



Nachhaltige Energieversorgung von Büro- und Gewerbegebäuden

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: von Kieckebusch

Vorname: Anne Sophie

Geb. am:



in:



Prüfer: Prof. Dr. rer. nat. Michael H. Breitner

Hannover, den 30.05.2023

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung / Abstract	i
Executive Summary	iii
Symbolverzeichnis	xii
Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xvi
1 Einleitung	1
1.1 Relevanz der Thematik und Forschungsfragen	1
1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit	2
2 Energieeffizienz	4
2.1 Begriff der Energieeffizienz	4
2.2 Dreifaltige Nachhaltigkeit	4
2.3 Klimaneutralität im Gebäudebestand	6
2.3.1 Gesetze, Verordnungen und Strategien	8
2.3.2 Energieausweis	9
2.3.3 Energetische Bewertung von Gebäuden	11
2.3.4 Energieeffizienz der Wärmebereitstellung	11
2.4 Wertschöpfung	12
3 Technische Grundlagen - Energiesystemkomponenten	16
3.1 Biomasse	16
3.1.1 Thermochemische Umwandlung - Verbrennung von Holz	16
3.1.2 BHKW - Kraft-Wärme-Kopplung	18
3.2 Geothermie	19
3.2.1 Wärmepumpe	19
3.2.2 Klimatisierung	21
3.2.3 Photovoltaik	23
3.3 Energiespeicher	25
3.3.1 Elektrische Speicher - Batteriespeicher	25
3.3.2 Thermische Speicher - Warmwasserspeicher	26
3.3.3 Chemische Speicher - Power-to-Gas	27
3.4 Ladesäulen für Elektrofahrzeuge	27
4 Wirtschaftlichkeit der Energieeffizienz	29
4.1 Verfahren der Investitionsrechnung	29
4.2 Förderung und Finanzierung	32
4.3 Energie- und Steuerrecht	36
4.3.1 Photovoltaikanlagen	36
4.3.2 Ladesäulen	37

5	Bestimmung der Eingangsdaten	41
5.1	Untersuchte Gebäudemodelle	41
5.2	Erstellung des Referenzszenarios	43
5.3	Auslegung der Energiesystemkomponenten	44
5.4	Komponentendaten und Marktpreisanalyse	47
6	Simulierte Energieversorgungsszenarien	52
6.1	Szenariogenerierung	52
6.2	Szenarioanalyse	52
6.2.1	Bürogebäude	53
6.2.2	Gewerbegebäude I - geringe Energieverbräuche	58
6.2.3	Gewerbegebäude II - mittlere Energieverbräuche	65
6.2.4	Gewerbegebäude III - hohe Energieverbräuche	72
6.3	Sensitivitätsanalyse	78
6.4	Ergebnisse und Einfluss finanzieller Förderungen	79
7	Diskussion, Implikationen und Handlungsstrategien	82
8	Limitationen	87
9	Fazit und Ausblick	89
	Literatur	91
A	Marktanalyse	99
A.1	alphainnotec Wärmepumpe	100
A.2	Viessmann Wärmepumpe	104
A.3	Viessmann BHKW	107
A.4	Enercity Fernwärmeanschluss	110
A.5	Energieberater Henner Henkel	115
A.6	Becker GbR	119
A.7	Friese & Röver GmbH & Co KG	123

1 Einleitung

1.1 Relevanz der Thematik und Forschungsfragen

Der Klimawandel stellt weltweit die bedeutendste ökologische Herausforderung der kommenden Jahrzehnte dar. Bereits heute hat die globale Erderwärmung 1 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter erreicht. Dem Ziel, Treibhausgasausstoße zu reduzieren, um die Erderwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen, haben sich im Rahmen des Pariser Klimaabkommen von 2015 weltweit 195 Parteien verpflichtet. Zum Erreichen des 2 °C-Ziels sei es laut Weltklimarat notwendig, bis zum Ende dieses Jahrhunderts sämtlichen Ausstoß von Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Das 1,5 °C-Ziel könne hingegen nur noch durch negative Emissionen erreicht werden. Bis 2050 wäre dafür eine Reduktion der Treibhausgasemissionen auf „Netto-Null“ notwendig und danach müssten verursachte Treibhausgasemissionen der Atmosphäre sogar entzogen werden (vgl. Kaltenborn, 2021).

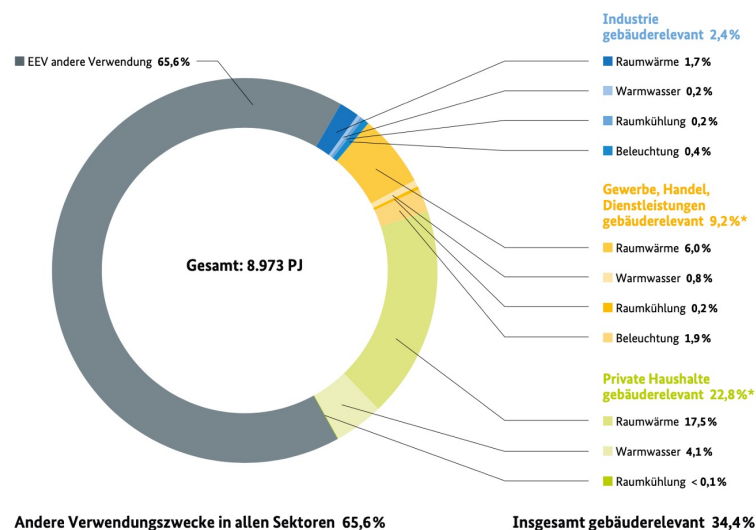


Abbildung 1.1: Anteil des gebäuderelevanten Endenergieverbrauchs am gesamten Endenergieverbrauchs in 2019 (vgl. Umweltbundesamt (UBA) Fachgebiet V 1.4, und BMWi, 2021)

In Deutschland gibt es neben rund 19 Mio. Wohngebäuden knapp zwei Mio. Nichtwohngebäude, die sich nicht nur in der Nutzung, sondern auch bezüglich des Energieverbrauchs und Wärmebedarfs von diesen unterscheiden (S. Becker u. a., 2022, S. 7). Wie in Abbildung 1.1 dargestellt, werden knapp 35% des deutschen Gesamtenergieverbrauchs durch den Betrieb bestehender Gebäude verursacht. Auch der Ausstoß von fast 30% der CO₂-Emissionen ist auf die Gebäudewirtschaft zurückzuführen. Die größten Anteile des Endenergieverbrauchs machen die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser aus (vgl. Umweltbundesamt (UBA) Fachgebiet V 1.4, und BMWi, 2021). Es wird deutlich, dass der emissionsintensive Gebäudesektor einen entscheidenden Einfluss auf das Erreichen der Klimaziele hat. Zur Bewältigung der Klimakrise ist eine Reduktion des Primärenergiebedarf von Gebäuden um 80% notwendig, wobei der verbleibende Energiebedarf durch erneuerbare Energien gedeckt werden soll (dena (Hrsg., 2023). Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sind erforderlich, um den Energieverbrauch und den Emissionsausstoß zu reduzieren. Dabei stehen Immobilienbestandhalter

allerdings vor der Herausforderung, die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit energetischer Sanierungsmaßnahmen zu vereinbaren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz durch energetische Sanierungsmaßnahmen eingegangen. Der Fokus liegt dabei auf dem ökologischen und ökonomischen Potenzial durch Nutzung Erneuerbarer-Energien-Anlagen in bestehenden Büro- und Gewerbegebäuden. Außerdem werden politische Maßnahmen zur Beschleunigung der Sanierungsrate und Steigerung des Einsatzes Erneuerbarer-Energien-Anlagen beschrieben. Dabei werden in simulierten Energieversorgungsszenarien verschiedene Ansätze betrachtet, wie beispielsweise die Nutzung verschiedener Heizungssysteme, die Integration von Energie- und Wärmespeichern und die Implementierung von Ladesäulen. Zusammenfassend verfolgt diese Arbeit die erfolgreiche Beantwortung folgender Forschungsfragen:

1. Wie können Erneuerbare-Energien-Anlagen in der Energieversorgung von Büro- und Gewerbegebäuden eingesetzt werden, um die Energieeffizienz sowie ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit zu verbessern?
2. Wie können staatliche Regulierungen und Anreizsysteme bewirken, dass der Einsatz Erneuerbarer-Energien-Anlagen in Büro- und Gewerbegebäuden gefördert wird?

1.2 Methodik und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit bedient sich einer Kombination verschiedener aufeinander aufbauender Forschungsmethoden. Beginnend mit einer grundlegenden und umfassenden Literaturanalyse werden relevante Studien und wissenschaftliche Arbeiten untersucht, um ein ganzheitliches Bild zur Nachhaltigkeit in der Gebäudewirtschaft zu schaffen. Zunächst werden dazu die Begriffe *Energieeffizienz* und *dreifaltige Nachhaltigkeit* erläutert. Außerdem wird im Bereich der Wertschöpfung auf Beschäftigungseffekte und deren Entwicklung in den letzten Jahren eingegangen.

Im Anschluss daran folgt eine Bestandsanalyse des Gebäudesektors mit Fokus auf bisherige Veränderungen und notwendige zukünftige Entwicklungen des Nichtwohngebäudebestands. Im Rahmen dessen werden die zur Umsetzung des Klimaschutzkonzeptes notwendigen politischen Maßnahmen, Prinzipien und Verpflichtungen dargestellt. Daraufhin werden Handlungsoptionen zur Verbesserung der Energieeffizienz im Rahmen der Wärmeerzeugung dargelegt.

In dem darauffolgenden Kapitel werden die technischen Grundlagen verschiedener Energiesystemkomponenten beschrieben. Dabei liegt der Fokus auf Erneuerbare-Energien-Anlagen und Speichertechnologien, aber auch Grundlagen zum Betrieb von Ladesäulen werden thematisiert.

Im nächsten Schritt werden Methoden zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmaßnahmen grundlegend erläutert und verglichen sowie die in dieser Arbeit vorrangig verwendete Methode der Investitionsrechnung vorgestellt. Des Weiteren werden Möglichkeiten zur Förderung und Finanzierung von energetischen Sanierungsmaßnahmen, sowie die dafür notwendigen Voraussetzungen und Förderhöhen beleuchtet. Abschließend wird auf die energie- und steuerrechtlichen Rahmenbedingungen von Photovoltaikanlagen und Ladesäulen eingegangen. Diese Analyse der verschiedenen Förderprogramme und Finanzierungsinstrumente, Energie- und Steuergesetze dient der Identifikation von Hemmnissen und Beihilfen sowie einer anschließenden Bewertung der staatlichen Regulierungen und Anreizsysteme.

Im nächsten Teil der Arbeit folgt eine Marktanalyse. Diese beinhaltet die Beschreibung von Merkmalen und Funktionen sowie eine preisliche Einordnung moderner Energiesystemkomponenten verschiedener Experten, wie Hersteller technischer Komponenten, Dienstleister für Sanitär- und Heizungstechnik

oder unabhängige Energieberater. Dabei werden auch Rahmenbedingungen, Einflussfaktoren und Differenzen bei der Preisbildung betrachtet. Die Marktanalyse ist Grundlage für die darauffolgenden Simulationen.

Energetische Sanierungen von Büro- und Gewerbegebäuden haben nicht nur positive Auswirkungen auf die ökologische, sondern auch auf die ökonomische Nachhaltigkeit (vgl. Umweltbundesamt (UBA) Fachgebiet V 1.4, und BMWi, 2021). Klimaschutz wird vor allem durch potenzielle Kosteneinsparungen für Unternehmen interessant, was den Bedarf an Untersuchungen der Einsatzmöglichkeiten von Erneuerbaren-Energien-Anlagen in Nichtwohngebäuden hervorhebt. Der Hauptteil dieser Arbeit umfasst Erläuterungen von Nutzungsmöglichkeiten verschiedener Energiesystemkomponenten und Betriebsweisen für eine nachhaltige Energieversorgung. Für verschiedene Gebäudemodelle (Büro- und Gewerbegebäude) unterschiedlicher Bedarfsgrößen werden mit dem Online-Webtool NESSI (Nano Energy System Simulator) Simulationen von Energieversorgungsszenarien durchgeführt. Dabei liegt der Fokus auf einem Bürogebäude mit durchschnittlichen Verbräuchen, aber auch auf Gewerbegebäuden mit geringen, durchschnittlichen und hohen Energieverbräuchen. Bei Betrachtung von Gewerbegebäuden wird zusätzlich zwischen dem Betrieb im Einschichtverfahren und Zweischichtverfahren unterschieden. Die Werte für Stromverbrauch, sowie Raumwärme- und Kältebedarf für die jeweiligen Gebäudemodelle werden durch eine literaturgestützte Recherche angenommen. Mit Hilfe von Basis- und Vergleichsszenarien kann so ein nachhaltiges Energiesystem für Neubauten, aber auch Bestandsgebäude gefunden werden. Dazu werden Energieflüsse, Investitionen, Kosten und Treibhausgasemissionen simuliert. Nach der Funktionsüberprüfung, bei der alle Strom- und Wärmelasten des Gebäudes gedeckt sein müssen, wird eine Optimierung durch die Variation der Leistungsgrößen der verwendeten Energiesystemkomponenten durchgeführt, um eine Maximierung des ökonomischen Nutzens zu erreichen. Die Szenarien werden gespeichert und anschließend mit Hilfe der Funktion *Szenariovergleich* miteinander verglichen. Diese Funktion dient der betriebswirtschaftlichen Bewertung der energetischen Sanierungsmaßnahme, die elementar für die Durchführung der Maßnahme ist. Bei der Bewertung der Energieversorgungsszenarien wird auf die im vorherigen Kapitel beschriebenen Methoden der Investitionsrechnung zurückgegriffen. Durch einen Vergleich der Kapitalwertveränderung der einzelnen Szenarien bezogen auf das gewählte Referenzszenario des jeweiligen Gebäudemodells wird so die ökonomisch wertvollste Alternative der Energieversorgung ermittelt. Außerdem wird auf Zusammenhänge zwischen Strom- und Wärmebedarf der Gebäude, Leistungsgrößen und Betriebsverhalten der Komponenten und Veränderungen des Kapitalwerts der Investition eingegangen. Darauf folgt eine kurze Analyse der Sensitivität des Kapitalwertes gegenüber Veränderungen von Wartungs-, Strombezugs- und Brennstoffkosten, um im Anschluss zusammenfassend die Ergebnisse darzustellen. Nach Erläuterung der Simulationsergebnisse werden Handlungsempfehlungen und Schlussfolgerungen für zukünftige Sanierungsmaßnahmen von Nichtwohngebäuden abgeleitet. Die Limitationen zeigen die Grenzen der Simulationsuntersuchung auf und gehen auf Verbesserungsmöglichkeiten ein. Abschließend wird ein Fazit der Ausarbeitung gezogen und ein Ausblick von möglichen zukünftigen Entwicklungen gegeben.

9 Fazit und Ausblick

Das Erreichen der Klimaziele ist stark abhängig von den Entwicklungen der einzelnen Sektoren, wobei die Energieeffizienz im Gebäudesektor eine zentrale Rolle spielt. Die Reduktion des Energieverbrauchs in Büro- und Gewerbegebäuden durch energetische Sanierungsmaßnahmen ist von großer Bedeutung. Höchste Priorität hat in dem Fall die Optimierung des Gebäudezustandes zur Minimierung des Energieverbrauchs. Danach wird der Einsatz energieeffizienter Technologien und die Nutzung Erneuerbarer-Energien-Anlagen zur Energieversorgung in Betracht gezogen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Einsatzmöglichkeiten Erneuerbarer-Energien-Anlagen in Büro- und Gewerbegebäuden geprüft. Der Fokus lag dabei auf der Verbesserung der Energieeffizienz sowie ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit. Des Weiteren wurde auf staatliche Regulierungen und Anreizsysteme, die den Einsatz Erneuerbarer-Energien-Anlagen fördern, eingegangen.

Besonders Büro- und Gewerbegebäude bieten große Potenziale zur Reduktion von Emissionen und Einsparung von Energiekosten, was die Betriebswirtschaft eines Unternehmens direkt beeinflusst. Verschiedenste Erneuerbare-Energien-Anlagen sind einzeln oder in Kombination einsetzbar. Im Fokus standen dabei Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen, Pellet- und Gasheizkessel, Blockheizkraftwerke und Speichertechnologien. Zusätzlich wurden Möglichkeiten zur Klimatisierung und die Integration von Ladesäulen für Elektrofahrzeuge betrachtet.

Die Literaturrecherche und Marktanalyse haben gezeigt, dass die Preise für Energiesystemkomponenten hoch sind und je nach Hersteller und Anbieter starke Differenzen aufweisen. Dennoch hat die durchgeführte Analyse der simulierten Energieversorgungsszenarien verdeutlicht, dass es viele Möglichkeiten gibt Erneuerbare-Energien-Anlagen einzusetzen und Energie effizient zu nutzen. Auch in Zukunft sind für eine nachhaltige Energieversorgung individuelle, gebäudeangepasste Lösungen notwendig. Ob die Entscheidung für ein Heizsystem auf eine monovalent betriebene Wärmepumpe fällt oder ein Heizkessel zur Spitzenlastabdeckung eingebaut wird, hängt stark von den gebäude-baulichen Gegebenheiten ab. Für eine möglichst autarke Energieversorgung von Büro- und Gewerbegebäuden mit hohen Energiebedarfen sollte der Einsatz einer Photovoltaikanlage unbedingt in Erwägung gezogen werden. Eine vielseitige und ökologisch sowie wirtschaftlich vorteilhafte Lösung zur Wärmeversorgung ist der Einsatz einer bivalent betriebenen Wärmepumpe mit Spitzenlastabdeckung durch einen Pellet-Heizkessel. Aufgrund des hohen ökologischen Potenzials und der geringen betriebswirtschaftlichen Einbußen sollte die Anschaffung von Ladesäulen auf dem Unternehmensgelände in Kombination mit Betrieb einer Photovoltaikanlage stark gefördert werden.

Für die weitere Forschung gibt es viele theoretische und praxisnahe Themengebiete. Im Folgenden soll kurz auf ein paar Beispiele für zukünftige Untersuchungen eingegangen werden. In Bezug auf energetische Sanierungen wurde im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich auf die Erzeugung von Energieversorgungssystemen eingegangen. Untersuchungen des Einflusses von verbesserten Dämmeigenschaften in Büro- und Gewerbegebäuden auf die Energieeffizienz und die daraus entstehenden wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile könnten im Detail untersucht werden.

Des Weiteren können die durchgeführten Simulationen ausgeweitet werden. Interessant wäre das Verhalten der ökologischen und wirtschaftlichen Kennzahlen in Szenarien mit Nutzung anderer Wärmepumpenarten, wie beispielsweise einer Sole/Wasser-Wärmepumpe. Auch können Untersuchungen

zu Auswirkungen von Preisänderungen für einen gesamten Betrachtungszeitraum oder aber Preisänderungen innerhalb eines Betrachtungszeitraums für das gesamtheitliche Verständnis informativ sein. Dabei kann auf spezielle Tarife durch Verträge mit Strom- und Gasanbietern eingegangen werden.

Darüber hinaus ist die Betrachtung von Gewerbe- und Industriegebäuden mit hoher Wärme-Grundlast, wie beispielsweise durch Prozesswärme, von großem Interesse. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hauptsächlich auf hohe Lasten elektrischer Energie und Wärmeenergie eingegangen, ohne eine über das Jahr bestehende hohe Grundlast.

Außerdem können weitere Betrachtungen zur optimierten Verwendung von Energiespeichern durchgeführt werden. Dabei besteht die Möglichkeit auf verschiedenste Energiespeicher und deren Vorteile im Betrieb mit unterschiedlichen Erneuerbare-Energien-Anlagen einzugehen, um herauszufinden, in welchem Zusammenhang der Einsatz am wirtschaftlich und ökologisch sinnvollsten ist.

Für die Zukunft im Allgemeinen ist es wichtig, technologieoffen zu bleiben, um die Entwicklung von heute noch unbekanntem oder ineffizienten Technologien zur Energieversorgung nicht zu behindern. Solche könnten sich zukünftig als vorteilhaft erweisen.