

Bachelorarbeit in der Angewandten Informatik

Registriernummer: AI-2024-BA-030

**Konzeption und Entwicklung einer datenbankseitigen Abbildung von
frei definierbaren Bilanzräumen im Zusammenhang mit dem
Energiemanagementsystem EMS-EDM PROPHET® nach ISO 50001.**

Fabian Heinlein

in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut Angewandte Systemtechnik (IOSB-AST)

Abgabedatum: 28.02.2024

Prof. Dr. Marcel Spehr
Sven Möller

Kurzfassung

Abstract

Vorwort

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract	iii
Vorwort	iv
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Problemstellung	2
1.2.1 Problembeschreibung	2
1.2.2 Praktische Relevanz des Problemraums	3
1.2.3 Wissenschaftliche Relevanz des Problemraums	3
1.3 Ziel der Arbeit	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Forschung und Theoretische Grundlagen	6
2.1 Grundlagen von Bilanzräumen	6
2.1.1 Bilanzierung	6
2.1.2 Definition von Bilanzräumen	10
2.1.3 Bilanzraumstrukturen	11
2.2 Bilanzräume im Energiemanagement nach ISO 50001	11
2.2.1 Abbildung des Organisationskontext	11
2.2.2 Energieleistungskennzahlen	11
2.2.3 Energieeinsätze	11
2.2.4 Reporting	11
2.3 Ansätze zur Datenbankseitigen Abbildung	11
2.3.1 Datenstrukturen zur Abbildung von Bilanzräumen	11
2.3.2 Abbildung der Datenstrukturen in relationalen Datenbanken	11
3 Konzeption und implementation in EMS-EDM Prophet®	12
3.1 Einleitung	12
3.2 Ausgangszustand: EMS-EDM Prophet®	12
3.3 Anforderungen	12
3.3.1 Modellierung von Bilanzräumen	12
3.3.2 Abbildung von Metriken zur Bewertung von Bilanzräumen	12
3.3.3 Technische Anforderungen und Datenkommunikation	12
3.4 Umsetzungskonzept für EMS-EDM Prophet®	12
3.4.1 Systemarchitektur	12
3.4.2 Datenmodell und Datenbankdesign	12
3.4.3 Technische Umsetzung und Datenkommunikation	12

3.4.4	EnPI Abbildung	12
3.4.5	Test- und Validierungskonzept	12
3.4.6	Sicherheitskonzept	12
3.4.7	Bedingungen und Anforderungen an die Laufzeitumgebung	12
3.5	Technische Realisierung	12
3.6	Umsetzungsablauf	13
3.7	Ergebnis	13
3.7.1	Anforderungsumsetzung	13
3.7.2	Vergleich zum bestehenden System	13
4	Evaluation	14
4.1	Einleitung	14
4.1.1	Ziel der Evaluation	14
4.1.2	Methodik	14
4.2	Metriken und Kennzahlen	14
4.2.1	Definition der Erfolgsmessung	14
4.2.2	Quantitative Metriken	14
4.2.3	Qualitative Metriken	14
4.3	Experimenteller Aufbau	14
4.3.1	Beschreibung des Experimentes	14
4.3.2	Testumgebung und -bedingungen	14
4.3.3	Datensätze und Szenarien	14
4.4	Durchführung und Ergebnisse	14
4.4.1	Durchführung	14
4.4.2	Quantitative Ergebnisse	14
4.4.3	Qualitative Ergebnisse	14
4.5	Vergleich mit alternativen Ansätzen	14
4.6	Diskussion der Ergebnisse	14
4.7	Zusammenfassung der Evaluation	14
5	Fazit	15
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	15
5.2	Ausblick auf zukünftige Arbeiten	15
A	Anhang	17

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Angesichts wachsender Umweltbelastungen und der Notwendigkeit nachhaltiger Praktiken spielt das Energiemanagement eine immer bedeutendere Rolle. Diese Arbeit untersucht die Entwicklung einer datenbankseitigen Lösung zur Abbildung frei definierbarer Bilanzräume im Energiemanagementsystem EMS-EDM PROPHET® nach DIN EN ISO 50001:2018-12. Sie wird durch das Potenzial, die energiebezogene Leistung und Energieeffizienz von Organisationen durch die Erfüllung ausgewählter Kriterien der DIN EN ISO 50001:2018-12 zu verbessern, motiviert. Bilanzräume stellen das zentrale Konzept der Arbeit dar und werden im Rahmen dieser als Einheiten betrachtet, die zur digitalen Abbildung von Organisationsstrukturen im Energiemanagement und als administrative Grenze zur Bilanzierungsrechnung dienen. Die Adressierung der Arbeit auf die freie definierbare Gestaltung der Bilanzräume soll eine Möglichkeit bieten, der Diversität von Organisationen gerecht zu werden und einen Einsatz der Forschungsergebnisse in Organisationen mit dem EDM-EMS-Prophet® ermöglichen. Die Untersuchung soll zur Weiterentwicklung nachhaltiger Energiemanagementpraktiken beitragen und Einblicke in die Integration technischer Lösungen in bestehende Systeme bieten.

Ein wesentlicher Fokus dieser Arbeit liegt auf der DIN EN ISO 50001:2018-12, einer Norm der Internationalen Organisation für Normung (ISO), die Anforderungen an Energiemanagementsysteme festlegt. Diese Norm ist universell einsetzbar, unabhängig von Größe, Art oder Standort der Organisation (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 10), und dient der fortlaufenden Verbesserung der energiebezogenen Leistung. (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 7). Um die Anforderungen der DIN EN ISO 50001:2018-12 zu erfüllen, müssen Organisationen den kontinuierlichen Fortschritt ihrer energiebezogenen Leistung nachweisen, wobei die Norm keine spezifischen Zielniveaus vorgibt. (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 10).

Die Umsetzung der DIN EN ISO 50001:2018-12 in Organisationen bringt sowohl operationale als auch organisatorische Herausforderungen mit sich [S. 11](Marimon und Casadesús, 2017). Dennoch lag im Jahr 2023 in 24.924 Organisationen weltweit ein Zertifikat nach DIN EN ISO 50001:2018-12 vor (International Organization for Standardization, 2023). Dies ist bemerkenswert, da die Erfüllung der Normanforderungen voraussichtlich etwa 60 % des globalen Energieverbrauchs beeinflussen kann (International Organization for Standardization, 2011, zitiert nach Marimon und Casadesús, 2017, S. 1). Darüber hinaus entstehen für Organisationen durch die Einführung der Norm signifikante Vorteile.

Zum einen können nach Aussagen der DIN EN ISO 50001:2018-12 (2018, S. 9) öko-

nomische Vorteile wie Energieeinsparungen erzielt werden, wodurch Organisationen einen Wettbewerbsvorteil aufgrund sinkender Energiekosten erlangen können. Zum anderen ergeben sich operationale Vorteile wie eine gesteigerte Produktivität, verbesserte Qualität und ein strukturierter Ansatz zur Prozessoptimierung (Marimon und Casadesús, 2017). Des Weiteren kann die Umsetzung der DIN EN ISO 50001:2018-12 dazu beitragen, die allgemeinen Klimaschutzziele zu erreichen (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d.). Dies unterstreicht die gesellschaftliche Bedeutung der Norm, insbesondere angesichts der Herausforderungen des Klimawandels.

Die Umsetzung der DIN EN ISO 50001:2018-12 basiert auf dem PDCA-Zyklus (Plan, Do, Check, Act), der Organisationen einen strukturierten Rahmen für die fortlaufende Verbesserung der energiebezogenen Leistung bieten soll (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 7f.). Während die Norm in erster Linie Anforderungen auf Managementebene formuliert, verweist sie auch auf technische Normen wie die E DIN ISO 50006:2024-07, die unter anderem spezifische Anforderungen an Energieleistungskennzahlen und energetische Ausgangsbasen definiert (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., 2024).

1.2 Problemstellung

1.2.1 Problembeschreibung

Forschungsfrage: "Welche strukturellen Erweiterungen und Anpassungen müssen auf Datenbankebene in EMS-EDM PROPHET® vorgenommen werden, um das Energiemanagementsystem zur Abbildung von frei definierbaren Bilanzräumen zu ermächtigen, die Organisationen des tertiären Wirtschaftssektors bei der Erfüllung von Anforderungen der ISO 50001 unterstützt?"

Ein wesentlicher Aspekt bei der Umsetzung der DIN EN ISO 50001:2018-12 ist die Berücksichtigung interner Bilanzierungsgrenzen und -strukturen im Kontext der Energiebilanzierung von Organisationen. Die Norm definiert grundlegende Anforderungen an den Nachweis der Verbesserungen der energiebezogenen Leistung durch Energiemanagementsysteme und nimmt daher in diesem Themenfeld eine zentrale Rolle ein.

Das Energiemanagement EMS-EDM PROPHET® steht vor dem Problem, frei definierbare Bilanzräume abzubilden und somit zur Erfüllung von Teilen der Anforderungen der DIN EN ISO 50001:2018-12 beizutragen. Um dieses Problem zu lösen, sind strukturelle Änderungen und Erweiterungen der Datenbank notwendig. Somit besteht das zentrale Problem dieser Arbeit darin, Anpassungen und Erweiterungen am Datenbanksystem von EMS-EDM Prophet® zur Abbildung frei definierbarer Bilanzräume zu konzipieren und zu implementieren um Teile der von der DIN EN ISO 50001:2018-12 gestellten Anforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet werden zu erfüllen.

Die Problemlösung umfasst alle Aspekte, die auf Grundlage der Vorgaben der Norm sowie praktischer Gegebenheiten konzipiert und auf Datenbankebene umgesetzt werden müssen, um EMS-EDM PROPHET® so zu erweitern, dass das System in der Lage ist, Organisationen bei der Erfüllung der ISO 50001 zu unterstützen. Dies gilt insbesondere für Anforderungen, die durch die Abbildung von Bilanzräumen adressiert werden können.

Aufgrund der Anwendbarkeit der DIN EN ISO 50001:2018-12 auf alle Organisationen ist die freie Definierbarkeit der Bilanzräume ein Qualitätskriterium des zu entwerfenden Systems und spielt bei der Beantwortung der Forschungsfrage eine zentrale Rolle. Die breite Anwendbarkeit der Norm impliziert außerdem die Notwendigkeit, praktische Herausforderungen beim Einsatz der Lösung zu berücksichtigen und Anwendungsgebiete des entworfe-

nen Konzepts zu betrachten, um der praktischen Relevanz dieser Arbeit gerecht zu werden.

Die Menge aller Organisationen für die die DIN EN ISO 50001:2018-12 eine Relevanz hat ist aufgrund ihrer Breiten Anwendbarkeit sehr groß und divers. Das wirkt sich auch auf die Anforderungen an die zu entwerfende Problemlösung aus. Um den Umfang der Arbeit zu reduzieren und die Präzision und Tiefe der Arbeit zu erhöhen befasst sich diese Forschungsarbeit mit Organisationen des tertiären Wirtschaftssektors.

1.2.2 Praktische Relevanz des Problemraums

Das beschriebene Problem weist eine praktische Relevanz auf, da es die Herausforderungen der DIN EN ISO 50001:2018-12 im Energiemanagement von Organisationen adressiert. Die bestehenden Anforderungen der DIN EN ISO 50001:2018-12 und der aktuelle Zustand von EMS-EDM Prophet® stellen praxisnahe Qualitätskriterien an die Abbildung von Bilanzräumen. Eine Herausforderung besteht darin, ein Konzept zur Änderung und Erweiterung des bestehenden Datenbankmodell zu entwickeln, das diese Anforderungen erfüllt und gleichzeitig praxisnah und umsetzbar ist. Die Berücksichtigung von aus der Praxis abgeleiteten Anforderungen ist dabei unerlässlich. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer Methodik, die sowohl theoretische als auch praktische Aspekte integriert. Die Integration der Lösung in EMS-EDM Prophet® stellt sicher, dass sie in bestehenden Organisationen nutzbar ist und deren Energiemanagement unterstützt.

1.2.3 Wissenschaftliche Relevanz des Problemraums

Die Problemstellung weist eine wissenschaftliche Relevanz auf, da im Zuge der Erarbeitung einer Lösung Methoden des Datenmanagements im Kontext der Modellierung von Energiebilanzräumen angewandt werden. Dabei werden die in EMS-EDM Prophet® bestehenden Methoden um neue Ansätze zur Modellierung von Bilanzräumen erweitert. Diese Erweiterungen tragen zur wissenschaftlichen Diskussion über Datenmanagementstrategien im Energiemanagement bei und bieten neue Perspektiven für die Integration von Bilanzräumen in datenbankbasierte Systeme. Darüber hinaus fördert die Arbeit den interdisziplinären Austausch zwischen den Bereichen Energiemanagement und Datenbankmodellierung, indem sie theoretische Konzepte mit praktischen Anwendungen verknüpft. Die entwickelten methodischen Ansätze und Modelle können als Grundlage für zukünftige wissenschaftliche Untersuchungen dienen und die Weiterentwicklung von Energiemanagementsystemen unterstützen.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption, Implementation und Evaluation eines Prototyps, der durch strukturelle Anpassungen und Erweiterungen des EMS-EDM Prophet® die Abbildung frei definierbarer Bilanzräume ermöglicht. Der Prototyp soll einen Mehrwert zur Erfüllung der Anforderungen der DIN EN ISO 50001:2018-12 bieten und in Organisationen des tertiären Wirtschaftssektors, die EMS-EDM Prophet® nutzen, anwendbar sein. Die Erarbeitung des Prototyps soll auf den theoretischen Grundlagen des Daten- und Energiemanagements basieren und bewährte Ansätze aus den Bereichen verwenden. Außerdem soll der Prototyp praktische Herausforderungen in den potentiellen Anwendungsgebieten berücksichtigen und allgemeine Anforderungen an Organisationen zu dessen Umsetzung formulieren.

Zur Evaluation des Prototyps soll die Bilanzraumstruktur der Organisation: Fraunhofer IOSB-AST in Ilmenau im entworfenen Prototyp abgebildet werden. Der angewendete Prototyp soll im Bezug auf die Unterstützung bei der Erfüllung der DIN EN ISO 50001:2018-12 Anforderungen auf qualitative und quantitative Qualitätskriterien evaluiert werden. Außerdem soll die freie Definierbarkeit und die praktische Anwendbarkeit des Prototyps evaluiert werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist so konzipiert, dass Sie die Grundlagen des Problemraums: Bilanzräume erfasst und Nutzen sowie Herausforderungen im Anwendungsgebiet: EMS nach DIN EN ISO 50001:2018-12 erarbeitet. Auf Grundlage der theoretischen Grundlagen im Anwendungsbereich wird mit bewährten Methoden des Datenmanagements eine Lösung der Forschungsfrage auf Datenbankebene des Energiemanagementsystems EMS-EDM Prophet® konzipiert, implementiert und evaluiert.

Der Aufbau der Arbeit umfasst drei Hauptabschnitte: theoretische Grundlagen, Konzeption und Implementierung eines Lösungsansatzes sowie dessen Evaluation.

1. Theoretische Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Die praxisnahe Problemstellung erfordert eine anwendungsorientierte Forschung. Aufgrund des spezifischen Anwendungskontexts EMS-EDM Prophet® existieren nur wenige vergleichbare Ansätze. Daher werden im theoretischen Teil der Arbeit drei Themenbereiche betrachtet: Grundlagen von Bilanzräumen und Bilanzierung, Energiemanagement nach DIN EN ISO 50001:2018-12 mit den einhergehenden praktischen Herausforderungen bei der Umsetzung und geeigneten Ansätzen des Datenmanagements zur Abbildung von Bilanzräumen in relationalen Datenbanken.

Für die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen des Energiemanagements werden in diesem Kapitel der Arbeit die DIN EN ISO 50001:2018-12, damit verbundene Normen und Basiswissen aus für den Problemraum relevanter Fachliteratur analysiert. Auf dieser Basis werden theoretische Konzepte und Anforderungen aus dem Problemraum abgeleitet, die für die Lösung der Forschungsfrage relevant sind.

Ein zentraler Aspekt der theoretischen Forschung dieser Arbeit ist die Interdisziplinarität. Die Verbindung von Energiemanagement und Datenmanagement ist entscheidend, um eine umfassende und praxisnahe Lösung zu entwickeln. Durch die Integration von Erkenntnissen und Methoden aus beiden Bereichen wird sichergestellt, dass die theoretischen Grundlagen sowohl die für Bilanzräume relevanten Anforderungen der DIN EN ISO 50001:2018-12 als auch die technischen Herausforderungen der Datenbankmodellierung abdecken. Diese interdisziplinäre Herangehensweise ermöglicht es, eine fundierte theoretische Basis zu schaffen, die sowohl den praktischen als auch den wissenschaftlichen Anforderungen gerecht wird.

Aufgrund der kleinen Menge an vergleichbaren Ansätzen fließen alternative Lösungsansätze im Rahmen der Erarbeitung der theoretischen Grundlagen nur teilweise ein. Der Stand der Wissenschaft wird ausschließlich im Themenbereich Ansätze des Datenmanagements zur Abbildung von Bilanzräumen in relationalen Datenbanken behandelt.

2. Konzeption und Implementation des Prototyps

Basierend auf den Forschungsergebnissen des theoretischen Teils der Arbeit wird im zweiten Kapitel der Arbeit eine Lösung für den Problemraum konzipiert und implementiert. Dabei wird das Konzept begründet und, wenn fertiggestellt, in EMS-EDM Prophet® implementiert. Als Grundlage der strukturellen Anpassungen dient der Ausgangszustand der Datenbankstruktur von EMS-EDM Prophet®. Dieser wird im Rahmen dieses Kapitels beschrieben und schematisch dargestellt.

Das Konzept basiert auf den theoretischen Grundlagen zu Bilanzräumen, Bilanzierung und Energiemanagement nach DIN EN ISO 50001:2018-12.

Zur Konzipierung der strukturellen Anpassungen und Erweiterungen des Datenbankmodells werden herausgearbeitete bewährte Ansätze zur Datenbankmodellierung von Bilanzräumen verwendet.

Außerdem werden Anforderungen an den Organisationskontext zur praktischen Umsetzung des Prototyps auf Grundlage des entworfenen Konzepts und der im Theorie- teil herausgearbeiteten praktischen Herausforderungen formuliert.

3. Evaluation des Prototyps

Im letzten Hauptkapitel der Arbeit wird der entworfene Prototyp evaluiert. Dazu wird die Bilanzraumstruktur des Fraunhofer IOSB-AST in Ilmenau erarbeitet und im entworfenen Prototyp abgebildet.

Auf Grundlage des angewandten Prototyps sollen nun mehrere Aspekte evaluiert werden. Die Evaluation prüft, wie gut der Prototyp die Organisation bei der Erfüllung der DIN EN ISO 50001:2018-12 unterstützt und inwiefern frei definierbare Bilanzräume umsetzbar sind.

Die Evaluation basiert auf Qualitätskriterien, die im Methodik-Abschnitt aus den theoretischen Grundlagen abgeleitet wurden.

Kapitel 2

Stand der Forschung und Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen von Bilanzräumen

2.1.1 Bilanzierung

Kontext der Bilanzierung

Bilanzierung ist ein Konzept welches in unterschiedlichen Einsatzbereichen verwendung findet. Diese Forschung befasst sich mit Bilanzräumen im Kontext der DIN EN ISO 50001:2018-12. Die Norm setzt den Schwerpunkt auf die fortlaufende Verbesserung der energiebezogenen Leistung (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., Kapitel 0.2). Aufgrund dessen sollte die Bilanzierung in diesem Forschungskontext aus einer Perspektive betrachtet werden welche energiebezogene Größen betrachtet.

Auch die Festlegung auf Organisationen des tertiären Wirtschaftssektors hat auswirkungen auf die betrachtungsweise der Bilanzierung. Denn in Organisation mit immateriellen Dienstleistungen spielt die Gebäudeenergie eine vorrangige Rolle zur Verbesserung der energiebezogenen Leistung (Alberto Fichera et al., 2020, S. 3). Dies lässt sich Beispielhaft an der Abbildung (2.1) darstellen.

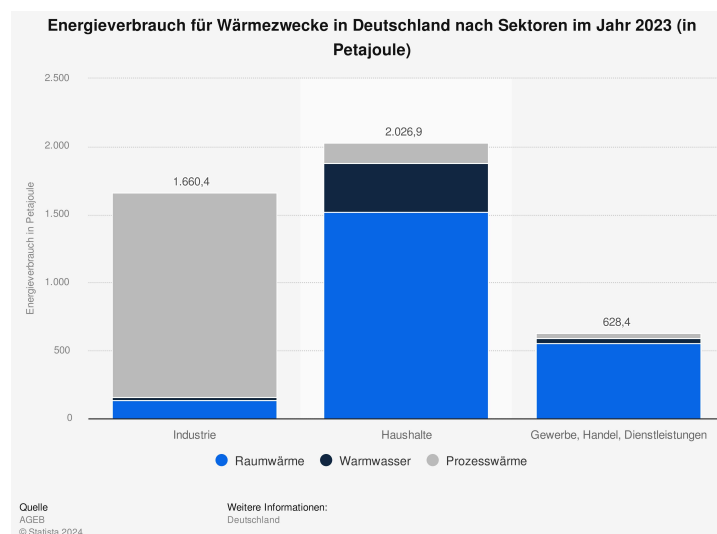


Abbildung 2.1: Energieverbrauch für den Wärmeezweck in Deutschland [AGEB, 2024]

Die Abbildung 2.1 zeigt den Energieverbrauch für Wärmezwecke in Deutschland im Jahr 2023, aufgeschlüsselt nach Sektoren. Während der industrielle Sektor einen hohen Anteil an prozessbezogener Wärme aufweist, spielt im Dienstleistungssektor die Raumwärme eine dominante Rolle. Diese Statistik bekräftigt die Aussage von Fichera (2020, S. 3) dass bei der Verbesserung der energiebezogenen Leistung in Organisationen des tertiären Wirtschaftssektors energiebezogene Prozesse und Technologien im Gegensatz zur Gebäudeenergie eine untergeordnete Bedeutung haben.

Im Rahmen der Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs eines Gebäudes über den Lebenszyklus wird vor allem der Gebäudebetrieb betrachtet (Musall, 2015, S. 133). Die sogenannte Graue Energie wird üblicherweise als kumulierter, nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand beschrieben, der alle vor- und nachgelagerten Prozesse der verwendeten Baustoffe und Materialien sowie der technischen Anlagen umfasst (Musall, 2015, S. 133). Da sich die Norm auf die fortlaufende Verbesserung der energiebezogenen Leistung abzielt und die Graue Energie konstant ist wird diese im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Stattdessen liegt der Fokus dieser Forschungsarbeit auf der Bilanzierung energetischer Größen im Rahmen von Organisation des tertiären Wirtschaftssektors. Sie grenzt sich somit von der Bilanzierung von Rohstoffen und Materialien ab.

Definition Bilanzierung

Im Rahmen des beschriebenen Kontexts rückt die verfahrenstechnische Perspektive der Bilanzierung in den Fokus. So wird die Bilanzierung im Kontext der Verfahrenstechnik nach Rönsch (2015, S. 66) in drei Bilanzgleichungen unterteilt: die Massenbilanz, die Energiebilanz und die Impulsbilanz. Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage hat insbesondere die Energiebilanz eine hohe Relevanz.

Die Energiebilanz beruht auf dem Energieerhaltungssatz (Rönsch, 2015, S. 66), der das Prinzip der Erhaltung der Energie ausdrückt (Baehr und Kabelac, 1966, S. 57). Der Energieerhaltungssatz bezieht sich auf alle Erscheinungsformen, in denen Energie auftritt, und besagt, dass es unmöglich ist, Energie zu erzeugen oder zu vernichten (Baehr und Kabelac, 1966, S. 57). Für zu bilanzierende Systeme bedeutet dies, dass die Energie in einem abgeschlossenen, adiabaten System über die Zeit konstant ist (Rönsch, 2015, S. 66). Adiatat bedeutet in diesem Kontext, dass das System keine Wärme mit seiner Umgebung austauscht (Rönsch, 2015, S. 66).

Für Systeme, die in der Lage sind, Energie zu speichern, impliziert dies nach Rönsch (2015, S. 66f.), dass die darin gespeicherte Energie gleich der Differenz aus ein- und austretenden Energieströmen ist. Für offene, nicht-adiabate Systeme ohne Speicherfähigkeit gilt, dass die Differenz der ein- und austretenden Energieströme Null ist (Rönsch, 2015, S. 66f.). Das von Rönsch (2015, S. 66f.) beschriebene Verhalten eines Systems bezüglich der Energiespeicherung, lässt sich mathematisch vereinfacht mit der Gleichung (2.1) darstellen:

$$E_{\text{gespeichert}} = \sum E_{\text{eingang}} - \sum E_{\text{ausgang}} \quad (2.1)$$

$E_{\text{gespeichert}}$: Im System gespeicherte Energie.

E_{eingang} : Energie eines eintretenden Energiestroms.

E_{ausgang} : Energie eines austretenden Energiestroms.

Für offene, nicht-adiabate Systeme ohne Energiespeicher gilt:

$$E_{\text{gespeichert}} = 0$$

In diesem Fall ist die zugeführte Energie gleich der abgegebenen Energie:

$$\sum E_{\text{eingang}} = \sum E_{\text{ausgang}}$$

Diese Gleichung beschreibt einen allgemeinen Ansatz zur Energiebilanzierung der im System gespeicherten Energie. Im Rahmen der Bilanzierung komplexer Systeme kann jedoch eine detailliertere Bilanzierung einzelner Zustandsgrößen im System erforderlich sein.

Dieses Problem wird von der von Ahrendts (2014, Kapitel 1.5) aufgestellten Bilanzgleichung im Kontext der Thermodynamik adressiert. Die Gleichung basiert auf dem Fakt, dass sich für jede mengenartige Zustandsgröße, die über die Grenze eines Systems transportiert wird, eine Bilanz aufstellen lässt (Ahrendts und Kabelac, 2014, Kapitel 1.5). Diese Bilanz umfasst ein- und austretende Ströme sowie im System enthaltene Energiequellen und -senken und ermittelt die Geschwindigkeit der Änderung des Bestands der zu bilanzierenden Zustandsgröße im System (Ahrendts und Kabelac, 2014, Kapitel 1.5).

Die von Ahrendts (2014, Kapitel 1.5) aufgestellte Bilanzgleichung wird in den Formeln (2.2) und (2.3) dargestellt.

$$dX_j/d\tau = (\sum \dot{X}_{j,e} - \sum \dot{X}_{j,a}) + (\dot{X}_{j,\text{Quell}} - \dot{X}_{j,\text{Senk}}) \quad (2.2)$$

X_j : Zustandsgröße.

τ : Zeitkonstante.

$X_{j,e}$: Über die Systemgrenze zufließende Zustandsgröße.

$X_{j,a}$: Über die Systemgrenze abfließende Zustandsgröße.

$X_{j,\text{Quell}}$: Quellen der Zustandsgröße im System.

$X_{j,\text{Senk}}$: Senken der Zustandsgröße im System.

Im Rahmen der Formel (2.2) wird der Strom einer Zustandsgröße X_j in Gleichung (2.3) definiert.

$$\dot{X}_j = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \Delta X_j / \Delta\tau \quad (2.3)$$

X_j : Zustandsgröße.

ΔX_j : Menge der Größe X_j im Zeitintervall $\Delta\tau$.

$\Delta\tau$: Zeitintervall.

Die Gleichung (2.2) in Verbindung mit (2.3) beschreibt die Geschwindigkeit der Änderung des Bestands der Größe X_j als Summe der Differenzen zwischen den über die Systemgrenze zu- und abfließenden Strömen der Zustandsgröße X_j sowie den Quell- und Senkströmen der Zustandsgröße X_j innerhalb des Systems. Somit formulieren die Gleichungen (2.1) und (2.2) in Verbindung mit (2.3) eine grundlegende und zugleich vereinfachte mathematische Beschreibung einer Bilanzierung im Kontext der Thermodynamik und Verfahrenstechnik. Sie bilden die Basis für die Beschreibung der grundlegenden Struktur einer Bilanz. Im Folgenden werden die in (2.1) und (2.2) mit (2.3) beschriebenen Bestandteile einer Bilanz im Anwendungskontext des Problemraums analysiert und in den praktischen Kontext dieser Arbeit gebracht.

Zustandsgrößen

Eine Bilanz bezieht sich gemäß Ahrendts (2014, Kapitel 1.5) auf das von der Systemgrenze eingeschlossene Kontrollgebiet. Die Systemgrenze kann dabei unter Berücksichtigung der Zweckmäßigkeit frei definiert werden (Ahrendts und Kabelac, 2014, Kapitel 1.5). Im Rahmen der in (2.1), (2.2) und (2.3) beschriebenen Bilanzierung spielt die Zustandsgröße eine zentrale Rolle. Folglich muss die Definition der Zustandsgröße ebenfalls unter dem Gesichtspunkt der Zweckmäßigkeit erfolgen.

Die DIN EN ISO 50001:2018-12 gibt mit dem Ziel der fortlaufenden Verbesserung der energiebezogenen Leistung eine Vorgabe zur zweckmäßigen Definition der Zustandsgröße (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 11). Da sich der Anwendungskontext der Bilanzierung auf energetische Größen im Bereich der Gebäudeenergie bezieht, ist eine zweckmäßige Auswahl der Zustandsgrößen zur Bewertung relevanter energetischer Parameter erforderlich. Die Vornorm DIN V 18599-1:2018-09, herausgegeben vom Deutschen Institut für Normung e. V. (2018, S. 1), behandelt die energetische Bewertung von Gebäuden und stellt ein Verfahren zur Durchführung der Gesamtenergiebilanz bereit (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, S. 9). Ihre Ausrichtung auf die energetische Bewertung erfüllt die Zweckmäßigkeit der DIN EN ISO 50001:2018-12. Der Fokus auf die Bewertung von Gebäuden entspricht der Zielsetzung der DIN V 18599-1:2018-09. Die Vorgaben der DIN V 18599-1:2018-09 bieten daher einen wertvollen Beitrag zur zielgerichteten Erarbeitung von zweckmäßigen Zustandsgrößen und werden im Folgenden näher untersucht.

Im Rahmen der energetischen Bewertung von Gebäuden betrachtet die DIN V 18599-1:2018-09 die Bilanzierung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). Dabei sind die Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung des Gebäudes Untersuchungsgegenstände der Bilanzierung des Energiebedarfs (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). Der Nutzenergiebedarf wird von der Vornorm als Überbegriff für Nutzwärmebedarf, Nutzkältebedarf, Nutzenergiebedarf für Trinkwarmwasser, Beleuchtung und Befeuchtung definiert (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 3.1.3). So versteht sich die Nutzenergie für die Beleuchtung als die Energiemenge, die zur Ausreichenden Beleuchtung der Gebäudezone aufgewendet werden muss (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 5.3.1). Der Nutzwärmebedarf hingegen ist die Wärmemenge, die der Gebäudezone zusätzlich (bedarfs-)gerecht zugeführt werden muss, um die vorgegebene Sollinnentemperatur einzuhalten (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 5.3.1). Im Rahmen der Luftaufbereitung versteht sich die Nutzenergie als Energiemenge, die zum Erwärmen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten der Luft in einer raumluftechnischen Anlage zu- beziehungsweise abgeführt werden muss, um den erforderlichen Zuluftzustand zu erreichen (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 5.3.1). Die Nutzenergie für die Trinkwarmwasserbereitung bedeutet die Energiemenge für die Erwärmung des Trinkwassers von der Kaltwassertemperatur auf die Warmwassertemperatur an der Entnahmestelle (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 5.3.1).

Der Endenergiebedarf wird von der Vornorm definiert als die berechnete Energiemenge, die der Anlagentechnik (Heizungsanlage, raumluftechnische Anlage, Warmwasserbereitungsanlage, Beleuchtungsanlage) zur Verfügung gestellt wird, um die festgelegte Rauminnentemperatur, die Erwärmung des Warmwassers und die gewünschte Beleuchtungsqualität über den Bilanzzeitraum sicherzustellen (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 3.1.2). Die Endenergiemenge stellt somit die Energiemenge dar, die der Verbraucher für eine bestimmungsgemäße Nutzung unter normativen Randbedingungen im Bilanzzeit-

raum benötigt (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 3.1.2). Der Endenergiebedarf wird nach verwendeten Energieträgern angegeben (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 3.1.2). Die Zustandsgrößen des Primärenergiebedarfs werden zur Reduktion der Komplexität im Rahmen dieser Forschung nicht weiter betrachtet.

Energieströme und Energiemengen

Die Veränderung einer Zustandsgröße innerhalb eines Systems ist nach der von Ahrendts (2014, Kapitel 1.5) aufgestellten Gleichung zum einen von den ein- und austretenden Zustandsströmen der Zustandsgröße abhängig. Dazu beitragend wird in der Gleichung (2.3) der Strom eines Zustands als Menge der Zustandsgröße in einem infinitesimal kleinen Zeitintervall definiert, welches im Grenzwert gegen 0 geht. Die Definition von Ahrendts (2014, Kapitel 1.5) gibt also Auskunft über die Veränderung der Zustandsgröße zu einem spezifischen Zeitpunkt.

Der in der DIN EN ISO 50001:2018-12 geforderte Nachweis der fortlaufenden Verbesserung der Energiebezogenen Leistung zeigt jedoch eine weitere notwendige Perspektive auf den Sachverhalt der Bilanzierung von Zustandsgrößen. Und zwar meint "Fortlaufend" laut DIN EN ISO 50001:2018-12 das Auftreten über einen Zeitraum (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 38). Das impliziert die Notwendigkeit die Bilanzierung einer Zustandsgröße auch in einem frei definierbaren Zeitintervall zu betrachten.

Gleichung (2.2) unterscheidet zwischen Quellen, Senken und zu- beziehungsweise abfließenden Strömen der Zustandsgröße. Quell- und Senkenströme treten in einer Energiebilanz nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik nicht auf da Energie als Erhaltungsgröße ist (Ahrendts und Kabelac, 2014, S. 14). Im Rahmen der DIN EN ISO 50001:2018-12 bezieht sich der Begriff Energie auf verschiedene Arten von Energie die erworben, gespeichert, aufbereitet, in einer Einrichtung oder einem Prozess verwendet oder zurückgewonnen werden können (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., Kapitel 3.5.1). Energie kann im Rahmen der Norm als Elektrizität, Brennstoff, Dampf, Wärme, Druckluft oder vergleichbares Medium auftreten (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., Kapitel 3.5.1). Folglich werden alle Energieströme, in denen Energie in eine Energieform umgewandelt wird, die nicht die genannten Kriterien erfüllen als Energiesenken betrachtet. Analog dazu werden alle Energieströme, bei denen Energie, die nicht den von der Norm aufgestellten Kriterien entspricht, in eine nach ISO 50001 definierte Energieform umgewandelt wird, als Energiequellen betrachtet.

Bilanzräume als System

Das System stellt den Kontext der Bilanz dar, indem es die Grenzen definiert und sich gemäß (2.1) auf das Verhalten der Zustandsgröße auswirkt. Nach (2.2) können in einem System mehrere Zustandsgrößen bilanziert werden.

2.1.2 Definition von Bilanzräumen

Bei der Wahl einer Zustandsgröße haben neben der Zweckmäßigkeit auch die Messinfrastruktur in Organisationen eine Relevanz. Denn die Gleichung (2.2) beschreibt das Verhalten der Zustandsgröße in Abhängigkeit von den zu- und abfließenden Zustandsgrößen und den Quellen und Senken der Zustandsgröße. Wenn die Ströme, Quellen und Senken der Zustandsgröße nicht vollständig erfasst werden ist somit auch keine korrekte Bilanzierung möglich. Die DIN EN ISO 50001:2018-12 (2018, Kapitel 6.6, A.6.6) stellt Anforderungen

und Qualitätskriterien an die Datensammlung in Organisationen. Diese verpflichtet Organisationen dazu Hauptmerkmale ihrer Tätigkeiten, die sich auf die energiebezogene Leistung auswirken zu identifizieren, und diese in geplanten Zeitabständen zu messen, überwachen und analysieren (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 23). Teil der zu erfassenden Hauptmerkmale sind relevante Variablen bezüglich wesentlicher Energieeinsätze, den Energieverbrauch bezüglich wesentlicher Einsätze und der Organisation und betriebliche Kriterien bezüglich wesentlicher Energieeinsätze (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 23). Die Komplexität der Umsetzung ist dabei nicht vorgeschrieben und kann von einfachen Zählwerten bis hin zu umfangreichen Werten aus Überwachungs- und Messsystemen mit Softwareanwendung reichen (Deutsches Institut für Normung e. V., n. d., S. 36).

2.1.3 Bilanzraumstrukturen

2.2 Bilanzräume im Energiemanagement nach ISO 50001

2.2.1 Abbildung des Organisationskontext

2.2.2 Energieleistungskennzahlen

2.2.3 Energieeinsätze

2.2.4 Reporting

2.3 Ansätze zur Datenbankseitigen Abbildung

2.3.1 Datenstrukturen zur Abbildung von Bilanzräumen

2.3.2 Abbildung der Datenstrukturen in relationalen Datenbanken

Kapitel 3

Konzeption und implementation in EMS-EDM Prophet®

3.1 Einleitung

3.2 Ausgangszustand: EMS-EDM Prophet®

3.3 Anforderungen

3.3.1 Modellierung von Bilanzräumen

3.3.2 Abbildung von Metriken zur Bewertung von Bilanzräumen

3.3.3 Technische Anforderungen und Datenkommunikation

3.4 Umsetzungskonzept für EMS-EDM Prophet®

3.4.1 Systemarchitektur

3.4.2 Datenmodell und Datenbankdesign

3.4.3 Technische Umsetzung und Datenkommunikation

3.4.4 EnPI Abbildung

3.4.5 Test- und Validierungskonzept

3.4.6 Sicherheitskonzept

3.4.7 Bedingungen und Anforderungen an die Laufzeitumgebung

3.5 Technische Realisierung

In diesem Kapitel sollen alle technischen Aspekte der Umsetzung beschrieben werden.

3.6 Umsetzungsablauf

In diesem Kapitel soll der Ablauf der Umsetzung beschrieben und begründet werden.

3.7 Ergebnis

In diesem Kapitel soll das Ergebnis der Umsetzung beschrieben werden.

3.7.1 Anforderungsumsetzung

In diesem Kapitel soll beschrieben werden wie die Anforderungen umgesetzt wurden und welche Anforderungen umgesetzt wurden.

3.7.2 Vergleich zum bestehenden System

In diesem Kapitel soll der Vergleich zum bestehenden System gezogen werden und erläutert werden was sich verändert hat.

Kapitel 4

Evaluation

4.1 Einleitung

4.1.1 Ziel der Evaluation

4.1.2 Methodik

4.2 Metriken und Kennzahlen

4.2.1 Definition der Erfolgsmessung

4.2.2 Quantitative Metriken

4.2.3 Qualitative Metriken

4.3 Experimenteller Aufbau

4.3.1 Beschreibung des Experimentes

4.3.2 Testumgebung und -bedingungen

4.3.3 Datensätze und Szenarien

4.4 Durchführung und Ergebnisse

4.4.1 Durchführung

4.4.2 Quantitative Ergebnisse

4.4.3 Qualitative Ergebnisse

4.5 Vergleich mit alternativen Ansätzen

4.6 Diskussion der Ergebnisse

4.7 Zusammenfassung der Evaluation

Kapitel 5

Fazit

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

5.2 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Literaturverzeichnis

- AGEB. (2024). Energieverbrauch für Wärmezwecke in Deutschland nach Sektoren im Jahr 2023 (in Petajoule) [Graph] (AGEB, Hrsg.). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/614202/umfrage/waermeverbrauch-in-deutschland-nach-sektoren/>
- Ahrendts, J., & Kabelac, S. (2014). *Das Ingenieurwissen: Technische Thermodynamik*. Springer.
- Alberto Fichera, Rosaria Volpe & Emanuele Cutore. (2020). Energy performance measurement, monitoring and control for buildings of public organizations: Standardized practises compliant with the ISO 50001 and ISO 50006. *Developments in the Built Environment*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100024>
- Baehr, H. D., & Kabelac, S. (1966). *Thermodynamik* (Bd. 12). Springer.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (n. d.). DIN EN ISO 50001:2018-12, Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2018); Deutsche Fassung EN ISO 50001:2018.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2018). DIN V 18599-1:2018-09, Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2024). E DIN ISO 50006:2024-07 Energiemanagementsysteme - Bewertung der Energieleistung anhand von Energieleistungskennzahlen und energetischen Ausgangsbasen (ISO 50006:2023); Text Deutsch und Englisch. <https://doi.org/10.31030/3543690>
- International Organization for Standardization. (2011). *Win the Energy Challenge with ISO 50001*. ISO Central Secretariat.
- International Organization for Standardization. (2023). ISO Survey 2023. <https://www.iso.org/the-iso-survey.html>
- Marimon, F., & Casadesús, M. (2017). Reasons to Adopt ISO 50001 Energy Management System. *Sustainability*, 9(10), 1740. <https://doi.org/10.3390/su9101740>
- Musall, E. (2015). *Klimaneutrale Gebäude: internationale Konzepte, Umsetzungsstrategien und Bewertungsverfahren für Null-und Plusenergiegebäude*. Universität Wuppertal. urn:nbn:de:hbz:468-20160205-115728-8
- Rönsch, S. (2015). *Anlagenbilanzierung in der Energietechnik: Grundlagen, Gleichungen und Modelle für die Ingenieurpraxis*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-07824-9>

Anhang A

Anhang

Selbstständigkeitserklärung