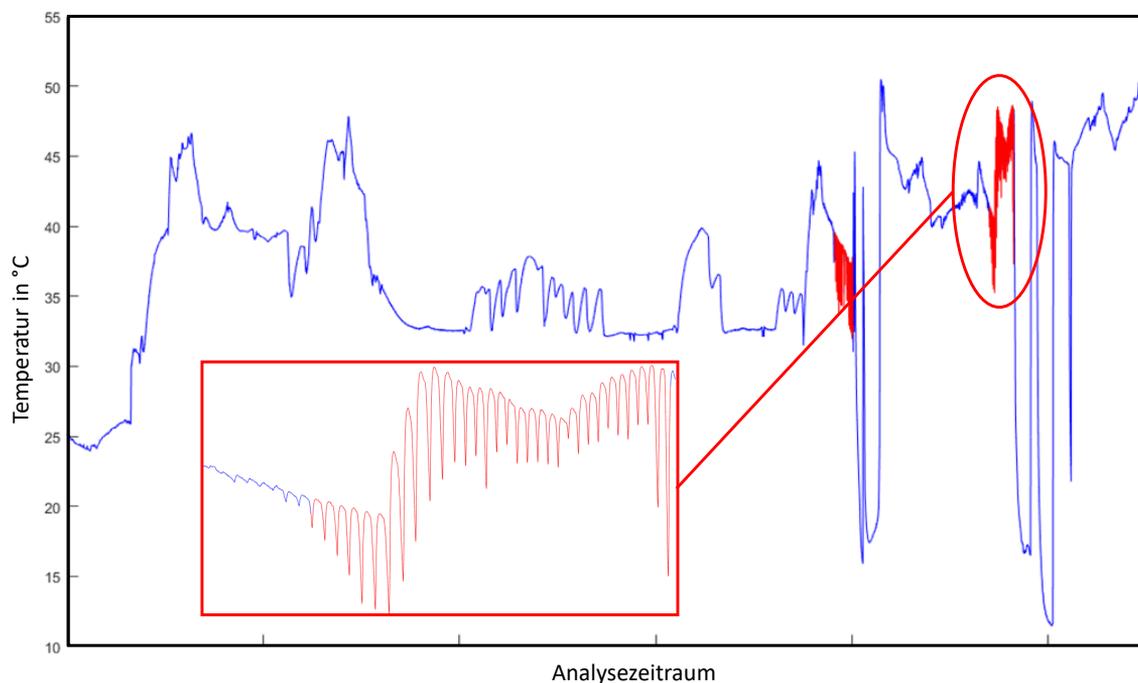


Abbildung 38: Identifizierte Hochfrequenzperioden eines Temperatursensors bei der Beladung eines Wärmespeichers.

Die **Zieltemperatur** für eine hydraulische Komponente ist der vom Hydrauliksystem eingestellte Wert, dem sich die Wassertemperatur im Idealfall annähern sollte. Eine Abweichung von der Zieltemperatur kann auf eine Ineffizienz oder einen Komponentenausfall hindeuten. Abbildung 39 zeigt gemessene Sensorwerte und die entsprechenden Zieltemperaturen für einen ausgewählten Sensor. Die Anwendung des Algorithmus auf die experimentellen Daten führt zu einem Satz sensorberechneter MSE-Wertepaare als Mittelwert der Fehlerquadrate. Anschließend werden Ausreißer der MSE-Werte erkannt und als fehlerhafte Signale annotiert. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die erkannten Ausreißer innerhalb des Gebäudes und stellt diese Sensoren als fehlerhaft dar.

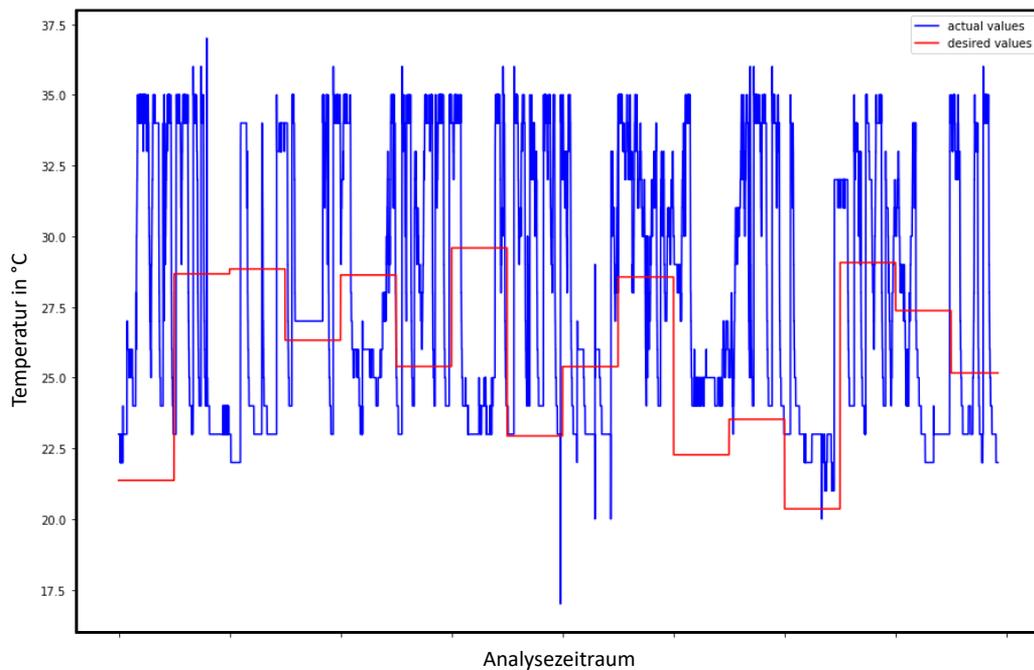


Abbildung 39: Analyse der Zieltemperatur – Sollwert und Regelgröße für Vorlauftemperatur einer Fußbodenheizung

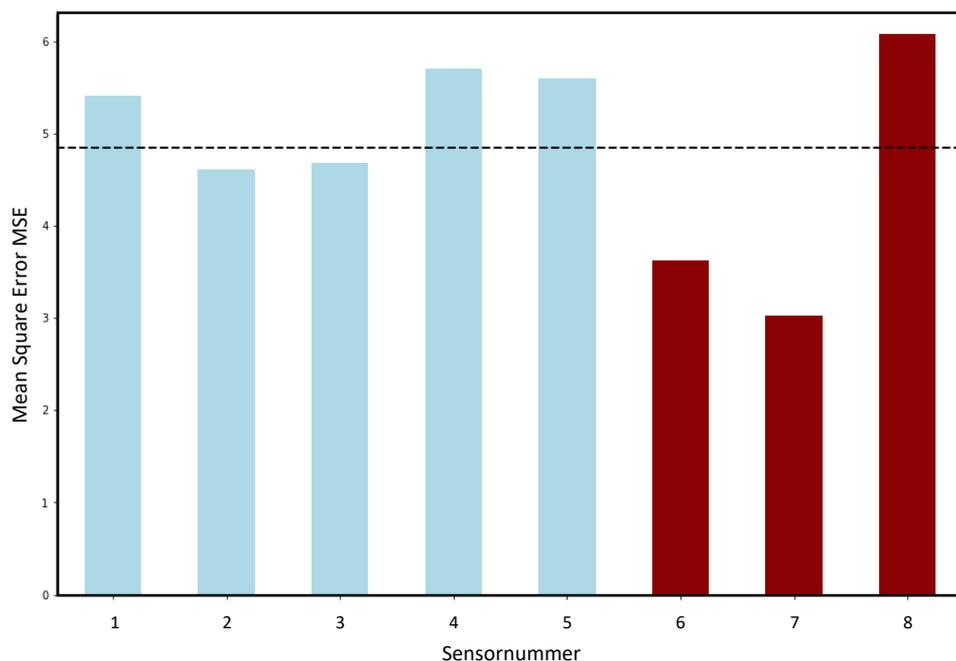


Abbildung 40: Ausreißer-Erkennung für Zieltemperaturen mehrerer Sensoren

Der Algorithmus zur **Analyse der Wärme- bzw. Kälteemission** berechnet die Temperaturdifferenzen zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur eines hydraulischen Kreislafs gewichtet mit der Durchflussmenge in der entsprechenden Messeinheit für eine bestimmte Zeitspanne. Es werden nur Datenpunkte mit Volumenstrom berücksichtigt, d.h. die Heizung ist in Betrieb. Diese ermittelten Energieeinheiten für die Datenpunkte werden aufsummiert und bilden die Grundlage für die Energiefreisetzungsanalyse. Diese Ergebnisse werden für einzelne Sensoren über mehrere Tage analysiert und auch für hydraulische Kreisläufe gegeneinander getestet. Zur Ermittlung der Ausreißer wird die Abweichung von der Standardabweichung untersucht.

Die Abbildung 41 zeigt die Verteilung der Wärmeabgabe eines Heizkreises in einem Tortendiagramm. Um diese Ergebnisse automatisiert zu analysieren, wird nach Ausreißern gesucht, indem die Standardabweichung untersucht wird. Die Abbildung 42 zeigt die Sensoren, die außerhalb des durchschnittlichen Wärmeemissionsmessbereichs liegen, und markiert sie als fehlerhaft, um weitere Analysen dieser Sensoren zu ermöglichen.

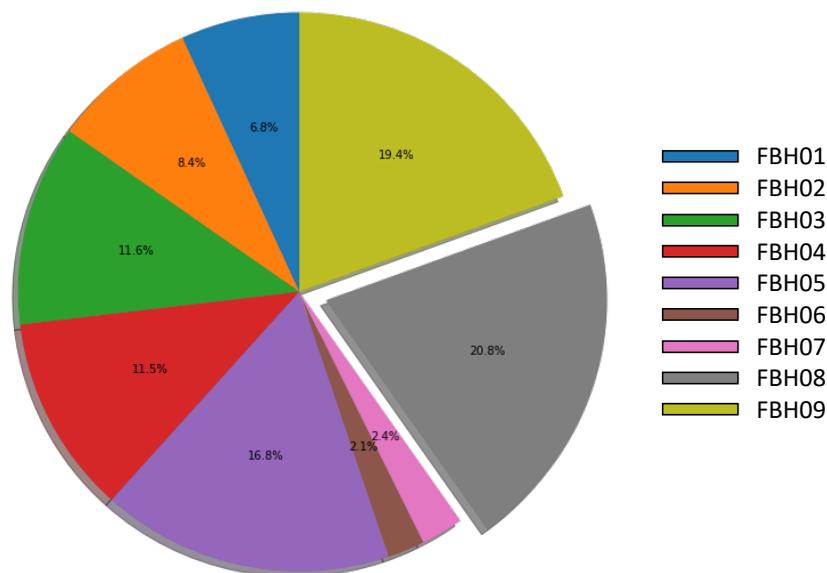


Abbildung 41: Verteilung der Wärmeabgabe von Heizkreisen

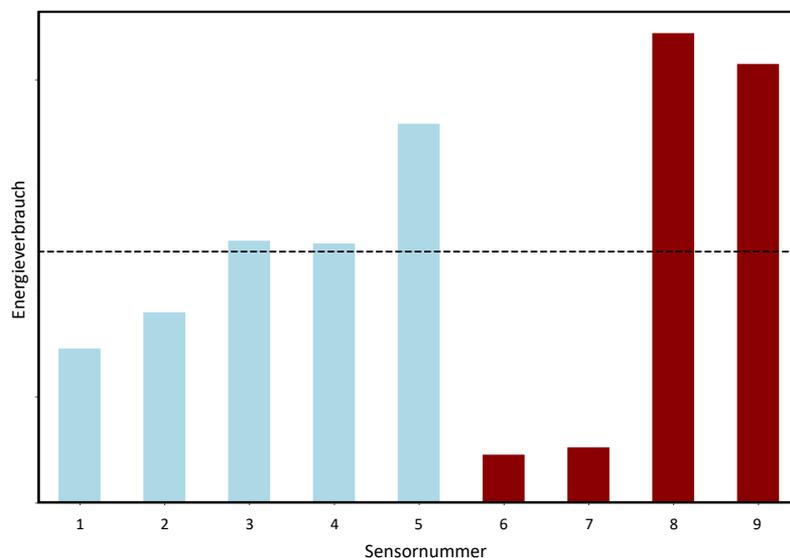


Abbildung 42: Ausreißer-Erkennung für die Wärmeemissionsanalyse

Eine anormale Abweichung von der durchschnittlichen **Betriebszeit** deutet auf ein mögliches, zukünftiges Versagen einer Anlagenkomponente hin. Die Betriebszeit wird durch Aufsummieren der Datenpunkte berechnet, an denen die Durchflussrate einen positiven Wert annimmt. Die Analyse ergibt einen Satz von gemessenen täglichen Betriebsstundenpaaren. Diese Methode kann auf das gesamte Gebäude über eine bestimmte Anzahl von Tagen, z.B. eine Woche, angewendet werden, wie in der Abbildung 43 dargestellt ist. Dieses Kastendiagramm zeigt die Verteilung der täglichen Betriebsstunden und markiert die Ausreißer als separate Punkte auf dem Diagramm. Diese gemessenen Systemkomponenten werden im Gegensatz zu den anderen hydraulischen Komponenten zu stark beansprucht.

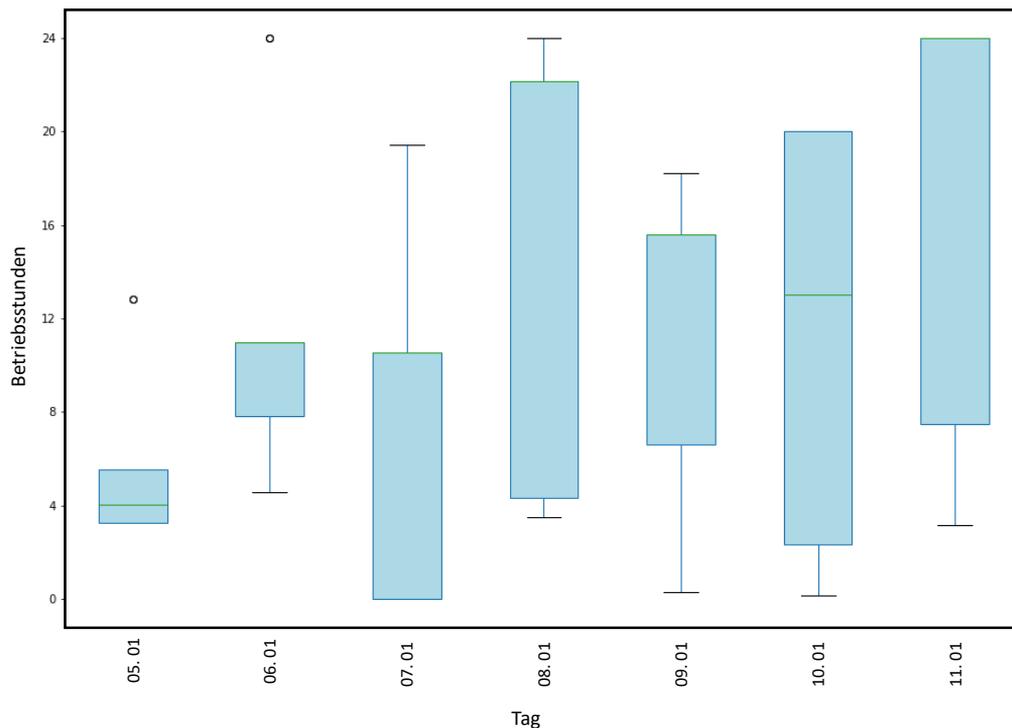


Abbildung 43: Verteilung der täglichen Betriebsstunden

Diese Methode kann auch auf einen einzelnen Sensor über einen längeren Zeitraum angewendet werden. Abbildung 44 zeigt die täglichen Betriebsstunden eines Sensors über einen Monat. Mit Hilfe mathematischer Methoden können die Ausreißer im resultierenden Datensatz identifiziert und als Fehler markiert werden, um eine weitere Untersuchung der Probleme zu ermöglichen.

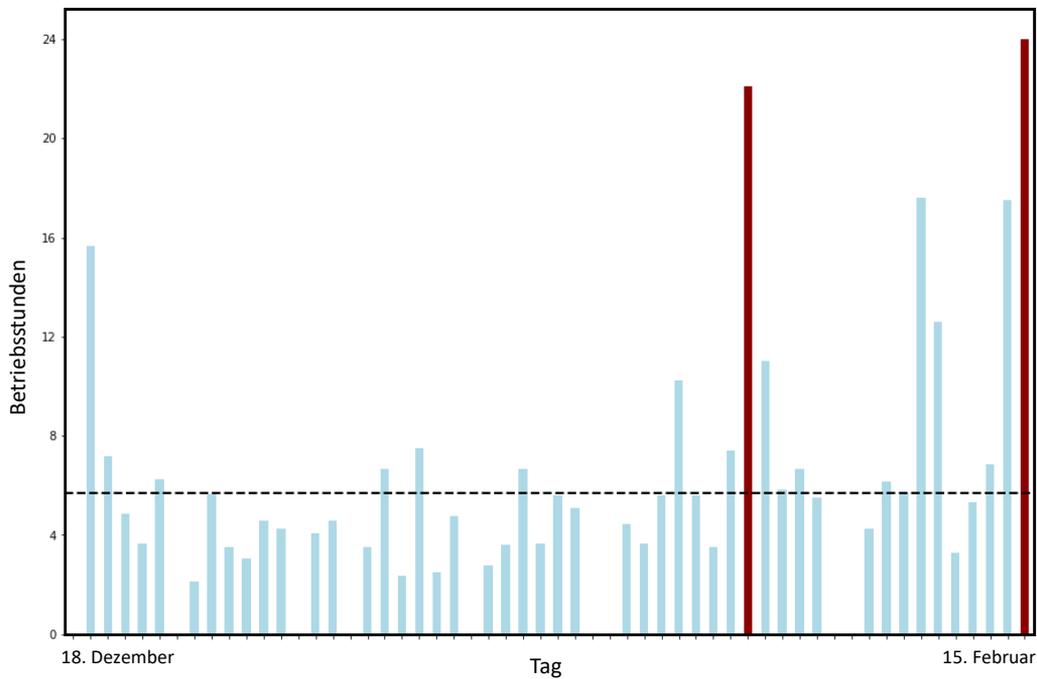


Abbildung 44: Ausreißer-Erkennung für einen bestimmten Sensor im Zeitverlauf

Mit einer „Rolling window“ Analyse können Sensorwerte erkannt werden, die sich innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls nicht ändern und auf einen **Netzwerkausfall** hindeuten. Die erkannten Zeitintervalle werden markiert und in den Analysen als irrelevante Daten behandelt. Die Abbildung 45 zeigt einen erkannten Netzwerkausfall des untersuchten Datensatzes.

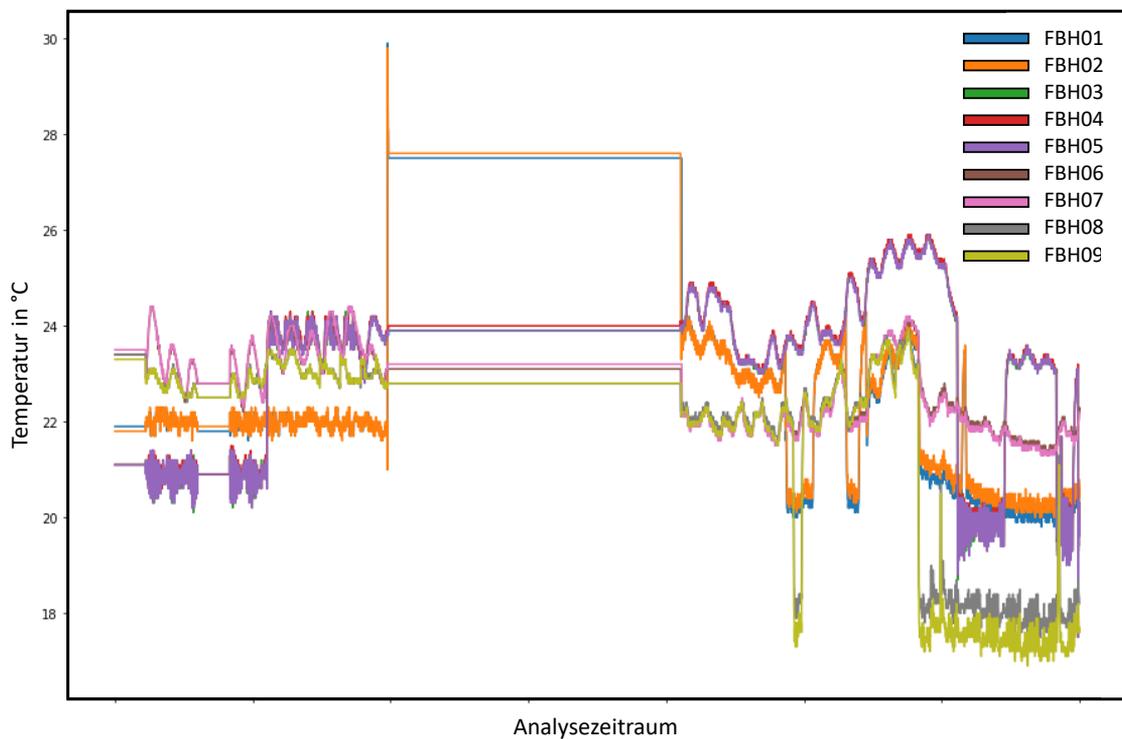


Abbildung 45: Ausfall der Netzwerkkonnektivität

Wenn ein Sensor keine Daten sendet, aber die übrigen Sensoren korrekte Daten liefern, kann der Sensor defekt sein und ein **Sensorausfall** liegt vor. Dies gilt jedoch nur dann, wenn die anderen Sensoren normal parallel zu diesem Zeitraum Daten senden, d.h. es handelt sich nicht um einen Netzwerkausfall. Diese erkannten Zeiträume sind entsprechend zu kennzeichnen. Abbildung 46 zeigt das Signal eines defekten Sensors, das im gesamten Datensatz durch den Algorithmus erkannt wurde.

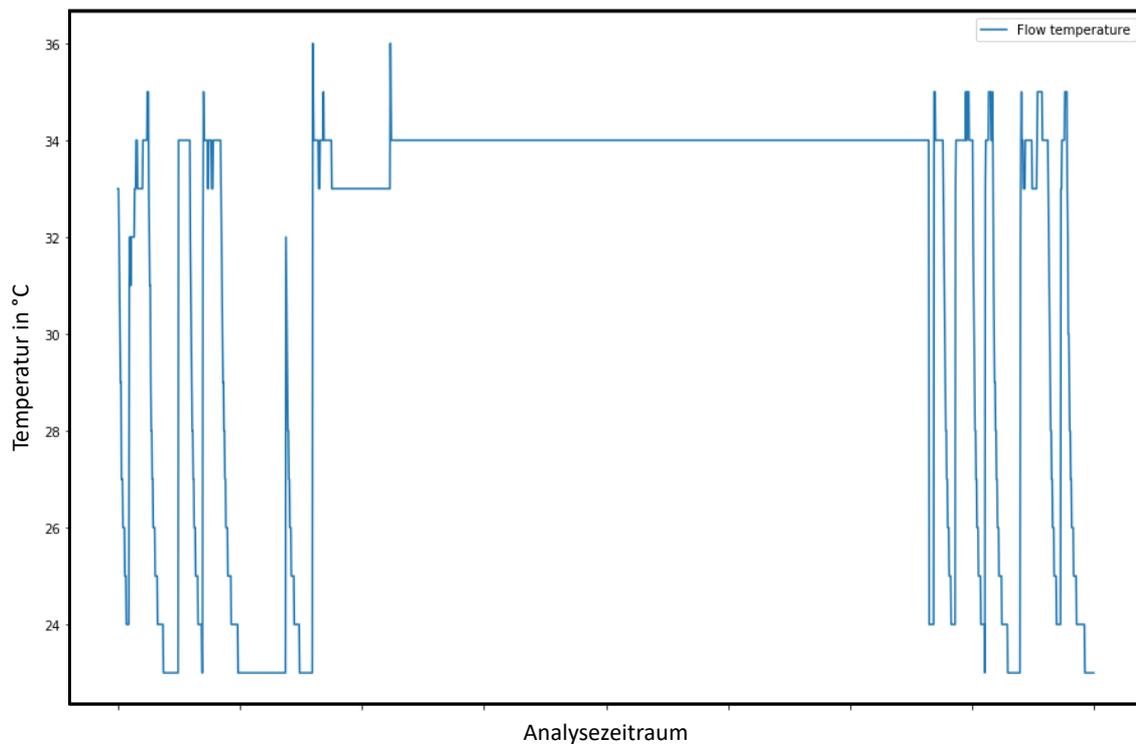


Abbildung 46: Detektiertes Sensorversagen eines Einzelsensors

3.3. Ökonomische Konzeptbeurteilung

OptiMAS hat das Ziel, die Gebäudeenergieeffizienz durch ein Monitoring von Energieströmen im hydraulischen Verteilnetz zu optimieren. Durch den Einsatz von non-invasiver Sensorik in Kombination mit drahtloser und ortsunabhängiger Datenübertragung und -speicherung eignet sich die Methodik vorrangig für eine nachträgliche Installation in Bestandsgebäuden. Eine weitgehend automatisierte Überwachung und Analyse identifiziert fehlerhaften Betrieb und optimiert damit die Energie- und Ressourceneffizienz.

3.3.1. Zielsetzung

Aus ökonomischer Sicht sind daher die Aufwendungen und Kosten für die Installation, Inbetriebnahme sowie den laufenden Betrieb des Monitoring-Systems den Einsparungen aufgrund des effizienteren Gebäudebetriebes gegenüberzustellen. Das Ausmaß der möglichen Effizienzsteigerung ist jedoch je nach untersuchtem Gebäude und spezifischem Anwendungsfall sehr unterschiedlich und von einer Reihe von Randbedingungen beeinflusst. Um im Sinne des Forschungsprojektes eine möglichst allgemeingültige Aussage zur Kosten-/Nutzen-Rechtfertigung des Systems treffen zu können, wird die jeweils geforderte Effizienzsteigerung für das Erreichen der Amortisation als abhängige Variable einer Parameterstudie für eine Reihe von Randbedingungen berechnet. Die Forschungsfrage lautet daher: Welche Effizienzsteigerung, definiert als Prozentsatz des jährlichen Gebäudeenergiebedarfs, muss das

installierte Monitoring- und Analysesystem mindestens erreichen, um innerhalb einer Amortisationsvorgabe von drei Jahren durch die eingesparten Ressourcen alle anfallenden Kosten zu decken? In der spärlich verfügbaren Literatur (Darby, 2006 & Ueno et al., 2006) wird von einer maximalen Effizienzsteigerung von 10 bis 15 % ausgegangen, weshalb für die vorliegende Untersuchung die geforderte Effizienzsteigerung auf <15 % begrenzt wird und darüberhinausgehend ein wirtschaftlicher Betrieb ausgeschlossen wird.

3.3.2. Randbedingungen und Parametervariation

Die Parameterstudie umfasst eine Reihe von Randbedingungen, die aufgrund von Literaturrecherchen und Experteninterviews festgelegt und in Tkauz (2019) dokumentiert sind. Ausgewählte Einflussparameter wie der Gebäudeenergieverbrauch, die Gebäudegröße, der Umfang des Monitoringkonzeptes sowie die Kostennahmen für das Monitoring und den Energieträger werden im Rahmen von definierten Szenarien variiert und der Einfluss auf die geforderte Effizienzsteigerung beurteilt.

Die **Gebäudegröße** wird mit vier Standardgrößen für Gebäude A bis D festgelegt. Gebäude A mit 2.000 m² Nutzfläche repräsentiert kleinere Bürogebäude und Wohngebäude mit bis zu 30 Wohneinheiten. Mit den Gebäuden B mit 7.000 m² und C mit 15.000 m² werden größere Wohnanlagen, Büros und Geschäfte umfasst. Das Gebäude D mit 50.000 m² soll generell große Gebäude wie z.B. Krankenhäuser abdecken.

Die Unterscheidung nach dem **Gebäudeenergiebedarf** wird in mehreren Kategorien unterteilt und orientiert sich nach Baujahren von 1970 bis heute. Die Studie umfasst die Energieverbräuche 50, 90, 150, 200 und 300 kWh/m²a.

Für die Festlegung des **Monitoring-Umfangs** werden ausgehend von einer repräsentativen gebäudetechnischen Anlage drei Levels an Erfassungsgraden definiert. Level 1 umfasst das Monitoring der Energiebereitstellung, im Allgemeinen eine bzw. bei größeren Gebäuden mehrere zentrale technische Anlagen. Level 2 umfasst zusätzlich zu Level 1 die zentrale Versorgungstechnik für die Belieferung der einzelnen Regelzonen und Level 3 erweitert den Umfang bis zur Wärmeabgabe auf Geschossebene. Für jedes Level wird eine Anzahl an notwendigen Messstellen zur vollständigen Erfassung der Energieströme im hydraulischen Netz festgelegt, wobei eine Messstelle eine Durchflussmessung, zwei Temperaturmessungen und die zugehörige Hardware für die Datenakquise umfasst. Um Skalierungseffekte aufgrund der Gebäudegröße zu berücksichtigen, wird die spezifische Messstellendichte in Sensoren/m² bei identem Monitoring-Level für größere Gebäude reduziert. Für den Erfassungsgrad Level 1 gilt beispielsweise folgende Annahme: Ausgehend vom Gebäude A mit 2.000 m² Nutzfläche und einer definierten Messstellendichte von 7,4 Sensoren/1.000 m² reduziert sich diese auf 2,2 Sensoren/1.000 m² für das Gebäude D mit 50.000 m² Nutzfläche. Die Erfassungsgrade Level 2 und 3 werden äquivalent behandelt, wobei beispielsweise die Sensordichte für das umfangreichste Monitoring in Level 3 für das Gebäude A 23,5 Sensoren/1.000 m² und für das größte Gebäude D 16,3 Sensoren/1.000 m² beträgt.

Die **Kostenanalyse des Monitoringsystems** berücksichtigt Investitionskosten (CAPEX) wie Hardware-, Installations- und Engineering-Kosten sowie Betriebskosten (OPEX) wie Kosten für Wartung der Komponenten, Server- und Energiekosten für den Betrieb des Monitoring- und Analysesystems. Preissteigerung für Wartung der Hardware und Betrieb der digitalen Infrastruktur sind in der Berechnung enthalten. Für die Auswertung wird ein Standardkostensatz definiert, der als bestmögliche Abschätzung für die aktuelle Preissituation gilt und die finanziellen Aufwendungen für ein breites Feld an denkbaren Anwendungen abdeckt. In Ergänzung zum Standardkostensatz wird auch ein erhöhter Kostensatz im

Sinne eines Worst-Case Szenarios definiert und ebenfalls in die Berechnung miteinbezogen. Aufgrund unterschiedlicher Förderbestimmungen in Österreich für Unternehmen, Privatpersonen, etc. sind keine Förderbeträge in der Kostenanalyse miteinbezogen.

Die **Kosten** der eingesparten **Energieträger** werden durch drei Preisbeispiele definiert, die das Spektrum des Energiemarktes abdecken und auch Einzelverträge von Großabnehmern berücksichtigen. In der Studie werden die Energiepreise 0,08, 0,05 und 0,03 €/kWh berücksichtigt, wobei auch eine Energiepreissteigerung von 0,8 %/a in der Berechnung enthalten ist. Ziel ist es, den Einfluss des Energiepreises auf die Wirtschaftlichkeit festzustellen, mit der Annahme, dass bei einem geringeren Energiepreis eine höhere Effizienzsteigerung gefordert ist, da das monetäre Einsparpotential sinkt. Im Gegensatz dazu reduziert ein hoher Energiepreis die geforderte Effizienzsteigerung, da das Einsparpotential erhöht ist.

3.3.1. Ergebnisse

Die Ergebnisse der ökonomischen Konzeptbeurteilung sind für das Szenario mit Standardkostensatz in Abbildung 47 und für das Szenario mit erhöhtem Kostensatz im Sinne einer Worst-Case Annahme in Abbildung 48 dargestellt. Unter Annahme des Standardkostensatzes ist für Gebäude A mit 2.000 m² und einem Energiebereitstellungspreis von 0,03 €/kWh ein Monitoring-System nur bei sehr hohem Energiebedarf von 300 kWh/m²a wirtschaftlich sinnvoll. Dieses Monitoring-System dürfte auch nur in der geringsten Ausbaustufe Level 1 ausgeführt werden und müsste beim Gebäudebetrieb mindestens 12,6 % Energieeinsparung erreichen, um sich innerhalb von drei Jahren zu amortisieren. Bei einem Energiepreis von 0,03 €/kWh fordern alle anderen Varianten eine Effizienzsteigerung > 15%, was als nicht realisierbar gilt und daher diese als unwirtschaftliche Varianten nicht in der Grafik berücksichtigt sind. Für kleinere Gebäude sind generell weniger Varianten wirtschaftlich als bei den größeren Gebäuden, da die in der Studie berücksichtigten Skalierungseffekte zum Tragen kommen. Bei größeren Gebäuden sind zudem die geforderten Effizienzsteigerungen im Allgemeinen niedriger und damit mit hoher Wahrscheinlichkeit in der praktischen Umsetzung erreichbar. Dies gilt auch unter Annahme des erhöhten Kostensatzes für ein Worst-Case Szenario bei den Aufwendungen für das System.

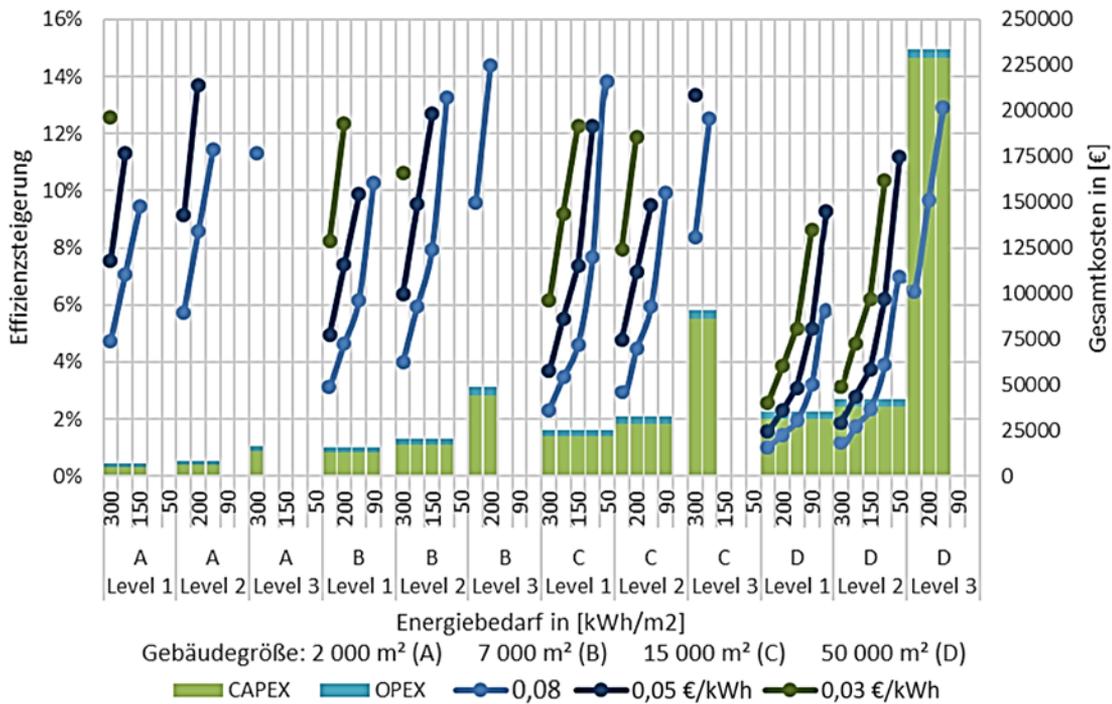


Abbildung 47: Geforderte Effizienzsteigerung des Gebäudebetriebes nach Einbau eines Monitoring- und Analysesystems, um alle anfallenden Investitions- (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) innerhalb von drei Jahren zu amortisieren. Die Varianten unterscheiden sich im Gebäudeenergiebedarf in kWh/m²a, in der Gebäudegröße A bis D in m² und in den Energiepreisen in €/kWh. Berechnung mittels Standardkostensatzes.

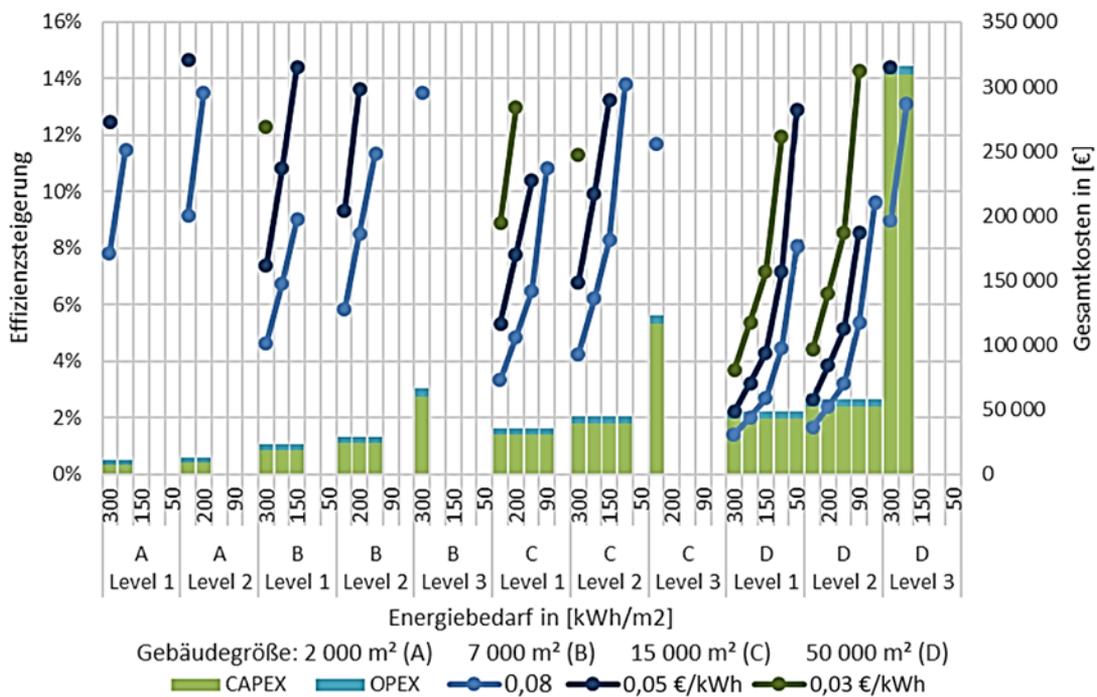


Abbildung 48: Geforderte Effizienzsteigerung des Gebäudebetriebes nach Einbau eines Monitoring- und Analysesystems, um alle anfallenden Investitions- (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) innerhalb von drei Jahren zu amortisieren. Die Varianten unterscheiden sich im Gebäudeenergiebedarf in kWh/m²a, in der Gebäudegröße A bis D in m² und in den Energiepreisen in €/kWh. Berechnung mittels erhöhten Kostensatzes im Sinne eines Worst-Case Szenarios.

3.4. Ökologische Konzeptbeurteilung

Im Rahmen einer Konzeptbeurteilung sind neben der technologischen Entwicklung und den wirtschaftlichen Aspekten auch die Umweltauswirkungen im Sinne der Nachhaltigkeit zu evaluieren. Im folgenden Abschnitt werden daher die Umweltauswirkungen, verbunden mit der Herstellung, dem Betrieb und der späteren Entsorgung des in OptiMAS angedachten Monitoring- und Analysesystems im Hinblick auf die Klimawirksamkeit (Treibhauspotential auf 100 Jahre, GWP 100) und den Primärenergiebedarf (PE) analysiert.

In Anlehnung an die durchgeführte ökonomische Beurteilung und zur Sicherstellung einer möglichst allgemeingültigen Aussage der Analyse werden alle Umweltauswirkungen auf eine einzelne Messstelle des Datenerfassungssystems bezogen. Die Herstellung, der Betrieb und die Entsorgung dieser Messstelle ist mit Umweltauswirkungen verbunden. Es muss Material bereitgestellt werden, Energie wird während des Betriebes verbraucht und nach der Nutzung endet der Lebensweg in der Entsorgung bzw. im Recycling. In der vorliegenden Bewertung wird dieser Lebensweg abgeschätzt und analysiert.

Zu diesem Zweck wird eine ökologische Bewertung basierend auf den methodischen Vorgaben der ISO EN 14040 (2006) und der ISO EN 14044 (2009) erstellt. Durch diese Normen ist die strukturierte Vorgehensweise, eingeteilt in Phasen der Ökobilanz, nachvollziehbar definiert (siehe Abbildung 49). Dies ist von besonderer Bedeutung, um alle Rahmenbedingungen zu dokumentieren und zukünftig mögliche Vergleiche mit anderen Systemen ziehen zu können.

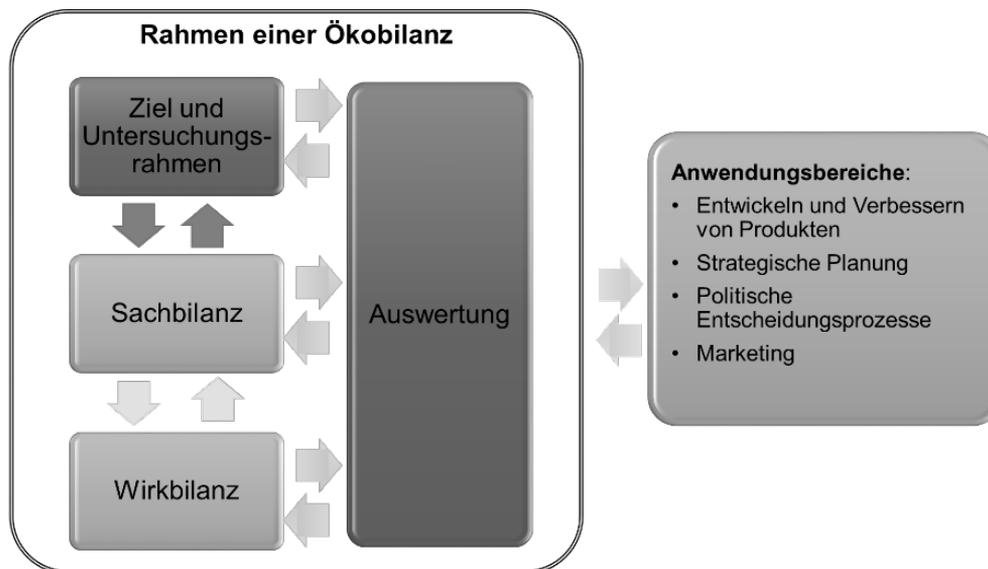


Abbildung 49: Phasen und Bestandteile der Ökobilanz nach ISO EN 14040 (2006)

3.4.1. Ziel und Untersuchungsrahmen

Im ersten Schritt ist die Definition des Zieles und Untersuchungsrahmens zu erörtern. Dies ergibt sich aufgrund der Fragestellung „Welche Umweltauswirkungen entstehen aufgrund der Installation einer Messstelle?“

Ziel der Nachhaltigkeitsanalyse ist es, die Umweltauswirkungen der Messstelle über den Lebensweg abzuschätzen. Es soll eine Aussage ermöglicht werden, wie groß die Einsparungen mit Hilfe des Messsystems sein müssten, um die Umweltlasten, die durch die Herstellung und den Betrieb des Messsystems selbst entstehen, auszugleichen. Als Indikator werden das Treibhauspotential (ohne biogenes

CO₂; Betrachtungszeit 100 Jahre; GWP 100) und der Primärenergiebedarf gesamt und fossil (PE ges. und PE fossil) gewählt.

Für die Systemgrenzen der ökologischen Bewertung wird ein Messpunkt definiert. Diese Eingrenzung soll eine beliebige Skalierbarkeit für die verschiedenen Objekte im Projekt gewährleisten. Bei der Auswahl der einzelnen Komponenten und Materialien wird die von den Forschungspartnern im Projekt verwendete Hardware als Ausgangsbasis gewählt. Hinter den für die Modellierung der Produktherstellung verwendeten Prozesse stehen Daten aus Europa bzw. weltweite Durchschnitt. Der Stromverbrauch während der Nutzung wird mit dem österreichischen Durchschnitts-Strommix (AT-Mix) bewertet. Als zeitlicher Bezug wird 1 Jahr herangezogen. Als Bezugseinheit (funktionelle Einheit) wird das Betreiben eines Messpunktes für 1 Jahr definiert. Die späteren Ergebnisse der Nachhaltigkeitsanalyse beziehen sich genau auf diese funktionelle Einheit.

3.4.2. Datenerhebung

Innerhalb dieser Phase erfolgten das Erheben und Quantifizieren aller nötigen In- und Outputs, die über den Lebensweg hinweg mit dem Produkt in Zusammenhang stehen. In Bezug auf die vorliegende Betrachtung wird eine Abschätzung der nötigen Infrastruktur für einen Messpunkt erstellt. Die nötigen Bauteile mit den dazugehörigen Massenangaben und Lebensdauer sind in der Tabelle 2 aufgelistet.

Die Angaben zu den nötigen Anlagenteilen und deren Bestandteile wurden von den Projektpartnern abgeschätzt. Auf Basis dessen konnten entsprechende Datensätze in der ecoinvent Datenbank (Ecoinvent, 2018) recherchiert werden. Von Bedeutung ist auch die geplante technische Lebensdauer des Bauteils, welche mit rund 10 Jahren unterstellt wurde – diese fließt in die Betrachtung mit ein. (OIB, 2015)

Tabelle 2: Messpunkt-Beschreibung: Teile, Gewicht, technische Lebensdauer und entsprechende ecoinvent-Prozesse

Anlagenteil	Gewicht / Länge	Beschreibung	Modelliert mit (ecoinvent-Prozess)	Lebensdauer
Messaufnehmer inkl. Datenübertragung	0,360 kg	elektronisches Bauteil	<i>RER: electronics production, for control units</i>	10 a
Temperaturfühler, 2 Stk. (PT 100)	0,077 kg	Temperaturfühler, Kunststoff und Metall: Aluminium, Silikon	<i>IAI Area, EU27 & EFTA: aluminium production, primary, ingot und RER: silicone product production</i>	10 a
Kabel	2 m	Datenkabel	<i>DE: cable production, data cable in infrastructure</i>	10 a
Wandgehäuse inkl. Befestigung Klammern	0,232 kg	Kunststoff; Annahme PE-LD (PE low density) wie bei Elektrodoosen; Dichte wird mit 0,9g/cm ³ (900kg/m ³) angenommen; Wandstärke 2mm	<i>RER: polyethylene production, low density, granulate und RER: polymer foaming</i>	10 a

Während der Betriebszeit benötigt die Anlage elektrische Energie. Die Leistungsaufnahme des Messaufnehmers inkl. Datenübertragung wird mit 5 W beziffert. Alle 15 Minuten wird eine Messung durchgeführt: 6 Minuten Messung und 9 Minuten Pause - das ergibt einen Energiebedarf von 48 Wh pro Tag, was einen jährlichen Energieverbrauch von 17,5 kWh/a und Messstelle zur Folge hat.

Am Ende der Nutzungsdauer steht die Entsorgung bzw. das Recycling an. Für die vorliegende Untersuchung wird die Cut-Off-Methode angewandt, dies bedeutet, dass hier nur eine Bewertung der Umweltwirkung bei der Entsorgung einbezogen wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Metalle überwiegend ins Recycling gehen und die Kunststoffe in die Entsorgung.

3.4.3. Berechnung der Umweltauswirkungen

Das Treibhauspotential (GWP 100) wird mit Hilfe der „ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Climate change, default, excl biogenic carbon“ Methode ausgewertet. Die Methode wurde in den Niederlanden entwickelt, ist wirkungsorientiert und nimmt keine Gewichtung vor, ihr räumlicher Gültigkeitsbereich ist Europa (Huijbregts et. al., 2016). Der Kohlenstoff aus biogenen Quellen wird als CO₂-neutral bewertet und trägt nicht zum Treibhauspotential bei. Der Primärenergiebedarf (PE) wird in Form eines Indikators als Gesamtwert und für den fossilen Anteil dargestellt.

3.4.4. Ergebnisse der Wirkbilanz

Nach der Erhebung der Inputmaterialien und nötigen Energiemengen erfolgt die Auswertung der Umweltwirkungen. Hierzu werden zunächst die Auswertungen der Einzelteile als normierte Größe, wie sie auch in der ecoinvent-Datenbank zu finden sind, dargestellt. Die in der Tabelle 3 dargestellten Werte sind wie folgt zu lesen: die Herstellung von 1 m Kabel ist mit 0,212 kg CO₂-Äquivalenten verbunden und hat einen gesamten Primärenergiebedarf (erneuerbar und nicht erneuerbar) von 4,791 MJ.

Tabelle 3: Auswertung Treibhauspotential und Primärenergiebedarf, normierte Größen je Bezugseinheit und Bauteil; ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Climate change, excl biogenic carbon und Primary energy demand from ren. and non ren. resources (net cal. value).

Bauteil	Kabel	Messaufnehmer / Datenübertragung	Wandgehäuse		Temperaturfühler (Hauptmaterialien Aluminium und Silikon)	
Bezugseinheit	1 m	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg	1 kg
Ecoinvent Prozess(e), ecoinvent 3.5	cable production, data cable in infrastructure	electronics production, for control units	polyethylene production, low density, granulate	polymer foaming	aluminium production, primary, ingot	silicone product production
Treibhauspotential [kg CO ₂ eq.]	0,212	34,194	2,278	0,541	7,887	3,099
Primärenergiebedarf [MJ]	4,791	575,396	75,189	12,287	161,565	61,733

Für das Wandgehäuse und die Temperaturfühler konnten keine entsprechenden Standarddatensätze in der Datenbank ermittelt werden. Aus diesem Grund wurde die Herstellung dieser Komponenten mit ihren Hauptmaterialien und deren Bearbeitung modelliert, in diesem Fall mit dem Kunststoff Polyethylen. Die Modellierung der Temperaturfühler erfolgt mit den Materialien Aluminium und Silicon. Es ist zu erkennen, dass die Herstellung des elektronischen Bauteils per kg mit den höchsten Treibhauspotential (ca. 34 kg CO₂ eq./kg) und auch mit dem größten Primärenergiebedarf (rund 575 MJ/kg) verbunden ist.

Während des Betriebes wird elektrische Energie benötigt. Zur Bewertung wird der österreichische Strommix herangezogen (Datensatz: market for electricity, low voltage ecoinvent 3.5). 1 kWh elektrische Energie ist mit 0,329 kg CO₂-Äquivalenten verbunden und hat einen gesamten Primärenergiebedarf von 8,587 MJ (5,61 MJ davon kommen aus dem fossilen Anteil).

Die Entsorgung der Kunststoffteile erfolgt in einer Müllverbrennungsanlage (Datensatz: treatment of waste plastic, industrial electronics, municipal incineration ecoinvent 3.5). Die Behandlung von 1 kg Kunststoffabfall in der Müllverbrennung ist mit 3,050 kg CO₂-Äquivalenten verbunden und hat einen gesamten Primärenergiebedarf von 0,606 MJ (0,60 MJ PE fossil).

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind das Treibhauspotential und der Primärenergiebedarf für einen Messpunkt dargestellt. Der gesamte Lebenszyklus wurde hier berücksichtigt und auf Basis der technischen Lebensdauer für den Messpunkt die Umweltauswirkungen für ein Jahr berechnet.

Tabelle 4: Treibhauspotential und Primärenergiebedarf des gesamten Lebenszyklus einer Messstelle anteilig für ein Jahr

Umweltwirkung	Menge in Stk.	GWP 100 in kg CO ₂ -Eqv-/a	PE fossil in MJ/a	PE ges. in MJ/a
Messpunkt (Herstellen, Betreiben, Entsorgen)	1	7,34	121,49	175,71

Um die Ergebnisse im Rahmen des von OptiMAS vorgesehenen Monitoring der Energieströme in den hydraulischen Netzen darzustellen, werden ausgehend von den Resultaten für die Einzelmessstelle geforderte Energieeinsparungen für ausgewählte Beispielgebäude der ökonomischen Betrachtung in Abbildung 47 bzw. Abbildung 48 berechnet. Die Energieeinsparungen verstehen sich dabei als ökologische Amortisation, d.h. die Umweltauswirkungen die das Monitoring-System über den gesamten Lebenszyklus verursacht, werden durch Effizienzsteigerungen des Gebäudebetriebes kompensiert.

Die Berechnung stützt sich dabei auf Annahmen der ökonomischen Konzeptbeurteilung und übernimmt für alle gelisteten Gebäudegrößen das Level 1 des Ausbaugrades mit Installation von Sensoren auf Ebene der zentralen Energiebereitstellung – vgl. Abschnitt 3.3.2. Die Umweltauswirkungen der Wärme- und Kälteversorgung für die Gebäude werden exemplarisch für einen Gas-Kessel und eine 30 kW Wärmepumpe der Ecoinvent 3.5 Datenbank angenommen bzw. für eine Kompressionskältemaschine in einem eigenen Prozessmodell erstellt (Annahme: 30 kW, AT-Strommix, COP = 3). Die berechneten Mindesteinsparungen bezogen auf eine kWh Wärme bzw. Kälte sind in Tabelle 5 gelistet.

Für ein erdgas-beheiztes Gebäude mit 2.000 m² Nutzfläche und installierter Mindestausbaustufe des Monitoringsystems mit insgesamt 15 Messstellen müssen zur Kompensation der Umweltauswirkung GWP 100 pro Jahr mindestens 423,5 kWh Wärme eingespart werden. Unter Berücksichtigung von Energieinhalt und Nutzungsgrad entspricht das einer geforderten Einsparung von ca. 45 bis 50 m³/a Erdgas. Die Ergebnisse der weiteren betrachteten Systeme sind äquivalent zu interpretieren, wobei für die Wärmepumpe und die Kompressionskältemaschine mit den Arbeitszahlen auf die einzusparende, elektrische Energie rückgerechnet werden kann.

Tabelle 5: Treibhauspotential und Primärenergiebedarf, gesamter Lebenszyklus für mehrere Messpunkte verschiedener Gebäudegrößen; Ergebnisse anteilig für 1 Jahr; Geforderte Mindesteinsparung durch Effizienzsteigerung

Gebäudefläche in m ²	Messstellen in Stk.	Geforderte Mindesteinsparung in kWh Wärme oder Kälte für Kompensation von ...		
		... GWP 100	... PE fossil	... PE ges.
Gas-Kessel				
2.000	15	423	480	690
7.000	45	1.270	1.439	2.070
15.000	76	2.146	2.430	3.496
50.000	110	3.105	3.517	5.060
Wärmepumpe				
2.000	15	1.449	1.458	1.380
7.000	45	4.346	4.374	4.140
15.000	76	7.340	7.387	6.992
50.000	110	10.624	10.691	10.119
Kompressionskältemaschine				
2.000	15	983	975	918
7.000	45	2.949	2.924	2.755
15.000	76	4.981	4.938	4.653
50.000	110	7.209	7.146	6.735

Ein Vergleich mit den geforderten Energieeinsparungen der ökonomischen Betrachtung zeigt, dass für die getroffenen Annahmen eine wirtschaftlich darstellbare Umsetzung des OptiMAS-Konzeptes immer auch eine ökologische Amortisation zur Folge hat. Ist eine Umsetzung wirtschaftlich sinnvoll, werden durch den verringerten Ressourcenbedarf für den Gebäudebetrieb auch die Umweltauswirkungen von Herstellung, Betrieb und Entsorgung des Monitoring- und Analysesystems kompensiert.

4. Schlussfolgerungen

Das OptiMAS Projekt konnte in vielerlei Hinsicht wertvolle Erkenntnisse für aktuelle Forschungsfragen im Bereich des Gebäudemonitorings und der intelligenten Analyse gebäudetechnischer Betriebsdaten liefern. Der OptiMAS-Ansatz ermöglicht, bestehende Gebäude, die bereits mit HLK-Anlagen ausgestattet sind, unabhängig von den darin verwendeten Automationskomponenten zu überwachen, die erfassten Daten zu analysieren und Parameter für eine Optimierung des Gebäudebetriebs abzuleiten. In OptiMAS wurde dazu eine sensorgestützte und modellbasierte Energiestromanalyse erarbeitet und die Anwendung der entwickelten Innovation validiert.

Das entwickelte Konzept kombiniert eine non-invasive Beurteilung des Energiestroms in hydraulischen Leitungen mit intelligenten Algorithmen zur Messdateninterpretation und Bewertung sowie einer flexiblen cloudbasierten Systemarchitektur zur Datenübertragung, -auswertung und -bereitstellung. Die vorgestellten Methoden umfassen automatisierte Fehlererkennungs- und Diagnoseverfahren von technischen Anlagen für Heizung, Kühlung und Klimatisierung.

Besonders hervorzuheben sind die Beiträge zur Charakterisierung sowie die Methoden- und Konzeptentwicklung für non-invasiven Sensorik an hydraulischen Leitungen, wobei der Fokus auf die kostengünstige Erfassung von Temperaturen und Durchflüssen gelegt wurde. Im Projekt wurden die Einsatzmöglichkeiten von Anlegesensoren positiv evaluiert und ein rein auf Temperaturmessungen basierter Strömungs- und Energiesensor entwickelt, sowie dessen erfolgreiche technische Integration zur Datenerfassung demonstriert. Bei Temperaturmessungen mit Anlegesensorik konnte für ungünstige Bedingungen (Kunststoffrohr, hohe Fluidtemperatur, etc.) und exakt kalibrierte Modelle eine Reduktion des Fehlers von ca. 3 Kelvin auf unter 0,2 Kelvin gezeigt werden. Eine Weiterentwicklung der modellbasierten Auswertung reduziert zudem den dynamischen Fehler bei non-invasiven Temperaturmessungen, um die Anwendung auch für zeitkritische gebäudetechnische Analysen, wie z.B. die Erfassung von Ventilöffnungen, einzusetzen. Für die temperaturbasierte Durchflussmessung konnte für Laborbedingungen eine Genauigkeit mit Abweichungen von unter 3 % erreicht werden.

Abschließend erfolgte eine multidimensionale Evaluierung des entwickelten Konzeptes im Rahmen einer Wirtschaftlichkeits- und Nachhaltigkeitsanalyse. Eine Amortisationsbetrachtung aus rein wirtschaftlicher Sicht zeigte eine stark individuelle Abhängigkeit von Randbedingungen wie Gebäudegröße, Gebäudeenergieverbrauch, Energiebereitstellung und dem Umfang der installierten Hard- und Software zur Analyse und Optimierung. Wird die von der EU geforderte Amortisierung von Monitoring-Systemen innerhalb von 3 Jahren (RL 2018/44/EU) angenommen, können Gebäude ab 2.000 m² Nutzfläche auch bei geringen realisierbaren Effizienzsteigerungen (<15 %) kostendeckend optimiert werden. Die Nachhaltigkeits-Analyse zeigt mit Blick auf die Umweltauswirkungen, dass ein Großteil (ca. 80 %) der Treibhausgase und des Primärenergiebedarfs auf den Betrieb und die Nutzung des Systems rückzuführen ist. Herstellung und Entsorgung spielen eine untergeordnete Rolle. Generell kann festgehalten werden, dass die geforderten Einsparungen zur Erreichung der wirtschaftlichen Amortisation in den untersuchten Szenarien immer auch eine ökologische Amortisation bewirkt. Die Umweltauswirkungen für Herstellung, Betrieb und Entsorgung des Monitoring- und Analysesystems können durch die Ressourceneinsparungen bei Gebäudebetrieb kompensiert werden.

5. Ausblick und Empfehlungen

Die EPBD 2018/844/EU Richtlinie sieht in der Gebäudeautomation bzw. der Digitalisierung im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung die Basis zur Ausschöpfung der Optimierungspotentiale im Gebäudesektor. Unter anderem wurde festgehalten, dass die tatsächliche Energieeffizienz und der optimale Betrieb der Anlagen von realen Nutzungsbedingungen über den Lebenszyklus abhängen und somit eine permanente Datenerfassung und -analyse unumgänglich ist. Zudem werden regelmäßige Inspektionen gefordert. Dabei könnten manuelle, kostenintensive Inspektionen durch datengetriebene Analysen ersetzt werden. Darüber hinaus müssen reale Betriebsanforderungen, die bei der Planung und Ausführung unter quasistationären Bedingungen abgeschätzt werden, mit den tatsächlichen, dynamischen Betriebsbedingungen, die meist ein ausgeprägtes dynamisches Teillastverhalten aufweisen, abgeglichen werden. Erst damit können notwendige Anpassungen, auch aufgrund von veränderter Nutzungssituation, vorgenommen werden. Als wesentlich werden dabei die Gebäudeautomatisierung und das elektronische Monitoring erachtet. Konkret sollen unter anderem die Gebäudeautomation in den Geltungsbereich der „Technical Building Systems“ aufgenommen und die reale Betriebsperformance von Gebäuden über den Lebenszyklus erfasst und dokumentiert werden. Es wird vorgeschlagen, das elektronische Monitoring als Alternative zur Inspektion von Heizungs- und Kühlanlagen einzusetzen. Gerade bei größeren Wohn- und Nichtwohngebäuden ergeben sich damit große Einsparpotenziale.

Um einen effizienten Gebäudebetrieb zu gewährleisten, bedarf es einer kontinuierlichen Bewertung der Gebäude- und Anlagenperformance unter Anwendung automatisierbarer Prüfverfahren. Technisches Monitoring und (In-)Betriebsnahme-Management sind zwei Methoden, welche sich in diesem Zusammenhang als prinzipiell wirksam erwiesen haben. Die derzeit verfügbaren Performance-Applikationen erfordern aber nach wie vor einen hohen manuellen Ressourcenaufwand. Insbesondere bei Bestandsgebäuden ist dieser Ressourcenaufwand enorm, da Anlagendaten oft nur eingeschränkt verfügbar sind und zusätzliche Messungen durchgeführt werden müssen. In diesem Fall ist es erforderlich, einfach nachrüstbare und non-invasive Monitoringsysteme in Kombination mit drahtloser Datenübertragung und ortsunabhängigen Datenspeicherung einzusetzen. Die in OptiMAS durchgeführten Forschungsarbeiten bilden daher einen wesentlichen Beitrag zur systematischen Analyse von bestehenden Heizungs- Lüftungs- und Klimasystemen sowie deren übergeordneten Betriebsstrategien. Ohne aufwendige Eingriffe in aktive, hydraulische Systeme können Betriebsparameter erfasst und die theoretisch vorhandenen Potentiale der Ressourceneinsparung in die Praxis umgesetzt werden.

Der Trend zur einfachen Installation sowie zum teilautomatisierten Engineering wird sich auch in der Zukunft fortsetzen, da mit den aktuellen Entwicklungen innerhalb der Halbleiterindustrie neue IoT-Sensortechnologien zur Verfügung stehen werden. Die damit verbundenen Innovationspotenziale sollten daher mit weiterführenden Forschungsaktivitäten – insbesondere für das technische Monitoring von gebäudetechnischen Anlagen und Systemen – nutzbar gemacht werden.

Auch das Forschungsfeld der Fehlererkennungs- und Diagnosemethoden von technischen Anlagen entwickelt sich kontinuierlich weiter und wird international intensiv diskutiert. Die Verfügbarkeit einer Vielzahl von Datenpunkten in Kombination mit einer hohen zeitlichen Auflösung erlaubt detaillierte Einblicke in das Betriebsverhalten von technischen Anlagen. Mit Blick auf die Analyse von gebäudetechnischen Anlagen sind hier vor allem jene Methoden vielversprechend, die das ingenieurstechnische Domänenwissen mit modernen Verfahren des „Machine Learnings“ kombinieren. Auf Basis physikalischer Grundprinzipien wie z.B. der Massen- und Energieerhaltung sowie Herstellerinformationen

können Anlagenmodelle abgeleitet und mit Betriebsdaten parametrisiert werden, um digitale Abbildungen der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungs-Komponenten zu generieren und automatisierte Betriebsperformanceanalysen durchführen zu können. Moderne Methoden der Datenanalyse und -aufbereitung sind dabei unumgänglich, um die großen Datenmengen überhaupt nutzbar zu machen.

Mit dem verstärkten Einsatz von numerischer Optimierung bilden diese datengetriebenen Modelle die Voraussetzung, um über die reine Fehlererkennung und Diagnose hinausgehend das optimale Betriebsverhalten sicherzustellen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Komplexität von miteinander vernetzten Systemen, bei denen nicht nur der thermische Komfort und Energieverbrauch, sondern auch die Flexibilitätsanforderungen aufgrund der vermehrten Integration von volatilen, erneuerbaren Energieträgern berücksichtigt werden müssen.

6. Verzeichnisse

6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: Exemplarische Installation eines invasiven Vergleichssensors zur Bestimmung der Fluidtemperatur T_f und zwei non-invasiven Temperatursensoren aus Messing (T_s BRA) und Aluminium (T_s ALU) vor Isolierung an einer Kunststoffleitung. Rechts: Gemessene Temperaturverläufe der Sensoren unterhalb und oberhalb der Umgebungstemperatur T_a	12
Abbildung 2: Thermisches Widerstandsmodell des Wärmetransports zwischen der Fluidtemperatur T_{fluid} und der Umgebungstemperatur T_{amb} an einem wärmegeprägten Rohr.	12
Abbildung 3: Berechnete Widerstandsverhältnisse ausgewählter, repräsentative Rohrdimensionen, -materialien, Fließgeschwindigkeiten und Wärmedämmstärken.	14
Abbildung 4: Diskretisiertes, zweidimensionales Finite-Volumen-Modell zur instationären Berechnung der Oberflächentemperatur an der Rohraußenseite.....	15
Abbildung 5: Berechneter Verlauf der äußeren Rohroberflächentemperatur T_2 bei sprunghaftiger Änderung der Fluidtemperatur T_{wasser} von 20 auf 40 °C in einem wärmegeprägten Kupfer- (links) und Kunststoffrohr (rechts).	16
Abbildung 6: Stationäres Modell.....	17
Abbildung 7: Instationäres Modell.....	17
Abbildung 8: Schematischer Aufbau des Laborprüfstands an der FH Burgenland zur experimentellen Charakterisierung, Modell-Validierung, Kalibration und Evaluierung von Korrekturalgorithmen der non-invasiven Temperaturmessung an Rohrleitungen mittels Anlegefühler.	18
Abbildung 9: Experimentell ermittelte stationäre Temperaturdifferenz zweier Anlegtemperatursensoren aus Messing (BRA) und Aluminium (ALU) T_s an einem Kunststoffrohr zur invasiv gemessenen Fluidtemperatur T_f aufgetragen über die Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Umgebung T_a jeweils im Vergleich zum linearen Modell nach Gleichung (6).	19
Abbildung 10: Living Lab Energetikum als Testgebäude innerhalb des OptiMAS Projektes (Forschung Burgenland, 2016).....	20
Abbildung 11: Konzept der Messdatenerfassung für Feldtests aus Kombination von Live-Daten der Gebäudeautomation mit ortsunabhängiger, drahtloser und nachträglich installierbarer non-invasiver Temperatur-Sensorik im Sinne von OptiMAS.....	21
Abbildung 12: Exemplarisches non-invasives Temperatur-Monitoring einer Fußbodenheizung vor Anbringung der Dämmung.....	21
Abbildung 13: Hauptarten thermischer Strömungssensoren a) Heißfilmsensor, b) kalorimetrischer Sensor und c) TOF-Sensor.....	22
Abbildung 14: FEM-Simulationsmodell. Im Heizer wird für diese Simulation eine konstante Heizleistung von $P_H = 10$ W eingestellt. Die roten Pfeile deuten das Geschwindigkeitsfeld an, das im Querschnitt einem parabolischen Profil entspricht. Dargestellt sind die stationären Simulationsergebnisse. Durch Rotation um die z-Achse entsteht aus dem axialsymmetrischen 2D-Modell (a) eine 3D-Darstellung (b).	24

Abbildung 15: (a) Temperaturdifferenz $T_{DOWN} - T_{UP}$ im Abstand von 5 cm vom Heizer sowie die Heizerübertemperatur $\Delta T_H = T_H - T_F$ als Funktion der mittleren Strömungsgeschwindigkeit v_0 bei einer konstanten Heizleistung von 11 W. (b) Zeitlicher Verlauf der Temperaturdifferenz $T_{DOWN} - T_{UP}$ sowie der Heizerübertemperatur ΔT_H bei einem Heizsprung von 0 W auf 11 W und $v_0 = 0,5$ m/s.	25
Abbildung 16: Geschwindigkeit (a) und Temperatur (b) als Funktion der Radialkoordinate r simuliert im Abstand 5 cm stromabwärts vom Heizer bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v_0 = 10$ cm/s, Wassertemperatur von $T_F = 60$ °C und konstanter Heizleistung von 11 W. (Die wandnahe Grenzschicht wird im turbulenten Fall im Bereich der Approximation mittels Wandfunktion nicht dargestellt.)	26
Abbildung 17: OptiMAS-System Architektur (Krammer et al., 2017)	27
Abbildung 18: Edge-Layer der OptiMAS Gebäude-Gateway-Architektur (Krammer et al., 2017).....	28
Abbildung 19: Stationäre Temperaturdifferenz zweier Anlegesensoren aus Messing (BRA) und Aluminium (ALU) an einem Kunststoffrohr zur invasiv gemessenen Fluidtemperatur (sensor) im Vergleich zu den Temperaturwerten nach Anwendung des statischen Korrekturalgorithmus (sensor corr) in Gleichung (7).....	33
Abbildung 20: Anwendung des statischen (links) und dynamisch Korrekturalgorithmus (rechts) nach Gleichung (7) und (9) für einen Temperaturverlauf aus dem Laborexperiment mit durchgezogener Darstellung für gemessenen und strichlierter Darstellung für korrigierte Signale	34
Abbildung 21: Messung der Fluidtemperatur in einem PVC-Kunststoffrohr bei hohem zeitlichen Temperaturgradienten und variierendem Durchfluss mit einem invasiven Temperatursensor (TIN 16) und zwei non-invasiven Temperatursensoren (TAN 10 und TAN 14) vor (oben) und nach (unten) der Anwendung des dynamischen Korrekturalgorithmus nach Gleichung (9).....	36
Abbildung 22: (a) Schematischen Querschnitts des Sensors; (b) Pt100-Element, für den Bau des ersten Sensorprototyps.....	37
Abbildung 23: Konstruktionsschritte des ersten Sensorprototyps: (a) Befestigung des Pt100-Element am Kupferrohr (Innendurchmesser 16 mm, Außendurchmesser 18 mm); (b) Eine Kupferwicklung um den Pt100-Temperatursensor dient als Heizer; (c) Die gleiche Struktur als "Dummy-Heizer" wird 10 cm stromaufwärts angeordnet, um die Fluidtemperatur T_F zu messen; (d) Beide Strukturen werden zuerst mit elektrischem Isolierband wärmedämmend; (e) Kupferband dient als weitere Isolierung und Abschirmung; (f) Die letzte Isolierschicht besteht aus einem 2 cm dicken Polyethylenrohr.....	37
Abbildung 24: (a) Prüfstand zur experimentellen Charakterisierung der thermischen Strömungssensoren; (b) Sensorprototyp im geschlossenen hydraulischen Kreislauf. Sichtbar ist außerdem die für die Signalaufbereitung verwendete Sensorelektronik samt passendem Netzteil... ..	38
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Signalaufbereitungsschaltung. $R(T_H)$ und $R(T_F)$ bezeichnen die Pt100-Elemente, die sich unterhalb bzw. stromaufwärts vom Heizer befinden. Durch den Offset des zweiten Verstärkers kann die Temperaturabhängigkeit des Ausgangssignals berücksichtigt werden. Vor der Abtastung durch einen Mikrocontroller wird das Ausgangssignal durch ein Tiefpassfilter (TP) gefiltert.....	39
Abbildung 26: (a) Sensorelektronikschaltung aufgebaut mit SMD-Technologie; (b) Die miniaturisierte Platine untergebracht in einem mittels 3D-Druck hergestellten Gehäuse.	40

Abbildung 27: (a) Ausgangskennlinie des ersten Sensorprototyps. Während der Messung lag die Wassertemperatur um den Referenzwert von 25 °C; (b) Differenz zwischen der Ausgangsspannung U_A (gemessen bei der aktuellen Fluidtemperatur T_F) und dem Referenzwert $U_{A, \text{ref}}$ (gemessen bei der Referenzfluidtemperatur $T_{\text{ref}} = 25 \text{ °C}$) als Funktion der Temperaturdifferenz $T_F - T_{\text{ref}}$. Bei der Messung wurde T_F bei verschiedenen konstanten Werten des Volumenstroms zwischen 10 °C und 50 °C für Niedertemperaturheizungen variiert.	41
Abbildung 28: (a) Oszillogramme und (b) entsprechende Histogramme der mittelwertfreien Ausgangsspannung ($UA - UA$, wobei UA den Mittelwert der Ausgangsspannung bezeichnet) aufgenommen bei zwei verschiedenen Werten des Volumenstroms. Die Oszillogramme wurden bei einer Abtastrate von 250 Hz aufgenommen, für die Histogramme wurden 50.000 Messwerte herangezogen.	41
Abbildung 29: Abschätzung des maximalen, relativen Fehlers nach Gleichung (12) als Funktion der Reynolds-Zahl.	42
Abbildung 30: Verlauf der Vorlauftemperatur einer Fußbodenheizung im Testgebäude bei einem Einschaltvorgang für einen invasiven Vergleichssensor TIN VL C, einen wärmegeprägten Anlegesensor TAN 11 und dargestellter Umgebungstemperatur im Fußbodenheizungsverteiler T_{amb} 2. Ergänzend in blau die Strömungsgeschwindigkeit im Kunststoffrohr.	43
Abbildung 31: Abweichung der Temperaturmessung des Anlegesensors TAN 11 vom invasiven Vergleichssensor TIN VL C ohne (oben) und mit Anwendung des statischen (mittig) bzw. des dynamischen Korrekturalgorithmus (unten).	44
Abbildung 32: Schematische Darstellung des Kompaktgerätes x ² A9 bestehend aus einem Lüftungsmodul (LU), einer Wärmepumpe (WP) sowie einem Hydraulikmodul. An das Gerät sind ein Warmwasserspeicher (WWS) und der Kreislauf einer Niedertemperatur-Heizung angeschlossen. Nichtinvasive Temperatursensoren werden an beiden Vorlaufleitungen (A und B) sowie an der gemeinsamen Rücklaufleitung (C) installiert. An letzterer wird auch der nichtinvasive thermische Strömungssensor angebracht. (nach Drexel und Weiss, 2019)	45
Abbildung 33: (a) Die Lage der beiden Vorlaufleitungen (A und B) sowie der gemeinsamen Rücklaufleitung (C) im Keller des Testgebäudes.	46
Abbildung 34: Montageschritte des nichtinvasiven thermischen Strömungssensors. (a)-(c) Das Anbringen von Pt100-Elementen und Heizerfolien. (d)-(f) Thermische Isolierung und elektrische Abschirmung des Sensors.	47
Abbildung 35: (a) An der Rücklaufleitung wird neben dem thermischen Strömungssensor auch ein Ultraschall (US)-Strömungssensor zur Referenz montiert. (b) Lage des Temperatursensors an der Vorlaufleitung zum Warmwasserspeicher (Stelle B in Abb. 33). (c) Lage des Temperatursensors an der Vorlaufleitung der Niedertemperatur-Heizung (Stelle A in Abb. 33).	47
Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf des Durchflusses, der Temperatur der Rücklaufleitung, der Temperatur der Vorlaufleitung zum Warmwasserspeicher (Vorlauftemperatur 1) und der Temperatur der Vorlaufleitung zum Heizkreis (Vorlauftemperatur 2) während eines Zeitraumes von einer Woche.	48
Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf des Durchflusses und der Vor- und Rücklauftemperaturen während eines Zeitraumes von einem Tag, wobei die Temperaturwerte jede Minute aktualisiert wurden.	49

Abbildung 38: Identifizierte Hochfrequenzperioden eines Temperatursensors bei der Beladung eines Wärmespeichers.....	50
Abbildung 39: Analyse der Zieltemperatur – Sollwert und Regelgröße für Vorlauftemperatur einer Fußbodenheizung.....	51
Abbildung 40: Ausreißer-Erkennung für Zieltemperaturen mehrerer Sensoren	51
Abbildung 41: Verteilung der Wärmeabgabe von Heizkreisen	52
Abbildung 42: Ausreißer-Erkennung für die Wärmeemissionsanalyse.....	52
Abbildung 43: Verteilung der täglichen Betriebsstunden	53
Abbildung 44: Ausreißer-Erkennung für einen bestimmten Sensor im Zeitverlauf.....	54
Abbildung 45: Ausfall der Netzwerkkonnektivität	54
Abbildung 46: Detektiertes Sensorversagen eines Einzelsensors	55
Abbildung 47: Geforderte Effizienzsteigerung des Gebäudebetriebes nach Einbau eines Monitoring- und Analysesystems, um alle anfallenden Investitions- (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) innerhalb von drei Jahren zu amortisieren. Die Varianten unterscheiden sich im Gebäudeenergiebedarf in kWh/m ² a, in der Gebäudegröße A bis D in m ² und in den Energiepreisen in €/kWh. Berechnung mittels Standardkostensatzes.	58
Abbildung 48: Geforderte Effizienzsteigerung des Gebäudebetriebes nach Einbau eines Monitoring- und Analysesystems, um alle anfallenden Investitions- (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) innerhalb von drei Jahren zu amortisieren. Die Varianten unterscheiden sich im Gebäudeenergiebedarf in kWh/m ² a, in der Gebäudegröße A bis D in m ² und in den Energiepreisen in €/kWh. Berechnung mittels erhöhten Kostensatzes im Sinne eines Worst-Case Szenarios.....	58
Abbildung 49: Phasen und Bestandteile der Ökobilanz nach ISO EN 14040 (2006)	59

6.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Randbedingungen der Parameterstudie	14
Tabelle 2: Messpunkt-Beschreibung: Teile, Gewicht, technische Lebensdauer und entsprechende ecoinvent-Prozesse	60
Tabelle 3: Auswertung Treibhauspotential und Primärenergiebedarf, normierte Größen je Bezugseinheit und Bauteil; ReCiPe 2016 v1.1 Midpoint (H) - Climate change, excl biogenic carbon und Primary energy demand from ren. and non ren. resources (net cal. value).....	61
Tabelle 4: Treibhauspotential und Primärenergiebedarf des gesamten Lebenszyklus einer Messstelle anteilig für ein Jahr	62
Tabelle 5: Treibhauspotential und Primärenergiebedarf, gesamter Lebenszyklus für mehrere Messpunkte verschiedener Gebäudegrößen; Ergebnisse anteilig für 1 Jahr; Geforderte Mindesteinsparung durch Effizienzsteigerung.....	63

6.3. Literaturverzeichnis

- Darby, S. (2006): The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for EFRA of the literature on metering, billing and direct displays, Environmental Change Institute, University of Oxford: Oxford, S. 1-21
- Drexel und Weiss (2019): Einbauanleitung Kompaktgerät x²A9, www.drexel-weiss.at/app/uploads/2016/08/900.5970_08_EA_x2-A9_DE.pdf.download, abgerufen am 15.11.202, Dokumentnummer 900.5970_13_EA_x2-A9_DE, AT-6922 Wolfurt
- Ecoinvent (2018): „Database Ecoinvent v3.5. Datenbank inkludiert im Software System GaBi 6,“ Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen, 2018.
- Elwenspoek, M. (1999): Thermal flow micro sensors. In Proceedings of the International Semiconductor Conference, Sinaia, Romania, 5–9 October 1999; Volume 2, pp. 423–435, doi:10.1109/SMICND.1999.810580.
- Forschung Burgenland (2016): „Energetikum – Living Lab“; URL: <http://www.forschung-burgenland.at/infrastruktur/energetikum/> aufgerufen am 23.09.2016
- Frank, S. (2016): Hybrid Model-Based and Data-Driven Fault Detection and Diagnostics for Commercial Buildings. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.
- Hix J. & Seydel A. (2016): Heating & Plumbing Pipes Europe 2016, Consumption of pipes by material and country, Hix Publishing, 58332 Schwelm, Germany, 2016.
- Holman, J.P. (2009): Heat Transfer, 10th ed.; McGraw-Hill Higher Education: Boston, MA, USA, 2009.
- Huijbregts, M., Steinmann, Z., Elshout, P., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Hollander, A., Zijp, M. und Van Zelm, R. (2016): „ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level; Report I: Characterization,“ National Institute for Public Health and the Environment, The Netherlands, 2016.
- ISO 14040 (2009): „Environmental management - Life cycle assessment - Grundsätze und Rahmenbedingungen“.
- ISO 14044 (2006): „Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines“.
- Katipamula, S., & Brambley, M. R. (2005): Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems— A Review, Part II. *Hvac&r Research*, 11(1), 3-25. Abgerufen am 25.2.2019 von <https://pdfs.semanticscholar.org/a992/de71d68db9c1d5160d957eefdfdb0b816190.pdf>
- Krammer, L.; Diwold, K.; Lechner, D.; Treytl, A.; Cerimovic, S.; Derler, B.; Seidl, C.; Wenig, F. (2017). Large-scale Energy Optimization of Buildings based on non-invasive Sensors. Department Energie-Umweltmanagement, FH Burgenland, Science.Research.Pannonia, Band 21, Zukunft der Gebäude: 99-108, leykamverlag
- OIB (2015): „OIB-Richtlinie 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz,“ Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien, 2015.

RL 2018/844/EU (2018): Richtlinie 2018/844/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz

Schlichting H., K. Gersten K. (2006): „Grenzschicht-Theorie“; 10th ed. Berlin, Heidelberg: Springer

Tkautz, S. (2019): Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Energie Monitoring Systems für Bestandsgebäude, Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur für technisch-wissenschaftliche Berufe an der Fachhochschule Burgenland, Campus Pinkafeld

Ueno, Tsuyoshi; Tsuji, Kiichiro; Saeki, Osamu (2006): Effectiveness of Displaying Energy Consumption Data in Residential Buildings: To know is to change, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, vol. 7, S. 264-277

Wenig F., Derler B., Seidl C. & Heschl C. (2017): Characterization of non-invasive pipe flow temperature measurement, 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems Conference, 4-8 October, Dubrovnik, Croatia.

7. Anhang

Die nachfolgende Liste ist ein **Auszug der relevantesten Publikation aus OptiMAS** und versteht sich als Literaturempfehlung bei weitergehendem Interesse zu der durchgeführten Forschungstätigkeit.

- Krammer, L.; Diwold, K.; Lechner, D.; Treytl, A.; Cerimovic, S.; Derler, B.; Seidl, C.; Wenig, F. (2017). Large-scale Energy Optimization of Buildings based on non-invasive Sensors. Department Energie-Umweltmanagement, FH Burgenland, Science.Research.Pannonia, Band 21, Zukunft der Gebäude: 99-108, leykamverlag
- Wenig F., Derler B. & Seidl C. (2017). Characterization of a non-invasive pipe flow temperature measurement, Conference Full Paper, SDEWES 2017 Dubrovnik
- Cerimovic, S.; Treytl, A.; Glatzl, G.; Beigelbeck, R.; Keplinger, F.; Sauter, T. (2018). Thermal Flow Sensor for Non-Invasive Measurements in HVAC Systems. In: Euroensors, proceedings 2018, 2(13), 827, Euroensors 2018 Conference: 827, Euroensors, Graz
- Sauter, T.; Treytl, A.; Diwold, K.; Molnar, D.; Lechner, D.; Krammer, L.; Derler, B.; Seidl, C.; Wenig, F. (2018). Getting Fit for the Future: Optimizing Energy Usage in Existing Buildings by Adding Non-Invasive Sensor Networks. IEEE, proceedings ISIE 2018: 963-968, IEEE, Cairns
- Cerimovic, S.; Treytl, A.; Glatzl, T.; Beigelbeck, R.; Keplinger, F.; Sauter, T. (2019). Development and Characterization of Thermal Flow Sensors for Non-Invasive Measurements in HVAC Systems. Sensors 2019, Vol. 19(6): doi: 10.3390/s1906139
- Seidl, C. & Wenig, F. (2019): ANALYSIS OF NON-INVASIVE TEMPERATURE SENSORS IN TERMS OF HEAT METERING, Indoor Climate of Buildings 2019, International Congress, High Tatra, Slovakia
- Wenig, F.; Seidl, C.; Derler, B.; Heschl, C.; Sauter, T.; Treytl, A. (2019). Towards non-invasive temperature measurements in HVAC: A characterization and correction approach. In: Proceedings of 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE): 1568-1572, IEEE, Vancouver

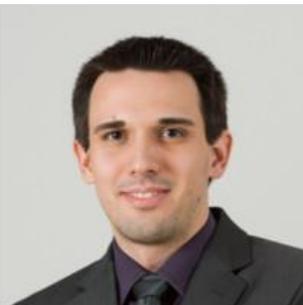
Kontaktinformationen der Projektverantwortlichen je Konsortialpartner



Florian Wenig
Hochschullehrer, Center for Building Technology
Fachhochschule Burgenland
florian.wenig@fh-burgenland.at



Albert Treytl
Zentrumsleiter - Department für Integrierte Sensorsysteme
Donau-Universität Krems
albert.treytl@donau-uni.ac.at



Lukas Krammer
Senior Research Scientist
Siemens Österreich
lukas.krammer@siemens.com

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)