



Leanheat: Die intelligente Fernwärmesteuerung für das Fernwärmenetz Hannover - Herausforderungen und Potentiale einer zukunftsweisenden Technologie

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“ im Studiengang
Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für
Maschinenbau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität
Hannover

vorgelegt von

Name:



Köster



Vorname:



Nico



Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, 8. Mai 2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Relevanz der Thematik	1
1.2 Aufbau und Zielsetzung	3
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Fernwärme in Hannover	4
2.1.1 Funktionsweise und Grundlagen	4
2.1.2 Hausanschluss und Hausanlage	9
2.1.3 Kohleausstieg Hannover	11
2.1.4 Fernwärmesatzungsgebiet	13
2.2 Intelligente Fernwärmesteuerung - Leanheat Building	15
2.2.1 Funktionsweise von Leanheat Building	15
2.2.2 Status Quo von Leanheat Building	18
3 Intelligente Fernwärmesteuerung in Hannover	19
3.1 Beweggründe und Wunschgedanken	19
3.2 Pilotprojekt	23
3.2.1 Versuchsobjekte	23
3.2.2 Implementierung des Pilotprojektes	24
3.3 Auswertung des Pilotprojektes	26
4 Akzeptanz der Intelligenten Fernwärmesteuerung	33
4.1 Herleitung des Akzeptanzmodells	33
4.1.1 Begriffsbestimmung Akzeptanz	33
4.1.2 Technologieakzeptanzmodelle	36
4.1.3 UTAUT-Modellentwicklung	41
4.2 Quantitative Umfrage	44
4.2.1 Datenerhebung und Datenerfassung	44
4.2.2 Inhalt und Aufbau	45
4.2.3 Datenanalyse in SPSS	48

5	Auswertung der quantitativen Umfrage	48
5.1	Deskriptive Analyse der Stichprobe	48
5.1.1	Demographie	48
5.1.2	Erfahrungen mit intelligenten Heizungssteuerungen	49
5.2	Überprüfung der Stichprobe	51
5.2.1	Datennormalität	51
5.2.2	Überprüfung der Anzahl Konstrukte mittels Faktoranalyse und Konsistenzreliabilität	52
5.3	Auswertung UTAUT-Modell	56
5.3.1	Regressionsanalyse Leistungserwartung und Nutzungsabsicht	57
5.3.2	Regressionsanalyse Aufwandserwartung und Nutzungsabsicht	59
5.3.3	Regressionsanalyse sozialer Einfluss und Nutzungsabsicht	61
5.3.4	Regressionsanalyse Wahrgenommene Glaubwürdigkeit und Nutzungsabsicht	62
5.3.5	Regressionsanalyse unterstützende Rahmenbedingungen und Nutzungsabsicht	65
5.3.6	Übersicht der Resultate	66
6	Diskussion	67
6.1	Erkenntnisse aus dem Pilotprojekt	67
6.2	Erkenntnisse der Umfrage	69
6.3	Beantwortung der Forschungsfragen	71
6.4	Limitation	75
6.5	Fazit und Ausblick	76
	Literatur	79
A	Anhang	85
A.1	FW-Stationen	85
A.2	Quellen - Quantitative Umfrage	87
A.3	Fragebogen	88
A.4	Rotierte Komponentenmatrix	96

1 Einleitung

„Energiesparen ist der schlafende Riese des Klimaschutzes.“

Franz Alt (2011)

1.1 Relevanz der Thematik

Die Relevanz dieser Arbeit zum Thema „Leanheat: Die intelligente Fernwärmesteuerung für das Fernwärmenetz Hannover - Herausforderungen und Potentiale einer zukunftsweisenden Technologie“ ergibt sich aus mehreren Aspekten des aktuellen energiepolitischen und technologischen Kontexts, der sowohl auf lokaler als auch auf nationaler Ebene bedeutende Entwicklungen aufweist.

Die Stadt Hannover hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2035 weitgehend klimaneutral zu sein. Diese Zielsetzung ist Teil eines umfassenden Engagements der Stadt Hannover, welches durch die Bereitstellung von 35 Millionen Euro zwischen 2021 und 2023 für CO₂-reduzierende Maßnahmen wie den Ölheizungstausch und die Anschlusspflicht an das Fernwärmenetz unterstrichen wird.¹ Ein wichtiger Schritt zur Unterstützung dieser Initiative war der Beschluss des Rates der Landeshauptstadt Hannover am 15. Juli 2021, das Kohlekraftwerk Stöcken schneller als geplant abzuschalten und die regenerative Wärmeerzeugung auszubauen. Dieser Schritt zeigt die Entschlossenheit der Stadt, die Wärmewende aktiv zu gestalten und innovative Energiesysteme wie Fernwärme zu stärken.² Die Herausforderung der Dekarbonisierung im Gebäudesektor ist dabei immens. Laut dem deutschen Klimaschutzgesetz soll bis 2030 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 40% erreicht werden. Diese Zielvorgabe erfordert eine signifikante Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien, um den Energieverbrauch insgesamt zu reduzieren.³ Die Bundesregierung verfolgt das langfristige Ziel, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu realisieren, was den Bedarf an fortgeschrittenen technologischen Lösungen zur Energieeffizienz weiter unterstreicht.⁴ Der Endenergieverbrauch in privaten Haushalten, der hauptsächlich auf Raumwärme und Warmwasser entfällt, verdeutlicht die Notwendigkeit, den Heizenergieverbrauch zu minimieren. Dies ist ein zentraler Punkt in den Plänen der Bundesregierung, die Energieeffizienz im Gebäudebestand zu verbessern.⁵ Innovative Technologien wie Leanheat Building, die eine präzise und effiziente Steuerung der Heizsysteme ermöglichen, sind entscheidend, um diese Ziele zu erreichen. Die Potenziale für Energie-

¹Vgl. *Einigungsvorschlag zum Kohleausstieg in Hannover* (2021)

²Vgl. Borderstep Institut (2024)

³Vgl. *Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019, geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021* (2021)

⁴Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015), S. 3

⁵Vgl. Singhal und Stede (2019), S. 620

effizienz durch technischen Fortschritt und Digitalisierung sind erheblich und könnten den Energieverbrauch in Deutschland um 10 bis 20 Prozent senken.⁶ Darüber hinaus wird erwartet, dass der Emissionsminderungsbeitrag durch die Gebäudeautomation bis 2030 bei ambitioniertem Ausbau auf 14,7 Millionen Tonnen CO₂ gesenkt wird, was rund 30 % des im Klimaschutzgesetz festgelegten Reduktionsziels für den Gebäudesektor entspricht.⁷

Die Relevanz intelligenter Heizungssysteme wie Leanheat Building nimmt in der Entwicklung nachhaltiger Städte und Quartiere deutlich zu. Solche Systeme stehen im Mittelpunkt der Bemühungen um eine effizientere Nutzung von Ressourcen und einer besseren Anpassung an die Komfortbedürfnisse der Bewohner. Dabei spielen innovative Energienetze und Smart-Home-Systeme eine entscheidende Rolle, wobei ihre Implementierung jedoch aufgrund hoher Kosten, Akzeptanzproblemen und technischer Herausforderungen als besonders anspruchsvoll gilt.⁸ Intelligente Heizungssteuerungen wie Leanheat Building zielen darauf ab, die Wohnraumtemperaturen automatisch den Vorstellungen der Bewohner anzupassen und dabei den Energieverbrauch zu minimieren. Diese Systeme nutzen fortgeschrittene Algorithmen zur Anpassung der Heizungssysteme und Vorlauftemperaturen, was zu deutlichen Einsparungen bei den CO₂-Emissionen und Heizkosten führen kann. Trotz dieser Vorteile besteht jedoch die Herausforderung, dass Bewohner möglicherweise zögern, die Kontrolle über ihre Heizsysteme an eine automatisierte Lösung abzugeben.⁹ Der Erfolg solcher Technologien hängt stark von der Nutzer-Technik-Interaktion ab. Technologien, die auf Ablehnung stoßen oder zusätzlichen Wartungsaufwand erfordern, finden oft wenig Anklang bei Wohnungsgesellschaften und Dienstleistern, was ihre Marktchancen verringert.¹⁰ Dennoch bieten intelligente Heizungssysteme und andere Smart-Home-Technologien bedeutende neue Interaktionsmöglichkeiten und können die Lebensqualität sowie die Energieeffizienz erheblich verbessern.¹¹ In Deutschland haben bereits 8 % der Bevölkerung in solche intelligenten Heizungssysteme investiert, wobei insbesondere Eigenheimbesitzer diese Technologien adaptieren. Die Mehrheit der Bevölkerung steht diesen Investitionen jedoch skeptisch gegenüber, teilweise aufgrund von Informationsmängeln und Sicherheitsbedenken hinsichtlich des Datenschutzes.¹² Studien bestätigen, dass der Einsatz digitaler Technologien in Gebäuden zu einer signifikanten Reduktion des Heizbedarfs und somit zu einem effizienteren Einsatz fossiler Energien führen kann. Dies un-

⁶Vgl. Bründlinger et al. (2018), S. 26

⁷Vgl. Beucker und Hinterholzer (2021), S. 8

⁸Vgl. Hickfang et al. (2020), S. 169

⁹Vgl. Hickfang et al. (2020), S. 170 f.

¹⁰Vgl. Moeller (2022), S. 280

¹¹Vgl. Gram-Hanssen und Darby (2018), S. 94; Strobel et al. (2021), S. 225

¹²Vgl. Setton et al. (2017), S. 105

terstreicht das Potenzial solcher Technologien zur Erreichung von Klimaschutzzielen.¹³ Der niedrige Anteil erneuerbarer Energien und die stagnierende Sanierungsrate in deutschen Wohngebäuden zeigen, dass ohne ambitionierte und weitreichende Maßnahmen die nationalen und internationalen Klimaschutzziele nicht erreicht werden können.¹⁴

Die aufgezeigten Aspekte beleuchten die Relevanz intelligenter Heizungssysteme im Kontext der städtischen Wärmewende. Es wird deutlich, dass eine umfassende strategische Planung und Anpassung notwendig sind, um die Potenziale solcher Technologien vollständig zu erschließen und einen signifikanten Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

1.2 Aufbau und Zielsetzung

In dieser Arbeit werden die Herausforderungen und Potenziale intelligenter Fernwärmesteuerung in Hannover untersucht, mit dem Ziel, ein tiefgreifendes Verständnis der technischen, sozialen und wirtschaftlichen Aspekte zu entwickeln. Die Einleitung betont die Bedeutung der Fernwärme in Hannover, insbesondere im Kontext des Kohleausstiegs und der fortschreitenden Digitalisierung. Das zweite Kapitel behandelt die theoretischen Grundlagen, darunter die Funktionsweise der Fernwärme und des Leanheat-Building-Systems. Das dritte Kapitel beschreibt ein Pilotprojekt zur intelligenten Fernwärmesteuerung, diskutiert die Beweggründe, den Projektaufbau und die ersten Ergebnisse. Im vierten Kapitel wird die Akzeptanz dieser Technologie mittels einer quantitativen Umfrage analysiert, die auf dem UTAUT-Modell basiert und Nutzereinstellungen untersucht. Das fünfte Kapitel präsentiert die Umfrageergebnisse, bietet eine deskriptive Analyse der Stichprobe und führt eine Faktoranalyse sowie Konsistenzreliabilitätstests durch. Das abschließende sechste Kapitel diskutiert die Ergebnisse aus dem Pilotprojekt und der quantitativen Umfrage. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen in der Fernwärme und digitalen Steuerungstechnologien ab und bietet ein umfassendes Bild der Rolle intelligenter Fernwärmesysteme in der städtischen Energieversorgung.

Ein Hauptziel dieser Arbeit besteht darin, ein vertieftes Verständnis für die Bedeutung von Fernwärme in einem spezifischen regionalen Kontext, wie Hannover, zu schaffen. Dies umfasst die Untersuchung der Rolle von Fernwärme bei der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen und der Steigerung der Energieeffizienz. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der eingehenden Untersuchung der Funktionsweise von Leanheat Building und der Bewertung der technologischen Innovationen im Kontext der intelligenten Fernwärmesteuerung. Diese Analyse zielt darauf ab, die Relevanz und Umsetzbarkeit dieser

¹³Vgl. Beucker und Hinterholzer (2022), S. 11

¹⁴Vgl. Dunkelberg et al. (2020), S. 1-3

Technologien zu bewerten, um potenzielle Verbesserungen und Optimierungen zu identifizieren. In dieser Arbeit wird die Akzeptanz und das Potenzial intelligenter Heizungssteuerungen, wie sie im Leanheat Building System zum Einsatz kommen, umfassend untersucht. Das Ziel besteht darin zu ermitteln, wie der Einsatz solcher Technologien in Fernwärmesatzungsgebieten zur Steigerung der Energieeffizienz beitragen und gleichzeitig die Bewohner der Gebäude in den Prozess einbeziehen kann. Die Arbeit wird bewerten, inwieweit Leanheat Building im spezifischen regionalen Kontext von Hannover umsetzbar ist. Dabei wird untersucht, wie diese Technologie dazu beitragen kann, regionale und bundesweite Anforderungen im Bereich Energieeffizienz und Nachhaltigkeit zu erfüllen. Dies beinhaltet auch die Untersuchung des Nutzens und möglicher Hürden der Implementierung. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen, die es in der Arbeit zu beantworten gilt:

1. Welche Rolle spielt die Fernwärme in Hannover hinsichtlich der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz für die Wärmeversorgung?
2. Welche Herausforderungen und Potentiale ergeben sich durch die Nutzung von intelligenten Heizungssteuerungen?
3. Welche Möglichkeiten bieten intelligente Heizungssteuerungen, für eine nachhaltige und energieeffiziente Wärmeversorgung?
4. Wie hoch ist die Akzeptanz von intelligenten Heizungssteuerungen wie Leanheat Building, welche Herausforderungen gilt es zu bewältigen und inwieweit kann die Akzeptanz gesteigert werden?

Diese Forschungsfragen bilden die Grundlage für die Untersuchung und Bewertung der Relevanz und Umsetzbarkeit von Leanheat Building in Fernwärmesatzungsgebieten und tragen dazu bei, den Beitrag von intelligenten Heizungssteuerungen zur Verbesserung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit in der Energieversorgung zu verstehen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Fernwärme in Hannover

2.1.1 Funktionsweise und Grundlagen

Die Geschichte der Fernwärme reicht weit zurück und hat sich im Laufe der Zeit zu einem wichtigen Bestandteil der städtischen Energieversorgung entwickelt. Die ersten Fernwärmesysteme wurden bereits in den 1870er und 1880er Jahren in den Städten

nehmen oder sie nicht abzuschließen. Darüber hinaus kann Anonymität zu ungenauen oder unseriösen Antworten führen.¹⁷⁰ Um diese Probleme zu minimieren, wurden klare Fragestellungen formuliert und Analysemethoden eingesetzt, um die Validität und Zuverlässigkeit der erhobenen Daten zu gewährleisten.

Eine weitere Einschränkung liegt in der Modifikation des zugrunde liegenden UTAUT-Modells. Der Moderator „Freiwilligkeit der Nutzung“ wurde entfernt, weil die Teilnehmer nicht in zwei verschiedenen Situationskontexten befragt werden konnten. Der freiwillige Gebrauch von intelligenten Heizungssteuerungen wurde angenommen, aber in zukünftigen Untersuchungen könnte dieser Moderator wieder aufgenommen werden, insbesondere wenn intelligente Fernwärmesteuerungen in Hannover Standard werden. Ein anderes Problem besteht darin, dass unter den Befragten niemand war, der die intelligente Heizungssteuerung Leanheat Building installiert hatte. Dadurch konnte die tatsächliche Nutzung dieser Technologie nicht beurteilt werden, und die Studie konzentrierte sich nur auf die Nutzungsabsicht. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse möglicherweise nicht direkt auf tatsächliche Anwendungen übertragbar sind.

Bei der Überprüfung der Konsistenzreliabilität mittels Cronbach's Alpha erreichten die Variablen sozialer Einfluss und unterstützende Rahmenbedingungen den Richtwert von $\alpha > 0.7$ nicht. Trotz der Verringerung der Items blieben diese Variablen für die weiteren Auswertungen erhalten, was die Validität und Aussagekraft der Ergebnisse beeinträchtigt. Die Faktoranalyse zeigte zudem unzureichende Faktorladungen und eliminierte Items, was darauf hinweist, dass das theoretische Modell möglicherweise überarbeitet werden sollte.

Eine weitere signifikante Einschränkung ergibt sich aus den Ergebnissen des Kolmogorov-Smirnov-Tests, der signifikante Abweichungen von der Normalverteilung aufzeigte. Obwohl die Skewness- und Kurtosis-Werte innerhalb akzeptabler Bereiche lagen, deuteten die p-Werte darauf hin, dass die Daten nicht der Normalverteilung entsprachen. Diese Abweichung wurde bei den statistischen Analysen nicht ausreichend berücksichtigt, was die Robustheit der Regressionsanalysen und damit die Aussagekraft der Ergebnisse beeinträchtigen kann.

6.5 Fazit und Ausblick

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass Fernwärme in Hannover eine zentrale Rolle bei der Umstellung auf eine nachhaltige und energieeffiziente Wärmeversorgung spielt. Die Stadt Hannover strebt an, bis 2035 klimaneutral zu werden, wofür umfassende Maßnahmen und Investitionen in Fernwärme erforderlich sind. Durch die geplante Stilllegung des Kohlekraftwerks in Stöcken und die Errichtung von 14 Ersatzerzeugungsanlagen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien verfolgt Hannover ei-

¹⁷⁰Vgl. Homburg (2020), S. 296

ne aktive Strategie zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und Förderung nachhaltiger Wärmeerzeugung. Die Fernwärmesatzung, die seit Januar 2023 in Kraft ist, unterstützt dieses Vorhaben durch die Einführung einer Anschluss- und Benutzungspflicht in bestimmten Gebieten. Die Nutzung intelligenter Heizungssteuerungen wie Leanheat Building in Hannover eröffnet neue Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz. Das Pilotprojekt zeigte, dass solche Systeme die Heizleistung effizient anpassen können, was zu deutlichen Energieeinsparungen und einer Reduzierung der CO₂-Emissionen führt. Allerdings gibt es auch Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Akzeptanz durch Mieter und die Komplexität der Heizkostenentwicklung. Eine klare Kommunikation und sorgfältige Planung sind entscheidend, um die Akzeptanz zu fördern und eine erfolgreiche Implementierung sicherzustellen. Die vielfältigen Möglichkeiten intelligenter Heizungssteuerungen, darunter Echtzeitüberwachung, automatisierte Anpassung und die Nutzung von Gebäuden als Energiespeicher, tragen dazu bei, den Energieverbrauch zu senken und den Wohnkomfort zu erhöhen. Diese Systeme können auch zur Optimierung der Netzlasten und zur Verringerung der Spitzenlasten beitragen, was die Versorgungssicherheit verbessert und die Effizienz der Fernwärmeversorgung steigert.

Für zukünftige Forschungen im Bereich intelligenter Heizungssteuerungen wie Leanheat Building ergeben sich mehrere wichtige Aspekte, die weiter untersucht werden sollten, um ein umfassenderes Verständnis dieser Technologie zu erlangen und ihre potenziellen Auswirkungen zu bewerten. Zunächst sollten Studien auf eine größere Stichprobe ausgeweitet werden, um die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Bisherige Untersuchungen basierten auf einem begrenzten Gebäudebestand in Hannover und eine breitere Datengrundlage könnte dazu beitragen, die Vielfalt der Einflussfaktoren auf Energieeinsparungen und Nutzungsabsicht besser zu verstehen. Des Weiteren ist es wichtig, die Auswirkungen von IoT- und KI-basierten Heizungssteuerungen genauer zu erforschen. Bisher gibt es nur begrenzte Studien zu diesem relativ neuen Bereich, und eine vertiefte Analyse könnte helfen, das volle Potenzial dieser Technologien für Energieeffizienz, Komfort und CO₂-Reduktion zu verstehen. Darüber hinaus sollten zukünftige Studien die Ergebnisse in neu ausgestatteten oder energetisch sanierten Gebäuden untersuchen, um die langfristigen Auswirkungen intelligenter Heizungssteuerungen besser zu bewerten. Dies würde helfen, ein vollständigeres Bild der Einsparungen an Energie, Leistung, Kosten und CO₂-Emissionen zu erhalten. Ein weiterer wichtiger Forschungsbereich ist die Untersuchung der Auswirkungen auf die Spitzenlastreduktion und die Netzdienlichkeit im Zusammenhang mit einem möglichen Demand Side Management. Diese Aspekte sind entscheidend für die Weiterentwicklung neuer Fernwärmesysteme der vierten Generation. Um die tatsächliche Nutzung von Technologien wie Leanheat Building zu verstehen, sollten zukünftige Studien die

tatsächliche Nutzung solcher Systeme erforschen und die Ergebnisse der Nutzungsabsicht validieren. Darüber hinaus ist es wichtig, die Methodik und Analyseverfahren in zukünftigen Studien zu verbessern, um eine höhere Konsistenzreliabilität und Validität der Ergebnisse zu gewährleisten. Dies umfasst eine robustere Faktoranalyse und die Berücksichtigung von Normalverteilungsproblemen bei statistischen Analysen. Insgesamt bieten diese Aspekte einen Ausblick auf die verschiedenen Bereiche, in denen weitere Forschung notwendig ist, um das volle Potenzial intelligenter Heizungssteuerungen zu erfassen und gleichzeitig bestehende Herausforderungen zu bewältigen.