

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 Konzept: Bilanzraum	9
2.1.3 Bilanzraumstrukturen	13
2.2 Bilanzräume im Energiemanagement nach ISO 50001	13
2.2.1 Abbildung des Organisationskontext	13
2.2.2 Energieeinsätze	13
2.2.3 Energieleistungskennzahlen	13
3 Konzeption und implementation in EMS-EDM Prophet®	14
3.1 Einleitung	14
3.2 Ausgangszustand: EMS-EDM Prophet®	14
3.3 Anforderungen	14
3.3.1 Modellierung von Bilanzräumen	14
3.3.2 Abbildung von Metriken zur Bewertung von Bilanzräumen	14
3.3.3 Technische Anforderungen und Datenkommunikation	14
3.4 Umsetzungskonzept für EMS-EDM Prophet®	14
3.4.1 Systemarchitektur	14
3.4.2 Datenmodell und Datenbankdesign	14
3.4.3 Technische Umsetzung und Datenkommunikation	14
3.4.4 EnPI Abbildung	14
3.4.5 Test- und Validierungskonzept	14
3.4.6 Sicherheitskonzept	14
3.4.7 Bedingungen und Anforderungen an die Laufzeitumgebung	14

3.5	Technische Realisierung	14
3.6	Umsetzungsablauf	15
3.7	Ergebnis	15
3.7.1	Anforderungsumsetzung	15
3.7.2	Vergleich zum bestehenden System	15
4	Evaluation	16
4.1	Einleitung	16
4.1.1	Ziel der Evaluation	16
4.1.2	Methodik	16
4.2	Metriken und Kennzahlen	16
4.2.1	Definition der Erfolgsmessung	16
4.2.2	Quantitative Metriken	16
4.2.3	Qualitative Metriken	16
4.3	Experimenteller Aufbau	16
4.3.1	Beschreibung des Experimentes	16
4.3.2	Testumgebung und -bedingungen	16
4.3.3	Datensätze und Szenarien	16
4.4	Durchführung und Ergebnisse	16
4.4.1	Durchführung	16
4.4.2	Quantitative Ergebnisse	16
4.4.3	Qualitative Ergebnisse	16
4.5	Vergleich mit alternativen Ansätzen	16
4.6	Diskussion der Ergebnisse	16
4.7	Zusammenfassung der Evaluation	16
5	Fazit	17
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	17
5.2	Ausblick auf zukünftige Arbeiten	17
A	Anhang	20

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.

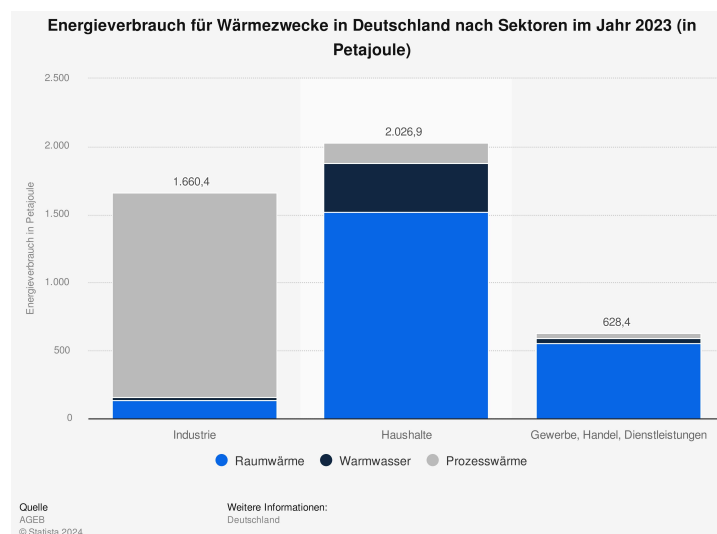


Abbildung 2.1: Energieverbrauch für den Wärmezweck in Deutschland [AGEF, 2024]

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 die DIN EN ISO 50001:2018-12 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 : Zeitintervall.

$X_{j,e}$: 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 zur Konzeption eines Bilanzraums im Anwendungskontext des Problemraums analysiert.

2.1.2 Konzept: Bilanzraum

Bilanzraumgrenzen zur Abbildung des bilanzierten Systems

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). Das definierte System kann auch als Bilanzraum bezeichnet werden, da die Berechnung der in einen Bilanzraum ein- und austretenden Ströme als Bilanzierung bezeichnet wird (Rönsch, 2015, S. 65). Einen Ansatz zur Definition von Bilanzräumen liefert Miller (2016, S. 105) mit der Konkretisierung von Bewertungsräumen mittels Kriterien der Bilanzgrenze, dem Aggregationsniveau und der Bewertungseinheit. Das definierte System dient der Bewertung der Nutzung der Ressourcen wobei der Effizienzbegriff eine zentrale Rolle spielt (Miller et al., 2016, S. 107). Miller (2016, S. 107) definiert die Effizienz nach Gleichung (2.4).

$$\text{Effizienz} := \frac{\text{Erreichter Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (2.4)$$

Der Aufwand umfasst nach Miller (2016, S. 108f.) unterschiedliche Ressourcen, wobei im Kontext energiewirtschaftlicher Fragestellungen der Fokus auf der Ressource Energie liegt. Der Nutzen ist vom Untersuchungsgegenstand, also der zu bilanzierenden Zustandsgröße, abhängig und wird im Kontext der energiewirtschaftlichen Fragestellung häufig über Energiedienstleistungen operationalisiert (Miller et al., 2016, S. 107). Betrachtet man dass der Nutzen grundsätzlich durch Befriedigung von Bedürfnissen beschrieben wird entsteht im Kontext der Energiewirtschaft ein Nutzenergiebedarf zur Befriedigung der Bedürfnisse im Rahmen einer Energiedienstleistung (Miller et al., 2016, S. 107). Sowohl die Ressourcen des Aufwands als auch die Energiedienstleistung auf Nutzenseite werden durch eine Bewertungseinheit formalisiert (Miller et al., 2016). Der Nutzen wird meist implizit durch den gewählten Untersuchungsgegenstand, also der bilanzierten Zustandsgröße, definiert (Miller et al., 2016, S. 110). Die in (2.4) aufgestellte Nutzen-Aufwand Relation stellt die Grundlage der Definition der Bilanzraumgrenze dar. Die Bilanzraumgrenze lässt sich somit in die Aufwandsseitige Bilanzgrenze, die alle zu bilanzierenden Ressourcen umfasst und die Nutzenseitige Bilanzgrenze die sich auf die zu Bilanzierende Energiedienstleistung bezieht (Miller et al., 2016, S. 111).

Das von Miller (2016) beschriebene Konzept bringt eine neue Perspektive auf die in (2.2) und (2.3) aufgestellte Bilanzgleichung. Sie bringt das Prinzip der Effizienz ein und teilt eine Bilanz in Aufwands und Nutzenseite. Aufwandsseitig sind die in (2.2) zufließenden Ströme und Quellen der Zustandsgröße zu betrachten. Nutzenseitig müssen abfließende Ströme und Senken der Zustandsgröße betrachtet werden. Im Zentrum der Bilanzierung steht der Untersuchungsgegenstand, welcher in (2.2) als Zustandsgröße definiert ist und einen Nutzen im Rahmen einer Energiedienstleistung impliziert.

Zustandsgrößen in Bilanzräumen

Im Rahmen der in (2.1), (2.2) und (2.3) beschriebenen Bilanzierung spielt die Zustandsgröße eine zentrale Rolle. Die Definition der Systemgrenze wird vom Untersuchungsgegenstand, also der Zustandsgrößen beeinflusst (Miller et al., 2016, S. 109). Somit gilt die Zweckmäßigkeit der Systemgrenze auch für die zu untersuchenden Zustandsgrößen.

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.

Im Rahmen der energetischen Bewertung von Gebäuden betrachtet die DIN V 18599-1:2018-09 die Bilanzierung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarf (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). In einem energiewirtschaftlichen Rahmen hat besonders der Nutzenergiebedarf eine Große Bedeutung da er aus der Befriedigung der Bedürfnisse im Rahmen einer Energiedienstleistung resultiert (Miller et al., 2016, S. 107).

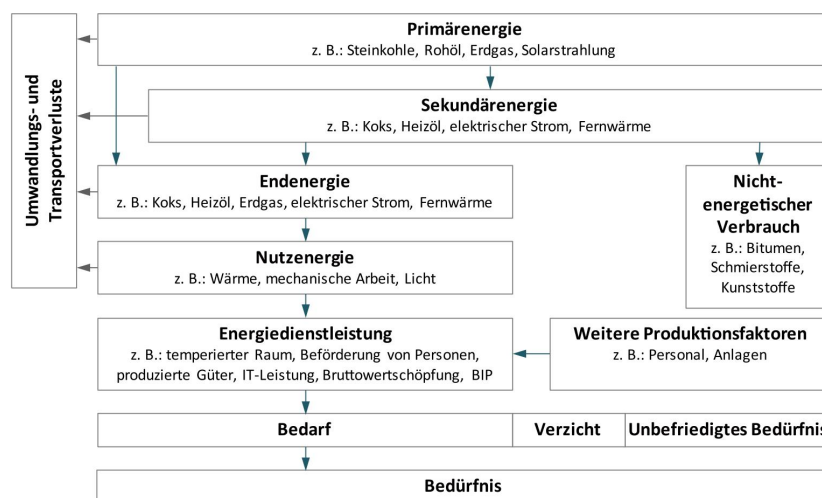


Abbildung 2.2: Energieflussschema. (Dargestellt von Miller (2016))

Im Energieflussdiagramm (2.2) wird die Nutzenergie zwischen der Endenergie und der Energiedienstleistungen verortet. Da die Endenergie die Energiemenge ist, die dem Bilanzraum zur bestimmungsgemäßen Nutzung bereitgestellt wird (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 3.1.2), repräsentiert diese Energieform die Menge der potentiellen Ressourcen auf Aufwandsseite der Bilanzierung. Außerdem wird der praktische Sachverhalt veranschaulicht dass bei der Umwandlung von Endenergie in Energiedienstleistungen über die Nutzenergie Umwandlungs und Transportverluste berücksichtigt werden müssen. Dass Zustandsvariablen den Nutzen, der durch Energiedienstleistungen operationalisiert wird, impliziert (Miller et al., 2016, S. 110), zeigt die Notwendigkeit zur festlegung geeigneter Zustandsvariablen des Nutzenergiebedarfs im Anwendungskontext.

Die DIN V 18599-1:2018-09 definiert den Nutzenergiebedarf für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung als relevante Untersuchungsgegenstände zur energetischen Bewertung von Gebäuden (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). Somit versteht sich der Nutzenergiebedarf im Rahmen der Vornorm als Überbegriff für Nutzwärmebedarf, Nutzkältebedarf, Nutzenergiebedarf für Tinkwarmwasser, Beleuchtung und Befuchtung definiert (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018, Kapitel 3.1.3). Die Nutzenergie für die Beleuchtung versteht sich 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-)geregelt 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 raumlufttechnischen 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).

Energieströme

In der Gleichung (2.3) wird der Strom einer Zustandsgröße als Menge der Zustandsgröße in einem infinitesimal kleinen Zeit- intervall definiert, welches im Grenzwert gegen 0 geht. Folglich wird ein Strom von Ahrendts (2014) als Menge einer Zustandsgröße zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert.

In Gleichung (2.2) wird zwischen in das System zu- und abfließende Ströme der Zustandsgröße Unterschieden. Die zufließenden Ströme können als Ressourcen der Aufwandsseite im von Miller (2016) aufgestellten Konzept der Bewertungsräume betrachtet werden, wobei energetische Ressourcen im Vordergrund stehen. Aufwandsseitige Ressourcen können zu einer Ressource mit einer Bewertungseinheit zusammengefasst werden (Miller et al., 2016, S. 112). Sollten nach erfassung und optionaler aggregation der Ressourcen mehrere Ressourcenkategorien bestehen, können diese mit unterschiedlichen Bewertungseinheiten bilanziert werden (Miller et al., 2016, S. 112). Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden Aufwandsseitig jedoch ausschließlich Energieressourcen betrachtet. Sie stammen somit aus dem Bereich der Endenergie. Dies impliziert dass die Bewertungseinheiten der zufließenden Ströme aus dem Bereich der Endenergie kommen müssen. Die abfließenden Ströme in (2.2) repräsentieren die Nutzenseite des von Miller (2016) aufgestellten Konzepts. Da die zu- und abfließenden Ströme die selbe Zustandsgröße haben, werden die Ströme der Nutzenseite als Energiebedarf der zu erfüllenden Energiedienstleistung betrachtet. Um die Nutzenseite vollständig abzubilden ist noch eine Konkretisierung der Energiedienstleistung durch eine angemessene Bewertungseinheit, welche vom Untersuchungsgegenstände impliziert wird notwendig (Miller et al., 2016). Diese Bewertungseinheit ist keine Energieeinheit, und kann beispielsweise bei der Untersuchung der Temperierung von Räumen die Quadratmeteranzahl des Bilanzraums bei einer definierten soll Temperierung sein (Miller et al., 2016).

Eine praktische Herausforderung im Rahmen der Bilanzierung ist die Energiedatensammlung der zu erfassenden Ströme zu der auch die DIN EN ISO 50001:2018-12 vorgeben macht. 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).

Energiequellen und -senken

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. In der Praxis stellen die in Abbildung (2.2) dargestellten Umwandlungs- und Transportverluste Energiesenken dar. Energiequellen können beispielsweise PV-Anlagen sein, da diese die Energie des Sonnenlichts, welche nach Definition der DIN EN ISO 50001:2018-12 nicht nutzbar ist in nutzbare Energie umwandelt und als Endenergie zur Verfügung steht.

Bilanzraumstrukturen

Bisher wurde die strukturelle Definition von Bilanzräumen unter Betracht praktischer Herausforderung unter der DIN EN ISO 50001:2018-12 in Organisationen des tertiären Wirtschaftssektors betrachtet. Allerdings können auch zwischen Bilanzräumen Beziehungen bestehen, welche im folgenden erläutert werden.

Ein Bilanzraum kann in mehrere Teilbilanzräume zerlegt werden (Engelmann, 2015, S. 310). Dies kann durch die Zerlegung in einzelne Prozesse, Anlagen oder Räumlich getrennte Bereiche realisiert werden (Engelmann, 2015, S. 310), wobei die Zerlegung in Prozesse bei Organisationen des tertiären Wirtschaftssektors eine geringere Relevanz hat. Analog zur Zerlegbarkeit eines Bilanzraums lässt sich auch der Untersuchungsgegenstand eines Bilanzraums Hierarchisch aufgliedern (Miller et al., 2016, S. 109).

Zur Erfassung der Energiedaten einer Organisation bedarf es eine detaillierte und aussagekräftige Analyse der Unterscheidung nach Verbrauchsarten (Hohnhold und Kai, 2013, S. 14). Dabei ist die Disaggregation der Daten von der Größe der Organisation und dem Zweck der Analyse möglich (Hohnhold und Kai, 2013, S. 14f.). Die beschriebene Unterscheidung nach Verbrauchsarten kann durch die Zerlegung eines Bilanzraums mit mehreren Verbrauchsarten in Bilanzräume mit einer Verbrauchsart realisiert werden. Zur Disaggregation von Daten hingegen kann durch die Zerlegung eines Bilanzraums mit einer oder mehreren Zustandsgrößen in mehrere Unterbilanzräume mit den selben Zustandsgrößen jedoch unterschiedlichen Bilanzgrenzen umgesetzt werden.

2.1.3 Bilanzraumstrukturen

2.2 Bilanzräume im Energiemanagement nach ISO 50001

2.2.1 Abbildung des Organisationskontext

2.2.2 Energieeinsätze

2.2.3 Energieleistungskennzahlen

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>
- Engelmann, D. (2015). Energiedatenmanagement. In *Energiemanagement: Für Fachkräfte, Beauftragte und Manager* (S. 285–320). Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02834-3{textunderscore}5>
- Hohnhold & Kai. (2013). Steigerung der Energieeffizienz durch Energiemanagement: Ausgestaltungs- und Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis. <https://hdl.handle.net/10419/88105>
- 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>
- Miller, M., Bubeck, S., & Hufendiek, K. (2016). Zur Methodik von Effizienzbewertungen im energiewirtschaftlichen Kontext. *Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 40(3), 105–125. <https://doi.org/10.1007/s12398-016-0180-9>
- 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