

Methodik zum bauteilbasierten Vergleich der Ökoeffizienz von Gebäuden in
frühen Planungsphasen unter Einbeziehung der Wärmeerzeugung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Architektur und Urbanistik

der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Christoph Kunde

geb. 14.08.1994 in Riesa

Weimar, Dezember 2024

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die Eindämmung des Klimawandels stellt eine der größten Herausforderungen unserer Zeit dar. Bereits heute sind die Folgen mit immer neuen Temperaturrekorden und einer signifikanten Zunahme von Extremwetterereignissen deutlich spürbar. Der Weltklimarat (IPCC) empfiehlt eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C, um die Risiken der nur schwer abschätzbaren Folgen einer weiteren Temperaturerhöhung einzudämmen und wichtige Kippelemente im Klimasystem zu schützen [1]. Mit einem Anteil von circa 40 % an den gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland kommt dem Gebäudebereich bei der Erreichung des Ziels der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 eine Schlüsselrolle zu [2]. Die Baubranche steht dabei vor der besonderen Herausforderung, dass bereits ein Großteil der über den Lebenszyklus eines Gebäudes erzeugten Treibhausgasemissionen in der Herstellungsphase gebunden sein kann [3]. Einmal getroffene Entscheidungen zur Ausführung der Baukonstruktion haben damit langfristige Auswirkungen auf das Treibhauspotenzial des Gebäudesektors.

Die beschriebene Notwendigkeit zur Reduktion des Treibhauspotenzials steht in einem fundamentalen Zielkonflikt mit den wirtschaftlichen Erfordernissen der Praxis. Insbesondere vor dem Hintergrund des prognostizierten Bedarfs von jährlich 372.000 Wohneinheiten bis zum Jahr 2025 [4] sowie steigender Mieten und angespannter Wohnungsmärkte dominieren ökonomische Aspekte in der Regel die Entscheidungsfindung zur Ausführung der Baukonstruktion. Dieser Zielkonflikt gewinnt zusätzlich an Brisanz, da die Ökobilanzierung in den kommenden Jahren voraussichtlich durch regulatorische Vorgaben und deren Verknüpfung mit Förderinstrumenten zunehmende Bedeutung erlangen wird [5]. Angesichts dessen bedarf es einer methodischen Grundlage, die eine integrierte Betrachtung von Treibhauspotenzial und Kosten über den Lebenszyklus ermöglicht.

Das Hauptziel der erarbeiteten Dissertation ist daher die Entwicklung und Validierung einer Methodik zur integrierten Bewertung der Auswirkungen verschiedener Ausführungsarten der Baukonstruktion auf das Treibhauspotenzial und die Kosten über den Lebenszyklus. Diese soll Planenden eine rationale Entscheidungsgrundlage zur Auflösung des beschriebenen Zielkonflikts zwischen ökologischen und ökonomischen Anforderungen bieten. Ein besonderer Fokus liegt auf der Ermöglichung einer frühzeitigen Anwendbarkeit der entwickelten Methodik, da in frühen Planungsphasen die Beeinflussbarkeit des Projekts am höchsten ist, während gleichzeitig grundlegende Entscheidungen zur Ausführung der Baukonstruktion und energetischen Versorgung eines Gebäudes getroffen werden.

Stand der Wissenschaft

Die Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in den Gebäudesektor erfolgt in Deutschland gegenwärtig primär durch Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme wie das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) oder die unterschiedlichen Systemvarianten der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Diese basieren auf dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit [6] und berücksichtigen ökologische, ökonomische und soziokulturelle Aspekte verschiedener Gebäudetypen.

Die DIN EN 15978 bildet die normative Grundlage zur Ökobilanzierung von Gebäuden. Auf Basis dieser haben sich in der Praxis verschiedene Bilanzierungsrahmen etabliert, die sich zum Teil in den betrachteten Lebenszyklusphasen sowie den zu untersuchenden Umweltindikatoren unterscheiden. Mit der Einführung des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude (QNG) und dessen Verknüpfung mit unterschiedlichen Förderinstrumenten der KfW gewinnt besonders das Treibhauspotenzial als Bewertungsindikator in der Praxis zunehmend an Bedeutung. Wenngleich die Bedeutung der Ökobilanzierung damit steigt, ist die Anwendung dieser durch Planende bislang nicht weitverbreitet [7].

Die ganzheitliche Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Gebäuden erfolgt in der Praxis durch die Lebenszykluskostenrechnung. Diese basiert in der Regel auf der Kapitalwertmethode und berücksichtigt neben den initialen Herstellungskosten eines Bauwerks auch weitere Kosten während der Nutzungsphase. Zur Durchführung dieser haben sich, analog zur Ökobilanzierung, verschiedene Bilanzierungsrahmen etabliert. Das DGNB-System sieht etwa einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren vor und definiert spezifische Preissteigerungsraten und Einheitspreise für unterschiedliche Kostenarten [8]. Die Ermittlung der Herstellungskosten erfolgt dabei nach DIN 276 und wird in der Praxis in verschiedenen Detaillierungsgraden entsprechend der jeweiligen Planungsphase durchgeführt.

Einen Ansatz zur integrierten Betrachtung ökologischer und ökonomischer Aspekte über den Produktlebenszyklus bildet die Ökoeffizienzmethode. Diese geht ursprünglich auf Entwicklungen des Unternehmens BASF zurück [9] und wurde in der Folge durch die DIN EN ISO 14045 standardisiert. Das hierin dokumentierte methodische Vorgehen ermöglicht eine systematische Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Umweltauswirkungen und Produktsystemnutzen. Wenngleich die Methodik in verschiedenen Branchen bereits erfolgreich Anwendung findet, bestehen für den Gebäudesektor bislang nur vereinzelte Ansätze zur Ökoeffizienzbewertung. Insbesondere fehlt bislang ein methodischer Ansatz, der die energetischen Eigenschaften der Baukonstruktion integriert betrachtet und dabei aktuelle Bilanzierungsrahmen der Nachhaltigkeitsbewertung berücksichtigt.

Eine besondere Herausforderung bei der Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die Gebäudeplanung stellt der sogenannte MacLeamy-Effekt dar. Dieser beschreibt den inversen Zusammenhang zwischen der Beeinflussbarkeit eines Projekts und dem verfügbaren Informationsgehalt über die verschiedenen Planungsphasen [10]. Gerade in frühen Planungsphasen, wenn grundlegende Entscheidungen zur Ausführung der Baukonstruktion getroffen werden, ist der Informationsgehalt noch gering.

Methoden

Als methodische Grundlage der Forschungsarbeit diente eine umfassende Literaturrecherche zu bestehenden Ansätzen der Ökobilanzierung, Lebenszykluskostenrechnung sowie der Ökoeffizienzbewertung im Gebäudebereich. Hierbei wurden neben wissenschaftlichen Erkenntnissen auch Erfahrungen und Konventionen der planerischen Praxis einbezogen, um eine möglichst breite Anwendbarkeit der zu entwickelnden Methodik zu gewährleisten.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgte die systematische Entwicklung einer Methodik zur bauteilbasierten Ökoeffizienzbewertung von Gebäuden. Die inhaltliche Struktur orientiert sich dabei an der DIN EN ISO 14045, die den normativen Rahmen zur Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen definiert. Zur Integration energetischer Aspekte wurde ein vereinfachter Berechnungsansatz auf Basis des Transmissionswärmeverlustes der Bauteile entwickelt. Zur Ermöglichung einer frühzeitigen Anwendung in der Gebäudeplanung wurde ein Modell konzipiert, das auf statistischen Kennwerten zur Bestimmung der Gebäudegeometrie sowie der systematischen Einbindung von Bauteilkatalogen basiert.

Die Validierung der entwickelten Methodik erfolgte anhand eines Fallbeispiels, bei dem verschiedene Konstruktionsvarianten eines repräsentativen Mehrfamilienhauses untersucht wurden. Die systematische Variation der Konstruktionsweisen ermöglichte dabei eine robuste Überprüfung der Methodik unter verschiedenen Randbedingungen. Aufbauend auf den Ergebnissen des Fallbeispiels wurde die entwickelte Methodik abschließend einer kritischen Reflexion unterzogen und Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung identifiziert.

Wesentliche Ergebnisse

Die entwickelte Methodik zur Ökoeffizienzbewertung von Gebäuden bildet einen wissenschaftlich fundierten Ansatz zur Integration von Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung für frühe Planungsphasen. Sie ermöglicht eine systematische Bewertung von Treibhauspotenzial und Lebenszykluskosten unter Einbeziehung der energetischen Eigenschaften der Baukonstruktion. Die Einbindung energetischer Aspekte erfolgt dabei über einen vereinfachten Berechnungsansatz auf

Basis des Transmissionswärmeverlustes der Bauteile. Durch anwenderorientierte Auswertungsformate, wie einer Heatmap zur bauteilbezogenen Analyse oder der übersichtlichen Visualisierung der Ökoeffizienzindikatoren, wird Planenden eine fundierte Entscheidungsgrundlage bereitgestellt.

Eine besondere methodische Herausforderung stellt der Konflikt zwischen der begrenzten Informationsverfügbarkeit und der angestrebten Bewertungstiefe in frühen Planungsphasen dar. Das entwickelte Modell zur frühzeitigen Anwendung adressiert diese durch die systematische Integration von Bauteilkatalogen sowie die Verwendung statistischer Flächenkennwerte. Dieser Ansatz ermöglicht eine deutlich aufwandsärmere Durchführung der Ökoeffizienzbewertung im Vergleich zu konventionellen Methoden der Lebenszyklusanalyse bei gleichzeitiger Wahrung der wissenschaftlichen Validität.

Die in der Arbeit entwickelten Lösungsansätze greifen weiterhin gezielt aktuelle Herausforderungen der Planungspraxis auf. So wurde ein spezifischer Bewertungsansatz für Wärmepumpen als zunehmend relevante bivalente Energiesysteme entwickelt und in die Methodik eingebunden. Auch die methodische Integration der energetischen Betrachtung von Gründungen bietet einen Lösungsansatz für eine spezifische Herausforderung der frühzeitigen Bewertung.

Die Validierung der entwickelten Methodik demonstrierte die Aussagekraft des entwickelten Ansatzes für die rationale Entscheidungsfindung in der Gebäudeplanung. So konnte gezeigt werden, dass Konstruktionsweisen, die in einer rein wirtschaftlichen Betrachtung bevorzugt werden, in der ganzheitlichen Ökoeffizienzbewertung vorteilhafter sein können. Die integrierte Betrachtung von Treibhauspotenzial, Lebenszykluskosten und energetischen Eigenschaften bietet Planenden dabei eine fundierte Argumentationsgrundlage, um klimaschonende Bauweisen, wie Konstruktionen in Holzbauweise, gegenüber der Bauherrenschaft zu vertreten.

Ein weiterer wissenschaftlicher Mehrwert ergibt sich aus der differenzierten Betrachtung verschiedener Bilanzrahmen. Die separate Ausweisung der Ergebnisse mit und ohne Einbeziehung des Recyclingpotenzials der Materialien (Modul D) trägt der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion um die methodische Integration von Kreislaufwirtschaftsaspekten in der Gebäudebewertung Rechnung. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der noch uneinheitlichen Position zum Umgang mit dem Modul D in verschiedenen Bewertungssystemen von hoher wissenschaftlicher und praktischer Relevanz.

Die entwickelte Analyse auf Bauteilebene ermöglicht eine hochaufgelöste Betrachtung der Ökoeffizienz. Hierdurch können spezifische Stärken und Schwächen einzelner Konstruktionen identifiziert werden, was einen iterativen Optimierungsprozess unterstützt. Die differenzierte Betrachtung der energetischen Eigenschaften auf Bauteilebene ermöglicht dabei auch die gezielte

Optimierung der thermischen Qualität der Baukonstruktion. In der Untersuchung des Fallbeispiels hat sich diese Eigenschaft als besonders relevant gezeigt, da die bauteilspezifischen Indikatoren zum Teil erheblich von den Werten auf Gebäudeebene abweichen können.

Die kritische Reflexion der Methodik offenbarte sowohl Stärken in der integrierten Betrachtung und frühzeitigen Anwendbarkeit als auch Limitationen, etwa in der vereinfachten Abbildung komplexer Zusammenhänge. Eine konsequente Ausrichtung auf praktische Anwendbarkeit führte zu einem wissenschaftlich fundierten Ausgleich zwischen methodischer Präzision und praktischer Handhabbarkeit. Die transparent dokumentierten Systemgrenzen und getroffenen Vereinfachungen ermöglichen dabei eine klare Einordnung der Aussagekraft der Ergebnisse.

Weiterführende Arbeiten

Die entwickelte Methodik zur Ökoeffizienzbewertung von Gebäuden eröffnet vielfältige Perspektiven für weiterführende Forschung und praktische Anwendungen. Mit Blick auf die steigende Relevanz ganzheitlicher Bewertungsansätze durch die Novellierung der Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), die EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten sowie der deutschen Klimaschutzziele, ergeben sich verschiedene konkrete Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung der Methodik sowie die Einbindung in die planerische Praxis.

Die systematische Untersuchung verschiedener Gebäudetypen und Konstruktionsweisen bietet die Grundlage für umfassende Metaanalysen. Diese können zur Identifikation von Optimierungspotenzialen sowie zur Entwicklung von Benchmarks und Best-Practice-Empfehlungen für unterschiedliche Gebäudearten beitragen. Darauf aufbauend können praxisnahe Planungsleitfäden entwickelt werden, die Planenden eine gezielte Unterstützung bei der Konzeption klimaschonender und wirtschaftlich tragfähiger Gebäudeausführungen bieten.

Eine methodische Verfeinerung bietet sich besonders im Bereich der energetischen Bewertung an. Die Integration dynamischer Szenarien für Energiemixe sowie die Berücksichtigung gebäudenaher Energieerzeugung, etwa durch Photovoltaik, würden zu einer präziseren Abbildung zukünftiger Entwicklungen beitragen. Auch die Abkopplung der Kosten für Wartung, Inspektion und Instandsetzung von den Herstellungskosten zugunsten materialspezifischer Ansätze stellt ein wichtiges Forschungsfeld dar.

Die fortschreitende Digitalisierung im Bauwesen bietet ebenfalls ein erhebliches Potenzial für die Weiterentwicklung. Die Integration der Methodik in Building Information Modeling (BIM) könnte eine automatisierte Datenerfassung und -auswertung ermöglichen. Auch die Einbindung in bestehende Bewertungswerkzeuge zur Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenrechnung sowie die Optimierung

des entwickelten Workflows auf Basis von Anwender*inneninterviews stellen relevante Entwicklungsfelder dar.

Eine besondere wissenschaftliche Herausforderung liegt in der Integration weiterer Nachhaltigkeitsindikatoren, insbesondere solcher, die in etablierten Zertifizierungssystemen wie dem DGNB-System verwendet werden. Dies könnte zu einem noch umfassenderen Bewertungsansatz führen, der neben dem Treibhauspotenzial auch weitere ökologische Wirkungskategorien berücksichtigt. In diesem Zusammenhang wäre auch die Entwicklung einer einheitlichen Position zum Umgang mit dem Recyclingpotenzial von Materialien (Modul D) von hoher Bedeutung für die Weiterentwicklung der Methodik.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] *Intergovernmental Panel on Climate Change*: Global Warming of 1.5°C, Genf, 2018.
- [2] *Ramseier, L.; Frischknecht, R.*: Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland – Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt, 2020, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Zugriff am: 16.08.2024].
- [3] *Pischetsrieder, E.*: Planungsbegleitende Ökobilanzierung in der Praxis. *In*: : BKI Konstruktionsatlas KA1 – Bauteile mit Ökobilanzen, CO₂-Äquivalenten und Baupreisen für die nachhaltige und wirtschaftliche Planung, BKI Kostenplanung. Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Stuttgart, 2023, S. 44-55.
- [4] *Deschermeier, P.; Henger, R.; Voigtländer, M.*: Mehr Wohnungsmangel durch steigende Bedarfe und sinkende Bautätigkeit – Aktuelle Ergebnisse des IW-Wohnungsbedarfsmodells, 2024, https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2024/IW-Gutachten_2024-Wohnungsbaubedarfe.pdf [Zugriff am: 19.08.2024].
- [5] *Dorn-Pfahler, S.; Lützkendorf, T.*: Ökobilanzielle Bewertung im Ordnungsrecht – Grundlagen und erste Ansätze zur vereinfachten Bewertung von Gebäuden mit angewandten Ökobilanzen, 2023, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2023/bbsr-online-44-2023-dl.pdf;jsessionid=721DC9A901C799E25943FD1FB12DEA80.live21303?__blob=publicationFile&v=3 [Zugriff am: 05.09.2024].
- [6] *Elkington, J.*: Cannibals with forks – The triple bottom line of 21st century business. Capstone, Oxford, United Kingdom, 1999.
- [7] *Lützkendorf, T.; Balouktsi, M.*: The level of knowledge, use and acceptance of LCA among designers in Germany: A contribution to IEA EBC Annex 72. *In*: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 588 (2020), Heft 4.
- [8] *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V.*: DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau – Version 2023, Stuttgart, 1.Auflage Ausgabe 2023.
- [9] *Sailing, P.; Kicherer, A.; Dittrich-Krämer, B. et al.*: Eco-efficiency analysis by BASF: the method. *In*: The International Journal of Life Cycle Assessment 2002, Heft 7, S. 203-218.
- [10] *Kraubitz, T.*: Trainer beim Bauen - Nachhaltigkeit planen aus Sicht des Auditors. *In*: Hauke, B.; Lemaitre, C.; Röder, A. (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz – Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen : aktueller Stand der Technik. Institut Bauen und Umwelt; Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2021, S. 80-86.