



Analyse und Weiterentwicklung einer Bestandssanierung unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus mit Fokus auf die Energie- und Gebäudetechnik anhand einer Fallstudie

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
M.Sc. Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen
an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität
München.

Betreut von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

M.Sc. Jonathan Woytowicz | M.Sc. Leander Präger

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von

Elias Sebastian Altenweger

Eingereicht am

München, den 17.12.2024

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Kurzfassung.....	1
Abstract.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung	7
2 Stand der Technik und Forschung	9
2.1 Normative Vorgaben.....	9
2.2 Leitfäden für Schulsanierungen in der Gebäudetechnik.....	11
2.2.1 Berliner Schulbauoffensive	11
2.2.2 Zukunftsfähiger Schulbau	13
2.3 Grundlagen einer Ökobilanz	15
2.4 Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400.....	19
2.4.1 Vereinfachtes Rechenverfahren nach der DGNB.....	20
2.4.2 Rechenverfahren mit QNG-Sockelbetrag.....	20
2.4.3 Detaillierte Bilanzierungsmethodik nach Harter.....	22
3 Forschungsfrage und Methodik.....	23
4 Anwendung und Auswertung.....	25
4.1 Bestandsanalyse des Gebäudes	25
4.1.1 Energieausweis	25
4.1.2 Ausführungsplanung der Firmen.....	27
4.2 Graue Emissionen der KG 400	30
4.2.1 Lebenszyklusanalyse nach DGNB.....	30
4.2.2 Detaillierte Ökobilanz nach Harter	33
4.3 Optimierung der Gebäudetechnik	41
4.3.1 Modelerstellung IDA ICE	41
4.3.2 Dynamische Simulation	44
4.3.3 Umplanung und Dimensionierung.....	48
4.4 Optimierte Variante der Ökobilanz nach Harter.....	50

5	Diskussion	53
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	53
5.2	Interpretation der Ergebnisse	55
5.3	Handlungsempfehlung für kommunale Bauprojekte	57
5.4	Limitationen der verwendeten Methodik	58
6	Fazit und Ausblick.....	59
	Literaturverzeichnis	61
	Abbildungsverzeichnis.....	67
	Anhang	69

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Anwendung einer Bewertungsmethode für die ökologische Analyse und Optimierung der Energie- und Gebäudetechnik, mit dem Ziel, die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus zu quantifizieren und auf Grundlage dieser Ergebnisse zielgerichtete Maßnahmen für Kommunen zu ermöglichen. Dies geschieht im Rahmen des Forschungsprojektes „BauKlima-Kommunal“, am Fallbeispiel der Sanierung und Erweiterung der Goetheschule in Hannover. Unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Forschung werden folgende Hypothesen aufgestellt: Das Maß an Technik im Gebäude führt aufgrund der statischen Systeme und Normen zu Überdimensionierungen. Die in der Praxis geläufigen ökologischen Bewertungsmethoden für Gebäudetechnik liefern unzureichend präzise Ergebnisse. Die Einsparungen der Nutzungsemissionen durch Effizienzsteigerung stehen nicht in sinnvoller Relation zu den ausgestoßenen grauen Emissionen.

Zur Verifizierung dieser Hypothesen werden einerseits drei Ansätze für die Lebenszyklusanalyse der Kostengruppen 410 bis 430 angewendet und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Andererseits werden anhand der Bestandsunterlagen und einer dynamischen Simulation mit dem Programm IDA ICE die Gewerke Heizung, Lüftung, Sanitär und Kälte untersucht und Optimierungen in der Planung vorgenommen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden Handlungsempfehlungen für kommunale Bauträger ausgesprochen.

Die Haupteergebnisse der Arbeit sind: Die Bewertungsmethode nach dem „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude“ liefert mit dem flächenspezifischen Sockelbetrag keine ausreichend präzisen Werte. Ein detailliertes Verfahren mit genauer Massenbilanz und der Zuordnung von Umwelt-Produktdeklarationen hingegen, gibt deutlich mehr Aufschluss über die tatsächlichen Umweltauswirkungen der Haustechnik. Durch das dynamische Simulationsmodell unter Berücksichtigung der klimatischen Rahmenbedingungen und internen Lasten konnte eine Reduzierung der Heizlast erreicht werden. Ebenso konnte durch die detaillierte Untersuchung alternativer Lüftungsvarianten festgestellt werden, dass einfachere Gebäudetechnikkonzepte aus ökologischer Sicht verstärkt zu bevorzugen sind.

Die Ergebnisse verdeutlichen den möglichen Einfluss der umweltbezogenen Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400 als Planungsinstrument. Die Verfahren sollen künftig jedoch noch deutlich erweitert und geschärft werden, um eine ökologisch nachhaltige Planung von allen Beteiligten bereits in den frühen Leistungsphasen vorantreiben zu können.

Abstract

This master's thesis focuses on the development and application of an assessment method for the ecological analysis and optimization of energy and building systems. The primary goal is to quantify greenhouse gas emissions across the entire lifecycle and, based on these results, enable targeted measures for municipalities. The research is conducted within the framework of the "BauKlima-Kommunal" project, using the case study of the renovation and extension of the Goetheschule in Hannover. Based on the current state of research, the following hypotheses are formulated: the level of technical systems in buildings often leads to over-dimensioning due to static systems and standards. Common ecological assessment methods for building technology provide insufficiently precise results. Furthermore, the reductions in operational emissions achieved through increased efficiency do not represent a meaningful trade-off when compared to the embodied (grey) emissions generated.

To verify these hypotheses, two approaches are taken: first, three lifecycle analysis methods are applied to cost groups 410 to 430, and their results are compared. Second, using existing documentation and dynamic simulations with the IDA ICE software, the heating, ventilation, sanitation, and cooling systems are analyzed, and planning optimizations are proposed. The insights gained are used to develop recommendations for municipal developers.

The key findings of this thesis are as follows: The assessment method based on the "Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude" fails to provide sufficiently precise results when using the area-specific base value. In contrast, a detailed approach incorporating precise mass balancing and the assignment of environmental product declarations provides significantly greater insight into the actual environmental impacts of building technology. Through the dynamic simulation model, which considers climatic conditions and internal loads, a reduction in heating demand was achieved. Additionally, a detailed analysis of alternative ventilation strategies revealed that simpler building technology concepts should be prioritized from an ecological perspective.

The results underscore the potential impact of environmental lifecycle analysis for cost group 400 as a planning tool. However, the methods must be further developed and refined in the future to promote ecologically sustainable planning by all stakeholders during the early project phases.

Abkürzungsverzeichnis

BA	Bauabschnitt
CAD	Computer Aided Design
CO₂e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DGNB	Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
DN	Nomineller Durchmesser
EPD	Umwelt-Produktdeklaration
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GWP	Erderwärmungspotential
HLSK	Heizung, Lüftung, Sanitär, Kälte
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
KG	Kostengruppe
LCA	Lebenszyklusanalyse
QNG	Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude
r. F.	Relative Luftfeuchte
RLT	Raumluftechnik
RSL	Reference Service Life
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TWK	Trinkwasser kalt
TWW	Trinkwasser warm

1 Einleitung

Die Technische Gebäudeausrüstung gewinnt in den letzten Jahren enorm an Zuwachs und konnte im Jahr 2021 bereits 18,7 % der gesamten Bauinvestitionen des Hochbaus einnehmen. Dieser Aufschwung liegt insbesondere an der starken Nachfrage an energetischer Sanierung und komplexer Gebäudetechnik. [1] Diese Aussage kann durch langjährige Erfahrung in der Planungsarbeit bei der KBP Ingenieure GmbH in den Gewerken Heizung, Lüftung, Sanitär und Kälte bestätigt werden [2]. Dabei steigt durch Bauherrenforderungen und gesetzliche Vorgaben in den letzten Jahren die Komplexität der Technischen Gebäudeausrüstung, sodass Planungen verwirklicht werden, bei denen, wie in Abbildung 1 ersichtlich, in weiten Teilen der Fußboden aufgrund der immensen Massen an Gebäudetechnik nicht mehr erkennbar ist. Aber nicht nur die äußeren Rahmenbedingungen fordern derartige Konzepte, sondern auch Versäumnisse in den frühen Leistungsphasen wegen unzureichender Kommunikation zwischen den Planungsparteien erzwingen solche Resultate. Dabei stehen zumeist eine vermeintliche Effizienz- und Komfortsteigerung im Vordergrund, welche es jedoch am Ende des Tages, wie auch Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer mit seiner Aussage „Weniger ist Zukunft!“ [3] bekräftigt, zu hinterfragen gilt.

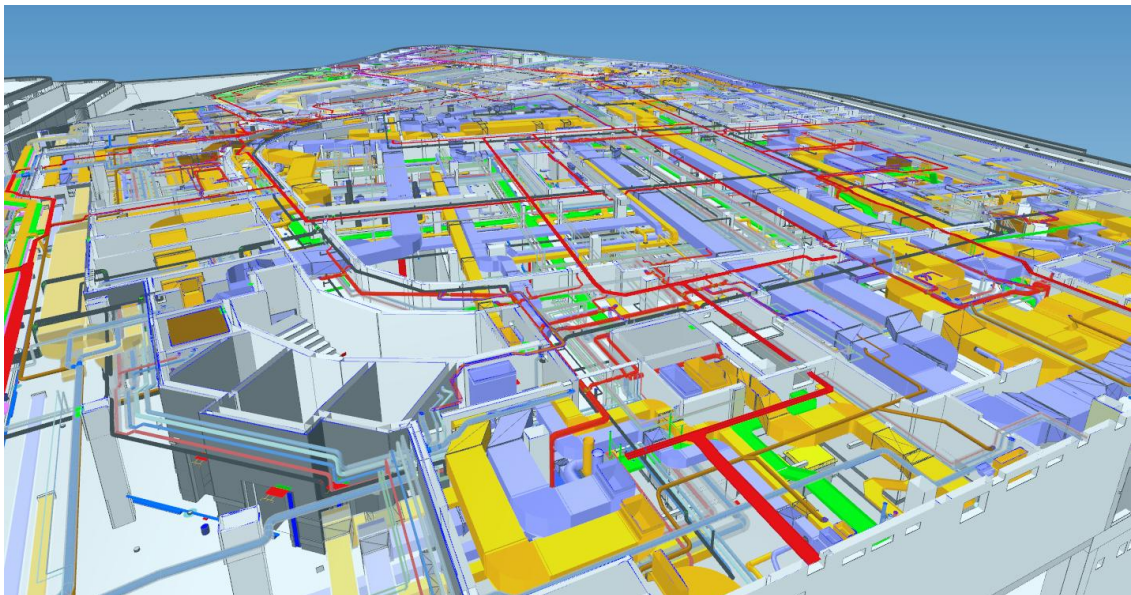


Abbildung 1 Aktuelle TGA-Planung für das Untergeschoss eines Büro- und Restaurantgebäudes [2]

Das Thema, mit dem sich diese Abschlussarbeit beschäftigt, ist die Analyse und Weiterentwicklung einer Bestandssanierung anhand einer Fallstudie unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus mit Fokus auf die Energie- und Gebäudetechnik. Dies soll im Rahmen des Forschungsprojektes „BauKlima-Kommunal“ behandelt werden. Das Ziel des Projektes ist, durch nachhaltiges Bauen und Sanieren den ganzheitlichen kommunalen Klimaschutz zu stärken und somit die Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors reduziert werden können. [4] Dafür werden primär sogenannte „Best-Practice-Projekte“ der am Forschungsprojekt teilnehmenden Kommunen analysiert und ausgewertet. Konkret handelt es sich in

dieser Arbeit dabei um die durchgeführte Sanierung und Erweiterung der Goetheschule in Hannover. Diese soll hinsichtlich der Effizienz und Effektivität der Technischen Gebäudeausrüstung und deren ökologischen Auswirkungen untersucht werden. Die Zielsetzung dieser Untersuchung ist zum einen, die Nutzungsemissionen im Betrieb zu reduzieren, da diese in den meisten Bauprojekten über 50 % der Gesamtemissionen ausmachen. [5] Entscheidend für nachhaltige Veränderungen ist nicht nur die thermische Hülle, die bei Sanierungen und Neubauten in den letzten Jahren einen sehr hohen Standard erreicht hat, sondern insbesondere auch die Gebäudetechnik. Zum anderen werden die grauen Emissionen der Technischen Gebäudeausrüstung in den vielen Projekten bislang häufig nicht erfasst und bei Zertifizierungssystemen vernachlässigt, woraus sich ein dringender Aufklärungsbedarf ergibt.

Das Ziel der Masterarbeit ist einerseits zu prüfen, wie viel Gewicht die Gebäudetechnik tatsächlich in der ökologischen Bewertung hat und damit einhergehend herauszufinden, ob die aktuellen Verfahren dies gut widerspiegeln oder ob Alternativen benötigt werden. Dabei sollen nur die oben bereits genannten Gewerke Lüftung, Heizung, Sanitär und Kälte behandelt werden. Infolgedessen soll zur Einordnung in das Forschungsprojekt eine Empfehlung beziehungsweise Leitlinie entstehen, wie die Technische Gebäudeausrüstung in Zukunft in kommunalen Bauprojekten umgesetzt werden soll.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird im ersten Schritt eine Literaturrecherche zu den theoretischen Grundlagen, welche für die Arbeit notwendig sind, durchgeführt. Im Anschluss sollen mittels der empirischen Fallstudie anhand des Beispielsprojektes zielgerichtet die Forschungslücken identifiziert und geschlossen werden.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel wird grundlegend auf den aktuellen Stand der Technik und Forschung, welcher für diese Arbeit relevant ist, näher eingegangen. Dies ist für das Verständnis der Arbeit notwendig und wird zusätzlich gebraucht, um eine angemessene Diskussionsgrundlage zu liefern. Dabei werden in mehreren Teilschritten zuerst die normativen Vorgaben geklärt, anschließend Leitfäden für Schulsanierungen mit Fokus auf die Gebäudetechnik aufgezeigt, sowie die Grundlagen einer Ökobilanz und die aktuellen Herangehensweisen an die Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400 erläutert.

2.1 Normative Vorgaben

Beginnend mit dem Stand der Technik, werden alle normativen Vorgaben und Richtlinien, welche im Kontext der Forschung benötigt werden, aufgezeigt und näher erläutert. Dies ist notwendig, da alle Vorhaben, die in der deutschen Baubranche umgesetzt werden, den geltenden Normen und Vorschriften unterliegen und damit zumeist eingehalten werden müssen. Dabei ist entscheidend, ob auf die DIN-Normen in Rechtsnormen oder in Verwaltungsvorschriften verwiesen wird oder nicht. Dies kann dazu führen, dass diese Normen eine rechtliche Bedeutung erlangen. [6] Die Regularien haben sich aus verschiedenen Gründen in den letzten Jahren fest im deutschen Bauwesen etabliert. Sie bieten Bauprojekten eine verlässliche Grundlage, indem sie nicht nur Gefährdungen vorbeugen und Haftungsfragen klären, sondern auch eine effektive Qualitätssicherung ermöglichen. Zudem schaffen sie wirtschaftliche Vorteile wie Planungssicherheit und stärken die Wettbewerbsfähigkeit. [7]

Nachfolgend werden alle Normen, Vorschriften und Gesetze aufgelistet und kurz beschrieben, die für diese Arbeit eine essenzielle Bedeutung haben. Diese werden in Bezug auf die Auswertung der Technischen Gebäudeausrüstung, sowie zur Erstellung von Ökobilanzen benötigt. Zusätzlich dazu müssen bei der Planung alle anderen Gesetze, Landesbauordnungen, sowie Musterbaurichtlinien stets eingehalten werden.

- Das **Gebäudeenergiegesetz (GEG)** regelt die energetischen Anforderungen an Neubauten und Bestandsgebäude in Deutschland, indem es den Energiebedarf für Heizung, Kühlung, Lüftung und Warmwasser begrenzt und Vorgaben zur Nutzung erneuerbarer Energien macht, um Klimaschutz und Energieeffizienz im Gebäudebereich zu fördern. [8]
- Die **ASR A3.5 (Technische Regel für Arbeitsstätten - Raumtemperatur)** steckt Anforderungen an die Raumtemperatur in Arbeitsstätten ab, um das Wohlbefinden und die Gesundheit der Beschäftigten zu gewährleisten. Zusätzlich definiert sie Mindest- und Höchsttemperaturen sowie Maßnahmen für besondere klimatische Bedingungen. [9]

- Die **DIN 276** dient als Grundlage für die Kostenplanung von Bauprojekten und strukturiert diese in Kostengruppen, um eine transparente, systematische und vergleichbare Darstellung der Baukosten während aller Projektphasen zu ermöglichen. Dabei werden Untergruppen der KG400 als Gewerke betitelt. [10]

Kostengruppe	Titel
100	Grundstück
200	Herrichten und Erschließen
300	Bauwerk - Baukonstruktionen
400	Bauwerk - Technische Anlagen
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen
420	Wärmeversorgungsanlagen
430	Raumluftechnische Anlagen
440	Elektrische Anlagen
450	Kommunikations-, sicherheits- und informationstechnische Anlagen
460	Förderanlagen
470	Nutzungsspezifische und verfahrenstechnische Anlagen
480	Gebäude- und Anlagenautomation
500	Außenanlagen
600	Ausstattung und Kunstwerke
700	Baunebenkosten
800	Finanzierung

Abbildung 2 Aufbau der Kostengruppen, eigene Darstellung basierend auf [10]

- Die **DIN EN 12831-1** legt das standardisierte Verfahren zur Berechnung der Heizlast von Gebäuden fest, um die erforderliche Heizleistung für die Planung und Dimensionierung von Heizungsanlagen unter Berücksichtigung von Normklimabedingungen und Gebäudeeigenschaften zu ermitteln. [11]
- Die **DIN EN 12828** setzt die Rahmenbedingungen für die Planung, Installation und Sicherheit von Warmwasser-Heizungsanlagen, einschließlich der Vorgaben für die Dimensionierung, den Betrieb und die Absicherung von Anlagenkomponenten, um einen sicheren und effizienten Betrieb zu garantieren. [12]
- Die **DIN EN 16798-1** gibt den Prozess der energetischen Bewertung und Planung von Lüftungssystemen in Nichtwohngebäuden an, einschließlich der Kriterien für die Raumlufqualität, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Lüftungsraten, um Komfort und Energieeffizienz sicherzustellen. [13]
- Die **DIN V 18599-1** erläutert die Herangehensweise zur ganzheitlichen energetischen Bewertung von Gebäuden, indem sie die Berechnung des Energiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung auf Basis standardisierter Methoden regelt. Diese wird für die Ermittlung des Primärenergiebedarfes von Gebäuden verwendet. [14]
- Die **DIN EN ISO 14040** und **DIN EN ISO 14044** beschreiben die Prinzipien, Rahmenbedingungen und Anforderungen zur Durchführung von Ökobilanzen, um die Umweltwirkungen von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen systematisch zu bewerten und Entscheidungsprozesse zu unterstützen. [15, 16]
- Die **DIN EN 15978** definiert ein standardisiertes Verfahren zur Bewertung der Umweltwirkungen von Gebäuden über deren gesamten Lebenszyklus, basierend auf einer Lebenszyklusanalyse und anderen quantifizierten Nachhaltigkeitskriterien. [17]

2.2 Leitfäden für Schulsanierungen in der Gebäudetechnik

Das Ziel der Arbeit ist die Analyse und Bewertung der Gebäudetechnik in kommunalen Schulbauten. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt näher darauf eingegangen, welche Ansätze momentan beim Bau der Technischen Gebäudeausrüstung praktiziert werden. Dafür werden unterschiedliche Leitfäden und Veröffentlichungen mit diversen Strategien mit Blick auf die Kostengruppen 410 bis 430 dargestellt und erläutert.

2.2.1 Berliner Schulbauoffensive

Die erste zu erwähnende Fachliteratur ist der „Leitfaden für die Sanierung von Schulen“ der Berliner Schulbauoffensive. Dieser beschreibt die aktuelle Herangehensweise an die Sanierung von Bestandsschulbauten im Raum Berlin für alle Kostengruppen der DIN 276. Dabei werden die Vorgaben aus den Anforderungen des Inklusionsgedankens, der Barrierefreiheit, der Nachhaltigkeit, sowie der Wirtschaftlichkeit und des Brandschutzes gezogen. [18] Zum Thema Nachhaltigkeit und Klimaschutzziele fordert der Leitfaden konkret, dass die gesetzlichen Anforderungen an Energieeffizienz und erneuerbare Energieversorgung, sofern wirtschaftlich über den gesamten Lebenszyklus realisierbar, unterschritten werden. Die grundlegende Empfehlung für die Technischen Anlagen der Kostengruppe 400 lautet dabei: „Für die Haustechnik eines Schulgebäudes soll eine Analyse der Technischen Anlagen unter dem Gesichtspunkt der bedarfsgerechten und energieeffizienten Nutzung des Gebäudes erstellt werden, die mögliche Optimierungspotentiale beinhaltet.“ [18]. Unter dieser Prämisse werden für alle Gewerke genaue Vorgaben angegeben.

Abwasser-, Wasser- und Gasanlagen

Die Regenwasseranlagen sind zur Entlastung der Kanalisation auszulegen, weshalb eine möglichst dezentrale Regenwasserbewirtschaftung geprüft werden soll. Zusätzlich soll der Verzug von Regenwasserleitungen zur Reduzierung der Installationsdichte im Gebäude an der Außenfassade des Gebäudes durchgeführt werden. Für das Schmutzwasser gilt der Ansatz, dass dieses, wenn möglich, nicht unterhalb der Rückstauenebene anfällt, um Hebeanlagen weitestgehend zu vermeiden. Für die Trinkwasserinstallationen muss eine gute Revisionierbarkeit gewährleistet sein. Jeder Gebäudehausanschluss muss mit Sicherheits- und Absperrarmaturen ausgestattet sein. Zum Schutz der Trinkwasserqualität sind abweichend zu der Norm DIN 1988-200 die Trinkkaltwasserleitungen mit einer 100-prozentigen Dämmdicke zu versehen. Zur Vermeidung von stehendem Wasser und für die Trinkwasserhygiene müssen zudem alle Wasserabnehmer bis zum letzten Verbraucher durchgeschleift werden. Dort soll dann eine Hygienespülung, welche bei Nichtnutzung alle 72 h spült, verbaut werden. Für die Trinkwarmwasserversorgung sollen in den meisten Fällen nur dezentrale elektrische Durchlauferhitzer geplant werden. Dies gilt unter anderem für Behinderten-WCs. Standard WC-Bereiche sollen hingegen nur mit einer Kaltwasserinstallation ausgestattet werden. Frischwasserstationen dürfen sich nur an Sportstätten und gebündelten Bereichen befinden. Batteriebetriebene Armaturen sind untersagt. [18]

Wärmeversorgungsanlagen

Für die Kostengruppe 420 gibt die Schulbauoffensive vor, dass für Bauvorhaben ein Energieversorgungskonzept zu erstellen ist, welches die wirtschaftlichste Wärmeversorgungsvariante aufzeigt und zeitgleich den Anteil an erneuerbaren Energien maximiert. In der Heizlastberechnung sollen Nacht- und Wochenendabsenkungen berücksichtigt und eventuell, abweichend von der DIN EN 12831, die anzusetzenden Wiederaufheizlasten mit den Bauträgern diskutiert werden. Die Wärmeverteilnetze sind im 2-Rohrsystem auszubilden und ein hydraulischer Abgleich ist durchzuführen. Jegliche Pumpen sind in der Energieeffizienzklasse A auszuführen. Die Einflussnahme der Nutzenden auf die Raumtemperatur innerhalb einer Zone ist zu beschränken. In Ausnahmefällen kann mit dem Nachweis der Wirtschaftlichkeit eine Einzelraumregelung geplant werden. [18]

Raumluftechnische Anlagen

Die raumluftechnischen Anlagen für Schulgebäude sollten grundsätzlich natürlich be- und entlüftet werden. Bei der Sanierung von Fenster- und Fassadenteilen muss nach dem Leitfaden ein Lüftungskonzept erstellt werden, welches folgende Rahmenbedingungen erfüllt:

- Die Raumlufqualität muss mind. Kategorie IDA 2 der DIN EN 16798 erfüllen
- Der Pettenkofer-Grenzwert [19] von 1000 ppm darf innerhalb einer Unterrichtsstunde im Mittelwert nicht überschritten werden
- Die Anzahl der Personen und Lüftungsintervalle sind abzustimmen

Für den Fall, dass eine maschinelle Belüftung erforderlich ist, sollte diese ohne Kühlung oder Befeuchtung geplant werden, jedoch eine Integration der Nachauskühlung stattfinden. Folgende Anforderungen an die RLT-Geräte sind definiert:

- Mechanische Be- und Entlüftung sind in den Sommermonaten außer Betrieb
- Außenluftansaugung in ausreichendem Abstand zu Schadstoffquellen platzieren
- Gerätewärme der Anlagen ist direkt am Entstehungsort abzuführen
- Überströmungen in angrenzende Räume sind zu vermeiden

Lüftungsanlagen für Küchen, Kantinen und Sanitärbereiche sind aufgrund der Geruchsentwicklung und Hygiene separat zu betrachten. Natürliche Belüftungskonzepte für Sporthallen werden explizit erwähnt. Lüftungskanäle sollen mit verzinktem Stahlblech ausgeführt werden und nur bei besonderen Anforderungen auf alternative Materialien gewechselt werden. Räume mit hohen technischen Wärmelasten sollen mittels dezentraler Umluftkühlgeräte gekühlt werden.

Der Planungsablauf für die Projekte ist dabei in vier Phasen gegliedert. Der erste Schritt ist die Bestands- und Bedarfsermittlung, die mittels eines Soll-Ist-Abgleichs und Bewertungsgutachtens durchgeführt werden soll. Die zweite Phase beschreibt die Ziel- und Sanierungsplanung mit Kosteneinschätzung, welche in der dritten Phase in einem Gesamtprogramm endet. Dieses wird dann im letzten Schritt der zuständigen baulichen Stelle zur Prüfung vorgelegt. Zusammenfassend liefert die Berliner Schulbauoffensive einige sehr konkrete Handlungsempfehlungen für Sanierungsprojekte. Diese sind in der Regel stark normgestützt und auf wirtschaftliche Rentabilität abgezielt. Gleichzeitig bleibt jedoch viel Handlungsspielraum in Bezug auf natürliche Konzepte.

2.2.2 Zukunftsfähiger Schulbau

Einen alternativen Ansatz für Schulsanierungen bringen Thomas Auer und Florian Nagler in ihrem Buch: „Zukunftsfähiger Schulbau – 12 Schulen im Vergleich“ [20]. Dabei wird der Fokus weniger auf die einzelnen Kostengruppen und die damit einhergehenden Regularien und Normen gelegt, sondern mehr auf die Ganzheitlichkeit des Konzeptes eingegangen. Konkret wurden 12 Schulen analysiert, die zwischen dem 19. und 21. Jahrhundert gebaut wurden. Entsprechend treffen in dieser Analyse komplett unterschiedliche Planungsansätze, aber auch Möglichkeiten, aufeinander. Der Fokus wird nicht nur auf objektiv messbare Ergebnisse gelegt, sondern vordergründig der Komfort und die Zufriedenheit der Nutzenden bewertet. Demzufolge wird beispielsweise unter anderem hinterfragt, ob der Grenzwert der CO₂-Konzentration von 1000 ppm zwingend eingehalten werden muss. [20]

In dem Endbericht der Analyse wird im Methodenteil auf fünf Themenblöcke näher eingegangen, welche für die Analyse eines Schulgebäudes notwendig sind. Diese werden in den nächsten Absätzen konkretisiert, jedoch liegt der Fokus dabei auf dem fünften Kapitel, da dieser die größte Bedeutung für diese Abschlussarbeit hat.

Das erste Kapitel „Kontext und Gebrauch“ behandelt die jeweiligen Einbindungen in den städtebaulichen und gesellschaftlichen Kontext. Dabei spielt das Thema Umnutzbarkeit eine große Rolle. Diesem Abschnitt folgt das Kapitel „Prozess und Planung“. Hier wird näher auf die Leistungsphase 0 eingegangen, in welcher der Rahmen und die Richtung des Gesamtprojekts näher beschrieben werden. Diese wird in den meisten Fällen als eine Projektvorbereitung oder Bedarfsplanung definiert, welche kein Teil der HOAI ist, jedoch essenziell für die Projektentwicklung. Zusätzlich wird in diesem Zusammenhang im Buch erläutert, dass Totalsanierungen sich häufig aus kleinen Eingriffen in den Bestand entwickeln. Unter anderem wird auch festgestellt, dass eine Implementierung von pädagogisch wertvollen Lerninseln zumeist im direktem Konflikt mit den Schulbau Richtlinien und Landesbauordnungen steht. [20] Das anschließende Kapitel ist mit „Material und Konstruktion“ betitelt. Hier geht es um eine vergleichende Darstellung der Schulen mit Blick auf die verwendeten Materialien und Konstruktionen. Dadurch wird ein Einblick in den Schallschutz, die Raumakustik und die Speichermassen gegeben, nachdem Schulen aufgrund ihrer überdurchschnittlich hohen Beanspruchung durch die Schüler:innen eine besondere Robustheit aufweisen müssen. Das Empfinden der Nutzenden lässt sich meist mit den Behaglichkeitskriterien des thermischen, hygienischen, visuellen sowie akustischen Komforts belegen. Dafür wurden Kurz- und Langzeitmessungen an diversen Zonen in den einzelnen Schulen durchgeführt und anschließend mit den Aussagen der Nutzenden verglichen, was in Kapitel 4 „Raum und Komfort“ festgehalten ist. Dabei wird auch die Raumkonditionierung und deren Effektivität behandelt. Die Ergebnisse der Studie „hinsichtlich der sogenannten adaptiven Komfortstandards zeigt eindeutig, dass die Nutzer in natürlich belüfteten Räumen eine höhere Raumtemperatur akzeptieren.“ [20] Denn grundsätzlich lässt sich auch in gekühlten Räumen, vor allem in den Übergangszeiten, ein für die Nutzenden tendenziell zu warmes Klima feststellen. Die durchgeführten Messungen bei den maschinell belüfteten Klassenzimmern führen zu dem Ergebnis, dass die Luftfeuchte in der kalten Jahreszeit unter 20 % r. F. oftmals zu niedrig ist, sodass diese trotz der vermeintlich besseren Luftqualität als nur mittelmäßig bewertet wird. [20]

Stand der Technik und Forschung

Im letzten Kapitel wird auf die „Technik und Energie“ eingegangen. Dort werden die tatsächlich gemessenen Verbrauchswerte der Gebäude aufgezeigt und daraus Schlüsse gezogen. Wie in Abbildung 3 ersichtlich, hat sich der spezifische Heizwärmebedarf in den meisten Fällen deutlich reduziert, je neuer die Schulen sind.

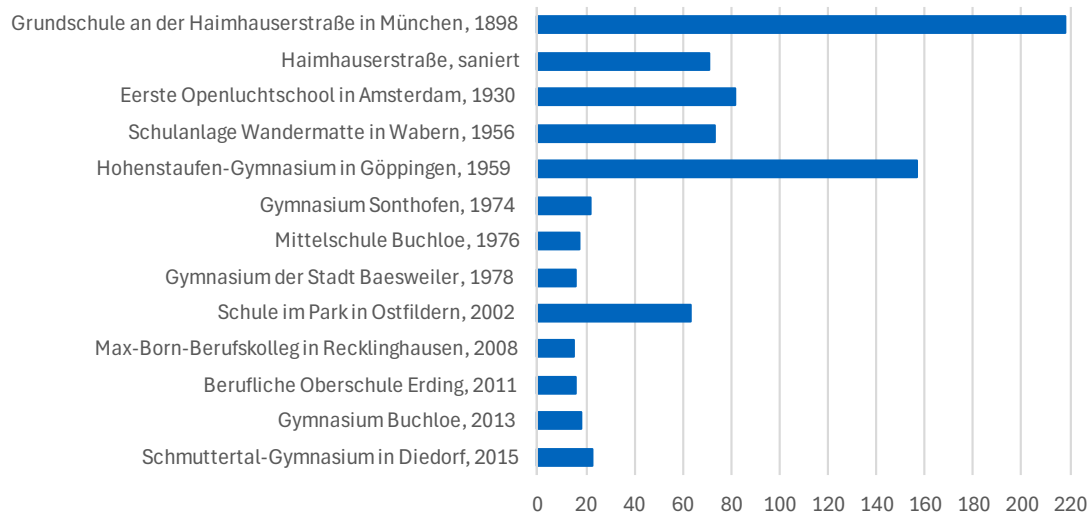


Abbildung 3 Spez. Heizwärmebedarf [kWh/m²*a], eigene Darstellung basierend auf [20]

Der hohe Heizwärmebedarf der älteren Schulen ist auf die schlechten U-Werte der Außenwandbauteile sowie auf die undichte thermische Hülle zurückzuführen. Im Vergleich dazu werden in Abbildung 4 die benötigten spezifischen Hilfsenergien für die Gebäudetechnik der einzelnen Gebäude aufgezeigt. Dabei wird deutlich, dass ein niedriger Heizwärmebedarf mit einem höheren Aufwand an elektrischer Energie für Pumpen, Ventilatoren und Ähnlichem vergesellschaftet ist.

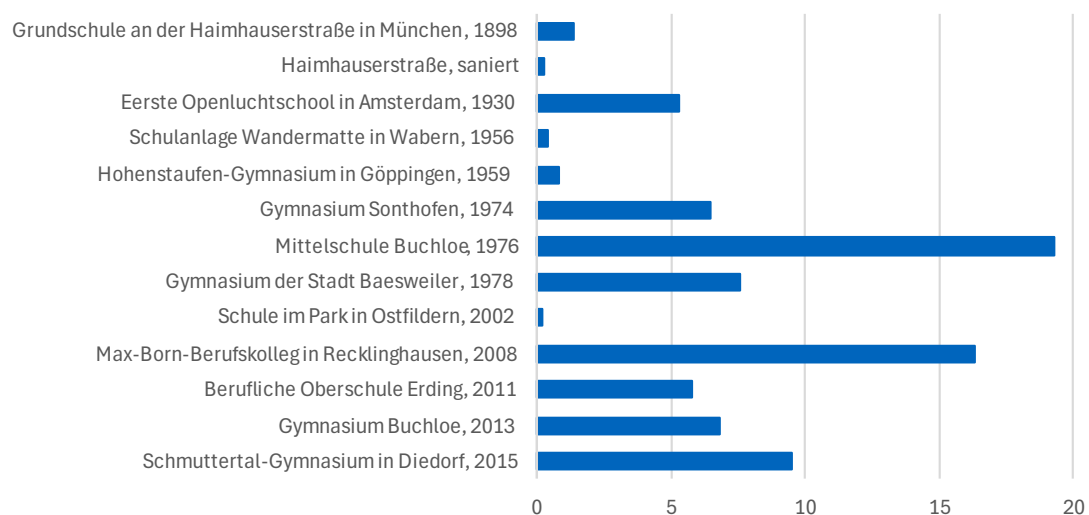


Abbildung 4 Spez. Hilfsenergiebedarf [kWh/m²*a], eigene Darstellung basierend auf [20]

Zusätzlich ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass die neuen Schulen in diesem Forschungsprojekt auf das Optimum eingeregelt sind und somit energieeffizient betrieben werden. Dies ist aufgrund des Performance Gaps bei Neubeuten jedoch oftmals nicht der Fall. [21]

Der größte Teil des Energiebedarfes in Schulen ist auf die Luftkonditionierung zurückzuführen, die Transmissionswärmeverluste spielen bei Neubauten und Komplettisanierungen mittlerweile nur noch eine nebensächliche Rolle. Aus diesen gewonnen Erkenntnissen lassen sich diese nachstehenden Leitlinien für eine energieeffiziente Schule ableiten: [20]

- Planung eines maximal möglichen Tageslichtquotienten und Ausführung eventuell notwendiger künstlicher Beleuchtung mit LED
- Maximierung des Anteils an erneuerbarer Wärmeversorgung und Einsparung von Treibhausgasemissionen im Betrieb
- Reduzierung der Druckverluste in Lüftungskanalnetzen durch großzügig dimensionierte Netze oder der Umstieg auf eine dezentrale Versorgung zur Verringerung der Hilfsenergie
- Minimierung des Kühlbedarfs durch optimalen sommerlichen Wärmeschutz

Im Anschluss an die fünf Methodikkapitel wird im Buch noch zusätzlich diskutiert, welches Maß an Technik für eine nachhaltige Schulsanierung am besten geeignet ist. Das optimale Maß der Technik kann nicht eindeutig definiert werden, da es weder falsch noch richtig gibt. Es kann jedoch aus Sicht der Aufenthaltsqualität gesagt werden, dass eine Diskrepanz zwischen den tatsächlich gemessenen und von den Nutzenden wahrgenommenen Rahmenbedingungen existiert. Lösungsansätze wären hierzu unter anderem, die Frischluftmengen der Lüftungsanlagen an kalten Tagen zu reduzieren und mit gezieltem Stoßlüften der schlechten Luftqualität entgegenzuwirken. Dies würde auch dem „Drang“ des Lüftens entgegenkommen, obwohl die tatsächliche gemessene Luftqualität in maschinell belüfteten Gebäuden sehr gut ist. In den Sommermonaten ist eine Nachaukühlung bei hoher thermischer Speichermasse empfehlenswert. Außerdem sollten die Außenluftqualität und die Lärmbelastung bei der Planung des Gebäudes von entscheidender Bedeutung sein. [20]

2.3 Grundlagen einer Ökobilanz

Zur Bewertung und Einordnung der Gebäudekonzepte und ihres ökologischen Potenzials, wird die Ökobilanz als anerkannter Stand der Technik verwendet. Diese soll grundsätzlich die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Produkte gewährleisten. In diesem Kapitel wird der Aufbau einer Lebenszyklusanalyse nach europäischem Standard systematisch erläutert. Diese muss nach der DIN EN ISO 14040 den nachstehenden sieben Grundsätze folgen: [15]

1. Lebenswegbetrachtung:

Betrachtung aller relevanten Lebenszyklusphasen zur Vermeidung von Verlagerungseffekten

2. Umweltbezogene Ausrichtung:

Fokus auf potenzielle Umweltaspekte und -wirkungen eines Produktsystems

3. Relativer Ansatz und funktionelle Einheit:

Eine Ökobilanz basiert auf einen relativen Ansatz, der durch die funktionelle Einheit definiert wird. Dabei wird festgelegt, was es zu untersuchen gilt und entsprechend werden alle Schritte auf die funktionelle Einheit bezogen.

4. Ganzheitlichkeit:

Zu Identifizierung von Wechselwirkungen innerhalb des Systems werden alle Attribute und Aspekte von menschlicher Gesundheit, Ressourcen und natürlicher Umwelt betrachtet.

5. Iterativer Ansatz:

Eine Ökobilanz folgt dem iterativen Ansatz, womit die Ganzheitlichkeit und Konsistenz der Bilanz gewährleistet werden kann.

6. Transparenz:

Für die Verständlichkeit eines komplexen Themas ist die Transparenz der Ökobilanz essenziell.

7. Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes:

Eine Ökobilanz basiert vorzugsweise auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und erst sekundär auf Ansätzen der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften oder internationalen Übereinkommen.

Aufbauend auf diesen Grundsätzen wird eine Ökobilanz in vier Phasen unterteilt:

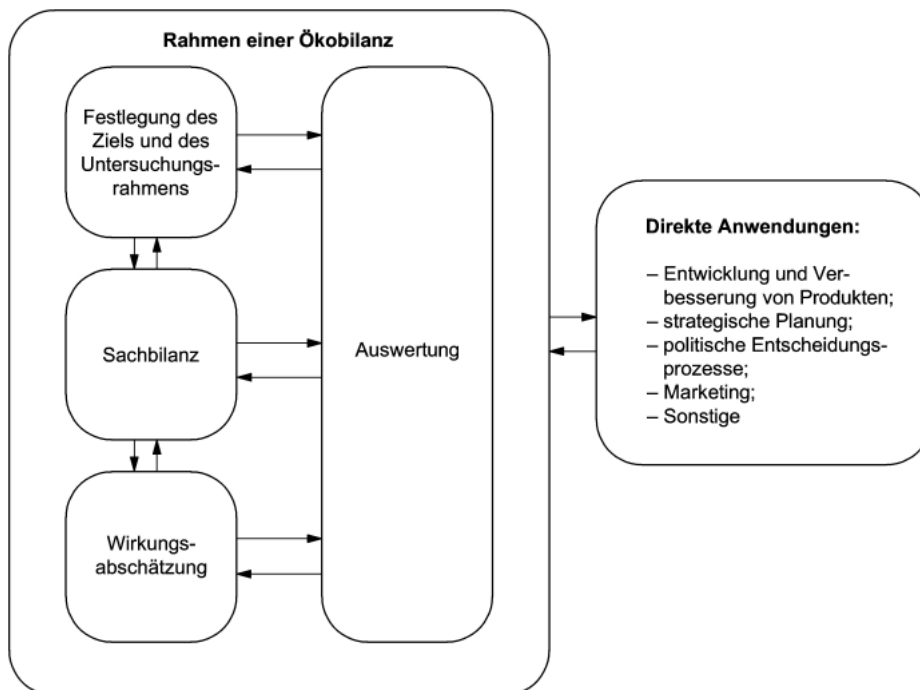


Abbildung 5 Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [15]

Die erste Phase ist die **Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**. Die Zieldefinition legt zunächst den Anwendungsbereich fest und beschreibt dabei sowohl das Ziel der Studie als auch den Untersuchungsfokus. Darüber hinaus soll das Erkenntnisinteresse definiert werden, wodurch sich die Adressaten und die Verwendung der Bilanz bestimmen. Der Untersuchungsrahmen legt das zu untersuchende Produktsystem und dessen Funktion, die Systemgrenze, die funktionelle Einheit, das Allokationsverfahren, die ausgewählten Wirkungskategorien, die Annahmen, die Anforderungen an die Daten und deren Qualität, die Einschränkungen, die Art der kritischen Prüfung sowie die Art und den Aufbau des für die Bilanz vorgesehenen Berichts fest. Dabei ist die funktionelle Einheit für die Quantifizierung der angegebenen Funktionen verantwortlich, wobei Bezug auf Input- und Outputflüsse genommen wird,

um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Ökobilanzen sicherzustellen. Die Systemgrenze beschreibt, welche Module in das System der jeweiligen Ökobilanz einbezogen werden müssen. Diese Grenze kann unter anderem geografisch, zeitlich oder auch phasenweise gezogen werden. [15]

Die **Sachbilanz** ist die zweite Phase der Ökobilanz und definiert als „Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“ [15]. Sie wird in drei größere Teilbereiche untergliedert: Der erste Teil ist die Datenerhebung, die unter anderem die Beschreibung der Prozessmodule, der Systemfließbilder, der Methoden zur Datenerhebung und Berechnung oder die Erstellung von Übersichtslisten beinhaltet. Dabei dürfen die Daten nach der DIN EN ISO 14044 in folgende Hauptgruppen kategorisiert werden, welche im weiteren Verlauf der Studie mit weiteren Unterkategorien zu versehen sind: [16]

- Energie-, Rohstoff-, Betriebsstoff-Inputs oder andere physikalische Inputs
- Produkte, Koppelprodukte und Abfall
- Emissionen in Wasser, Luft und Boden

Der nächste Schritt in der Sachbilanz ist die Datenberechnung, wobei zu Beginn alle Berechnungsverfahren und Annahmen genauestens und eindeutig erläutert werden. Um die Richtigkeit und eine hohe Datenqualität zu gewährleisten, muss eine Art Datenvalidierung, zum Beispiel in Form von Massen- oder Energiebilanzen, durchgeführt werden. Nach der Validierung müssen die Daten auf ein Prozessmodul und die funktionelle Einheit bezogen werden. Dies bedeutet, dass ein passender Fluss mit Bezug auf die quantitativen Input- und Outputdaten des Prozessmoduls berechnet wird. Der Tatsache geschuldet, dass eine Ökobilanz dem iterativen Ansatz verpflichtet ist, kann es sein, dass die Systemgrenzen der Studie nochmals angepasst werden müssen. Dies führt dazu, dass durch die Sensitivitätsanalyse teilweise Lebenswegabschnitte vernachlässigt oder auch neue Prozessmodule hinzugefügt werden können. Als letzter Schritt in der Sachbilanz muss eine Allokation der erhobenen Daten durchgeführt werden. [16]

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, ist die dritte Phase der Ökobilanz die **Wirkungsabschätzung**. Diese ist der „Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient“ [15]. Die Wirkungsabschätzungsphase besteht dabei aus drei verbindlichen Bestandteilen. Es müssen sinnvolle Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle ausgewählt werden. Mögliche Wirkungskategorien einer Ökobilanz können unter anderem das globale Erderwärmungspotential, das Versauerungspotential, die photochemische Oxidantienbildung, die Überdüngung, toxische Schädigung durch Feinstaub, der Ozonabbau sowie die eingesetzte Naturraum- und Ressourcenbeanspruchung sein [22]. Im Anschluss daran folgt die Klassifizierung, im Rahmen derer den Wirkungskategorien die Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden. Abschließend werden in der Charakterisierung die Wirkungsindikatorwerte berechnet. [16]

Der letzte Schritt der Ökobilanz ist die **Auswertung** der Ergebnisse der Studie. In der DIN EN ISO 14040 ist die Auswertung beschrieben als „Bestandteil der Ökobilanz, bei dem die Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung oder beide bezüglich des festgelegten Ziels und Untersuchungsrahmens beurteilt werden, um Schlussfolgerungen abzuleiten und Empfehlungen zu geben“ [15]. Die Auswertung ist erneut in drei Bausteine gegliedert. Ziel ist zunächst, durch die Strukturierung der Ergebnisse der Sachbilanz- und Wirkungsabschätzungsphasen signifikante Parameter zu identifizieren. Anschließend folgt die Beurteilung der Ergebnisse der Ökobilanzstudie, um Zuverlässigkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Dabei muss eine Vollständigkeitsprüfung, Sensitivitätsprüfung, sowie Konsistenzprüfung durchgeführt werden. Abschließend werden in der Studie noch die Schlussfolgerungen, Einschränkungen sowie Empfehlungen zu den gewonnenen Erkenntnissen erörtert. [16]

Auf Basis dieser Normen ist in der DIN EN 15978 die Ökobilanzierung von Gebäuden festgelegt. Dabei werden für den Bewertungsgegenstand ein funktionales Äquivalent, der Betrachtungszeitraum, die Systemgrenzen, die zu betrachtenden Lebenszyklusphasen sowie das Gebäudemodell beschrieben. Das Funktionale Äquivalent beschreibt dabei den zu untersuchenden Gegenstand der Bewertung hinsichtlich seiner materiellen und zeitabhängigen Eigenschaften. Konkret müssen der Typ des Gebäudes, maßgebliche technische und funktionale Anforderungen, Art und Struktur der Nutzung, sowie die geforderte Nutzungsdauer beschrieben werden. Alle Bewertungen werden auf einen gewissen Betrachtungszeitraum bezogen, welche auf Gebäudeebene als geforderte Nutzungsdauer anzusetzen ist. Wie in Abbildung 6 ersichtlich, wird gemäß der Norm ein Gebäude in vier übergeordnete Lebenszyklusphasen eingeteilt. Diese sind die Herstellungsphasen A 1-3, die Errichtungsphasen A 4-5, die Nutzungsphasen B 1-7, sowie die Entsorgungsphasen C 1-4. Zusätzlich werden dazu ergänzende Informationen außerhalb des Lebenszyklus in der Phase D aufgezeigt. Dabei handelt es sich um Potentiale für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling. [17]

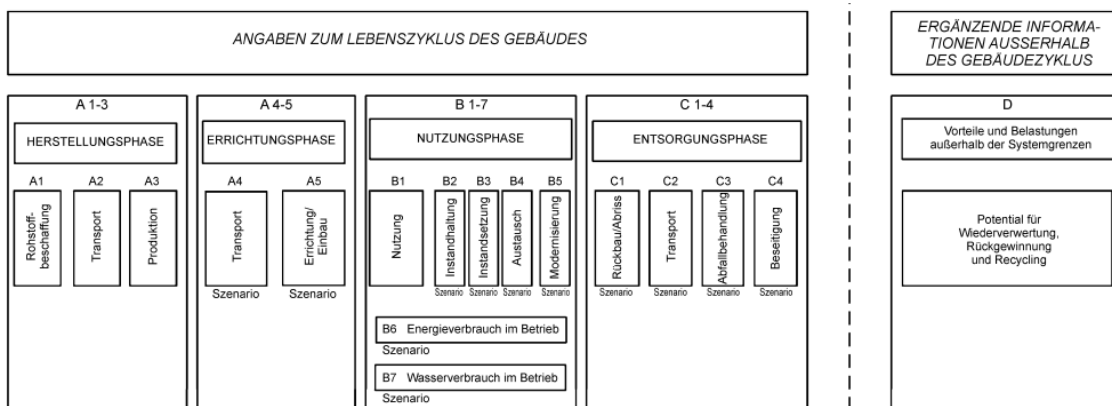


Abbildung 6 Modulare Informationen für die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes [17]

Abschließend wird für den Bewertungsgegenstand noch das Gebäudemodell beschrieben. Dabei wird das Gebäude in seine Bestandteile, in die dazugehörigen Prozesse wie Transporte, Bau und Instandhaltung, sowie die Nutzung von Energie und Wasser im Betrieb aufgeteilt. Zudem werden die physikalischen Eigenschaften des Gebäudes, wie zum Beispiel die Anzahl der Stockwerke, Geschosshöhen und Geschossflächen, aber auch Details zu projektspezifischen Bauteilen beschrieben. [17]

2.4 Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, sind die Grundsätze der Ökobilanz klar definiert. Daraus folgend ergeben sich detaillierte Leitfäden und Normen für die Durchführung der Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 300. Um allerdings das gesamte Bauwerk abzubilden, muss die Kostengruppe 400 ebenfalls bilanziert werden. Diese spielt zum aktuellen Zeitpunkt aufgrund ihrer Komplexität, sowie des benötigten Zeit- und Kostenaufwandes oft eine untergeordnete Rolle und müsste viel genauer untersucht werden. [23] Im Kontext dieser Thematik schafft der Sanierungsleitfaden der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen aus dem Jahr 2021 klare Rahmenbedingungen für die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse. In diesem Leitfaden wird das Gesamtgebäude ohne die Kostengruppe 500 (Außenanlagen) betrachtet. Außerdem zieht die DGNB die Systemgrenzen für die Ökobilanz über die im Rahmen von Kapitel 2.3 bereits beschriebenen Lebenszyklusphasen, wie aus Abbildung 7 ersichtlich [24]

LEBENSWEG-PHASEN	A 1-3			A 4-5		B 1-7							C 1-4				D	
	HERSTELLUNGS-PHASE			ERRICHTUNGS-PHASE		NUTZUNGSPHASE							ENDE DES LEBENS-ZYKLUS				VORTEILE UND BELASTUNGEN AUSSERHALB DER SYSTEM-GRENZE	
	ROHSTOFFBESCHAFFUNG	TRANSPORT	PRODUKTION	TRANSPORT	ERRICHTUNG / EINBAU	NUTZUNG 1	INSTANDHALTUNG 2	INSTANDSETZUNG	AUSTAUSCH 2	MODERNISIERUNG	ENERGIEVERBRAUCH IM BETRIEB	WASSERVERBRAUCH IM BETRIEB	RÜCKBAU / ABRISS	TRANSPORT	ABFALLVERWERTUNG	ENTSORGUNG	POTENTIAL FÜR WIEDERWERTUNG, RÜCKGEWINNUNG UND RECYCLING	
Module gemäß DIN EN 15978	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
Deklarierte Module	x	x	x						(x) 4		x				x	x	x	

Abbildung 7 Systemgrenzen der DGNB-Ökobilanz [24]

Für die Phasen A1-A3, B4-B5 und C3-C4 des Lebenszyklus werden in der Bilanz die grauen Emissionen ermittelt. Die grauen Emissionen sind die Emissionen, die zum einem direkt bei der Produktherstellung freigesetzt werden und zum anderen indirekt aus der für die Herstellung benötigten Stromerzeugung entstehen [25]. Die Emissionen der Lebenszyklusphase B6 werden als Nutzungsemissionen deklariert. Damit die Vergleichbarkeit zwischen den Kostengruppen 300 und 400 gewährleistet ist, wird auch die Systemgrenze der DGNB-Ökobilanz bei der Bilanzierung der Technischen Gebäudeausrüstung verwendet. Im Folgenden werden drei unterschiedliche Herangehensweisen vorgestellt, wie die Bilanzierung der Kostengruppe 400 gemäß dem aktuellen Stand der Technik und Forschung durchgeführt werden kann.

2.4.1 Vereinfachtes Rechenverfahren nach der DGNB

Der erste Ansatz ist das vereinfachte Rechenverfahren des Leitfadens der DGNB. Dieser beschreibt, dass für die Kostengruppen 300 und 400 in den Herstellungsphasen A1-A3 Massen für folgende Bauteile ermittelt werden müssen: [24]

1. Außen- und Kellerwände
2. Dächer
3. Geschossdecken
4. Bodenplatten
5. Fundamente
6. Innenwände und Türen
7. Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen, sowie Lüftungsgeräte
8. Sonstige gebäudetechnische Anlagen
9. Nutzerausstattung mit nennenswerten Energieverbrauch

In den Punkten sieben und acht soll nachfolgend die Massenermittlung weiter konkretisiert werden. Dabei werden für die HLSK-Gewerke nur die Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen sowie die zentralen Lüftungstechnischen Anlagen eingerechnet; Rohre, Leitungen, Kanäle und andere Anlagen sind nicht mit in die Ökobilanz einzubeziehen. Im Rahmen der sonstigen gebäudetechnischen Anlagen sollen PV-Module oder Solarkollektoren in die Gesamtberechnung eingehen. Sollten nicht genügend Datensätze vorhanden sein, ist dies entsprechend zu kennzeichnen und wird dennoch akzeptiert. Abschließend wird noch darauf hingewiesen, dass das Gesamtbilanzierungsergebnis der Herstellungsphase, Instandhaltung, Austausch und Lebensende noch mit dem Faktor 1,2 multipliziert werden muss, sollte die Massenermittlung anhand der vereinfachten Variante erfolgt sein. Grund dafür ist, dass in der Praxis die Massenermittlung der technischen Gebäudeausrüstung mittels des vereinfachten Verfahrens häufig nur in stark reduzierter Form oder gar nicht vorgenommen wird. Die Verrechnung eines Ausgleichsfaktors soll diesen Unsicherheiten in der Bilanzierung entgegenwirken. [24]

Für die Bilanzierung der Nutzungsemissionen in der Lebenszyklusphase B6 weist die DGNB beim Strombedarf auf die Verwendung des Erderwärmungspotentials des deutschen Strommixes hin. Wenn Eigenstrom vorhanden ist, soll dieser mit in die Bilanz einfließen. Für die Fernwärmeerzeugung sollen in erster Linie die Emissionssätze der jeweiligen regionalen Erzeuger verwendet werden. Das Wiedergewinnungspotential aus dem Modul D wird ebenfalls mit einem Faktor von 1,2 beaufschlagt. [24]

2.4.2 Rechenverfahren mit QNG-Sockelbetrag

Die zweite Herangehensweise wird ebenfalls in den Leitfäden der DGNB für Sanierung und Neubau beschrieben. Dabei handelt es sich um das detaillierte Rechenverfahren, welches speziell für die Kostengruppe 400 auf das Bilanzierungsverfahren des „Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude“ verweist. [24, 26] Das QNG ist eine Auszeichnung des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen die für das Erfüllen besonderer ökologischer, ökonomischer und soziokultureller Qualitäten von Gebäuden verliehen wird [27]. Das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude unterscheidet dabei die zwei Anforderungsniveaus „Plus“ und „Premium“,

basierend auf fünf zentralen Grundsäulen: In der ökologischen Qualität sind klare Grenzwerte für CO₂-Emissionen und Recyclingfähigkeit gefordert. Bei der ökonomischen Qualität wird der Fokus auf langfristige Wirtschaftlichkeit gelegt. Die soziokulturelle Qualität umfasst Standards für Gesundheit, Komfort und soziale Integration. In der technischen Qualität werden die technischen Systeme bewertet und abschließend wird bei der Prozessqualität eine detaillierte Dokumentation und nachhaltige Planung verlangt. Dabei ist das geforderte Minimum im Rahmen der jeweiligen Säulen bei „Premium“ höher als bei „Plus“. Insgesamt bietet das Anforderungsniveau Plus solide Nachhaltigkeitsstandards, während Premium ambitionierte Projekte mit maximaler Nachhaltigkeit auszeichnet. [28] Im Rahmen dieser Bilanzierungsmethode werden die unterschiedlich existierenden Gebäudetypologien in LCA-Klassen eingeteilt. Diese sind für Nichtwohngebäude wie folgt aufgeteilt: [26]

- LCA-Klasse 1: Verwaltungsgebäude, Schulen
- LCA-Klasse 2: Labor- und Veranstaltungsgebäude
- LCA-Klasse 3: Krankenhäuser
- LCA-Klasse 4: geschlossene Lagerräume und Produktionsstätten
- LCA-Klasse 5: Sporthallen

Da es sich bei dieser Arbeit um die Betrachtung eines Schulgebäudes handelt, liegt in der Erläuterung der Bilanzierungsmethode der Fokus auf der Klasse 1. Der Grundsatz des QNGs für die Lebenszyklusanalyse liegt darin, dass für die Kostengruppen 410 bis 450 ein flächenspezifischer klassenabhängiger Sockelbetrag angesetzt wird, der das GWP pro Quadratmeter Nettonraumfläche pro Jahr definiert. Das System ist dabei wieder auf die Phasen A1-A3, B4-B5, C3-C4 und D begrenzt. [29]

Modul	Wirkungsindikatoren	Einheit	Bezugsfläche	Anforderungsniveau	
				Plus	Premium
A-C	PEne	kWh/m ² *a	NRF	4,11	5,67
D	PEne	kWh/m ² *a	NRF	-2,06	-2,83
A-C	GWP	kg CO ₂ e/m ² *a	NRF	1,23	1,72
D	GWP	kg CO ₂ e/m ² *a	NRF	-0,62	-0,86

Abbildung 8 QNG Sockelbetrag KG 400 für LCA-Klasse 1 [29]

Die Werte setzen sich aus der Summe der grauen Emissionen der Steig-, Fallrohr- und Anschlussleitungen für alle Sanitärobjekte der KG 410, den Rohrleitungen und Verteilern für Raumheizflächen sowie den Raumheizflächen der KG 420, den Rohrleitungen, Verteilern und Anschlussleitungen der KG 430, den Niederspannungshauptverteilern, Kabeln, Leitungen und Unterverteilern der KG 440 sowie den Leerrohren, Kabeln, Leitungen, Personenruf-, Lichtruf-, Klingel-, Türsprech- und Türöffnungsanlagen der KG 450 zusammen [29]. Zusätzlich zu diesem Betrag werden für einzelne Großkomponenten, wie zum Beispiel Wärmeerzeuger und Lüfter mit Wärmerückgewinnung, gesonderte Bilanzierungsgrößen mittels Tabellenwerten berechnet [30]. Die Austauschzyklen für das Modul B4 werden unter Verwendung der erwarteten Lebensdauer (t_b) und des Betrachtungszeitraums (t_n) mit folgender Formel berechnet:

$$n_{\text{Austausch}} = \text{Aufrunden} \left(\frac{t_b}{t_n} \right) - 1$$

Dieser Austauschfaktor wird dann mit dem GWP des Gerätes multipliziert. [24] Beide Summanden werden abschließend für das finale Erderwärmungspotential der Kostengruppe 400 miteinander verrechnet.

2.4.3 Detaillierte Bilanzierungsmethodik nach Harter

Die Studie „Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion“ im Auftrag der DGNB, in welcher 50 DGNB-zertifizierte Gebäude untersucht wurden, kommt zu dem Ergebnis, dass „die Kostengruppe 400 nicht pauschal, sondern im Rahmen einer detaillierten Berechnung berücksichtigt werden“ sollte [23]. Dies hat den Grund, dass in den untersuchten Gebäuden lediglich vereinfachte Rechenverfahren für die Kostengruppe 400 angewendet wurden, wobei in der Regel jeweils mit höheren Ergebnissen zu rechnen ist. [31]

Auf Grundlage dieser Aussage wird in dem dritten hier vorgestellten Verfahren eine detaillierte Herangehensweise an die Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400 beschrieben. Dabei wird auf den Ansatz aus der Dissertation von Hannes Michel Harter mit dem Titel „Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Wohngebäudebestände auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle“ Bezug genommen [32]. Die oben genannte Dissertation betrachtet zwar in erster Linie Stadtmodelle, die Ergebnisse werden jedoch aus Gebäudemodellen hochskaliert. Der Ansatz auf Gebäudeebene lässt sich für die Module A1-A3, B4-B5 und C3-C4 in folgende Teilschritte gliedern: [32]

- Ermittlung des Endenergiebedarfs und der Heizlast
- Planung, Auslegung und Dimensionierung aller Komponenten und Verteilungen der Technischen Gebäudeausrüstung
- Zuweisung der spezifischen TGA-Produkt-Datensätze
- Ermittlung und Umrechnung der genauen Massen inklusive der Berücksichtigung der Lebensdauer der Produkte
- Verrechnung der Datensätze mit den Mengen
- Ergebnis der grauen Emissionen

Die TGA-Produkt-Datensätze werden dabei unter anderem aus der Ökobaudat [33] verwendet, einer vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen bereitgestellten Datenbank mit Datensätzen für die Ökobilanzierung von Bauwerken ist. Zusätzlich dazu werden Umwelt-Produktdeklarationen von Herstellern verwendet, da die Datensätze speziell für die TGA-Komponenten meist in der Datenbank nicht ausreichend vorhanden sind. Die Hersteller können die Erstellung dieser Datensätze aus Eigeninteresse und im Sinne der Nachhaltigkeitsbewertung für ihre Produkte veranlassen.

Besonders die Dimensionierung und Massenermittlung, sowie die Zuordnung der Datensätze ist dabei sehr umfangreich, weshalb sich diese Art der Herangehensweise an die Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400 noch nicht bewährt hat. Die Ergebnisse sollten jedoch deutlich präziser die realen Gegebenheiten widerspiegeln. [32]

3 Forschungsfrage und Methodik

Aufbauend auf dem Stand der Technik und Forschung sollen in diesem Kapitel die Forschungsfrage sowie die Methodik, die zur Lösung dieser Frage angewendet wird, erläutert werden. Zusammenfassend gibt es aktuell zwei übergeordnete Ansätze, wie die technische Gebäudeausrüstung in Schulen ausgeführt werden kann. Zum einen gibt es den stark normativ gestützten Ansatz, bei dem häufig sehr viel Technik verbaut wird. Dies hat den Vorteil, dass dadurch eine Steigerung der Energieeffizienz möglich ist und insgesamt optimalerweise weniger Gesamtenergie verbraucht wird. Auf der anderen Seite gibt es die Möglichkeit, die klassischen Konzepte zu hinterfragen und das Maß an Technisierung so klein wie möglich zu halten. Dies erfordert in der Praxis jedoch häufig deutlich mehr Planungsarbeit, damit diese Konzepte trotz der Abweichungen von den Normen zugelassen werden.

Bei der Betrachtung der aktuellen Ansätze für die Ökobilanzierung der Kostengruppe 400 fallen sehr starke Schwankungen im Detaillierungsgrad der Methodik auf. Diese reichen von der Erhebung durch pauschale Prozentsätze über flächenspezifische Sockelbeträge bis hin zu genau ermittelten Massen mit verknüpften Umweltproduktdeklarationen. Hinzukommend stehen als Grundlage noch die Fallbeispiele des Forschungsprojekts „BauKlima-Kommunal“ zur Verfügung, welche hinsichtlich des Baustandards und der damit verbundenen Technischen Gebäudeausrüstung als Leuchtturmprojekte der einzelnen Kommunen gelten.

Auf dieser Grundlage kann folgende Forschungsfrage definiert werden: **„Welche Bewertungsmethodik kann für die ökologische Analyse und Optimierung der Energie- und Gebäudetechnik bei Bestandssanierungen entwickelt und angewandt werden, um die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus zu quantifizieren und zielgerichtete Maßnahmen für Kommunen zu ermöglichen?“**

Daraus folgend ergeben sich drei Hypothesen, welche anhand dieser Forschungsfrage untersucht werden können:

- Die Menge an verbauter und installierter technischer Gebäudeausrüstung ist in vielen Fällen aufgrund statischer Systeme und Normen überdimensioniert und sollte mit Blick auf ihre ökologischen Auswirkungen reduziert werden.
- Die in der Praxis geläufigen Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Erderwärmungspotentials der Kostengruppe 400 liefern unzureichend präzise Ergebnisse.
- Die Einsparungen der Nutzungsemissionen durch effizientere Gebäudetechnik stehen nicht immer in sinnvoller Relation zu den dadurch ausgestoßenen grauen Emissionen.

Ziel soll sein, die oben genannten Hypothesen mittels der Ergebnisse aus dem Methodenteil in den Absätzen „Interpretation der Ergebnisse“ und „Handlungsempfehlung für kommunale Bauprojekte“ zu beantworten.

Zur Lösung der Forschungsfrage wird die in dieser Arbeit angewandte Methodik in vier Teilschritte untergliedert. Dabei liegt in allen Abschnitten die Auswertung und Analyse des Gymnasiums Goetheschule Hannover im Fokus. Als erster Schritt soll mittels einer Auswertungsmethode eine Bestandsanalyse der durchgeführten Sanierung erstellt werden. Dabei werden zum einen die Architekturmodelle, Energieausweise sowie die Ausführungsplanung der betrachteten Gewerke der Kostengruppe 400 untersucht. Die Kostengruppe 400 ist, wie in Kapitel 2.1 „Normative Vorgaben“ erläutert, in diverse Gewerke unterteilt. Teil dieser Arbeit sind aufgrund der Komplexität und des Umfangs die Kostengruppen 410 (Abwasser-, Wasser- und Gasanlagen), 420 (Wärmeversorgungsanlagen) und 430 (raumluftechnische Anlagen). Die Anderen Gewerke der Kostengruppe 400 werden nicht betrachtet.

Mit Hilfe der ersten Auswertung soll zunächst ein Überblick geschaffen und erste Optimierungsansätze identifiziert werden. Als nächster Schritt werden die grauen Emissionen der Technischen Gebäudeausrüstung ermittelt. Die beiden in den Abschnitten 2.4.1 und 2.4.2 beschriebenen Berechnungsverfahren der DGNB und des QNGs, welche aktuell als anerkannter Stand der Forschung gelten und in der Praxis umgesetzt werden, durchgeführt und miteinander verglichen [26]. Darauf folgend wird eine detailliertere Variante der Lebenszyklusanalyse mit dem Ansatz nach Harter durchgeführt [32].

Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden im dritten Teilschritt konkrete Maßnahmen und Potentiale ermittelt. Mit Hilfe des Simulationsprogrammes IDA ICE [34] werden die Daten hinterfragt und Alternativen entwickelt, welche anschließend auch in der Planung realisiert werden. Die entwickelte optimierte Lösung wird in einem letzten Schritt einer erneuten Ökobilanzierung im detaillierten Verfahren nach Harter unterzogen und mit den vorherigen Ergebnissen verglichen. Dabei sollen zudem auch Einblicke in die Veränderungen der Nutzungsemissionen von ausgewählten Verbrauchern gegeben werden. In Gesamtzusammenschau aller Ergebnisse sollen dann zu Beantwortung der Forschungsfrage Handlungsempfehlungen für die kommunale Ebene abgegeben werden.

4 Anwendung und Auswertung

In der Anwendung und Auswertung werden die oben beschriebenen Methoden Schritt für Schritt durchgeführt und die Ergebnisse präsentiert. Zum Verständnis sind besonders die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Unterkapiteln von Relevanz.

4.1 Bestandsanalyse des Gebäudes

Ziel der Bestandsanalyse ist es zunächst, den Gebäudekomplex eingehend zu erfassen, um darauf aufbauend gezielte Maßnahmen empfehlen zu können. Dabei wird untersucht, welche Bauarten und Technikkonzepte zur Anwendung kommen.

4.1.1 Energieausweis

Der erste Schritt in der Bewertung des Gebäudes war die Analyse des Bestandsgebäudes und der durchgeführten Sanierung und Erweiterung. Es handelt sich bei dem in dieser Masterarbeit untersuchten Beispielprojekt um die Goetheschule Hannover, welche sich circa drei Kilometer Luftlinie nordwestlich der Stadtmitte im Stadtbezirk Herrenhausen befindet. Der Schulbau wurde ursprünglich 1955 errichtet und bietet Platz für circa 100 Lehrkräfte und über 1100 Schüler:innen. [35] Der Neubau, die Erweiterung und die Sanierung erfolgten in den Jahren 2016 und 2020 in zwei Phasen. Im ersten Bauabschnitt wurde ein Klassenzimmerkomplex im Passivhausstandard errichtet. Im Anschluss wurden die Bestandsgebäude auf einen Standard von EnEV -30% modernisiert sowie neue Klassenzimmer hinzugefügt.

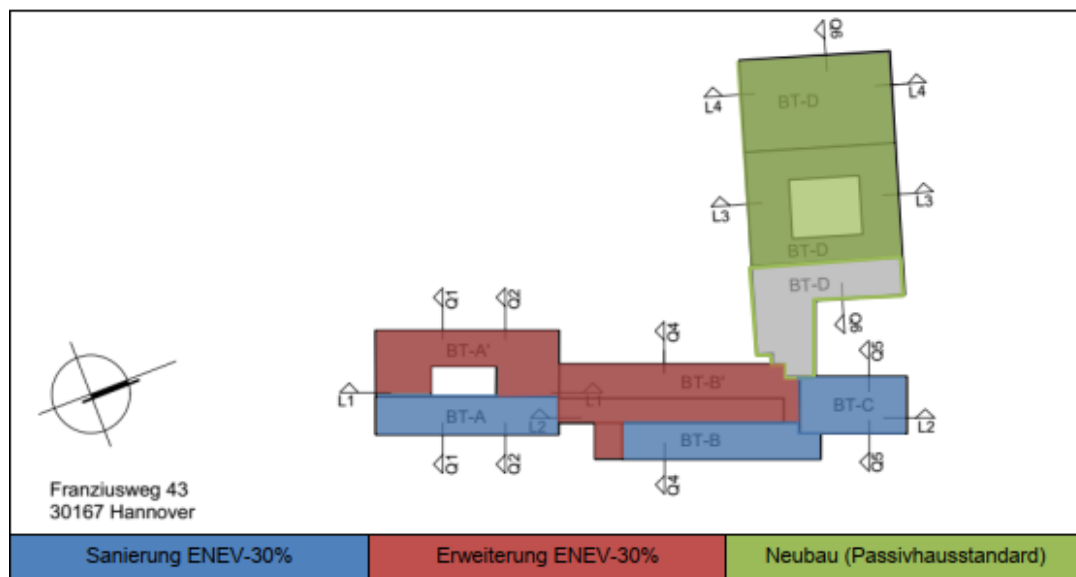


Abbildung 9 Lageplan Goetheschule aus dem Energieausweis [36]

Die Abbildung 9 zeigt die Aufteilung der Bauteile mit dem jeweiligen Baustandard. Der Gebäudekomplex setzt sich aus vier Gebäudeteilen zusammen. Bauteil A besteht zu jeweils 50 % aus sanierten und neugebauten Klassenzimmern und hat zwei Obergeschosse und ein Untergeschoss. Bauteil B ist zweigeschossig und hat im

Erdgeschoss neben großen Verkehrsflächen eine Mensa mit dazugehöriger Aufwärmküche. Im Obergeschoss befinden sich die Klassenzimmer für die naturwissenschaftlichen Fächer. Bauteil C beherbergt die energetisch sanierte Aula mit Bühne und Proberäume. Bauteil D setzt es sich aus neu errichteten Klassenzimmern Umkleiden und einer Turnhalle zusammen. Dieses Bauteil teilt sich in den grau hinterlegten ersten und grün markierten zweiten Bauabschnitt auf.

Bei der Betrachtung des Energieausweises vom 23.08.2022 [36] wurde deutlich, dass der Komplex in folgende 15 Zonen nach DIN-V 18599 [14] eingeteilt und auf dieser Basis der Primärenergiebedarf berechnet wurde.

Zone	1a-Klassen WRG	1a-Klassen Fenster	2a-Verkehr WRG	2b-Verkehr Fenster	3c-Lager/Tech WRG
Profil DIN V 18599	8. Klassen	8. Klassen	19. Verkehrsflächen	19. Verkehrsflächen	20. Lager/Technik
Lüftung	RLT mit WRG	Fensterlüftung	RLT mit WRG	Fensterlüftung	RLT mit WRG
Zone	3b-Lager/Tech Fenster	3c-Lager/Tech Abluft	3d-Lager/Tech Fenster/Absenk	3e-Lager/Tech Abluft/Absenk	4-Büro Fenster
Profil DIN V 18599	20. Lager/Technik	20. Lager/Technik	20. Lager/Technik	20. Lager/Technik	2. Gruppenbüro
Lüftung	Fensterlüftung	Abluftanlage	Fensterlüftung	Abluftanlage	Fensterlüftung
Zone	5-Sporthalle WRG	6-Sanitär WRG	7-Mensa WRG	8-Küche WRG	9-Aula WRG
Profil DIN V 18599	31. Turnhalle	16. Sanitär NIWO	12. Kantine	14. Küchen NIWO	9. Hörsaal/ Auditorium
Lüftung	RLT mit WRG	RLT mit WRG	RLT mit WRG	RLT mit WRG	RLT mit WRG

Abbildung 10 Zonenaufteilung Energieausweis nach DIN V 18599 im Bestand [36]

Der Bedarf liegt bei 35 kWh/m²*a und liegt damit 56% unter dem Wert des Referenzgebäudes des Gebäudeenergiegesetzes. Ebenso sind die U-Werte der opaken Bauteile 46 % und die der transparenten Außenbauteile um 47 % niedriger als die geforderten Grenzwerte. Für das Bauteil D wird der Passivhausstandard erreicht, wobei der Heizwärmebedarf mit 12,3 kWh/m²*a die Grenze um 18 % unterschreitet. Der elektrische Endenergiebedarf liegt bei 12,4 kWh/m²*a. Den Zonen wurden unterschiedliche Last- und Belegungsprofile gemäß der Norm zugewiesen sowie diverse Lüftungsarten, wie raumluftechnische Anlagen mit Wärmerückgewinnung im Passivhausbereich, aber auch natürliche Belüftung mittels Fensterlüftung. Für alle Zonen wurden die Ergebnisse der Luftdichtheitsmessung mittels Blower-Door-Verfahren angesetzt und ein pauschaler Wärmebrückenzuschlag von 0,05 W/m²K angenommen. Das Gebäude ist an das Fernwärmenetz Hannover angeschlossen, welches aktuell einen Primärenergiefaktor von 0,25 aufweist. Da dies bereits der zweite Energieausweis ist, muss in diesem Zusammenhang zusätzlich erwähnt werden, dass der erste Ausweis, der im Rahmen der Planung im Jahr 2016 erstellt wurde, noch mit dem damals gültigen Primärenergiefaktor von 0,19 berechnet wurde.

$$\text{Primärenergiebedarf } (Q_p) = \text{Endenergiebedarf } (Q_e) * \text{Primärenergiefaktor } (f_p)$$

Trotz eines Unterschiedes von circa 30 % zwischen den beiden Faktoren hat sich der Primärenergiebedarf des Gebäudes um zwei kWh/m²*a verringert, was lediglich auf die 10 % Verbesserung der U-Werte der opaken Bauteile zurückzuführen ist. Zusätzlich zur Heizung wird das Trinkwarmwasser auch zentral über die Fernwärme abgedeckt.

4.1.2 Ausführungsplanung der Firmen

Für die detailliertere Untersuchung der im Rahmen dieser Arbeit näher betrachteten Kostengruppen 410 bis 430 wurden die Ausführungspläne inklusive Versorgungsschemata der Planungsbüros analysiert. Hierfür wurde ein Onlinezugang der Stadt Hannover mit den Unterlagen auf Poolarserver [37] bereitgestellt. Im Folgenden wird jeweils näher auf die verschiedenen Gewerke eingegangen.

Abwasser, Wasser- und Gasanlagen

Die Abwasserversorgung der Gebäudeteile basiert zu großen Teilen auf einer Freispiegelentwässerung mittels 1-prozentigen Gefälles. Eine Ausnahme stellt das Untergeschoss des Gebäudeteils A dar, hier wird aufgrund der Unterschreitung der Rückstauenebene eine Hebeanlage benötigt, welche kein fäkalhaltiges Abwasser führt. Schmutz- und Regenwasser werden getrennt aus den Gebäuden geführt und an die Kanalisation angeschlossen. Einzel- und Sammelentlüftungsleitungen werden über das Dach verzogen.

Der Trinkwasserhausanschluss befindet sich unter dem Gebäudeteil B in DN 65 mit einem Spitzendurchfluss von 3,3 l/s ausgeführt und führt in den Anschlussraum im Erdgeschoss, wo der Verteiler mit Filter für die anderen Gebäudeteile steht. Es gibt zwei zentrale Trinkwarmwassererzeuger, welche aus einem Warmwasserspeicher und einer Frischwasserstation bestehen. Hierfür ist jeweils ein Wärmetauscher vorgesehen, welcher die Energie der Wärmeversorgung an das Trinkwassernetz übergibt. Von der Frischwasserstation gehen jeweils Trinkwarmwasserleitungen mit zugehöriger Zirkulationsleitung zu den Verbrauchern in der Küche, sowie zu den Duschen in den Umkleiden der Turnhalle. Die restlichen Verbraucher haben zu großen Teilen keinen Warmwasseranschluss, mit Ausnahme der Laborwaschbecken in den Klassenzimmern und den Waschtischen in den Behinderten-WCs. Dort wird dezentral mittels elektrischen Durchlauferhitzern Warmwasser erzeugt. Grundsätzlich werden die Trinkwasseranschlüsse in den einzelnen Gebäudeteilen bis zum entferntesten Verbraucher durchgeschleift, um stehendes Wasser zu vermeiden. Am Ende ist eine Hygienespülung mit Schmutzwasseranschluss installiert, um beispielsweise auch während der Ferien eine adäquate Trinkwasserhygiene zu gewährleisten.

Im Gebäudeteil B befindet sich zusätzlich noch ein zentraler Gasanschluss, welcher für die Chemie- und Physikräume benötigt wird. In diesen Räumen gibt es zusätzlich zu den Versuchsvitrinen noch Gasanschlüsse an den Tischen der Schüler:innen.

Wärmeversorgungsanlagen

Als zentrale Wärmeerzeugungsanlage gibt es im Untergeschoss von Bauteil A einen Fernwärmeanschluss in DN 125 an das städtische Fernwärmenetz. Dieser liefert laut Plan und Schema 700 kW Anschlussleistung bei 29,15 m³/h Fördermenge mit einer Vorlauftemperatur von 70°C und Rücklauftemperatur von 50°C. Das Wärmeverteilnetz ist nicht direkt an das Fernwärmenetz angebunden, sondern über eine Übergabestation entkoppelt. Eine zentrale Verteilerpumpe versorgt die einzelnen Heizkreise. Diese Heizkreise haben jeweils wieder eigene Pumpen, wodurch die zu überwindende Förderhöhe der jeweiligen Pumpen reduziert und eine einfachere Regelung und Steuerung gewährleistet wird. Im Gebäudekomplex befinden sich vier Arten von

Heizkreisen mit unterschiedlichen Spreizungen. Verbaut sind einerseits die statischen Heizungen der Gebäude, welche für die „klassische“ Wärmeversorgung mit Hilfe von Radiatoren und Konvektoren sorgen. Diese haben eine Vor- und Rücklauftemperatur von 70/50°C. Die zweite Art ist die dynamische Heizung, welche die Versorgung der Heizregister der raumluftechnischen Anlagen gewährleistet. Hier werden Temperaturen von 50/30°C benötigt. Als drittes gibt es noch die Versorgung der Frischwasserstationen, welche die größte Spreizung mit 70/25°C aufweist. Das vierte ist das Primärverteilnetz, welche alle Heizkreise miteinander verbindet. Die benötigte Anschlussleistung der einzelnen Verteilnetze liegt, wie in Abbildung 11 ersichtlich, bei circa 1,1 MW. Die Analyse der Schemata zeigt, dass bei der Dimensionierung des Primärnetzes die Trinkwarmwasserversorgung mit 70/25°C sowie die dynamische Heizung mit 50/30°C in die Berechnung des Massenstroms einfließen. In der Bilanz hingegen werden die Leistungen für die dynamische Heizung in den Bauteilen A und D komplett vernachlässigt. Zudem fehlen diese Netze auch in den Planungsunterlagen der Firma, obwohl sie für die Luftkonditionierung der Außenluft unabdingbar sind.

Wärmeverteilnetz	Vorlauf [°C]	Rücklauf [°C]	Leistung [kW]	Massenstrom Planung [m³/h]
Statische Heizung A	70	50	130	5,58
Dynamische Heizung A	50	30	52	-
Statische Heizung B	70	50	125	5,37
Dynamische Heizung B	50	30	174	3,74
Trinkwarmwasser B	70	25	140	2,67
Statische Heizung C	70	50	52	2,23
Trinkwarmwasser D	70	25	280	5,35
Statische Heizung D	70	50	98	4,21
Dynamische Heizung D	50	30	47	-
Summe			1098	29,16

Abbildung 11 Struktur und Parameter des Wärmeverteilnetzes im Bestand

Außerdem wurden die Beimischung der niedrigen Temperaturen für die raumluftechnischen Anlagen, sowie die große Spreizung der Trinkwarmwassererwärmung nicht berücksichtigt. Dies führt zu dem Ergebnis, dass die Rücklauftemperatur an der Übergabestation fälschlicherweise mit 50°C angegeben wird, obwohl diese durch Berechnung der Mischtemperatur (T_m) in Realität niedriger ist. Die jeweiligen Temperaturen werden im Volllastfall wie folgt in das Verhältnis gesetzt:

$$\begin{aligned}
 T_m &= \frac{T_{RL1} * \dot{m}_1 + T_{RL2} * \dot{m}_2 + \Delta T_{RL3} * \dot{m}_3}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3} \\
 &= \frac{50^\circ\text{C} * 17,4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 30^\circ\text{C} * 3,74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 25^\circ\text{C} * 8,02 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{29,16 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 40,56^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Die tatsächliche Rücklauftemperatur schwankt jedoch aufgrund der unterschiedlichen Lastfälle der Netze in der Praxis häufig stark, kann allerdings nur 50°C betragen, wenn lediglich die statische Heizung in Betrieb ist. Somit kann mit den zur Verfügung gestellten Planungsdokumenten behauptet werden, dass ein Planungsfehler vorliegt.

Raumluftechnische Anlagen

Die Kostengruppe 430 beinhaltet zwei übergeordnete Themen: Zum einen die Lüftung der Räume und zum anderen deren Klimatisierung. Erstens ist die Lüftung der Räume in diesem Fallbeispiel wiederum in zwei Kategorien unterteilt. Die Klassenzimmer in den Gebäudeteilen A und B werden via Fensterlüftung natürlich belüftet. Dies hat zur Folge, dass keine weit verzweigten Kanalnetze verbaut und keine Ventilatorenergie verbraucht wird. Allerdings findet so auch keine Wärmerückgewinnung statt, wodurch eine erhebliche Menge an thermischer Energie verloren geht. Der Rest der Schule wird maschinell belüftet. Dabei gibt es wieder verschiedene Varianten. Die Klassenzimmer im Passivhaus-Bauteil D werden mit maschinellen Einzelraumlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung versorgt. Diese sind nicht an das Wärmeversorgungsnetz angeschlossen und nutzen ein elektrisches Heizregister, um die Außenluft nach der Wärmerückgewinnung auf die gewünschte Innenraumtemperatur zu erhitzen. Für jedes dieser zwölf Kompaktlüftungsgeräte gibt es eine eigene Außen- und Fortluftanbindung. Im Bauteil B ist im zweiten Obergeschoss eine Lüftungszentrale verortet. Hier befinden sich neben dem Gerät für die WC- und Nebenräume noch zusätzliche Geräte für die Küche und die Mensa. Die Wärmerückgewinnung findet jeweils über einen Gegenstrom-Plattenwärmetauscher statt. Dies hat den Vorteil, dass keine Gerüche von der Abluft in die Zuluft übertragen werden können, da keine Vermischung der Luftströme stattfindet. Im Bauteil A befindet sich zudem noch eine reine Abluftanlage, die die Abluft der Verkehrsflächen aller Geschosse absaugt. In Kombination mit dem Abluftventilator für die Verkehrsflächen ist für die Zentralen in den Untergeschossen noch eine Umluftanlage für die Querlüftung installiert. Diese saugt Umluft aus den Verkehrsflächen im Erdgeschoss an und bläst sie als Frischluft im Untergeschoss wieder ein.

Der flächenbezogene Mindestaußenluftvolumenstrom für die Klassenzimmer, die Mensa und die Aula ist $2,5 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ und für die WC-Bereiche mit Wärmerückgewinnung $5,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Für die Küchen wird im Energieausweis ein Volumenstrom von $11250 \text{ m}^3/\text{h}$ angesetzt, in der Planung jedoch nur mit $9300 \text{ m}^3/\text{h}$ realisiert. Insgesamt gibt es acht zentrale Lüftungsgeräte, wobei sechs davon im Bauteil B lokalisiert sind.

Der zweite übergeordnete Punkt ist die Kostengruppe 434 mit der Kälteerzeugung für die Gebäude. Diese beschränkt sich dabei fast ausschließlich auf die Kühlung der Elektroverteilerräume, da hier die Abwärme der Datenserver abgeführt werden muss. Zusätzlich werden Küchenbereiche gekühlt. Da auch hier aufgrund der Abwärme der Küchengeräte sehr hohe interne Lasten zu erwarten sind, müssen für die Einhaltung der maximalen Temperaturen an ständigen Arbeitsplätzen nach ASR A3.5 effektive Maßnahmen ergriffen werden [9]. Dies wird in diesem Beispiel durch den Einsatz dezentraler Umluftkühlgeräte in Split-Bauweise realisiert, wobei sich das Quellmodul auf dem Dach befindet. Insgesamt sind sieben Kilowatt Kühlleistung im Gebäude verbaut, was im Verhältnis zu der Lüftung und der Wärmeerzeugung als marginal anzusehen ist.

Abschließend kann die Bestandsanalyse wie folgt zusammengefasst werden: Die Wärmeerzeugung mit Fernwärme wurde aus ökologischer Sicht bereits sinnvoll durchgeführt, auch wenn hier an einigen Stellen in der Planung Diskrepanzen auffallen. Zudem wird bereits in weiten Teilen des Gebäudes auf natürliche Lüftungskonzepte zurückgegriffen, was den Hilfsenergiebedarf senkt. Die Haustechnik der Gewerke Sanitär und Kälte ist auf ein Minimum reduziert.

4.2 Graue Emissionen der KG 400

Aufbauend auf den Ergebnissen der Bestandsanalyse wurde nachfolgend eine erste Einschätzung der Treibhausgasemissionen mit Hilfe von Ökobilanzen realisiert. Hierbei wurden nur die Aspekte der Kostengruppe 400 berücksichtigt und beleuchtet, welche Auswirkungen diese auf die Umwelt haben. Grundsätzlich geht es im ersten Schritt um die Ermittlung der grauen Emissionen der technischen Anlagen. Die Ergebnisse der Bilanz sind auf eine Systemlebensdauer von 50 Jahren berechnet und es wurden ausschließlich die Kostengruppen 410 bis 430 betrachtet. Die Nettoraumflächen der einzelnen Bauteile beträgt in Summe 15170 m² und setzt sich wie folgt zusammen:

Gebäudeteil:	A	B	C	D
UG	636,17 m ²	-	69,78 m ²	-
EG	1540,78 m ²	1806,78 m ²	427,94 m ²	3248,88 m ²
1.OG	1543,62 m ²	1606,24 m ²	587,38 m ²	1995,38 m ²
2.OG	1544,35 m ²	162,88 m ²	-	-
Gesamt:	5264,92 m ²	3575,90 m ²	1085,10 m ²	5244,26 m ²

Abbildung 12 Nettoraumflächen Goetheschule

Vor dieser Arbeit wurde bereits vom Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen eine Ökobilanz der Kostengruppe 300 für alle Bauteile mit dem Programm One Click LCA [38] auf Grundlage der Datensätze gemäß EN 15804+A2 für die Wirkungskategorie „Erderwärmungspotential“ erstellt. Es wurden die Module A1-A3, B4-B5, C3-C4 sowie das Potential für Rückgewinnung aus Modul D betrachtet. Aus den Ergebnissen der Ökobilanz der Kostengruppe 300 wurde der erste Bauabschnitt des Gebäudeteiles D zusätzlich herausgenommen, da für diesen Bereich über alle Gewerke hinweg keine Ausführungsplanungsunterlagen vorlagen und somit keine realistische Massenbilanz im späteren Verlauf ermittelt werden konnte. Der Anteil des ersten Bauteils am Bauteil D liegt bei circa 29 %, weshalb sich die Fläche auf **3717 m²** reduziert und bereits mit einem Faktor von 0,71 in nachfolgende Emissionen einbezogen wurde.

Modul	A [kg CO ₂ e]	B [kg CO ₂ e]	C [kg CO ₂ e]	D [kg CO ₂ e]
A1-A3	1.810.000	1.470.000	213.000	1.729.229
B4-B5	163.000	152.000	43.400	147.410
C3-C4	184.000	166.000	41.700	263.637
D	-235.000	-212.000	-57.100	-231.745

Abbildung 13 Ergebnisse Lebenszyklusanalyse KG 300

Diese Ergebnisse wurden im Verlauf der Arbeit als Referenzwerte weiterverwendet, um gewonnene Erkenntnisse in Relation setzen zu können. In den folgenden Kapiteln wurden diverse Ansätze für eine Ökobilanz, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, angewandt.

4.2.1 Lebenszyklusanalyse nach DGNB

Im ersten Schritt wurden die beiden Ansätze der DGNB für die Bilanzierung der Kostengruppe 400 herangezogen. Diese sind wie bereits im Stand der Forschung

erläutert, einerseits das vereinfachte Rechenverfahren und andererseits das detailliertere in Anlehnung an das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude.

Das vereinfachte Verfahren sieht vor, dass am Ende der Lebenszyklusanalyse eines Gebäudes für die einzelnen Komponenten ein Faktor von 1,2 hinzugerechnet wird, um eine grobe Schätzung der Emissionen zu erhalten. Im Fallbeispiel wurde die Bilanz der KG 300 sehr ausführlich durchgeführt, jedoch keine Erzeugeranlagen berücksichtigt, weshalb der Faktor in diesem Fall ausschließlich der Kostengruppe 400 zuzuordnen ist. Da dieser Faktor sich auf die gesamte Kostengruppe 400 bezieht, muss hierbei wie bereits angeschnitten ein Faktor festgelegt werden, welcher rein die Massen der Kostengruppen 410 bis 430 widerspiegelt. Nach Auswertung verschiedener Veröffentlichungen, wie beispielhaft die Dissertation von Markus Weißenberger [39] und der eigenen praktischen Erfahrung wurden für die grauen Emissionen der TGA die in Abbildung 14 angegebenen Werte angenommen. [40–42]

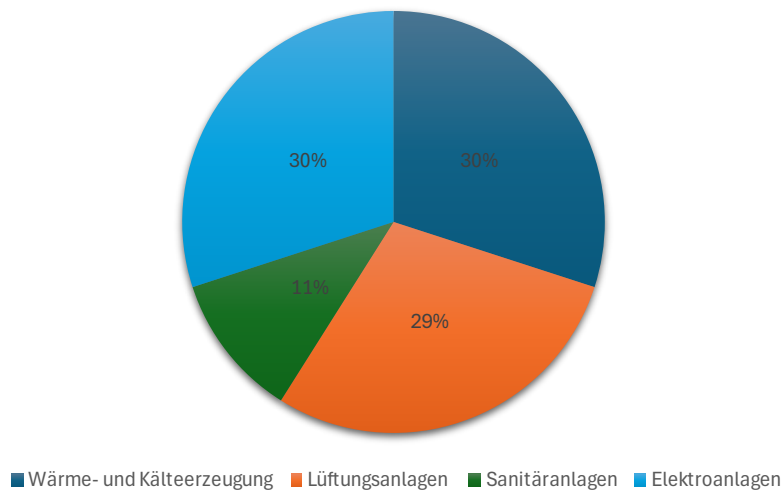


Abbildung 14 Verteilung der grauen Emissionen der KG 400, eigene Darstellung basierend auf [39-42]

Nachdem Elektroanlagen im Schnitt mit bis zu 30% in die Bilanz einfließen, wurde dieser Anteil entsprechend in allen pauschalisierten Berechnungen abgezogen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Bilanzierungsansätzen zu gewährleisten. Für das vereinfachte Rechenverfahren bedeutet das, dass der ursprünglich 20-prozentige Aufschlag der Treibhausgasemissionen auf die Ergebnisse der KG 300 auf 14 Prozent reduziert wurde. Konkret entstehen für die technischen Anlagen im Fallbeispiel zusätzlich zu den 6383 t CO₂e nochmal **894 t CO₂e** für die Module A1-A3, B4-B5, C3-C4. Das Rückgewinnungspotential in Modul D erhöht sich um **-103 t CO₂e** auf -839 t CO₂e.

Das detaillierte Verfahren der DGNB beschreibt die Methode des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude und den damit verbundenen Sockelbetrag für die Kostengruppe 400. Wie in Kapitel 2.4 erläutert, wird für jeden Quadratmeter Nettonutzwfläche ein bestimmter flächenspezifischer Emissionswert pro Jahr angesetzt und mit dem Betrachtungszeitraum multipliziert. Hierbei gibt es jeweils zwei Anforderungsniveaus für die unterschiedlichen LCA-Klassen. Im Fallbeispiel war der Betrachtungszeitraum 50 Jahre und es fand aufgrund des Schulbaus die LCA-Klasse K1 Anwendung [43]. Außerdem musste durch den Abzug der Elektroanlagen der Sockelbetrag erneut mit

dem Faktor von 0,7 verrechnet werden. Modul A-C ist in der Abbildung die Abkürzung für die Module A1-A3, B4-B5, C3-C4.

Modul	Wirkungsindikatoren	Einheit	Bezugsfläche	Anforderungsniveau	
				Plus	Premium
A-C	PEne	kWh/m ² *a	NRF	2,88	3,97
D1	PEne	kWh/m ² *a	NRF	-1,44	-1,98
A-C	GWP	kg CO ₂ e/m ² *a	NRF	0,86	1,20
D1	GWP	kg CO ₂ e/m ² *a	NRF	-0,43	-0,60

Abbildung 15 Sockelbetrag der QNG für die KG410-430 mit Faktor 0,7

Zusätzlich zu dem flächenspezifischen Wert wurden noch extra Bilanzgrößen auf Basis der Einzelerfassung addiert. Dabei handelte es sich zumeist um Großkomponenten, die mit Hilfe der Tabelle Ökobilanzierung - Rechenwerte 2023 [30] ermittelt wurden. In dieser Tabelle sind sieben Datensätze für die hier relevanten Kostengruppen aufgeführt, die entsprechend in die Bilanz einbezogen wurden. Die Ermittlung der Massen erfolgte über die Ausführungspläne und die darin enthaltenen Großkomponenten. Für die Fernwärmeübergabestation wurden aufgrund der 700 kW installierten Anschlussleistung 700 kg berücksichtigt. Für die dezentralen Lüfter ohne Wärmerückgewinnung in Wand und Decke gibt es nur einen Datensatz, welcher sich auf 60 m³/h beschränkt. Da im Bauteil B, vorrangig in den naturwissenschaftlichen Klassenzimmern, mehrere dieser Ventilatoren mit deutlich höherem Volumenstrom verbaut sind, wurde zur Massenermittlung die Gesamtluftmenge durch 60 m³/h geteilt. Der gleiche Ansatz wurde auch bei den dezentralen Lüftern mit Wärmerückgewinnung verfolgt, wobei der Fokus auf den Lüftungsgeräten der Klassenzimmer im Passivhausbauteil lag. Der Abluftventilator auf dem Dach A wurde als einziger zentraler Lüfter ohne Wärmerückgewinnung mit einer Luftmenge bis 5000 m³/h berücksichtigt. Konkret bedeutet das, dass dieser Ventilator bei einer tatsächlich abgeführten Luftmenge von 4281 m³/h 0,86-mal in die Bilanz eingerechnet wurde. Für die Lüfter mit Wärmerückgewinnung gibt es Varianten mit 1000 und 5000 m³/h. Den jeweiligen Lüftern wurden entsprechend die Geräte aus den Zentralen zugeordnet, welche näher an den tatsächlich gemessenen Luftmengen liegen. Jeder Lüfter wurde letztlich als Verhältnis aus tatsächlicher Luftmenge in die Bilanz einbezogen. Die Klimageräte setzten sich aus den Verdampfern zusammen mit der jeweiligen installierten Leistung pro Gebäude. Als weiterer Faktor wurden durch die „Reference Service Life“ die Austauschzyklen festgelegt und dann in die Bilanz einkalkuliert. Die erwartete Lebensdauer der Komponenten wurden mit den Datensätzen aus der Ökobaudat ermittelt. [33]

Gebäudeteil	RSL [a]	Anzahl A	Anzahl B	Anzahl C	Anzahl D
Übergabestation Fernwärme 1 kg/kW	25	700			
Lüfter dezentral 60 m ³ /h	12		98,3		
Lüfter dezentral mit WRG 60 m ³ /h	20				132,5
Lüfter zentral 5000 m ³ /h	12	0,86			
Lüfter zentral mit WRG 1000 m ³ /h	20		1,4		
Lüfter zentral mit WRG 5000 m ³ /h	20	0,98	3,39	1,20	1,28
Klimagerät (Direktverdampfer) (pro 1 kW)	15	3,3	1,5	0,25	1,8

Abbildung 16 Massenermittlung der Großkomponenten

Im Anschluss daran wurde der flächenspezifische Sockelbetrag mit der Nettonraumfläche multipliziert und mit den Ergebnissen der Großkomponenten verrechnet. Dabei wurden, wie in Abbildung 17 ersichtlich, die Module für beide Anforderungsniveaus berechnet und mit den Ergebnissen der Bilanz der Kostengruppe 300 verglichen.

KG	Wirkungsindikator	Einheit	Module A1-3; B4-B5; C3-C4	Zuschlag auf KG 300
410-430 Plus	GWP	kg CO ₂ e	642.721	10,07%
410-430 Premium	GWP	kg CO ₂ e	876.690	13,73%
KG	Wirkungsindikator	Einheit	Modul D	Zuschlag auf KG 300
410-430 Plus	GWP	kg CO ₂ e	-323.320	43,94%
410-430 Premium	GWP	kg CO ₂ e	-437.917	59,51%

Abbildung 17 Ergebnisse LCA mit Sockelbetrag nach dem QNG

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die Großkomponenten mit 55410 kg CO₂e in beide Bilanzen eingegangen sind. Zusammenfassend zeigen sowohl das vereinfachte als auch das detailliertere Verfahren, so wie sie von der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen in den Leitfäden festgehalten sind, mit 14 % bzw. 13,73 % in der „Premium“-Variante nahezu identische Ergebnisse. Dies wirft die Frage auf, inwieweit das Verfahren nach dem QNG tatsächlich realistische Resultate liefern kann, da weder der Fixbetrag noch der Sockelbetrag klare Einsicht in die Zusammensetzung der zugrundeliegenden Berechnungen erlauben.

4.2.2 Detaillierte Ökobilanz nach Harter

Im nächsten Absatz soll durch eine detaillierte Lebenszyklusanalyse, basierend auf der Dissertation von Hannes Michel Harter und dessen Methodik für die Kostengruppe 400, ein näherer Einblick in die Zusammensetzung der grauen Emissionen gegeben werden. Zu diesem Zweck musste für die durchgeführte Sanierung in den Lebenszyklusphasen A1-A3, B4-B5, C3-C4, sowie für Modul D eine konkrete Massenermittlung der Gewerke Sanitär, Heizung, Kälte und Lüftung durchgeführt werden. Da das Bauvorhaben bereits abgeschlossen ist, sollte dies theoretisch am einfachsten über die Leistungsverzeichnisse und die zugehörigen Mengen möglich sein. Bei der Analyse der Bestandsunterlagen wurde jedoch deutlich, dass nur Ausschreibungsunterlagen für die Kostengruppe 300 vorhanden sind, sodass ein alternativer Ansatz verfolgt werden musste. Die nächstliegende Lösung wäre es gewesen, einen Massenauszug aus den CAD-Modellen zu exportieren, wie es in der Praxis in Planungsbüros für die Befüllung der Leistungsverzeichnisse üblicherweise erfolgt. Dies war jedoch ebenfalls nicht möglich, da beispielsweise die Ausführungsplanung des Heizungsgewerkes eine reine zweidimensionale Strichplanung ist, weshalb keine Dimensionen für die Rohre hinterlegt sind. Zudem wurden die 3D-CAD-Pläne der Lüftungsanlage in einem

unbekannten Programm erstellt, das keine Datenmasken mit Attributen enthält, sodass eine sinnvolle Auswertung der Daten nicht möglich war.

Der dritte Lösungsansatz bestand in der erneuten Zeichnung der gesamten Planung der einzelnen Gewerke in einem Dimensionierungsprogramm, welches zusätzlich zu den Massen auch eine Rohr- und Kanaldimensionierung sowie Druckverluste der einzelnen Stränge ermittelt. Diese Daten könnten im Anschluss an die Lebenszyklusanalyse bei der Analyse und Optimierung der gebäudetechnischen Anlagen verwendet werden. Es wurde das Programm mh-software verwendet [44].

3D-Modelle der Kostengruppen

Im ersten Schritt wurde die Gebäudestruktur definiert. Hierfür wurden die Anzahl der Stockwerke, die lichte Raumhöhe, die Höhe des Fußbodenaufbau, sowie Deckenstärke hinterlegt. Im Anschluss mussten die Architekturgrundrisse der Bauteile eingepflegt werden. Nun konnte mit der Anlage der ersten Rohrsysteme gestartet werden.

Im Fall der Heizung wurde zuerst ein Rohr mit Durchmesser, Wandstärken, Wärmeleitfähigkeit und Gewicht pro Meter definiert, dasselbe wurde für die Dämmung umgesetzt. Im konkreten Fall wurden Gewinderohre aus Stahl nach DIN EN 10255 [45] gewählt. Die Dämmung wurde mit Steinwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,035 \text{ W/(m}^*\text{K)}$ und einer Dämmstärkencicke nach dem Gebäudeenergiegesetz ausgeführt. Eine solche Dämmung hat im Innenbereich bis zu einen Außendurchmesser von 100mm zumeist die gleiche Dicke wie der Durchmesser des zu dämmenden Rohrs. [8] In diesem Projekt gibt es in Bezug auf die Heizung, wie im Kapitel 4.1.2 bereits erwähnt, vier unterschiedliche Verteilnetze. Die statische für die Wärmeversorgung der Zonen, die dynamische für die Heizregister, die Trinkwarmwassererwärmung und das Primärnetz, welches alle Häuser und Netze miteinander verbindet. Die Aufteilung erfolgte aus dem Grund, dass für jeden Heizkreis eigene Pumpen installiert sind, welche zur Bestimmung der benötigten Förderhöhe im Programm getrennt werden müssen. Mit den ausgewählten Rohrmaterialien konnte schließlich das Rohrsystem mit Vor- und Rücklauf gezeichnet werden. Da in diesem Schritt das Bestandsnetz abgebildet werden sollte, wurden die Rohre auf die Dimensionen fixiert, wie in den PDF-Plänen der Planungsbüros ersichtlich. In den einzelnen Zimmern wurden beim statischen System die Verbraucher in Form von Radiatoren, Konvektoren, Deckenstrahlplatten und Deckenluftherhitzern angeschlossen. Die zur Deckung der Heizlast benötigten Massenströme wurden dabei hinterlegt. Die einzelnen Teilstränge wurden mit druckunabhängigen Regelventilen und Absperrungen in Form von Ventilen und Klappen ausgestattet. Für die Heizregister und den Pufferspeicher wurden Verbraucher mit der jeweilig hinterlegten Leistung hinzugefügt.

Das Modell für Lüftung setzt sich aus den einzelnen Geräten zusammen und ist aufgrund der vielen dezentralen Anlagen teilweise wesentlich feingliederiger aufgebaut. Jeder Ventilator erhielt ein eignes Netz mit damit verbundenem Startobjekt. Den Kanälen und Wickelfalzrohren wurden erneut Materialien, in diesem Fall verzinktes Stahlblech, zugewiesen, bevor mit dem Zeichnen begonnen wurde. Bezüglich der Dämmung erfolgte eine etwas komplexere Aufgliederung als bei der Heizung: Die Kanäle der Außen- und Fortluft wurden mit 19 mm synthetischem Kautschuk zur Verhinderung von Tauwasserbildung gedämmt. Für die vorkonditionierte Zu- und Abluft wurde zur Vorbeugung von Wärmeverlusten in Schächten, Technikzentralen und

Geschossebenen eine 30 mm dicke alukaschierte Mineralwolle befestigt. Dabei gibt es an außenluftberührten Kanälen sowie bei der Versorgung der Klassenzimmer im Bauteil D Abweichungen mit größeren Dämmschichtdicken. Auslässe wurden in Form von Gittern und Tellerventilen mit der geforderten Luftmenge gesetzt. Der letzte Schritt war die Implementierung von Komponenten, wie Volumenstromreglern, Brandschutzklappen und Schalldämpfern.

Das Gewerk Sanitär wurde in zwei Netze aufgeteilt: Auf der einen Seite in das Trinkwasser-, auf der anderen das Abwassernetz. Die Trinkwasserleitungen wurden dabei als Mapress Edelstahlrohre mit Muffen für den Anschluss ausgeführt. Die Rohre für kaltes Wasser wurden zur Verhinderung von Tauwasserbildung und zu hohen Temperaturen mit 13 mm synthetischen Kautschuk isoliert. Für die Trinkwarmwasser- und Zirkulationsleitungen wurde alukaschierte Steinwolle nach Vorgabe des GEGs verwendet. Als Verbraucher wurden in den Toilettenräumen Unterputzspülkästen für WCs und Urinale, sowie Waschtische geplant. Diese besitzen jeweils nur einen Kaltwasseranschluss, mit der Ausnahme in den Behinderten-WCs – hier wurden elektrische Durchlauferhitzer platziert. Zusätzlich wurden noch in den naturwissenschaftlichen Klassenzimmern für die Laborausgussbecken und in den Sportumkleiden Wasseranschlüsse platziert. Die Gasleitungen wurden ebenfalls in Edelstahl ausgeführt. Das Schmutz- und Regenwassernetz wurde im Gefälle verzogen, in 45 oder 90 Grad Bögen zusammengeschlossen und zumeist unterirdisch aus den Gebäuden geführt. Die Rohre bestehen aus Grauguss mit der Bezeichnung SML. Alle Verbraucher, bis auf die Augenduschen in den Chemie- und Physikräumen, haben einen Schmutzwasseranschluss. Außerdem wurden noch Bodenabläufe in den Sanitärbereichen, sowie Lüftungszentralen und Lager verbaut. Das Regenwasser wird auf dem Dach mit Abläufen gesammelt. Die Systemgrenze ist hierbei die Gebäudekante, der Rest wird der Kostengruppe 500 (Außenanlagen) zugeschrieben.

Abschließend wurde für jedes einzelne Netz ein IFC-Modell erstellt und in das folgende Gesamtmodell der Kostengruppen 410 bis 430 eingepflegt.

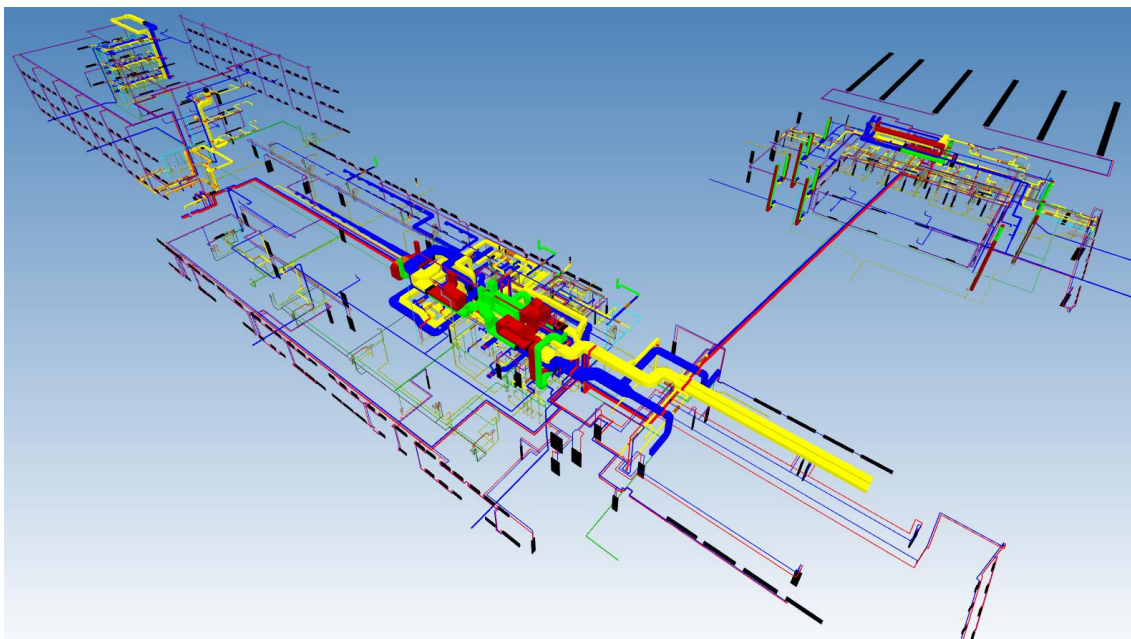


Abbildung 18 IFC-Gesamtmodell Heizung, Lüftung und Sanitär

Massenermittlung

Die Fertigstellung der 3D-Modelle ergab den Vorteil, dass durch die hinterlegten Gewichte der Rohre, die Dichte des verzinkten Stahlblechs und die Dicken der Dämmungen konkrete Massenauszüge für die jeweiligen Teilnetze erzeugt werden konnten. Als Beispiel ist in Abbildung 19 der Massenauszug für die Stahlrohre der statischen Heizung im Bauteil B dargestellt. Zusätzlich werden automatisch Fittings, wie beispielhaft Bögen, in diesen Auszügen ausgelesen.

Rohrmaterial Zusammenstellung

Hersteller: ST Stahlrohre

Material: GB3 DINEN10255_Gewinderohr_Bauart3

DN	Nennweite		Oberfläche	Gewicht	Länge	Volumen	Bögen
	Aussen	Innen					
[mm]	[mm]	[mm]	[m²]	[kg]	[m]	[m³]	Anzahl
15	21,3	16,0	68,74	1243,0	1027,3	0,207	805
20	26,9	21,6	12,28	226,68	145,30	0,053	63
25	33,7	27,2	8,47	192,75	79,98	0,046	7
32	42,4	35,9	17,91	415,55	134,48	0,136	21
40	48,3	41,8	9,96	233,60	65,62	0,090	27
50	60,3	53,0	3,97	105,49	20,97	0,046	10
Summe			121,33	2417,12	1473,68	0,579	933
Total			121,33	2417,12	1473,68	0,579	933

Abbildung 19 Massenauszug Rohrmaterial Statische Heizung B aus mh-software [44]

Anhand der erstellten Zeichnungen konnten also alle Massen für Rohre, Kanäle und Dämmungen der Gewerke Heizung, Lüftung, Trink- und Abwasser für die detailliertere Ökobilanz so präzise wie möglich ermittelt werden. Die Gasversorgung sowie die Kälteanlagen wurden aufgrund des geringen Umfangs mittels Aufmaßes aus den einzelnen Planungsunterlagen gemessen. In den folgenden Absätzen werden die in dieser Bilanz berücksichtigten Massen für die jeweiligen Gewerke im Detail erläutert.

Für die Bilanz musste zunächst die genaue Anzahl an Komponenten ermittelt werden. Bei der Betrachtung des Gewerkes Heizung konnten beispielsweise die Anzahl der Ventile, Absperrungen, sowie Umwälzpumpen mit ihren jeweiligen Abmessungen konkret aus den Auszügen bestimmt werden. Die Massen für die Heizkörper mussten jedoch erst berechnet werden, da die reine Anzahl für die Bilanzierung nicht aussagekräftig genug ist. Das Gewicht der Heizkörper, Konvektoren und anderer Verbraucher wurde mittels der Auslegungsdatenblätter von den Herstellern in Kilogramm bestimmt. In diesen Datenblättern sind für alle Abmessungen Wert in Form von Kilogramm pro Meter hinterlegt, die anschließend mit ihrer Länge multipliziert wurden. Ein weiterer Schritt war die Ermittlung der Brandschutzdurchführungen für Decken und Wände. Dabei handelt es sich um Dämmschalen, welche eine Feuerausbreitung zwischen Brandabschnitten für bis zu 90 Minuten verhindern. Die Anzahl wurde den Planunterlagen entnommen und mit einer Länge von 30 cm verrechnet, um eine Gesamtlänge zu ermitteln. Außerdem wurden in der Massenermittlung Komponenten wie Rückschlagklappen, Schmutzfänger, Wärmemengenzähler, aber auch Membranausdehnungsgefäße und Lufttöpfe zur Entgasung des Netztes berücksichtigt. In der Abbildung 20 sind beispielhaft für zehn maßgebende Heizungskomponenten die tatsächlich verbauten Massen aufgelistet.

Komponente	Anzahl	Einheit	Komponente	Anzahl	Einheit
Gewinderohr	13904	kg	Umwälzpumpen	14	St.
Dämmung	5295	m	Heizkörper	12209	kg
Fittinge	3575	St.	Absperrklappen	142	St.
Regelventil	103	St.	Rohrschalen	109	m
Deckenstrahlplatten	2384	kg	Ausdehnungsgefäß	87	kg

Abbildung 20 Massen ausgewählter Heizungskomponenten

Für die Kostengruppe 410 Abwasser, Wasser- und Gasanlagen wurden die primären Mengen an Rohren, Fittings und Dämmungen ebenfalls über den Massenauszug aus mh-software ermittelt. In diesen Auszügen sind, wie auch bei der Heizung, noch Absperrungen, Durchlauferhitzer, Zirkulationspumpen, Boden-/Dachabläufe und Regelventile enthalten. Ebenso sind an der Übergabestation Filter und dahinter Verteilarmaturen vorgesehen. Ein wichtiger Aspekt waren die Sanitärarmaturen und verbauten Spülkästen, hier wurde die Anzahl mit dem Gewicht der jeweilig verbauten Keramik verrechnet. Besondere Positionen waren unter anderem die Anschluss- und Verteilerschächte aus Beton, welche nicht den Außenanlagenanlagen anzurechnen sind. Außerdem ist im Gebäudeteil B ein Fettabscheider für das fetthaltige Küchenabwasser verbaut, wobei die Masse des Kunststoffbehälters über das verdrängte Volumen ermittelt wurde. Das Aufmaß der Rohre und Absperrventile für die Gasversorgung wurde in diese Bilanz mit einkalkuliert

Komponente	Anzahl	Einheit	Komponente	Anzahl	Einheit
Edelstahlrohr	3500	kg	Abflussrohr SML	16938	St.
Rockwool 800	444	m	Fettabscheider	1710	kg
Fittinge	3575	St.	Abläufe	58	St.
Armaflex	8,7	m ³	Sanitärkeramik	5034	kg
Durchlauferhitzer	29	St.	Absperrhahn	84	St.

Abbildung 21 Massen ausgewählter Sanitärkomponenten

Die Massen für das Gewerk raumluftechnische Anlagen wurden ebenfalls größtenteils über die Exporte aus der Berechnungssoftware ermittelt. Das Gewicht der Kanäle und Wickelfalzrohre wurde dabei über die Fläche, in Kombination mit der Blechdicke und der Dichte des Materials, berechnet. Bei der Steinwolldämmung wurden die Quadratmeter und bei dem synthetischen Kautschuk das Volumen einkalkuliert. Hier ist zu erwähnen, dass an den Außen- und Fortluftkanälen der Kompaktlüftungsgeräte 100 mm dicke alukaschierte Steinwolldämmung montiert sind. Die größte Anzahl an Komponenten machten Brandschutzklappen, Schalldämpfer und konstante Volumenstromregler in runder und eckiger Bauweise aus. Dabei wurden alle Abmessungen und Baulängen einzeln erfasst. Bei den Schalldämpfern handelt es sich zum einen um Kulissen und zum anderen um Telefoneschalldämpfer. Die Menge der Tellerventile, Gitterauslässe, sowie der Einbauventilatoren und Kompaktlüftungsgeräte wurden ebenfalls im Modell abgebildet. Die Anzahl der Deflektorhauben und Dachventilatoren wurde jedoch den Dachaufsichten entnommen.

Komponente	Anzahl	Einheit	Komponente	Anzahl	Einheit
Kanal	11663	kg	Schalldämpfer	133	St.
Rohre	4071	kg	Tellerventil	276	St.
Steinwolldämmung	2170	m ²	RLT-Geräte	20	St.
Volumenstromregler	75	St.	Deflektorhauben	32	St.
Brandschutzklappen	216	St.	Ventilatoren	13	St.

Abbildung 22 Massen ausgewählter Lüftungskomponenten

Bei der Kälteerzeugung wurden dreierlei Mengen identifiziert: Die Split-Geräte mit Außen- und Innenbauteil, die Leitungsführung aus Gewinderohr und die Kälte­dämmung aus synthetischem Kautschuk.

Der letzte Schritt war die Kalkulation der Menge an Befestigungs­konstruktionen für die Gebäudetechnik. Da weder die Programme dazu Ergebnisse liefern, noch die Planungsunterlagen hierzu Aufschluss gaben, wurde auf Erfahrungswerte des Planungsbüros KBP Ingenieure GmbH [2] zurückgegriffen. Dort werden mit über 40 Jahren Planungserfahrung in allen Bereichen der Technischen Gebäudeausrüstung jährlich die realisierten Projekte und Leistungsverzeichnisse ausgewertet, um flächenspezifische Kenngrößen für die Befestigung zu erhalten. Diese Auswertung ergab für das Gewerk Lüftung 1,0 kg Befestigungsstahl pro Quadratmeter Nettoraumfläche des Gebäudes, für das Gewerk Heizung und Kälte wurden 0,6 kg pro Quadratmeter und für Sanitär nochmals 0,5 kg pro Quadratmeter beaufschlagt. In Summe wurden somit 28,6 Tonnen Befestigungsmaterial bilanziert.

Die detaillierten Massenauszüge mit weiteren Komponenten und Verbrauchern, die in der Lebenszyklusanalyse verwendet wurden, sind exemplarisch im Anhang 1 festgehalten. Die Massenauszüge werden hier zusätzlich nach unterschiedlichen Dimensionen und Nenngrößen gefiltert, um ein realistisches Ergebnis zu erzielen.

Bilanzierung

Der letzte Schritt des detaillierten Verfahrens der Ökobilanz nach Harter ist die „Verrechnung der spezifischen TGA-Produkt-Datensätze mit den Dimensionierungen/Auslegungen“ [32]. Dafür wurde im ersten Schritt die Ökoba­dat gemäß EN 15804+A2 durchsucht, ob passende Datensätze für alle Komponenten zur Verfügung stehen [33]. Die übergeordneten Positionen, wie beispielweise Lüftungs­kanäle und Edelstahl-Trinkwasserrohre, sind dort ebenfalls eingetragen. Speziellere Materialien, wie Schalldämpfer oder Regelungsventile, sind nicht in der Datenbank enthalten. Im Folgenden wird die Herangehensweise zur Datenbestimmung der einzelnen Gewerke näher erläutert.

Für die raumluf­technischen Anlagen wurden, zusätzlich zu den Datensätzen der Ökoba­dat, Umwelt-Produktdeklarationen von Herstellern und Instituten gesucht. Dabei wurde speziell bei der Lüftung auf die norwegische EPD-Datenbank zurückgegriffen, welche circa die dreifache Menge an Deklarationen für Produkte beinhaltet. [46] Diese Produkte werden auch in Deutschland verbaut und teilweise produziert. Für Komponenten wie Brandschutzklappen, Schalldämpfer, Tellerventile, Deflektorhauben und Volumenstromregler wurden die grauen Emissionen des Referenzproduktes mit

Hilfe des Gewichtes auf alle im Projekt vorkommenden Dimensionen skaliert. Für die Kompaktlüftungsgeräte der Klassenzimmer im Bauteil D gibt es für das verbaute Exemplar keine Zertifizierung, jedoch hat Systemair mit dem Modell Topvex TR [47] ein baugleiches Fabrikat auf dem Markt, mit gleichen Volumenströmen und ähnlichem Gewicht. Dieses wurde für die Ökobilanz verwendet. Für die zentralen Lüftungsgeräte wurde nicht auf den Ökobaudat Datensatz zurückgegriffen, da dieser lediglich Ventilator und Wärmerückgewinnung enthält. Da es sich bei den geplanten Exemplaren jedoch um Vollklimaanlagen mit Registern, Filtern und Schalldämpfern handelt, wurde hier wiederum eine ähnliche Anlage von Systemair verwendet [48]. Für dieses Gerät gibt es vier Baureihen, welche den jeweils tatsächlich verbauten Kubus-Volumina zugeordnet wurden. Beispielsweise hat das Lüftungsgerät für die Aula mit den Abmessungen LxBxH von 6,44/2,4/2,68 m ein Volumen von 41,4 m³ und wurde dementsprechend der Variante P16.08 mit einem Volumen von 42 m³ zugeordnet. Die erwartete Lebenserwartung liegt für fast alle Lüftungsbauteile nach VDI 2067 bei 20 Jahren [49].

Im Gewerk Heizung wurden für die Gewinderohre und die Fernwärmeübergabestation die Datensätze aus der Ökobaudat verwendet. Für die Formteile wie Bögen, T-Stücke oder auch Reduzierungen kam aufgrund der Sonderformen und Gewindeverbindungen eine extra Stückpauschale mit zusätzlicher EPD hinzu. Für die Regelventile, Absperrklappen und Umwälzpumpen wurden die EPDs direkt von den Herstellern, wie zum Beispiel von Danfoss, Grundfoss, IMI oder auch Georg Fischer, abgerufen. [50] Diese Einbauteile haben eine erwartete Lebensdauer von 10 Jahren und müssen dementsprechend bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren viermal ausgetauscht werden. Für die Heizkörper und Deckenstrahlplatten wurden erneut Informationen der Hersteller verwendet, diese wiesen eine RSL von 30 Jahren auf [51].

Die Umwelt-Produktdeklarationen für die Kostengruppe 410 entsprangen größtenteils erneut aus der norwegischen Datenbank. Für die Sanitärarmaturen sowie Anschlusskästen liefert der Hersteller Geberit zuverlässige Datensätze [52]. Für die Sanitärkomponenten schwanken die Lebenserwartungen am stärksten. Beispielsweise müssen Entwässerungsleitungen, Schächte und Edelstahlleitungen in 50 Jahren nicht ausgetauscht werden, während Durchlauferhitzer, Hebeanlagen und Pumpen alle 10-15 Jahre erneuert werden müssen. Das komplexeste Produkt in der Analyse war der Fettabscheider unter dem Bauteil B, da dieser eine Lebenserwartung von 40 Jahren hat. Ein Austausch dieses Produktes würde einen erheblichen Aufwand bedeuten, welcher so vermutlich nicht in der EPD erfasst ist [53].

Gewerkeübergreifend wurden für die Dämmungen und F90 Rohrschalen die grauen Emissionen mit dem Ökobilanzrechner von Rockwool ermittelt. [54] Dieser hat für alle Produkte EPDs hinterlegt und multipliziert diese mit den eingegebenen Massen. Für die Dämmungen aus synthetischem Kautschuk wurde das berechnete Gesamtvolumen in Kilogramm umgerechnet und ebenfalls mit einer Produktdeklaration verrechnet. Die Nutzungsdauern der Dämmungen sind grundsätzlich unbegrenzt. In der Deklaration wird aber darauf hingewiesen, dass diese in der Realität der Nutzungsdauer des zu dämmenden Materials entspricht. Als Datensatz für die Befestigungskonstruktionen aller Gewerke wurden Schrauben, Metall und Rohrschellen verwendet. In der Praxis werden hier lediglich Kilogramm Profilstahl in den Leistungsverzeichnissen ausgeschrieben. Die angesetzte Lebensdauer und die damit verbunden Austauschzyklen wurden mit denen der Rohre und Kanäle des Gewerkes gleichgesetzt.

Nachdem nun allen Komponenten der Kostengruppen 410 bis 430 eine Umwelt-Produktdeklaration zugewiesen wurde, konnten diese mit dem Austauschfaktor und der Masse verrechnet und folgende Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse nach Harter ermittelt werden.

Gewerk	Summe GWP A1-A3, B4, B5, C3, C4 [kg CO ₂ e]	Summe GWP D1 [kg CO ₂ e]
Sanitär	117788,6	-31941,0
Heizung	320512,1	-138007,8
Kälte	4263,4	-1954,5
Lüftung	723308,2	-172498,6
Summe	1165872,3	-344401,9
Relation zu KG300	18,26%	46,80%

Abbildung 23 Ergebnisse der LCA der KG 410 bis 430 nach Harter

Die detaillierte Berechnung nach Harter hat ergeben, dass die grauen Emissionen der Kostengruppe 410 bis 430 in den Lebenszyklusphasen A1-A3, B4-B5, C3-C4 im Verhältnis zur KG 300 bei circa 18,3 % liegen. Das Wiederverwertungspotential hingegen entspricht einem Anteil von fast 47 % ein. Außerdem ist zu erwähnen, dass die Aufteilung der grauen Emissionen in diesem konkreten Fallbeispiel relativ stark von der Literatur abweicht. Dies liegt zum einen daran, dass durch den Passivhausstandard im Bauteil D der Anteil der Lüftungsanlagen sehr hoch ist und auf der anderen Seite so gut wie keine Kälteerzeugung in der gesamten Schule vorhanden ist.

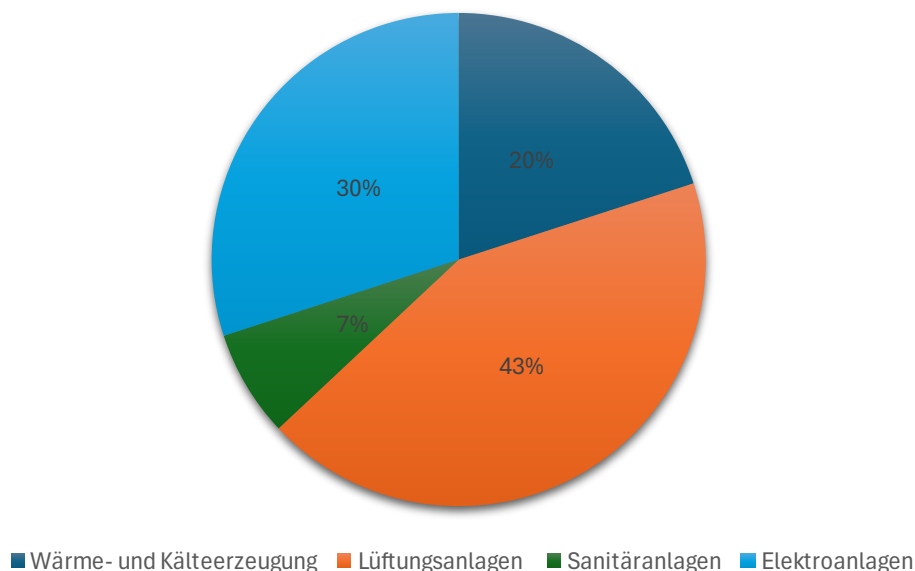


Abbildung 24 Aufteilung grauer Emissionen nach TGA-Gewerken

In Abbildung 24 ist die Aufteilung der Ergebnisse dargestellt. Die Darstellung berücksichtigt ebenfalls den erneuten Aufschlag von 30% für Elektroanlagen. Dabei ist insbesondere die Emissionsverschiebung von der Wärme- und Kälteerzeugung hin zu den Lüftungsanlagen als Abweichung von der Literatur ersichtlich.

Die ausführlichen Berechnungen finden sich im Anhang 2 unter der Anlage 2.1.

4.3 Optimierung der Gebäudetechnik

Im Folgenden soll nun der Teilaspekt der Forschungsfrage beantwortet werden, ob eine Bewertungsmethodik für die ökologische Analyse und Optimierung der Energie- und Gebäudetechnik bei Bestandssanierungen entwickelt und angewandt werden kann. Hierfür wurden zunächst die bisherigen Erkenntnisse aus den Leitfäden, der durchgeführten Bestandsanalyse und den verschiedenen Ökobilanzen konkret zusammengetragen und bewertet. Eine erste mögliche Optimierung stellen die Diskrepanzen der Heizlasten, Spreizungstemperaturen und den damit verbunden geförderten Massenströmen dar. Falls eine Reduzierung möglich ist, können hierbei vermutlich sowohl graue als auch Nutzungsemissionen eingespart werden. Der nächste Punkt ergab sich nach Betrachtung der Ergebnisse der Ökobilanzen. Ein bedeutender Anteil der grauen Emissionen wird durch die raumluftechnischen Anlagen ausgestoßen, weshalb speziell die maschinelle Belüftung der Klassenzimmer hinterfragt werden kann. Die restlichen Lüftungen, wie in der Mensa oder den Sanitärbereichen sind aufgrund der Normen und Vorgaben obligatorisch. Damit konkrete Schlüsse gezogen werden können, wurde, wie in den folgenden Absätzen beschrieben, eine dynamische Heizlastberechnung durchgeführt, sowie eine alternative Lüftung simuliert.

4.3.1 Modelerstellung IDA ICE

IDA ICE [34] ist ein dynamisches Simulationsprogramm, welches auf Grundlage von Schwankungen der klimatischen Bedingungen, variierenden Nutzungs- und Betriebszeiten sowie internen Lasten, Heiz- und Kühllasten sowie Energieverbräuche für definierte Räume oder Gebäude simuliert. Dies hat im Gegensatz zu statischen Berechnungen den Vorteil, dass eine präzisere Dimensionierung und damit einhergehend Energieeinsparungen möglich sind. Der erste Schritt bei der Erstellung des Modelles war die Hinterlegung der Rahmenbedingungen. Diese waren zum einen der bevorzugte Wetterdatensatz für den Standort der Goetheschule. Der Deutsche Wetterdienst bietet hierfür ein Tool, womit ortsgenaue Testreferenzjahr-Datensätze für 2015 und 2045 heruntergeladen werden können [55]. Dabei wurde vor allem der Fokus auf die Datensätze von 2045 gelegt, da im Rahmen dieser Arbeit eine nachhaltige und zukunftssträchtige Planung dargestellt werden soll, sodass die geplanten Maßnahmen auch in 20 Jahren noch sinnvoll und nicht überdimensioniert sein sollen.

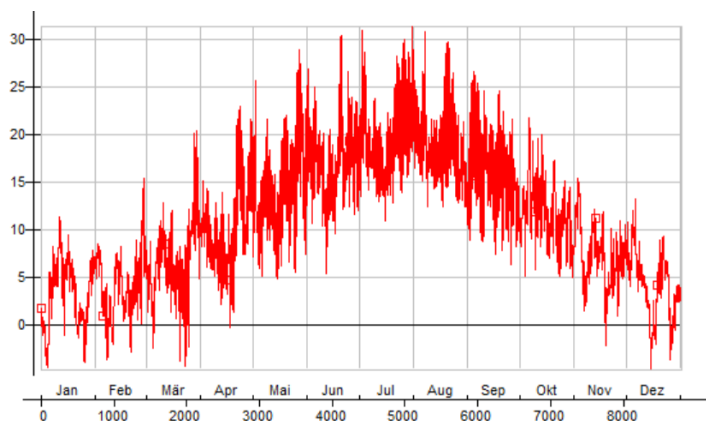


Abbildung 25 Jahresverlaufstemperatur Hannover 2045 [55]

Die Prognosen ergeben, dass die Temperaturen dabei im Jahresverlauf im Jahre 2045 zwischen -5 und +31°C schwanken. In einem zweiten Schritt wurden daraufhin die Systemparameter definiert. Im Anschluss sind die wichtigsten Parameter aufgelistet:

- Wärmebrückenkoeffizient wie im Energieausweis auf 0,05 W/K*m²
- CO₂ Gehalt der Außenluft bei 420 ppm
- Zeitplanglättung bei +/- 1h
- Windprofil für geschlossene Ortschaften
- Nordausrichtung bei 75°
- Keine Signifikante Verschattung durch angrenzende Großbauten
- Windabhängige Luftwechselrate je Gebäudeteil zwischen 0,89 1/h und 1,33 1/h
- Druckkoeffizienten für teilgeschützt Gebäude
- Erdreichmodell nach ISO-13370

Anschließend wurde ein Bauteilkatalog angelegt. Dazu wurden beispielweise die Aufbauten für Außenwände gegen Erdreich und Luft, Böden gegen Erdreich, Decken zu unbeheizten Räumen, Dächer, Verglasungen und Türen definiert. Aufgrund der Tatsache, dass das 3D-Architekturmodell und die Angaben im Energieausweis nicht übereinstimmen, wurden in diesem Modell die nach Vorgabe zu erreichenden U-Werte verwendet. Diese können bezüglich der Bauteildicke von der Planung abweichen.

Im nächsten Schritt konnte nun das Gebäudemodell gezeichnet werden, welches die Stockwerke und Außenbauteile übergeordnet automatisch definiert. Dafür wurden die Stockwerksdateien im DWG-Format aus Revit [56] exportiert und in IDA ICE eingespeist, damit die Räume sinnvoll reproduziert werden können. Nun wurden Zonenvorlagen für die verschiedenen Nutzungen erstellt, was den Vorteil hat, dass sich durch den wiederholenden Effekt der Klassenzimmer, Verkehrsflächen und Sanitärbereiche repetitive Arbeit vermeiden lässt. In den Vorlagen wurden die Regelungsstrategien, Belegungsprofile, Anlagentechnik und Ausstattung definiert. Dabei wurde den Zonen zunächst ein Lastprofil nach der DIN V 18599 [14] zugeordnet. Beispielhaft war hier für Schulklassenzimmer ein Belegungsprofil von 8:00 bis 15:00 mit einem Normfaktor von 0,716 hinterlegt, bei einer Temperaturerhöhung in diesem Zeitraum von 18 auf 20°C. Bei einer klassischen Heizlastberechnung würden diese Parameter fest angesetzt werden. Dies hätte zur Folge, dass um 8 Uhr morgens sofort eine Spitzenheizlast auftreten würde, welche dem Delta von 2°C entgegensteht. Die Aufrechterhaltung dieser Spitzenheizlast über den Tag hinweg ist allerdings nicht notwendig, sodass hier als Alternativsystem ein langsames Hochregulieren der Heizkörper in den Klassenzimmern ab 7 Uhr um 0,5°C alle 15 Minuten implementiert wurde. Auch bezüglich der Belegung wurden Anpassungen vorgenommen: Die Klassenzimmer sind für 30 Schüler:innen und eine Lehrkraft ausgelegt, diesen wurde entsprechend der Norm ein Aktivitätsgrad von 1,2 MET und eine Bekleidung von 0,75 +/- 0,25 CLO zugewiesen. Der Faktor 0,716 für die Personenbelegung wurde weiterverwendet. Allerdings entspricht auch für die Belegung ein abrupter Start um 8:00 nicht der Realität. Insbesondere Schüler:innen, die den öffentlichen Nahverkehr nutzen, sind teils deutlich früher in den Klassenzimmern. Um dies entsprechend in das Modell zu integrieren, für den Zeitraum von 7:30 bis 8:00 zusätzlich ein Belegungsfaktor von 0,25 hinterlegt. Bezüglich der Fensterlüftung wurde pro Schulstunde ein Stoßlüften von mindestens drei Minuten definiert, was mit einem Zeitplan umgesetzt wurde.

Zusätzlich wurden unter anderem Vorlagen für Verkehrsflächen, Sanitärbereiche, Lager- und Technikräume, Küchen und für die Mensa erstellt. Dabei sind für die maschinell belüfteten Räume Lüftungsgeräte angelegt und mit den benötigten Luftmengen versehen worden.

Nach Abschluss dieser vorbereitenden Maßnahmen wurde nun mit der Erstellung des Gesamtmodells begonnen. Aufgrund der Präzision und des Detailgrades des Modells war so eine möglichst realistische Simulation des Energiebedarfs des Schulgebäudes möglich, sodass im Nachgang keine Skalierungen mehr vorzunehmen waren.

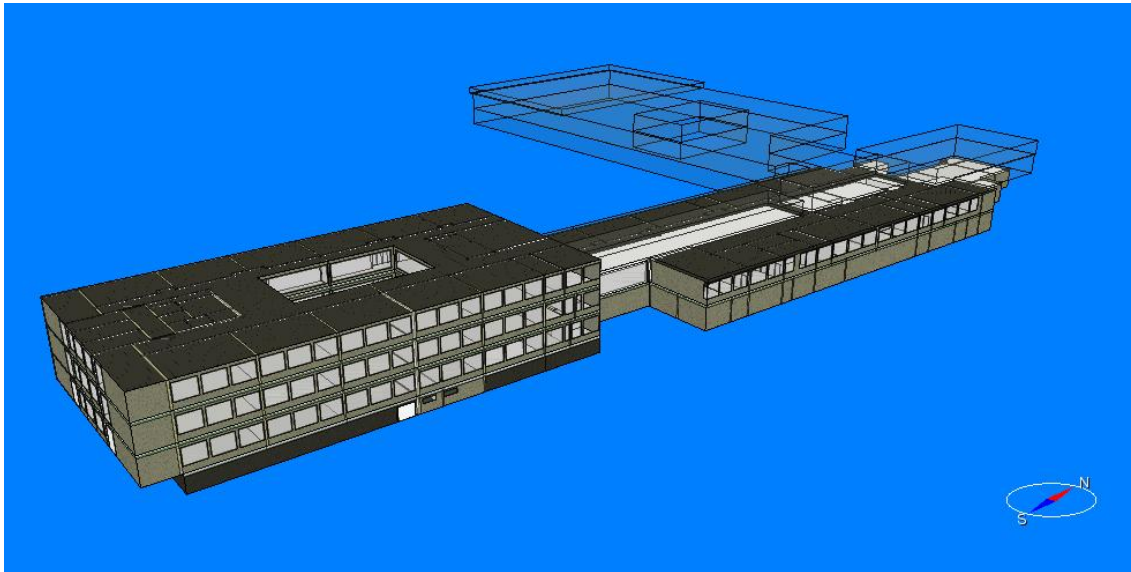


Abbildung 26 Ansicht Südost Gesamtmodell IDA ICE

Nach der zeichnerischen Fertigstellung der Bauteile A und B traten zunehmend Probleme mit der Hardware und dem Modell auf, welche sich während der Modellierung des Bauteils C nochmals deutlich verstärkten. Es kam während der ersten Probesimulationen mehrfach zu Systemabstürzen, sodass von einer Fortsetzung des Modells entsprechend des in Abbildung 26 gezeigten Vorgehens abgesehen werden musste. Die Alternative bestand aus der Teilsimulation einer aussagekräftigen Auswahl an kritischen Zonen, um diese letztlich auf das Gesamtgebäude zu extrapolieren. Als kritische Zonen werden Bereiche bezeichnet, welche das größte Potential für Überhitzung oder Unterkühlung aufweisen. Diese sind zumeist exponierte Eckräume in den Randgeschossen, da diese den größten Anteil an außenluftberührten Bauteilen haben. Dafür wurden zwei Eckklassenzimmer im Bauteil A ausgewählt, welche zusätzlich dazu noch eine Nordwestausrichtung aufweisen und somit die nutzbaren solaren Gewinne besonders aufgrund der geringen Nutzung am Spätnachmittag im Schulbau minimal sind. Als dritte Zone wurde aufgrund der großen Personenmenge und der Lüftungsanlage zur Diversifikation die Mensa ausgewählt. Die vierte Zone ist ein Klassenzimmer im Passivbauteil D, da hier zusätzlich zur Heizlast eine alternative Lüftungsvariante simuliert werden sollte. Eine nähere Beschreibung der vier Zonen erfolgt an späterer Stelle im Rahmen der Darstellung der Ergebnisse der Simulation. Die Zonen wurden wie folgt bezeichnet: A.0.20 und A.2.20 befinden sich im Erd- und letzten Obergeschoss des Bauteils A an der Nordwestecke. B.0.01 ist die Mensa in der Mitte des Erdgeschosses des Bauteiles B. Die Zone D.1.06 befindet sich im letzten Obergeschoss des Bauteiles D mit Südausrichtung.

Die Zonen wurden entsprechend Abbildung 27 separat in das Gebäudemodell eingepflegt und die fehlenden Rahmenbedingungen angepasst.

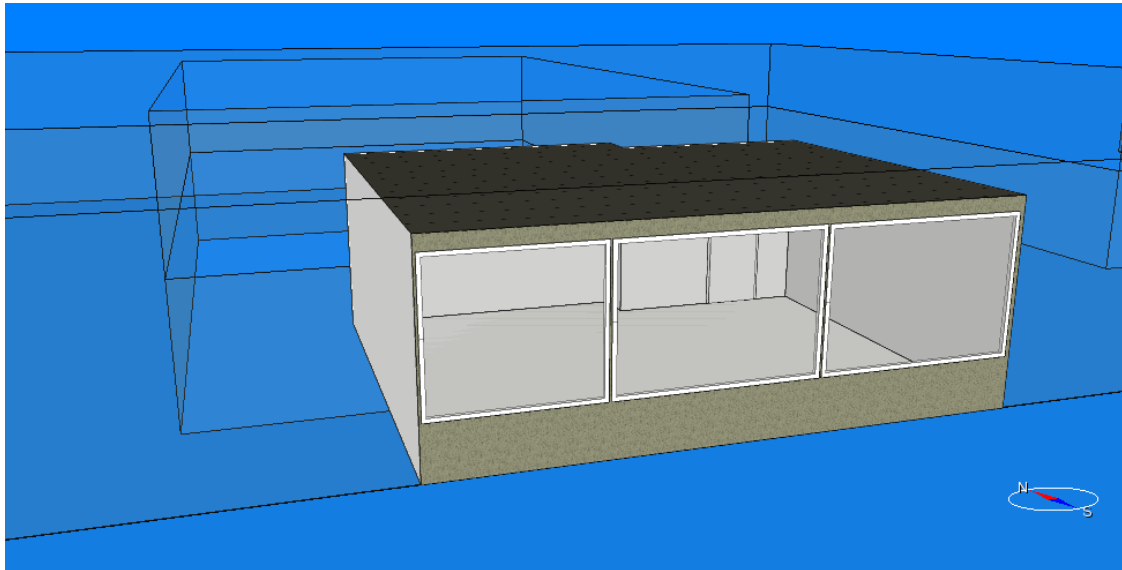


Abbildung 27 Darstellung Zone D.1.06 in IDA ICE

4.3.2 Dynamische Simulation

Zu Beginn der Simulation wurde zunächst das gesamte Jahr 2025 simuliert, um die Kalenderwoche mit der größten benötigten Heizlast zu identifizieren. Das Ergebnis war Kalenderwoche Fünf, in der die niedrigsten Temperaturen bei gleichzeitig maximalem Wärmeverlust durch fehlende Sonneneinstrahlung und erhöhte Windgeschwindigkeit nachweisbar waren. Dabei sind die größten Heizlasten aufgrund des sehr kalten vorausgehenden Wochenendes zu Beginn der Woche zu erwarten, da das Gebäude über das Wochenende stärker als normal ausgekühlt ist. Der Anteil der internen Lasten, welcher in der Simulation berücksichtigt wurde, lag bei 50 %. Dies hat den Vorteil, dass eine gewisse Grundlast zu jeder Zeit der Nutzung bereits ohne externe Wärmezufuhr erreicht wird, jedoch sich aber nicht gänzlich darauf verlassen wird. Abschließend ist zu betonen, dass durch die Simulation kein neuer Primärenergiebedarf für das gesamte Gebäude ermittelt wurde, sondern lediglich potentielle Optimierungen an der Technischen Gebäudeausrüstung aufgezeigt werden sollen.

Zone A.0.20

Das Klassenzimmer hat zwei Außenwände und einen erdreichberührten Fußboden. Zusätzlich dazu ist die angrenzende Verkehrsfläche unbeheizt und in der ursprünglichen Heizlastberechnung mit 10° angesetzt, nachdem hier ein direkter Ausgang angrenzt, welcher in einer hoch frequentierten Schule zu größeren Wärmeverlusten führt. Die Simulationsergebnisse in Abbildung 28 zeigen, dass die Wärmeverluste während der Schultage am höchsten sind. Dies ist bedingt durch die deutlich erhöhten Lüftungswärmeverluste und die Anhebung des Temperaturniveaus. Außerdem ist in der Grafik zu sehen, dass die Lüftung konstante Verluste aufweist. Dies hängt mit der Zeitplanglättung zusammen, welche harte Kanten in der Simulation vermeidet und damit einen Durchschnitt der Luftmenge bildet. Die Luftwechselrate ist dabei unverändert. Des

Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, dass die Abwärme der Personen im Betrieb konstant über 1 kW liegt, während die solaren Gewinne eine kleinere Gewichtung einnehmen. Außerdem sind diese Gewinne größtenteils gegen Ende des Tages nachweisbar, was sich durch die Ausrichtung und das Höhenniveau der Zone begründet. Daraus resultierend beträgt die neue simulierte maximale Heizlast **2675 W**.

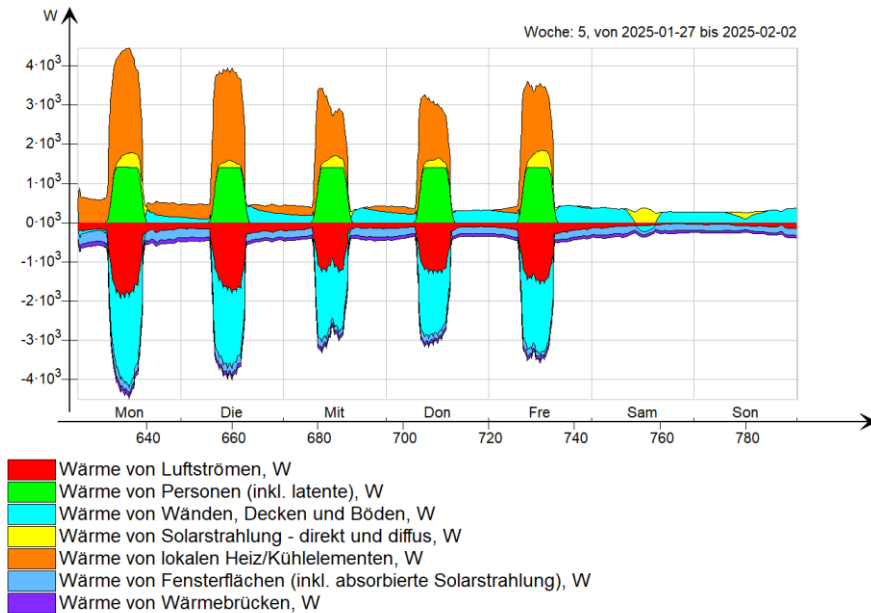


Abbildung 28 Wärmebilanz der Zone A.0.20

Zone A.2.20

Im zweiten Obergeschoss wurde die Zone A.2.20 betrachtet. Diese hat ähnlich wie die erste Zone zwei Außenwände. Der Unterschied liegt darin, dass dieses Mal zusätzlich das Dach hinzukommt und dieses im Gegensatz zum Erdreich Temperaturen unter 10°C ausgesetzt ist. Die Belegung, Heizungs- und Fensterlüftungsregelung ist dieselbe.

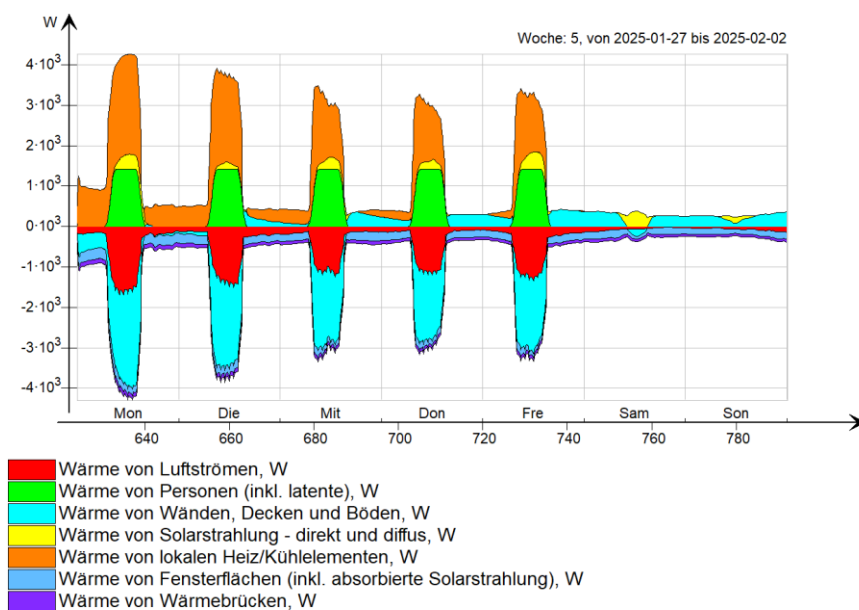


Abbildung 29 Wärmebilanz der Zone A.2.20

Die internen Lasten unterstützen das Heizprofil erneut signifikant, während jedoch ein nicht zu vernachlässigender Anteil an Wärme durch die Lüftung verloren geht. Die Wärmeverluste in den Zeiten ohne Stoßlüftung, sind auf die Undichtigkeit der thermischen Hülle zurückzuführen. Die neue maximale Heizlast beträgt **2473 W**

Zone B.0.01

Die dritte Zone unterscheidet sich stark von den ersten beiden. Obwohl die Zone mehr als fünfmal so groß ist wie die Klassenzimmer, ist die neue Heizlast mit **4201 W** nicht einmal doppelt so hoch. Die Heizlast fällt in dieser Zone geringer aus, da die Mensa aufgrund der Essenserüche vollständig maschinell belüftet werden muss. Dies sind circa 5000 m³/h, was eine flächenspezifische Mindestaußenluftwechselrate von circa 15,6 m³/h*m² ergibt. Die Außenluft wird dabei mittels Wärmerückgewinnung und einem zusätzlichen Heizregister auf 19°C temperiert und dann in Kombination mit der Ventilatorabwärme, welche standardmäßig mit 1°C angenommen wird, temperaturneutral in die Zonen eingebracht.

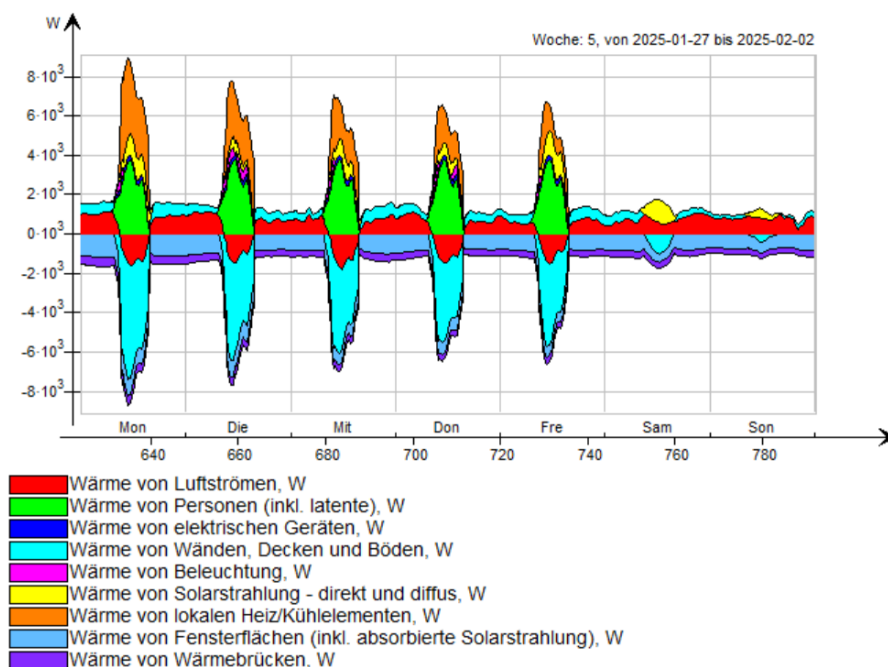


Abbildung 30 Wärmebilanz der Zone B.0.01

Eine weitere Ursache für den vergleichsweise niedrigen Wärmebedarf durch die statische Heizung der Kantine sind die internen Lasten. Für die Mensa wurde anhand der Sitzplätze eine Raumbelugung von maximal 120 Personen hinterlegt, mit einer Dauerbelegung zwischen 10 und 60 %. Die größte zu erwartende Belegung fiel auf die Pausen am Vormittag mit einem weiteren, etwas geringeren Ausschlag zur Mittagszeit. Neben der erheblichen Wärmezufuhr durch die Schüler:innen, welche teilweise über drei kW beträgt, spielt in dieser Zone zum ersten Mal die Abwärme von elektrischen Geräten, insbesondere der Warmhaltebecken für die Gerichte, eine spürbare Rolle. In der Simulation wurde die Temperatur von 7:00 bis 9:00 linear von 18°C auf 20°C erhöht und bis 15:30 gehalten. Anschließend wurde sie für die nächtliche Temperaturhaltung wieder auf 18°C abgesenkt.

Zone D.1.06

Die vierte und letzte betrachtete Zone ist ein Klassenzimmer im Gebäudeteil D. In dieser Simulation wurde zur Berücksichtigung der internen Lasten zusätzlich die maschinelle Lüftung durch Fensterlüftung ersetzt. Die Leckagerate der thermischen Hülle für das Bauteil D von 0,89 1/h wurde dem Energieausweis entnommen. Der Volumenstrom setzte sich in der Simulation aus den Anforderungen des Energieausweises von 2,5 m³/h*m² flächenbezogener Mindestaußenluftvolumenstrom und der Leckage über die Dichtigkeit des Gebäudes zusammen. Mit dieser Auslegung kann auf die dezentralen Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung und die zusätzlichen elektrischen Heizregister verzichtet werden.

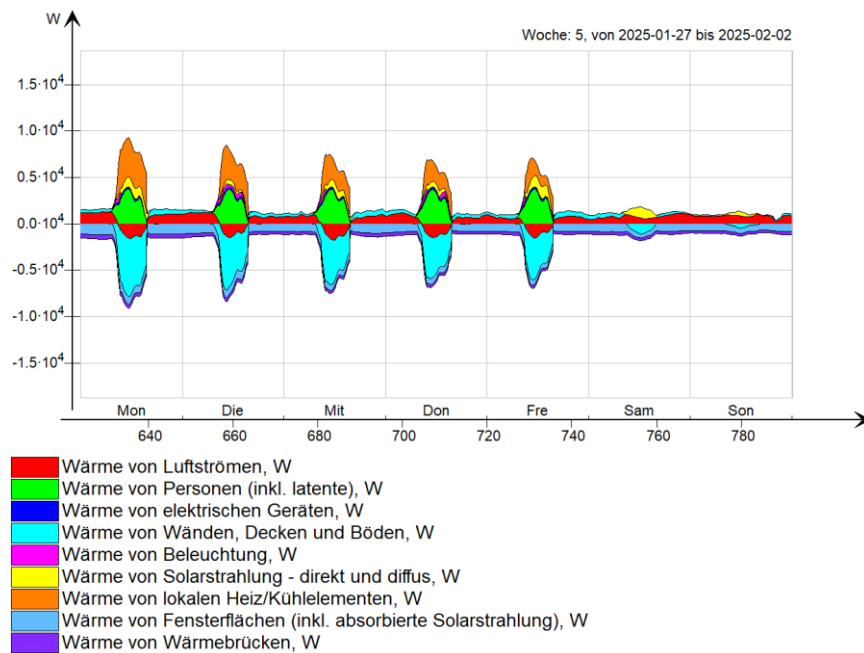


Abbildung 31 Wärmebilanz der Zone D.1.06

Die aktuelle Auslegungsheizlast dieser Zone beträgt 1429 W und muss aufgrund der Fensterlüftung auf **2100 W** angehoben werden. Auf dieser Grundlage lässt sich ein Faktor von 1,47 zur Erhöhung des Massenstroms in den Klassenzimmern des Passivhausbauteils D ermitteln.

Zusammenfassend konnte, entsprechend der Abbildung 32, durch die dynamische Simulation eine Reduzierung der Heizlast in drei von vier Fällen erzielt werden. In der vierten Zone hat sich die Heizlast lediglich durch die Umstellung der Lüftungsart erhöht.

Beispielzone	Heizlast Alt [W]	Heizlast Neu [W]	Faktor
A.0.20	3148	2675	0,850
A.2.20	2646	2473	0,935
B.0.01	4677	4201	0,898
D.1.06	1429	2100	1,470

Abbildung 32 Berechnete Heizlastfaktoren nach der Simulation in IDA ICE

4.3.3 Umplanung und Dimensionierung

Aus den bisherigen Ergebnissen der Simulation sollte im nächsten Schritt die gesamte Heizlast für die Goetheschule ermittelt werden. Dafür wurde für alle beheizten Zonen – mit Ausnahme der Klassenzimmer in Bauteil D – der Mittelwert der ersten drei Faktoren aus Abbildung 32 mit der Heizlast aus den Planungsunterlagen verrechnet, woraus sich eine Reduktion der Heizlast in diesen Bereichen um **10,6 %** ergab. Für die folgenden Schritte wurde, wie in Anhang 3 ausführlich dargestellt, über die alte Heizlast und den Faktor eine neue Heizlast und damit verbunden ein aktualisierter Massenstrom berechnet. Für die zwölf Klassenzimmer in Bauteil D hat sich die Leistung durch die Änderung der Lüftungsart um 47 % erhöht. Somit konnte in Summe für alle Zonen, welche mit der statischen Heizung versorgt werden, die Heizlast von 405 auf 374 kW und der Massenstrom von 17,4 auf 16,05 m³/h reduziert werden. Dies entspricht einer tatsächlichen Verringerung der benötigten Heizlast um **7,8 %**.

Die Massenströme wurden anschließend erneut in die Einzelverbraucher des mh-software-Modells eingetragen und das Rohrnetz neu berechnet. Dabei wurden zusätzlich alle Fixierungen im Modell entfernt, um eine Dimensionierung ohne fremde Einflüsse zu ermöglichen. Für die Berechnung wurde die standardmäßig hinterlegte Auslegungsstrategie der Software verwendet. Diese legt für alle Dimensionen minimale und maximale Fließgeschwindigkeiten sowie einen angestrebten Solldruckverlust pro Meter fest. Ebenso wurde auch hier die Anschlussdimension DN 10 berücksichtigt, welche in der ursprünglichen Planung aufgrund der zu erwartenden höheren Druckverluste vernachlässigt wurde. Da in diesem Projekt viele dieser Einzelanschlüsse verbaut sind, könnte dies eine signifikante Reduktion der Massen bedeuten.

In Zusammenschau der Ergebnisse aus Abschnitt 4.3.2 ließen sich die erheblichsten Veränderungen für die Zonen in Bauteil D feststellen, sodass diese den wohl größten Einfluss auf die Ergebnisse dieser Arbeit hat. Entsprechend soll der Heizkreis für die Wärmeversorgung der Klassenzimmer und Verkehrsflächen im folgenden Abschnitt nochmals genauer betrachtet werden. Für die Flure wurde, wie in den restlichen Bauteilen, eine Reduktion der Heizlast ermittelt und in das Modell eingespielt.

Variante	Alt	Neu
Nettowärmebedarf [W]	31822	39966
Massenstrom [kg/h]	1369	1720
Pumpendruck [Pa]	33230	43438

Abbildung 33 Vergleich der Ergebnisse Rohrnetzberechnung

Aufgrund der Tatsache, dass der Nettowärmebedarf im Bauteil D gestiegen ist und die Rohrdimensionen sich aufgrund der größeren Auswahlpalette teilweise trotzdem verkleinert haben, ist für die Wärmeversorgung der Klassenzimmer der benötigte zu überwindende Pumpendruck insgesamt gestiegen. Zur Abschätzung der Auswirkung für den Energieverbrauch mussten die Pumpen für die alte und neue Variante ausgelegt werden. Dies wurde mit der Auslegungssoftware der Firma Grundfos durchgeführt [57]. Das Ergebnis war, wie in Anhang 4 ersichtlich, dass eine leistungsfähigere Pumpe ausgewählt werden musste, welche anstatt der zuvor verbrauchten 107 kWh nun 142 kWh pro Jahr benötigt. Dies bedeutet eine Erhöhung des Energieverbrauches in einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren von 5350 kWh auf 7100 kWh.

Durch die Erhöhung der Heizlast in den Räumen um den Faktor 1,47 wurde für diese der bisherige Jahresheizwärmebedarf von 12,3 auf 18,1 kWh/(m²*a) angehoben. Bei einer Klassenzimmerfläche von 880 m² entspricht dies bei dem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren der nachstehenden Mehrung:

$$\left(18,1 \frac{kWh}{m^2 * a} * 880 m^2 * 50 a\right) - \left(12,3 \frac{kWh}{m^2 * a} * 880 m^2 * 50 a\right) = 255,2 MWh$$

Auf der anderen Seite konnte durch diese Vergrößerung der Wärmezufuhr auf die dezentrale Lüftungsversorgung verzichtet werden. Diese Anlage besitzt laut Datenblatt eine elektrische Ventilatoranschlussleistung von 270 W [58]. Die Betriebsstunden der Anlage wurden über die Betriebszeiten der Schule, was bei 190 Schultagen in Niedersachsen und einer realistischen Betriebsdauer von circa fünf Volllaststunden pro Tag, auf 760 h/a geschätzt, dabei ist ein Aussetzen der Lüftung in den Sommermonaten berücksichtigt. Durch den Verzicht auf die zwölf Einzelgeräte kann somit folgende Ventilatorleistung eingespart werden:

$$270 W * 950 \frac{h}{a} * 50 a * 12 = 153,9 MWh$$

Zusätzlich muss das elektrische Nachheizregister berücksichtigt werden, das hinter dem Gegenstrom-Plattenwärmetauscher positioniert ist. Es verfügt über eine elektrische Anschlussleistung von 1,35 kW und wird in einer vereinfachten Betrachtung bei Außentemperaturen unter 10°C während der Betriebszeiten benötigt. Entsprechend Abbildung 25 entspricht dies etwa 40 Schultagen pro Jahr und führt zu folgendem Gesamtenergieverbrauch für die Lufterhitzung:

$$1350 W * 200 \frac{h}{a} * 50 a * 12 = 162 MWh$$

Die Erhöhung der Wärmezufuhr für die Heizkörper und Konvektoren erfordert über 50 Jahre also 255,2 MWh an thermischer und 1,75 MWh an elektrischer Leistung. Dadurch werden jedoch 315,9 MWh an elektrischer Ventilator- und Registerleistung eingespart.

Der Vergleich der verbauten Pumpen in der alten und neuen Variante gibt zusätzlich Aufschluss darüber, dass trotz erhöhter Druckverluste in den Netzen durch die Massenstromreduzierung nur marginale Verschlechterungen und teils sogar Optimierungen mit über zehn Prozent in der Pumpenleistung (P) möglich sind.

Verteilnetz	Massenstrom [kg/h]	Pumpendruck [Pa]	Aufnahme-Leistung [W]	Vergleich P Alt/Neu
Primär Neu	26790	98010	1075	-1,2%
Primär Alt	29360	90010	1062	
Statisch A Neu	4996	54550	128	13,5%
Statisch A Alt	5600	56350	148	
Statisch B Neu	4795	66440	149	3,9%
Statisch B Alt	5391	61680	155	
Statisch C Neu	2003	53400	65	-1,6%
Statisch C Alt	2242	49130	64	

Abbildung 34 Pumpenvergleich der unterschiedlichen Auslegungssituationen

Für das Gewerk Sanitär und Kälte wurden keine weiteren Änderungen in der Planung umgesetzt, da diese, wie im Berliner Leitfaden [18] beschrieben, bereits auf ein Minimum reduziert sind und den Vorgaben entsprechen.

4.4 Optimierte Variante der Ökobilanz nach Harter

Durch die oben beschriebenen Optimierungen in der Planung der Gewerke Heizung und Lüftung stellt sich nun die Frage, welchen Einfluss diese auf die grauen Emissionen der Kostengruppe 410 bis 430 haben. Zudem sollten vereinzelt die veränderten Nutzungsemissionen der Phase B6 untersucht werden, auf die in der Arbeit Einfluss genommen wurde. Als Grundlage der folgenden Analysen wurden die finalen Tabellen inklusive der gleichen Umwelt-Produktdeklarationen aus der Lebenszyklusanalyse in Kapitel 4.2.2 herangezogen. Wie in Abbildung 35 ersichtlich, wurden die dezentralen Einzelraumlüfter im Bauteil D beispielweise entfernt, die Fixierungen aufgehoben und die Heizungsrohrdimensionen auf die neuen Massenströme angepasst.

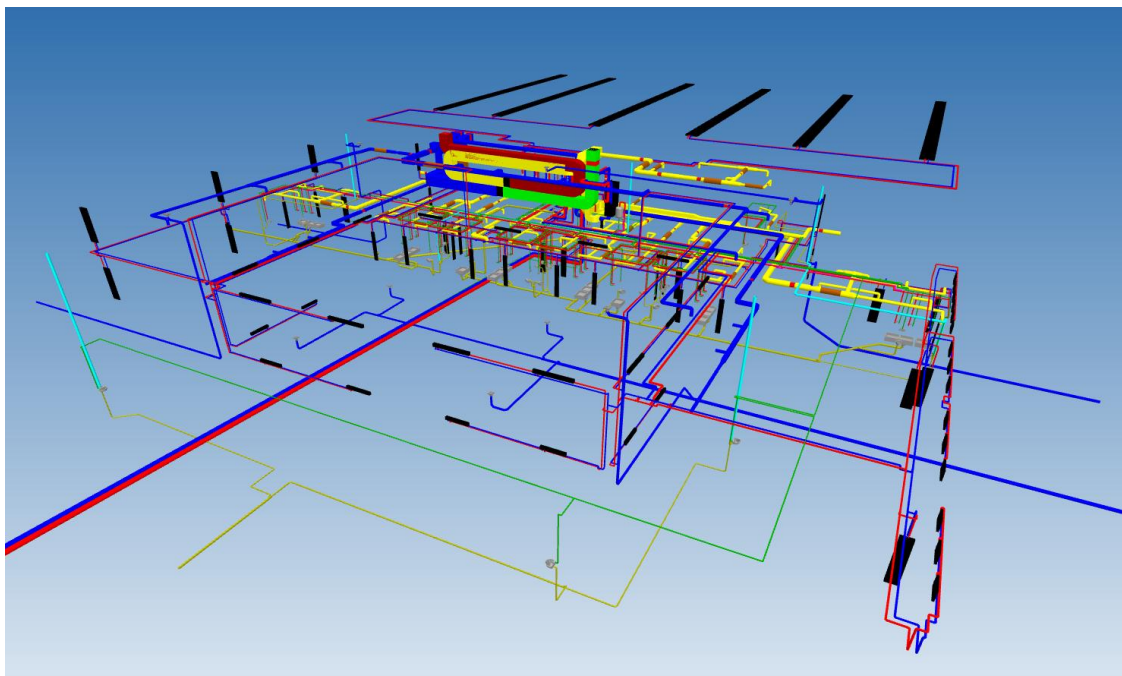


Abbildung 35 Ansicht Bauteil D optimierte Variante TGA

Beginnend mit der Bilanzierung der raumlufttechnischen Anlagen wurden als erstes die dezentralen Einzelraumlüfter entfernt, was durch das Einzelgewicht des reinen Gerätes von über 300 kg und den darin verbauten Materialien in 50 Jahren über 40 t CO₂e einspart. Damit verbunden wurden die Wickelfalzrohre in DN 315 für Außen- und Fortluft entfernt, welche zusätzlich mit einer 100 mm dicken alukaschierten Steinwolldämmung ausgestattet waren. Auf die Deflektorhauben im Dachaufbau konnte entsprechend auch verzichtet werden. Eine weitere Stellschraube war die Befestigungs konstruktion, welche in der ersten Bilanz nach Quadratmeter Nettoraumfläche ermittelt wurde. Bei gleichbleibender Fläche hätte dies zur Folge, dass die Menge an Stahl gleich bleibt, was nicht der Realität entspricht. Zur Ermittlung eines sinnvollen Faktors wurde das Gewicht der Rohre und Kanäle beider Varianten ins Verhältnis gesetzt.

$$m_{BefNeu} = \frac{m_{Neu}}{m_{Alt}} * m_{BefAlt} = \frac{14645 \text{ kg}}{15734 \text{ kg}} * 13600 \text{ kg} = 12659 \text{ kg}$$

Für das Gewerk Heizung ergaben sich in der Massenermittlung auch einige Änderungen. Durch die Massenstromverringering, die Aufhebung der fixierten Rohrdimensionen, sowie die Implementierung des Rohrdurchmessers DN 10 wurde die verbaute Stahlrohrmenge um über 22 Prozent verringert. Dabei hatte das Verteilprimärnetz den größten Einfluss, welches von DN 125 mit 16,6 kg/m auf DN 100 mit 12,19 kg/m reduziert werden konnte. Bei der Dämmung ergaben sich weniger deutliche Veränderungen, da in der Praxis üblicherweise dieselbe Dämmdicke für DN 10 und DN 15 verwendet wird und zusätzlich die normale maximale Standarddämmdicke DN 100 ist. Die Heizkörper spielten mit über 14,5 Tonnen Gesamtgewicht in der ersten Variante eine signifikante Rolle. Diese wurde anlässlich der Heizlastreduzierung um ungefähr 7,8 % auf unter 13,5 Tonnen reduziert. Die Befestigungskonstruktion der Heizung wurde analog zum Gewerk Lüftung mit demselben Verfahren angepasst.

Insgesamt konnten somit für dieselben Module in einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren folgende Ergebnisse in der optimierten Variante errechnet werden.

Gewerk	Summe GWP A1-A3, B4, B5, C3, C4 [kg CO ₂ e]	Summe GWP D1 [kg CO ₂ e]
Sanitär	117788,6	-31941,0
Heizung	283439,3	-119380,1
Kälte	4263,4	-1954,5
Lüftung	652653,8	-157032,4
Summe	1058145,2	-310307,9
Relation zu KG300	16,58%	42,17%

Abbildung 36 Ergebnisse der LCA KG 410 bis 430 nach Harter mit optimierter TGA

Die Zahlen belegen, dass durch die Optimierungen der Technischen Gebäudeausrüstung das Erderwärmungspotential der grauen Emissionen für die Kostengruppen 410 bis 430 um circa 1,7 % verringert werden konnte. Die gesamte Bilanz ist wiederum im Anhang 5 aufgeführt.

Abschließend wurden teilweise noch die Nutzungsemissionen der Phase B6 speziell für die Änderungen im Bauteil D betrachtet. Dabei wurde in 50 Jahren der Bedarf an Heizwärme über das Fernwärmenetz speziell für den Heizkreis, der die Klassenzimmer und Flure versorgt, um 255,2 MWh erhöht. Diese Leistung emittiert bei einem wärmeabsatzspezifischen GWP von 98,7 kg CO₂e/MWh [59] des Fernwärmenetzes von Hannover 25,2 t CO₂e. Hinzu kommen noch 1,75 MWh elektrische Pumpenleistung, welche nach dem Datensatz „Strom für Gebäudebetrieb 2021“ der ÖkobaDat [33] ein spezifisches GWP von 410,2 kg CO₂e/MWh hat. In Summe werden für die Nutzung der Variante Fensterlüftung circa 26 t CO₂e emittiert. Im Vergleich dazu benötigt die Variante mit maschineller Belüftung mit einem rein elektrischen Leistungsverbrauch von 315,9 MWh und dem gleichen Datensatz für den Gebäudebetrieb 129,6 t CO₂e. Somit können durch die Änderung des Systems mit den zum heutigen Zeitpunkt vorliegenden Datensätzen fast 80 % der Treibhausgasemissionen eingespart werden.

5 Diskussion

In diesem Abschnitt werden zunächst die wesentlichen Erkenntnisse der einzelnen Arbeitsschritte zusammengefasst und in Relation zueinander gesetzt. Daraufhin erfolgt die Interpretation der Ergebnisse und die Ableitung der daraus gezogenen Schlüsse. Zur finalen Lösung der Forschungsfrage wird auf dieser Grundlage eine Handlungsempfehlung für Kommunen abgeleitet. Abschließend werden die Limitationen der angewandten Methoden sowie die Einschränkungen der Forschung erläutert.

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung dieser Arbeit lassen sich in vier Themenblöcke gliedern: Der erste Block beschreibt die Analyse der durchgeführten Sanierung und Erweiterung, wobei verschiedene Planungsansätze zum Tragen kommen. Zum einen das Bauteil A, das in seiner Form die geringste Komplexität in Bezug auf die technische Gebäudeausrüstung aufweist. Das Bauteil B, welches durch seine diversen Nutzungen, beispielsweise die Kantine, die Küche, die Verwaltungsräume bis hin zu den Klassenzimmern, besonders mit Blick auf seine raumluftechnischen Anlagen heraussticht. Nicht zuletzt ist das Bauteil D zu nennen, welches in Passivhausbauweise ausgeführt wurde. Dabei sind insbesondere Fehler und Unklarheiten in der Verteilung und den Leistungen der Heizungsplanung aufgefallen, welche Anlass zur genaueren Untersuchung der Technischen Gebäudeausrüstung gaben. Der GEG-Nachweis bescheinigt dem Schulgebäude mit Unterschreitungen der Referenzwerte um bis zu 50 %, exzellente Werte mit Blick auf die energetische Versorgung.

Vor der Entwicklung alternativer Konzepte sollte zunächst das ökologische Potenzial des Gebäudes, nicht nur im Betrieb, sondern auch in der Errichtung und Instandhaltung, beurteilt werden. Auch hier wurden lediglich die Kostengruppen 410 bis 430 untersucht. Dafür wurde die vereinfachte und Sockelbetrag Variante der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen angewendet. Nachdem in dieser Arbeit der Anteil von 30 Prozent der grauen Emissionen für die Elektroanlagen stets vernachlässigt wurde, reduziert sich im vereinfachten Verfahren der Faktor auf 1,14. Dies bedeutet, dass für die Module A1-A3, B4-B5 und C3-C4 der Technischen Gebäudeausrüstung zu den 6383 t CO₂e der Kostengruppe 300 zusätzlich 14 % addiert werden. Für die zweite Variante wurde der Sockelbetrag des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude verwendet, wobei sich die Treibhausgasemissionen aus einem flächenspezifischen Festbetrag und einzelner Großkomponenten zusammensetzen. Dabei wurde ermittelt, dass in der „Premium“ Variante zusätzlich 13,73 % zu den Emissionen der KG 300 hinzukommen. Beim Anforderungsniveau „Plus“ sogar nur 10,07 %. In der dritten Bestandsvariante wurde ein detailliertes Verfahren nach Harter mit genauen Massen und den zugehörigen Umwelt-Produktdeklarationen angewendet. Für die Massenermittlung wurde ein neues 3D-Modell erstellt. Diese Methode kam zu dem Ergebnis, dass zusätzliche 18,26 %

notwendig sind, um das Erderwärmungspotential richtig abzubilden. Für alle drei Varianten wurde darüber hinaus das Rückgewinnungspotential des Moduls D ermittelt. Hier wurden im Zuge der ersten Variante erneut 14 % der Emissionen der KG 300 aufgeschlagen, beim Sockelbetrag waren es für die beiden Anforderungsniveaus Premium/Plus zusätzliche 59,51/43,94 % und beim Verfahren nach Harter 46,8 %.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde ein Modell für eine dynamische Simulation erstellt. Damit wurde zum einen die Heizlast der kritischen Zonen und zum anderen eine alternative Belüftungsmethodik für die Klassenzimmer in Bauteil D geprüft. Die Simulation basierte auf dem Wetterdatensatz von Hannover aus dem Jahr 2045 und berücksichtigte zudem die internen Lasten. Insgesamt konnte in dem Modell die Heizlast in dem gesamten Gebäude, mit Ausnahme der Klassenzimmer im Bauteil D, um 10,6 % minimiert werden. In den besagten Klassenzimmern hat sich die Heizlast um 47 % erhöht, da durch den Verzicht auf die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung die Verluste dementsprechend höher ausfielen. In Summe zeigte sich eine Reduktion des zu fördernde Massenstrom um 7,8 %. Aufbauend darauf konnte erneut eine Rohrdimensionierung mit Druckverlustberechnung für die Pumpenauslegung durchgeführt werden. Im Anschluss wurde speziell für die zwölf Klassenzimmer eine energetische Bilanz aufgestellt. Mit dem Systemwechsel kann innerhalb von 50 Jahren einerseits elektrische Ventilator- und Heizregisterleistung von 315,9 MWh eingespart werden. Auf der anderen Seite erhöht sich jedoch die Pumpenleistung in dieser Zeit um 1,75 MWh, sowie die thermische Leistung um 255,2 MWh. Insgesamt kann aufgrund der Verschiebung der elektrischen zur thermischen Leistung das Erderwärmungspotential der Nutzenergie auf circa 20% reduziert werden.

Als letzter Schritt wurde für die optimierte Gebäudetechnik nochmals das genaue Verfahren für die Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Dabei wurden lediglich Änderungen an der Lüftung und Heizung vorgenommen. Die zusätzlichen Treibhausgasemissionen für die Module A1-A3, B4-B5 und C3-C4 konnten dabei auf 16,58 % reduziert werden. In Abbildung 37 sind alle Ergebnisse der verschiedenen Ökobilanzvarianten als prozentualer Aufschlag zur Kostengruppe 300 dargestellt.

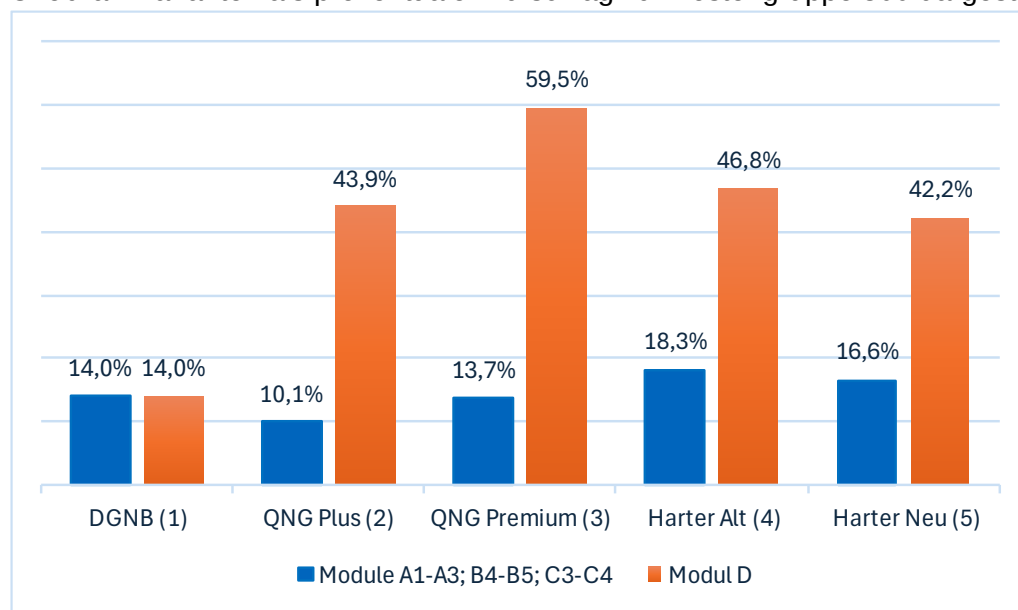


Abbildung 37 GWP-Zuschlag der Kostengruppen 410 bis 430 auf die Kostengruppe 300

5.2 Interpretation der Ergebnisse

Bei Betrachtung der Bestandsanalyse wurde deutlich, dass es sich bei dem Bau der Goetheschule um eine bereits sehr ins Detail gebrachte Planung handelt. Dies zeigt sich bereits beim Gewerk Sanitär, das zur Energieeinsparung zumeist nur Kältewasseranschlüsse verwendet. Die zentrale Wärmeversorgung wird über das städtische Fernwärmenetz abgedeckt und die Kälteerzeugung wird nur dort eingesetzt, wo sie aufgrund des Arbeitsschutzes und der Regularien benötigt wird. Bezüglich der Lüftung werden im Projekt zwei Ansätze verfolgt, auf die im Verlauf noch näher eingegangen wird. Der Umstand, dass es sich bei der Goetheschule im Rahmen des Forschungsprojektes „BauKlima-Kommunal“ um ein sogenanntes „Best-Practice-Projekt“ handelt, konnte in weiten Teilen bestätigt werden.

Als nächstes wird auf die Ergebnisse zur Berechnung der grauen Emissionen für die Kostengruppe 400 näher eingegangen. Das vereinfachte Verfahren (1) der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen liefert im Großen und Ganzen lediglich eine Zahl, die jedoch für eine erste Abschätzung in frühen Leistungsphasen als erster Anhaltspunkt sinnvoll sein kann, insbesondere da die detaillierten Verfahren erst noch an Relevanz gewinnen müssen. Das Rückgewinnungspotential der Variante (1) hingegen müsste dringend angepasst werden, da hier enorme Abweichungen zu den anderen Verfahren festgestellt werden konnten. Die nächsten beiden Varianten, (2) und (3), verwenden den Sockelbetrag der QNG als Bilanzierungsgrundlage. Der erste Kritikpunkt dabei ist, dass, obwohl es als detailliertes Verfahren gekennzeichnet ist, für den flächenspezifischen Sockelbetrag keinerlei Informationen zu dessen konkreten Zusammensetzung angegeben werden. Es wird einzig erwähnt, dass sich dieser aus den Kostengruppen 410 - 450 und deren Komponenten zusammensetzt. Hinzu kommen noch die Bilanzierungsgrößen für die Großkomponenten, welche aus einer Tabelle gezogen werden, die mit den Datensätzen der ÖkobaDat gespeist ist. Problematisch ist hierbei, dass die Anzahl dieser Datensätze viel zu gering ist. Es existieren beispielsweise keine Datensätze zu Frischwasserstationen, Umwälzpumpen und Heizregistern, welche bei größeren Bauvorhaben stark ins Gewicht fallen können. Zusätzlich sind die bestehenden Datensätze oft nicht aussagekräftig genug. Beispielhaft ist der Datensatz der zentralen Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung wie folgt beschrieben: „Die Lüftungsanlage besteht neben den Ventilatoren, die den Luftaustausch gewährleisten, aus einem Aluminiumwärmetauscher, der mit der Wärme der Abluft die frische Zuluft erwärmt.“ [33]. Dabei enthalten die Vollklimaanlagen, die großteils verbaut werden, noch Heizregister aus Kupfer, Schalldämpfer und Filter. Daraus folgt, dass der angegebene Umrechnungsfaktor nicht sinnvoll verwendet werden kann und die Bilanz der Großkomponenten ungenau ist, sodass zwangsläufig Fehler entstehen. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen wider. Mit knapp über 10 % in der „Plus“ und 13,7 % in der „Premium“ Variante, sind diese Werte deutlich zu niedrig und erscheinen in Wahrheit nicht logisch. Zudem kommt noch, dass in den Sockelbeträgen die Kälteerzeugung vollends enthalten ist, konkret in diesem Fallbeispiel aber nicht wirklich zum Tragen kommt. Dies bedeutet, dass das Erderwärmungspotential nach QNG in konkret diesem Beispiel zu hoch sein sollte. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass auch Nutzungen, wie Büroflächen, der LCA-Klasse 1 zuzuordnen sind, welche jedoch erfahrungsgemäß nochmals einen deutlich höheren

Grad der Technisierung aufweisen. Dieser kann und wird in der Bilanz dann folglich noch schlechter abgebildet.

Die erste Variante des genauen Verfahrens nach Harter (4) entspricht dem Stand der tatsächlichen Ausführung des Gebäudes. Dabei wird zum ersten Mal eine größere Abweichung zum zu den ersten drei Bilanzen ersichtlich. Mit Blick auf die errechneten 18,3 Prozentpunkten allein für die Kostengruppen 410 bis 430 kann gesagt werden, dass der Kostengruppe 400 in den bewährten Herangehensweisen der Ökobilanzierung ein deutlich zu geringer Stellenwert zugeschrieben wird. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der restlichen elektrotechnischen Gewerke der Kostengruppe wäre ein Zuschlag von über 26 % auf die Kostengruppe 300 realistisch. Dabei ist nochmal zu erwähnen, dass dieses Schulgebäude nicht das Maximum an verbauter technischer Gebäudeausrüstung bietet. Für die genaue Massenbilanz muss jedoch ergänzend gesagt werden, dass die ausgewählten Verbraucher nicht zwingend den tatsächlich verbauten entsprechen müssen und die Planung teilweise, wie in den Registeranschlüssen ersichtlich, nicht vollständig ist. Außerdem konnte nicht jeder Komponente eine vollends passende EPD zugewiesen werden und auch in der Bilanz der Befestigungskonstruktionen sind aufgrund der pauschalen Massenermittlung größere Schwankungen möglich. Beim Vergleich der Ergebnisse der Lüftungsgeräte wurde dabei eine erhebliche Abweichung zu den Geräten des Sockelbetrages festgestellt. Diese sind in Realität bis zu 5-mal größer als die auf Grundlage der Tabelle des QNGs errechneten. Das verdeutlicht nochmals, dass für eine Präzisierung des Verfahrens nach Sockelbetrag eine Erweiterung der Datensätze unabdingbar ist. Aus ökologischer Sicht kann positiverweise durch die Variante (5) gesagt werden, dass es vermutlich in jeder Planung Optimierungsmöglichkeiten gibt, welche oft gar keine allzu großen Eingriffe erfordern. Vor allem sollte zunehmend auf einfachere Bauweisen gesetzt werden, womit in diesem Beispiel die Gesamtreibhausgasemissionen der Heizung, Lüftung, Sanitär und Kälte von 18,3 auf 16,6 % reduziert werden konnten.

Das Rückgewinnungspotential aus dem Modul D wird in dem Verfahren der QNG auch etwas zu hoch eingestuft. Die Werte sind zwar etwas zu hoch, jedoch lässt sich festhalten, dass die Emissionen der TGA über die gesamte Lebensdauer hinweg deutlich reduziert werden könnten, wenn dieses Potenzial am Ende des Betrachtungszeitraums oder während des Austauschs genutzt wird.

In einem letzten Schritt sollen noch die Resultate der Simulation und Gebäudetechnikoptimierung bewertet werden. Zukünftig sollte in allen Bauprojekten in Betracht gezogen werden, Heizlast- und Energieverbrauchsrechnungen basierend auf tatsächlichen Lasten und Nutzung durchzuführen. Dies führt sowohl in der Emissionsbilanz als auch bei den Kosten, zu spürbaren Einsparungen. Die konkreten Ergebnisse der Fallstudie zu den Nutzungsemissionen der Lüftung und Heizung in den Klassenzimmern ermöglicht eine klare Antwort auf die Frage: „Ist es sinnvoll, für eine mechanische Lüftungsanlage – die den Wärmebedarf reduziert – Strom aufzuwenden, der bei der Erzeugung gegebenenfalls mehr CO₂ emittiert, als die Wärmerückgewinnung einspart?“ [20]. Diese Frage wird in Kapitel 2.2.2 des in dieser Arbeit untersuchten Buchs „Zukunftsfähiger Schulbau“ aufgeworfen und lässt sich auf Grundlage dieser Forschungsarbeit eindeutig mit „Nein“ beantworten. Solange die Treibhausgasbilanzen der Fernwärme- und Stromerzeugung auf dem aktuellen Niveau bleiben, ist es aus ökologischer Sicht sowohl in der Nutzungsphase als auch in Bezug

auf die grauen Emissionen sinnvoller, größere Lüftungswärmeverluste in Kauf zu nehmen, bevor der Anteil an elektrischer verbrauchter Energie zu hoch wird. Zusätzlich müsste das Verhalten der Nutzenden reguliert werden, denn die Wärmerückgewinnung kann nur effizient funktionieren, wenn eine Fensterlüftung in den Heizperioden unterbunden wird. Zum Abschluss ist noch zu erwähnen, dass für die technische Gebäudeausrüstung die Nutzungsemissionen ein viel höheres Erderwärmungspotential haben als die grauen Emissionen. Der Ansatz der Effizienzsteigerung ist schon sinnvoll, jedoch nur unter dem Vorbehalt, dass Optimierungen letztlich auch aus ökologischer Sicht von Vorteil sind.

5.3 Handlungsempfehlung für kommunale Bauprojekte

Zur finalen Beantwortung der Forschungsfrage und der aufgestellten Hypothesen, wie eine Bewertungsmethodik für die ökologische Analyse und Optimierung der Energie- und Gebäudetechnik bei Bestandssanierungen entwickelt werden kann, werden folgende Ansätze geliefert:

Die erste Empfehlung ist dabei, dass auch zukünftig die Lebenszyklusanalyse für die Kostengruppe 400 eingesetzt wird. Entscheidend ist hierbei der Zeitpunkt. Bereits früh in der Planung werden die Maßstäbe für das gesamte Projekt oder die Sanierung gelegt. Es ist anzunehmen, dass bei einer Sanierung der technischen Gebäudeausrüstung in der Regel nahezu die gesamte Ausstattung ausgetauscht wird. In diesem Zusammenhang kann die Ökobilanz als Instrument genutzt werden, um frühzeitig Impulse zu geben. Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass die in der Praxis häufig eingesetzten Bilanzierungsverfahren ungenaue Ergebnisse liefern. Entsprechend wäre es von Vorteil, bereits in den frühen Leistungsphasen mit Massenbilanzen ein genaueres GWP zu ermitteln. Dafür bräuchten die Kommunen bereits in Leistungsphase 2 Zugriff auf die Kostenschätzungen der TGA-Planungsbüros. Dieser Schätzung liegen meistens Auswertungen bereits durchgeführter Projekte zugrunde. Diese haben flächenspezifische Daten für Rohre, Verbraucher und Erzeuger, die als Grundlage für eine präzisere Bilanz verwendet werden können.

Die LCA sollte allerdings nicht nur als planungsbegleitendes Instrument genutzt werden, es ist auch sinnvoll vor Start der eigentlichen Sanierung diese durchzuführen. Dafür ist das in dieser Arbeit beschriebene detaillierte Verfahren nach Harter empfehlenswert, nachdem bereits in der Bilanz deutlich wurde, dass das Gewerk Lüftung überproportional stark gewichtet ist. Dadurch konnte eine Alternative entwickelt werden, durch die die Kommune sowohl Emissionen als auch Geld einspart. Diese Methode müsste jedoch in Zukunft anders umgesetzt werden. Die Kommunen sollten sich dabei mehr auf die Montage- und Werkstattplanung der ausführenden Firmen fokussieren. Wenn diese vorhanden sind, könnten die dort erzeugten Massen und Stücklisten sofort in die Bilanz eingepflegt werden, was den Prozess deutlich erleichtern würde. Ein enger Austausch mit den Baufirmen spielt somit eine zentrale Rolle. Zudem werden die Datenbanken mit den Umwelt-Produktdeklarationen kontinuierlich erweitert, wodurch die Präzision in den kommenden Jahren nochmal zusätzlich gesteigert werden kann.

Zusätzlich zu der direkten Bewertung des gesamten Lebenszyklus gelten folgende Planungsansätze als vielversprechend: Zukünftig sollte mehr auf dynamische Simulationen mit tatsächlich auftretenden Last- und Belegungsprofilen gebaut werden. Dies hat den Vorteil, dass, wie auch in dieser Fallstudie gezeigt, durch die normativen Vorgaben oft eine Überdimensionierung stattfindet, welche jedoch durch die Berücksichtigung von internen Lasten und angepassten Regelstrategien vermieden werden kann. Konkrete Handlungsempfehlungen für die Kostengruppen 410 bis 430 in Schulbauten sind die Verwendung von natürlichen Lüftungskonzepten. Für den Fall, dass raumluftechnische Anlagen verbaut werden, sollte die Luftkonditionierung immer zentral über die Wärmeerzeugung realisiert werden. Dies ist vor allem relevant, solange sich die Treibhausgasbilanzen der Wärme- und Stromerzeugung nicht signifikant ändern. Sollte jedoch eine lokale erneuerbare Stromerzeugung mit Speichermöglichkeit zur Verfügung stehen, ist eine erneute Analyse der Situation erforderlich. Des Weiteren sollten für die Wärmeverteilnetze sinnvolle Gleichzeitigkeiten in der Planung angesetzt werden. In der Norm DIN EN 12828 ist definiert, dass „Heizlasten nicht notwendigerweise kumulativ sind und die Wärmeerzeugungsleistung nach vereinbarten Kriterien für ihren jeweiligen Bedarf bestimmt werden sollte“ [12]. Es werden dort zwar keine konkreten Reduzierungsfaktoren genannt, diese sollten aber nicht zu gering angesetzt werden, da es nahezu ausgeschlossen ist, dass alle Wärmeabnehmer gleichzeitig die maximale Heizlast benötigen.

5.4 Limitationen der verwendeten Methodik

Zum Ende der Diskussion müssen noch die entscheidenden Limitationen der durchgeführten Methoden erörtert werden. Hierbei ist zunächst der Ausschluss der elektrischen Anlagen in der Kalkulation zu nennen, wodurch keine 100-prozentig passende Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400 durchgeführt werden konnte. Da sich der Faktor von 0,7 aus einem Mittelwert von mehreren wissenschaftlichen Quellen zusammensetzt, kann es sein, dass hierbei Abweichungen zu den tatsächlichen Bilanzierungsergebnissen entstanden sind. Daneben konnte, wie bereits in Kapitel 5.2 angesprochen, aufgrund der fehlenden Daten der Großkomponenten keine vollkommen korrekte Zuweisung stattfinden, wodurch die Ökobilanzierungsergebnisse vermutlich reduziert wurden. Ferner konnte auch bei der Massenermittlung auf Grundlage der Ausführungsplanung auch nicht alles erfasst werden. Beispielsweise konnte die Menge an Brandschutzmörtel zum Verputzen der Brandschutzklappen nicht definiert werden oder die Massen für die Befestigung mussten ebenso pauschalisiert werden. Die nächste, größere Limitation war der Abbruch der Gesamtmodellerstellung für die dynamische Simulation. Dies hätte den Vorteil gehabt, dass eine Energiesimulation des gesamten Betrachtungszeitraum hinweg für die TGA möglich gewesen wäre. Dadurch hätten die kompletten Nutzungsemissionen der Phase B6 aufgezeigt und besser mit den grauen Emissionen in Relation gesetzt werden können. Zudem hätte das Gesamtmodell voraussichtlich genauere Ergebnisse geliefert, da die Heizlast nicht aus Einzelzonen hätte extrapoliert werden müssen. Zur finalen Verifizierung der Methode müsste diese noch in weiteren Bauprojekten mit anderen Erzeugungsvarianten und Konzepten angewendet werden, was den Umfang dieser Masterarbeit allerdings sprengen würde.

6 Fazit und Ausblick

Fazit

Aus der Datenerhebung in der Bestandsanalyse ging hervor, dass die Sanierung der Goetheschule aus energetischer Sicht und mit Blick auf das Maß an verbauter Technik bereits gut umgesetzt wurde. Zur ökologischen Bewertung der Gebäudetechnik wurden diverse Ökobilanzverfahren durchgeführt, die relevante Unterschiede in der Menge an grauen Emissionen ergaben. Die umfangreiche Bilanz ergab konkret an diesem Fallbeispiel deutlich zu niedrige Ergebnisse unter Verwendung der gängigen Methoden. Die dynamische Simulation hat zudem bewiesen, dass durch die Standardverfahren die Heizlasten und damit verbunden die Rohrdimensionierungen zu groß ausfallen und hier ein deutliches Einsparpotenzial vorhanden ist. Ebenso konnte festgestellt werden, dass bereits kleinere Veränderungen an der Gebäudetechnik relevante Mengen an CO₂-Äquivalenten einsparen können.

Das Ziel der Arbeit war die Entwicklung und Anwendung einer Bewertungsmethode, die eine ökologische Analyse und Optimierung der Energie- und Gebäudetechnik bei Bestandssanierungen ermöglicht. Dies konnte mithilfe der oben beschriebenen Methoden erfolgreich umgesetzt werden. Eine zielführende Bewertungsmethode besteht dabei aus zwei Teilen: Der erste Teil ist die detaillierte Ökobilanz, die Aufschluss über die möglichen Potenziale in der Planung gibt und eine Vergleichbarkeit zwischen den Projekten ermöglicht. Im zweiten Schritt müssen die entdeckten Möglichkeiten im Detail hinterfragt werden, um mittels neuer Berechnungen und dynamischer Simulationen den Grad der Technisierung und damit einhergehend das Erderwärmungspotenzial zu minimieren. Dabei lassen sich vor allem neue Erkenntnisse in Bezug auf die Lebenszyklusanalyse der Kostengruppe 400 gewinnen. Diese ist nunmehr von essenzieller Bedeutung, da sie nicht nur Potenzial zur Verbesserung bietet, sondern insbesondere hier auch die Wahrnehmung der Bauherren und aller Planungsbeteiligten maßgebend beeinflusst werden kann.

Die konkrete Umsetzung der Methodik dieser Abschlussarbeit wies neben zahlreichen Stärken auch einige Schwächen auf. Insbesondere bei der Massenermittlung ist eine Verknüpfung mit der Montageplanung oder mit den Mengen aus den Leistungsverzeichnissen notwendig. Eine Neuanfertigung der Planungsunterlagen würde nicht nur mit Abweichungen zum Bestand, sondern ebenso mit einem erheblichen zeitlichen Mehraufwand einhergehen. Außerdem vernachlässigen die aktuellen Systemgrenzen der Ökobilanz die gesamten Außenanlagen, welche jedoch speziell bei den Abwasseranlagen mit einer großen Menge an grauen Emissionen verbunden sind. Zusätzlich ist die Menge an verfügbaren Datensätzen noch sehr gering, wodurch sich eine bleibende Unsicherheit in den Ergebnissen nicht vermeiden lässt. Letztlich ist auch die Handhabung des verwendeten Simulationsprogrammes IDA ICE nicht sehr benutzerfreundlich, mit teilweise schwer nachvollziehbaren Ergebnissen aufgrund der großen Datengrundlage.

Ausblick

Die Ankündigung des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen im Mai 2024, wonach die Tabelle der Rechenwerte für die Großkomponenten im Bilanzierungsverfahren mit Sockelbetrag durch die überarbeitete Version der Ökobaudat 2024 ersetzt werden soll, lässt hoffen, dass die Erfassung der Großkomponenten künftig deutlich präziser erfolgen wird. Die Überarbeitung sollte im Herbst dieses Jahres erfolgen, wurde allerdings bislang nicht umgesetzt. [60] In Zukunft könnte es sinnvoll sein, die Datenbank auf europäischer Ebene zu verknüpfen, wobei jedoch eine eingehende Prüfung der Machbarkeit erforderlich wäre. Dies hätte zukünftig insbesondere in den frühen Leistungsphasen der Projekte den Vorteil, dass mit dem verbesserten Verfahren nach dem Standard des QNGs, präzisere Abschätzungen zu den ökologischen Auswirkungen der TGA getroffen werden könnten. Die Forschung könnte sich besonders mit einer Optimierung der Massenbilanz und mit der Frage beschäftigen, inwiefern sich eine solche Verknüpfung durch den Fortschritt im Bereich BIM implementieren ließe. Den so würde die Methode nach Harter vor allem vor dem Sanierungsbeginn, aber auch in den späteren Leistungsphasen von Neubauten an Bedeutung gewinnen. Außerdem wäre auf Gebäudeebene zudem relevant, wie eine klimaneutrale Strom- und Wärmeerzeugung die Bilanzierungsergebnisse verändert und konkreter, welche Werte für alternative Heizsysteme, wie Fußbodenheizungen oder flächendeckende Heiz-/Kühlsegele, zu erwarten wären. Dabei stellt sich die Frage, ob sich die Ergebnisse in anderen Projekten reproduzieren lassen und wie die Handlungsempfehlungen auf kommunaler Ebene eine konkrete Anwendung finden können. Abschließend, um das Zitat aus der Einleitung von Prof. Auer nochmals aufzugreifen, wird es in Zukunft unabdingbar sein, den Grad der Komplexität der technischen Gebäudeausrüstung, trotz ihres hohen Stellenwertes, wieder zu reduzieren und sich streng nach dem Motto „Weniger ist Zukunft“ auf das Wesentliche zu fokussieren [3]. Dies kann und wird nur durch eine inkludierte Planung aller Beteiligten möglich sein.

Literaturverzeichnis

- [1] tab – Die Fachzeitschrift für technische Gebäudeausrüstung, "Gebäudetechnik gewinnt an Bedeutung," 28. Juni 2022. Zugriff am: 6. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.tab.de/artikel/tab_gebaeudetechnik-gewinnt-an-bedeutung-3792716.html
- [2] KBP Ingenieure GmbH. "KBP Ingenieure Technische Gesamtplanung | München." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.kbp.de/>
- [3] Deutsche BauZeitschrift, "„Weniger ist Zukunft!“ Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer zum Thema „Nachhaltigkeit“, " *Deutsche BauZeitschrift*, 11. Juni 2014. Zugriff am: 6. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Weniger_ist_Zukunft_Prof._Dipl.-Ing._Thomas_Auer_zum_Thema-2025379.html
- [4] Nationale Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. "BauKlima-Kommunal." Zugriff am: 6. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.klimaschutz.de/de/projekte/bauklima-kommunal>
- [5] C. Gengnagel und D. Apellániz, "Lebenszyklusanalyse und parametrischer -Raumentwurf - nbau. NACHHALTIG BAUEN," Aug. 2023. Zugriff am: 6. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.nbau.org/2023/04/17/lebenszyklusanalyse-und-parametrischer-raumentwurf/>
- [6] Deutscher Bundestag, "DIN-Normen und Rechtssetzung," Dez. 2019. Zugriff am: 3. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/677848/f35cfe3e47845c4c9ae2b6839a9e6a2c/WD-7-198-19-pdf-data.pdf>
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik. "Bauaufsichtliche Begleitung der Normung." Zugriff am: 3. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/bauaufsichtliche-begleitung-der-normung>
- [8] Deutscher Bundestag, *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden** (Gebäudeenergiegesetz - GEG): GEG, 2023. Zugriff am: 5. August 2024. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>
- [9] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, *Technische Regeln für Arbeitsstätten - Raumtemperatur: ASR A3.5*, 2022. Zugriff am: 23. November 2024. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/ASR/ASR>
- [10] DIN 276 - *Kosten im Bauwesen*, 276, Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2018. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:293154016>
- [11] Deutsches Institut für Normung e. V. "DIN EN 12831-1." Zugriff am: 3. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-12831-1/261292587>

- [12] *DIN EN 12828: Heizungsanlagen in Gebäuden - Planung von Warmwasser-Heizungsanlagen*, Deutsches Institut für Normung e. V., Jul. 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-12828/203258170>
- [13] *DIN EN 16798-1 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden: Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019*, 16798-1, Deutsches Institut für Normung e. V., Mrz. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nhrs/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:349622591>
- [14] *DIN V 18599-1 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*, 18599-1, Deutsches Institut für Normung e. V., Sep. 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/vornorm/din-v-18599-1/293515783>
- [15] *DIN EN ISO 14040 - Umweltmanagement – Ökobilanz: Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020)*, 14040, Deutsches Institut für Normung e. V., Feb. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nagus/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:325953744>
- [16] *DIN EN ISO 14044 - Umweltmanagement – Ökobilanz: Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020*, 14044, Deutsches Institut für Normung e. V., Feb. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nagus/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:325953813>
- [17] *DIN EN 15978 Nachhaltigkeit von Bauwerken: Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011*, 15978, Deutsches Institut für Normung e. V., Okt. 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:164252701>
- [18] Berliner Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie. "Leitfaden für die Sanierung von Schulen: Berliner Schulbauoffensive." Zugriff am: 29. November 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.berlin.de/schulbau/_assets/service/downloadcenter/publikationen/leitfaden-fur-die-sanierung-von-schulen.pdf
- [19] BauNetz, "Pettenkofer-Wert | Gebäudetechnik | Glossar | Baunetz_Wissen," *BauNetz*. Zugriff am: 7. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/pettenkofer-wert-2493079>
- [20] F. N. Thomas Auer, *DBU Bauband 2: Zukunftsfähiger Schulbau: 12 Schulen Im Vergleich* (DETAIL Special Ser). München: Detail Business Information GmbH The, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4943670>

- [21] Dr. Sabine Perch-Nielsen, "Energie Performance Gap in Neubauten," Zugriff am: 4. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.minergie.ch/media/2019_performance-gap_in_neubauten_ebp.pdf
- [22] ifeu gGmbH: Institut für Energie- und Umweltforschung, "Wirkungsabschätzung," 2016. Zugriff am: 15. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ifeu.de/methoden-tools/wirkungsabschaetzung>
- [23] A. Braune, L. Ekhvaia und K. Quante, "BENCHMARKS FÜR DIE TREIBHAUSGASEMISSIONEN DER GEBÄUDEKONSTRUKTION: Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden," Aug. 2021. Zugriff am: 5. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf
- [24] Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB), "DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Sanierung: ENV1.1 Ökobilanz des Gebäudes," 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dgnb.de/filestorages/Downloads_unprotected/dokumente/kriterien/dgnb-kriterium-env1-1-gebaeude-sanierung-version-2021.pdf
- [25] Die Deutsche Emissionshandelsstelle, "Glossar - graue Emissionen," Dez. 2024. Zugriff am: 5. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dehst.de/DE/Service/Glossar/_functions/glossar.html?nn=282246&lv2=283132
- [26] Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB), "DGNB System: Kriterienkatalog Gebäude Neubau," 2023. Zugriff am: 28. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/gebaeude/neubau/version-2023>
- [27] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, "QNG - Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude," Aug. 2023. Zugriff am: 5. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/bauen/bauwesen/qng/qng-node.html>
- [28] Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude, "QNG Anforderungen | QNG," Nov. 2024. Zugriff am: 5. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.qng.info/qng/qng-anforderungen/>
- [29] Deutsches Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, "Bilanzierungsregeln des QNG für Nichtwohngebäude," Anhang 3.2.1.1 zur ANLAGE 3, Mrz. 2023. Zugriff am: 30.05.2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qng.info/app/uploads/2023/03/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-3211_LCA_Bilanzregeln-NW_v1-3.pdf
- [30] Deutsches Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. "Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude: Ökobilanzierung Rechenwerte 2023 Version 1.3." Zugriff am: 29. Mai 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.qng.info/qng/qng-anforderungen/qng-siegeldokumente/>
- [31] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), www.bmu.de, "Bedeutung des Energieaufwands für verschiedene Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus für den Klimaschutz," 2019.

- [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3715_41_111_energieaufwand_gebaeudekonzepte_bf.pdf
- [32] Hannes Michel Harter, "Lebenszyklusanalyse der Technischen Gebäudeausrüstung großer Wohngebäudebestände auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle," Dissertation, Technische Universität München, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1610979>
- [33] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, *OEKOBAUDAT*. Zugriff am: 26. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: oekobaudat.de
- [34] EQUA Solutions AG, *IDA ICE* (5.0). Zugriff am: 29. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.equa.se/de/ida-ice>
- [35] Wikipedia. "Goetheschule (Hannover)." Zugriff am: 21. November 2024. [Online.] Verfügbar: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Goetheschule_\(Hannover\)&oldid=248115617](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Goetheschule_(Hannover)&oldid=248115617)
- [36] KApplus - Ingenieurbüro vollert, "Energieausweis - Fortschreibung GEG+PHPP," Aug. 2022. Zugriff am: 7. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.kapplus.de/>
- [37] Poolarserver GmbH. "Landeshauptstadt Hannover: 001-GSH Dateien." Zugriff am: 22. November 2024. [Online.] Verfügbar: https://stadt-hannover.poolarserver.com/pageDownloadB.aspx?_pssid=4C4F4D8#
- [38] One Click LCA Ltd, *One Click LCA*. Zugriff am: 30. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://oneclicklca.com/our-address-and-vat?_gl=1*ughwai*_up*MQ.&gclid=CjwKCAjwx-CyBhAqEiwAeOcTda9fu0rDK2oEnk0IcHP2thqtlleh_aWHBSirAE97Jyk1iAXUQ0-JhRoCMokQAvD_BwE
- [39] M. N. Weißenberger, "Lebenszyklusorientierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik," Dissertation, Technische Universität München, 2016.
- [40] Hochschule Luzern, "Systemkennwerte Graue Energie Gebäudetechnik," Jg. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=67175&Load=true>
- [41] M. Klingler, "Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen: Sach- und Ökobilanzen von sechzehn verschiedenen Gebäuden in den Bereichen Wohnen, Büro, Schulen und Altersheime Sach- und Ökobilanzen von sechzehn verschiedenen Gebäuden in den Bereichen Wohnen, Büro, Schulen und Altersheime," 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dflca.ch/inventories/Baumaterial/BfU_B&H_2014-Oekobilanzdaten_Lueftungs-_und_Waermeanlagen.pdf
- [42] Bundesamt für Energie - BFE, "Graue Energie von Sanitär- und Elektroanlagen: Sach- und Ökobilanzen von zwölf verschiedenen Gebäuden in den Bereichen

- Wohnen und Büro," 2011. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dflca.ch/inventories/Baumaterial/BfU_2011-GraueEnergie_Sanitaer_Elektro.pdf
- [43] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, "QNG_Handbuch_Anlage-1-Siegelvarianten: Verzeichnis der Gebäude- und Nutzungsarten," 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qng.info/app/uploads/2023/01/QNG_Handbuch_Anlage-1-Siegelvarianten_v1-2.pdf
- [44] H. Martin und L. Heinz, *mh-software* (mh7). mh-software GmbH. Zugriff am: 30. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mh-software.de/impressum.html>
- [45] *DIN EN 10255: Rohre aus unlegiertem Stahl mit Eignung zum Schweißen und Gewindeschneiden - Technische Lieferbedingungen*, Deutsches Institut für Normung e. V., Jul. 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-10255/98526027>
- [46] EPD Norge. "EPD Norge - Forsiden." Zugriff am: 26. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.epd-norge.no/#googtrans%28no%7Cde%29>
- [47] Systemair GmbH. "Topvex Lüftungsgeräte -Topvex air handling units from Systemair." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.systemair.com/de-de/produkte/luftungsgerate/topvex>
- [48] Systemair GmbH. "HHFlex Air Handling Units High quality, ultimate flexibility." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.systemair.com/en/products/air-handling-units/hhflex>
- [49] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. "VDI 2067 Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-wirtschaftlichkeit-gebaudetechnischer-anlagen-grundlagen-und-kostenberechnung-1>
- [50] Danfoss GmbH, "EPD ABQM DN 40 -100 with NovoCon M actuator," Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://assets.danfoss.com/documents/356898/BI461538630489en-000104.pdf>
- [51] Kermi GmbH, "EPD - Heizkörper aus Stahl," Aug. 2023. Zugriff am: 27. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.arbonia-assets.com/v/RkaeXide/>
- [52] Geberit Vertriebs GmbH. "Nachhaltigkeit in der Sanitärbranche." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.geberit.de/know-how/nachhaltigkeit/>
- [53] ACO Passavant GmbH, "EPD -Fettabscheider," Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.aco.dk/catalog/Om_ACO/EPD/EPD_-_Plast_Olie-_og_fedtudskillere.pdf?fileVersion=1731659338
- [54] DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG, "Ökobilanz-Rechner," 04. September 2024. Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.rockwool.com/de/downloads-und-services/tools-und-rechner/oekobilanz-rechner/>

- [55] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. "Ortsgenaue Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html;jsessionid=AAE6AA3578D820BB4AE2E5D337C09CFB.live11293?pos=2#doc2799182bodyText1>
- [56] Autodesk GmbH, *Autodesk Revit* (2025). Zugriff am: 12. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autodesk.de/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- [57] GRUNDFOS GMBH. "Produktauslegung - Grundfos Product Center." Zugriff am: 30. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://product-selection.grundfos.com/de/size-page?sQcid=2530182893>
- [58] Rosenberg Ventilatoren GmbH. "SupraBox DELUXE: Kompaktlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung." Zugriff am: 27. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.rosenberg-gmbh.com/de/produktprogramm/kompaktlueftungsgeraete-mit-wrg/suprabox-deluxe>
- [59] enercity Hannover. "Primärenergiefaktor Fernwärme." Zugriff am: 1. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.enercity.de/fernwaerme/primaerenergiefaktor>
- [60] Deutsche Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, "Informationen zur Weiterentwicklung der LCA-Methodik im QNG," Jg. 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qng.info/app/uploads/2024/05/QNG_Weiterentwicklung_LCA_Methodik_2024_240517.pdf

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aktuelle TGA-Planung für das Untergeschoss eines Büro- und Restaurantgebäudes [2].....	7
Abbildung 2 Aufbau der Kostengruppen, eigene Darstellung basierend auf [10].....	10
Abbildung 3 Spez. Heizwärmebedarf [kWh/m ² *a], eigene Darstellung basierend auf [20].....	14
Abbildung 4 Spez. Hilfsenergiebedarf [kWh/m ² *a], eigene Darstellung basierend auf [20].....	14
Abbildung 5 Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 [15].....	16
Abbildung 6 Modulare Informationen für die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes [17].....	18
Abbildung 7 Systemgrenzen der DNGB-Ökobilanz [24]	19
Abbildung 8 QNG Sockelbetrag KG 400 für LCA-Klasse 1 [29].....	21
Abbildung 9 Lageplan Goetheschule aus dem Energieausweis [36]	25
Abbildung 10 Zonenaufteilung Energieausweis nach DIN V 18599 im Bestand [36]	26
Abbildung 11 Struktur und Parameter des Wärmeverteilnetzes im Bestand.....	28
Abbildung 12 Nettoraumflächen Goetheschule	30
Abbildung 13 Ergebnisse Lebenszyklusanalyse KG 300.....	30
Abbildung 14 Verteilung der grauen Emissionen der KG 400, eigene Darstellung basierend auf [39-42]	31
Abbildung 15 Sockelbetrag der QNG für die KG410-430 mit Faktor 0,7.....	32
Abbildung 16 Massenermittlung der Großkomponenten	32
Abbildung 17 Ergebnisse LCA mit Sockelbetrag nach dem QNG	33
Abbildung 18 IFC-Gesamtmodell Heizung, Lüftung und Sanitär	35
Abbildung 19 Massenauszug Rohrmaterial Statische Heizung B aus mh-software [44].....	36
Abbildung 20 Massen ausgewählter Heizungskomponenten	37
Abbildung 21 Massen ausgewählter Sanitärkomponenten.....	37
Abbildung 22 Massen ausgewählter Lüftungskomponenten	38
Abbildung 23 Ergebnisse der LCA der KG 410 bis 430 nach Harter	40
Abbildung 24 Aufteilung grauer Emissionen nach TGA-Gewerken	40
Abbildung 25 Jahresverlaufstemperatur Hannover 2045 [55].....	41
Abbildung 26 Ansicht Südost Gesamtmodell IDA ICE.....	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 27 Darstellung Zone D.1.06 in IDA ICE	44
Abbildung 28 Wärmebilanz der Zone A.0.20	45
Abbildung 29 Wärmebilanz der Zone A.2.20	45
Abbildung 30 Wärmebilanz der Zone B.0.01	46
Abbildung 31 Wärmebilanz der Zone D.1.06	47
Abbildung 32 Berechnete Heizlastfaktoren nach der Simulation in IDA ICE	47
Abbildung 33 Vergleich der Ergebnisse Rohrnetzberechnung	48
Abbildung 34 Pumpenvergleich der unterschiedlichen Auslegungssituationen	49
Abbildung 35 Ansicht Bauteil D optimierte Variante TGA	50
Abbildung 36 Ergebnisse der LCA KG 410 bis 430 nach Harter mit optimierter TGA	51
Abbildung 37 GWP-Zuschlag der Kostengruppen 410 bis 430 auf die Kostengruppe 300	54

Anhang

Anhang 1: Massenauszüge aus mh-software

Die nachstehend aufgeführten Massenauszüge aus der mh-software sollen exemplarisch den Prozess der Massenermittlung veranschaulichen.

Anlage 1.1: Ventilzusammenstellung Statische Heizung Bauteil D [44]

Ventil-Zusammenstellung

Hersteller: Dan Danfoss Wärmetechnik 202304
 Gruppe: 2 Heizkörperarmaturen für Zweirohrsysteme

KB	Bezeichnung	kvs	DN	Anzahl
		[m³/h]	[mm]	
15	RLV	2,50	15	75
Summe				75

Gruppe: 4 Absperr- und Regelarmaturen für Rohrleitungen

KB	Bezeichnung	kvs	DN	Anzahl
		[m³/h]	[mm]	
18	AB-QM	0,00	50	1
21	AB-QM 4.0	0,00	15	3
21	AB-QM 4.0	0,00	20	10
Summe				14

Hersteller: IMI IMI Heimeier
 Gruppe: 2 Heizkörperarmaturen für Zweirohrsysteme

KB	Bezeichnung	kvs	DN	Anzahl
		[m³/h]	[mm]	
8	mit geringem Widerstand Th-Ventil	3,10	15	75
Summe				75

Hersteller: KSB KSB SE & Co. KGaA
 Gruppe: 5 Armaturen mit Festwiderständen z.B. Wärmemengenzähler (Mess-

KB	Bezeichnung	kvs	DN	Anzahl
		[m³/h]	[mm]	
300	BOA-H Flanschen-Absperrventil, PN16/25, DN15-350, bis 350°C	4,90	15	3
300	BOA-H Flanschen-Absperrventil, PN16/25, DN15-350, bis 350°C	8,50	20	10
300	BOA-H Flanschen-Absperrventil, PN16/25, DN15-350, bis 350°C	43,40	50	1
340	BOAX-SF Absperrklappe, Gewindeflansch, PN10/16, DN20-600, bis	37,00	20	3
340	BOAX-SF Absperrklappe, Gewindeflansch, PN10/16, DN20-600, bis	65,00	32	6
340	BOAX-SF Absperrklappe, Gewindeflansch, PN10/16, DN20-600, bis	130,00	50	3
Summe				26
Total				190

Anhang

Anlage 1.2: Dämmung Bauteil B Lüftungsrohre [44]

Material: rund R Steinwolle

Rauhigkeit: 0,300 mm

Lambda: 0,040 W/mK

b	a/DN	Dicke	Länge	Oberfläche	Gewicht
[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[m²]	[kg]
	90	30,00	5,61	1,59	7,19
	100	30,00	228,5	71,81	325,30
	125	30,00	73,94	29,03	131,53
	150	30,00	35,64	16,79	76,07
	200	30,00	100,6	63,26	286,59
	224	30,00	5,04	3,54	16,06
	250	30,00	40,08	31,48	142,60
	315	30,00	10,21	10,10	45,77
Summe			499,78	227,62	1031,11

Anlage 1.3: Menge Wickelfalzrohre Bauteil B [44]

Hersteller: WFR Wickelfalzrohr

Material: rund WFR DIN 24190/24191

Rauhigkeit: 0,150 mm

Lambda: 200,00 W/mK

Alpha	b	a/DN	Länge	Oberfläche	Dicke	Gewicht
[°]	[mm]	[mm]	[m]	[m²]	[mm]	[kg]
		90	5,61	1,59	0,40	5,01
		100	228,5	71,81	0,60	340,38
		125	73,94	29,03	0,60	137,62
		150	35,64	16,79	0,60	79,60
		200	103,1	64,83	0,60	307,30
		224	5,04	3,54	0,60	16,80
		250	40,08	31,48	0,60	149,21
		315	11,20	11,08	0,80	70,04
Summe			503,2	230,16		1105,98

Anlage 1.4: Massenverteilung Mapress Edelstahlrohre [44]

Hersteller: GEB GEBERIT

Material: MAP Mapress Edelstahlrohr

Nennweite							
DN	Aussen	Innen	Oberfläche	Gewicht	Länge	Volumen	Bögen
[mm]	[mm]	[mm]	[m²]	[kg]	[m]	[l]	Anzahl
12	15,0	13,0	52,34	666,74	1111,2	147,4	823
15	18,0	16,0	10,14	125,63	179,48	36,1	56
20	22,0	19,6	9,13	132,19	132,19	39,9	50
25	28,0	25,6	32,92	486,79	374,45	192,6	149
32	35,0	32,0	17,35	331,49	157,85	126,9	64
40	42,0	39,0	35,22	667,73	267,09	318,9	62
50	54,0	51,0	20,27	394,52	119,55	244,1	31
65	76,1	72,1	9,01	218,69	37,71	153,9	4
Summe			186,39	3023,79	2379,56	1259,7	1239

Anhang 2: Lebenszyklusanalyse der KG 410 – 430 nach Harter

In Anhang 2 ist die Ökobilanztafel für das detaillierte Verfahren nach Harter dargestellt. Dort werden den jeweiligen Massen entweder Datensätze aus der ÖkobaDat, dem Ökobilanzrechner von Rockwool oder die direkten Hersteller EPDs zugewiesen. Die Nummerierung bezieht sich auf die EPDs in der Sych+Share Datei.

Anlage 2.1: Bilanzierungstabelle Bestand Goetheschule

Nummer	Gewerk	Komponenten	Beschreibung	Anzahl	Einheit	Lebensdauer [a]	GWP A1- A3, C3, C4 [kg CO ₂ e]	GWP D1	Faktor Lebensdauer	Summe GWP A1- A3, B4, B5, C3, C4 [kg CO ₂ e]	Summe GWP D1 [kg CO ₂ e]	EPD
1.1	RLT	Lüftungskanal	verzinktes Stahlblech	11663	kg	20	3,07	-1,23	3	107311,3	-43036,47	ÖkobaDat
1.2	RLT	Wickelfalzrohr	verzinktes Stahlblech	4071	kg	20	3,07	-1,23	3	37457,3	-15021,99	ÖkobaDat
1.3	RLT	Brandschutzklappe eckig	200x100	2	St	20	22,59	-1,88	3	135,6	-11,3	1
1.4	RLT	Brandschutzklappe eckig	200x200	43	St	20	31,63	-2,64	3	4080,4	-340,1	1
1.5	RLT	Brandschutzklappe eckig	300x100	3	St	20	27,11	-2,26	3	244,0	-20,3	1
1.6	RLT	Brandschutzklappe eckig	300x150	4	St	20	31,63	-2,64	3	379,6	-31,6	1
1.7	RLT	Brandschutzklappe eckig	300x200	6	St	20	36,15	-3,01	3	650,7	-54,2	1
1.8	RLT	Brandschutzklappe eckig	350x200	1	St	20	49,71	-4,14	3	149,1	-12,4	1
1.9	RLT	Brandschutzklappe eckig	400x200	2	St	20	45,19	-3,77	3	271,1	-22,6	1
1.10	RLT	Brandschutzklappe eckig	400x250	3	St	20	54,22	-4,52	3	488,0	-40,7	1
1.11	RLT	Brandschutzklappe eckig	400x400	4	St	20	72,30	-6,03	3	867,6	-72,3	1
1.12	RLT	Brandschutzklappe eckig	450x200	2	St	20	54,22	-4,52	3	325,3	-27,1	1
1.13	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x250	6	St	20	63,26	-5,27	3	1138,7	-94,9	1
1.14	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x300	1	St	20	67,78	-5,65	3	203,3	-16,9	1
1.15	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x350	6	St	20	76,82	-6,40	3	1382,7	-115,2	1
1.16	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x400	3	St	20	81,34	-6,78	3	732,0	-61,0	1
1.17	RLT	Brandschutzklappe eckig	550x550	10	St	20	122,01	-10,17	3	3660,2	-305,1	1
1.18	RLT	Brandschutzklappe eckig	600x300	4	St	20	76,82	-6,40	3	921,8	-76,8	1
1.19	RLT	Brandschutzklappe eckig	600x600	1	St	20	135,56	-11,30	3	406,7	-33,9	1
1.20	RLT	Brandschutzklappe eckig	700x400	4	St	20	99,41	-8,29	3	1192,9	-99,4	1
1.21	RLT	Brandschutzklappe eckig	800x100	2	St	20	58,74	-4,90	3	352,5	-29,4	1
1.22	RLT	Brandschutzklappe eckig	800x500	9	St	20	149,12	-12,43	3	4026,2	-335,6	1
1.23	RLT	Brandschutzklappe eckig	1000x500	8	St	20	176,23	-14,69	3	4229,5	-352,5	1
1.24	RLT	Brandschutzklappe eckig	1200x400	8	St	20	176,23	-14,69	3	4229,5	-352,5	1
1.25	RLT	Brandschutzklappe rund	DN 100	17	St	20	17,39	-2,13	3	886,6	-108,6	2
1.26	RLT	Brandschutzklappe rund	DN 125	10	St	20	21,40	-2,62	3	641,9	-78,6	2
1.27	RLT	Brandschutzklappe rund	DN150	4	St	20	24,07	-2,95	3	288,9	-35,4	2
1.28	RLT	Brandschutzklappe rund	DN200	19	St	20	33,43	-4,10	3	1905,7	-233,5	2
1.29	RLT	Brandschutzklappe rund	DN250	10	St	20	44,13	-5,41	3	1323,9	-162,2	2
1.30	RLT	Brandschutzklappe rund	DN315	24	St	20	58,84	-7,21	3	4236,6	-519,1	2
1.31	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	300/100	1	St	20	32,03	-1,59	3	96,1	-4,8	3
1.32	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	300/200	1	St	20	64,06	-3,18	3	192,2	-9,6	3
1.33	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	400/200	2	St	20	85,42	-4,25	3	512,5	-25,5	3
1.34	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	400/300	1	St	20	128,12	-6,37	3	384,4	-19,1	3
1.35	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	300/100	1	St	20	48,05	-2,39	3	144,1	-7,2	3
1.36	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	300/200	2	St	20	96,09	-4,78	3	576,6	-28,7	3
1.37	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	300/250	1	St	20	120,12	-5,97	3	360,3	-17,9	3
1.38	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	400/200	1	St	20	128,12	-6,37	3	384,4	-19,1	3
1.39	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	400/400	2	St	20	256,25	-12,74	3	1537,5	-76,4	3
1.40	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	500/200	1	St	20	160,15	-7,96	3	480,5	-23,9	3
1.41	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	900/300	1	St	20	432,42	-21,50	3	1297,3	-64,5	3
1.42	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	900/400	1	St	20	576,56	-28,66	3	1729,7	-86,0	3
1.43	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN100	54	St	20	59,74	-2,56	3	9677,8	-414,7	4
1.44	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN125	12	St	20	69,70	-2,99	3	2509,1	-107,5	4
1.45	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN150	11	St	20	79,65	-3,41	3	2628,5	-112,6	4
1.46	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN200	29	St	20	99,57	-4,27	3	8662,2	-371,2	4
1.47	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN250	8	St	20	129,44	-5,55	3	3106,5	-133,1	4
1.48	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN315	4	St	20	149,35	-6,40	3	1792,2	-76,8	4
1.49	RLT	Volumenstromregler eckig	300/100	3	St	20	29,08	-1,36	3	261,8	-12,2	5
1.50	RLT	Volumenstromregler eckig	300/150	1	St	20	34,57	-1,62	3	103,7	-4,9	5
1.51	RLT	Volumenstromregler eckig	300/200	1	St	20	38,96	-1,82	3	116,9	-5,5	5
1.52	RLT	Volumenstromregler eckig	300/250	1	St	20	41,16	-1,93	3	123,5	-5,8	5
1.53	RLT	Volumenstromregler eckig	400/200	3	St	20	42,26	-1,98	3	380,3	-17,8	5
1.54	RLT	Volumenstromregler eckig	400/250	2	St	20	45,55	-2,13	3	273,3	-12,8	5
1.55	RLT	Volumenstromregler eckig	400/300	1	St	20	48,29	-2,26	3	144,9	-6,8	5
1.56	RLT	Volumenstromregler eckig	400/400	2	St	20	72,99	-3,41	3	437,9	-20,5	5
1.57	RLT	Volumenstromregler eckig	500/200	2	St	20	48,84	-2,28	3	293,0	-13,7	5
1.58	RLT	Volumenstromregler eckig	500/250	2	St	20	51,04	-2,39	3	306,2	-14,3	5
1.59	RLT	Volumenstromregler eckig	600/200	1	St	20	64,75	-3,03	3	194,3	-9,1	5
1.60	RLT	Volumenstromregler Rund	DN100	7	St	20	8,77	-0,37	3	184,3	-7,8	6
1.61	RLT	Volumenstromregler Rund	DN125	5	St	20	9,75	-0,41	3	146,2	-6,2	6
1.62	RLT	Volumenstromregler Rund	DN150	7	St	20	12,19	-0,51	3	255,9	-10,8	6
1.63	RLT	Volumenstromregler Rund	DN200	23	St	20	14,62	-0,62	3	1009,0	-42,6	6
1.64	RLT	Volumenstromregler Rund	DN250	11	St	20	17,06	-0,72	3	563,0	-23,7	6
1.65	RLT	Volumenstromregler Rund	DN315	3	St	20	23,40	-0,99	3	210,6	-8,9	6
1.66	RLT	Tellerventil	DN100	150	St	20	1,69	-0,22	3	759,5	-99,1	7
1.67	RLT	Tellerventil	DN125	58	St	20	1,97	-0,26	3	342,6	-44,7	7
1.68	RLT	Tellerventil	DN150	13	St	20	2,25	-0,29	3	87,8	-11,5	7
1.69	RLT	Tellerventil	DN200	27	St	20	2,81	-0,37	3	227,8	-29,7	7
1.70	RLT	Tellerventil	DN250	7	St	20	3,38	-0,44	3	70,9	-9,3	7
1.71	RLT	Tellerventil	DN315	21	St	20	4,22	-0,55	3	265,8	-34,7	7
1.72	RLT	Auslassgitter	Fläche	11,9	m ²	20	293,52	-119,27	3	10517,7	-4273,9	8
1.73	RLT	Einbauventilator	450	6,0	St	20	291,08	-31,70	3	5239,4	-570,6	9
1.74	RLT	Dachventilator DN200	DN200	6	St	20	561,3	-193,4	3	10103,7	-3481,1	10
1.75	RLT	Dachventilator DN710	DN710	1	St	20	1319,7	-454,7	3	3959,1	-1364,0	10
1.76	RLT	Deflektorhaube	DN200-315	32	St	30	70,3	-15,9	2	4498,5	-1016,0	11
1.77	RLT	Geräte Klassenzimmer	DN315	12	St	20	1136,26	-148,00	3	40905,4	-5328,0	12
1.78	RLT	Geräte Zentralen	P08.04	4	St	20	6093,03	-532,45	3	73116,4	-6389,4	13
1.79	RLT	Geräte Zentralen	P12.06	3	St	20	13159,90	-1150,00	3	118439,1	-10350,0	13
1.80	RLT	Geräte Zentralen	P16.08	1	St	20	22003,35	-1922,80	3	66010,1	-5768,4	13
1.81	RLT	Lüftungsdämmung	Klimarock 30mm	2007	m ²	20	1,94	-0,04	3	11691,9	-264,0	Rockwool-Tool
1.82	RLT	Lüftungsdämmung	Klimarock 100mm	173	m ²	20	4,47	-0,13	3	2318,7	-66,3	Rockwool-Tool
1.83	RLT	Lüftungsdämmung	Armaflex 19mm	8,05	m ³	20	330,00	-38,20	3	7967,1	-922,3	14
1.84	RLT	Befestigung	Stahl, Schrauben, Schellen	13600	kg	20	3,470	-1,69	3	141590,6	-68952,0	15

Anhang

2.01	HZG	Stahlrohr	Gewinderohr	13904	kg	40	2,49	-1,32	2	69315,5	-36790,0	Ökobaudat
2.02	HZG	Stahlrohr	Fittinge	3575	St.	40	7,81	-2,40	2	55841,5	-17160,0	16
2.03	HZG	Regelventil	ABQM DN15	30	St.	10	7,57	-0,99	5	1135,9	-148,3	17
2.04	HZG	Regelventil	ABQM DN20	16	St.	10	8,37	-1,09	5	669,6	-87,4	17
2.05	HZG	Regelventil	ABQM DN25	13	St.	10	10,76	-1,41	5	699,5	-91,3	17
2.06	HZG	Regelventil	ABQM DN32	19	St.	10	14,35	-1,87	5	1363,1	-178,0	17
2.07	HZG	Regelventil	ABQM DN40	12	St.	10	33,08	-4,32	5	1984,8	-259,2	17
2.08	HZG	Regelventil	ABQM DN50	7	St.	10	64,51	-8,42	5	2257,7	-294,8	17
2.09	HZG	Regelventil	ABQM DN65	2	St.	10	139,60	-18,23	5	1396,0	-182,3	17
2.10	HZG	Regelventil	ABQM DN80	2	St.	10	160,11	-20,91	5	1601,1	-209,1	17
2.11	HZG	Regelventil	ABQM DN100	2	St.	10	196,83	-25,70	5	1968,3	-257,0	17
2.12	HZG	Absperfhahn	DN15-40	74	St.	25	1,22	-0,09	2	180,6	-13,3	18
2.13	HZG	Absperklappe	DN50	23	St.	10	3,99	-0,53	5	458,7	-60,4	19
2.14	HZG	Absperklappe	DN65	20	St.	10	4,71	-0,62	5	470,7	-62,0	19
2.15	HZG	Absperklappe	DN80	13	St.	10	5,19	-0,68	5	337,1	-44,4	19
2.16	HZG	Absperklappe	DN100	8	St.	10	7,98	-1,05	5	319,1	-42,0	19
2.17	HZG	Absperklappe	DN125	4	St.	10	9,33	-1,23	5	186,7	-24,6	19
2.18	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN25	2	St.	10	114,20	-7,21	5	1142,0	-72,1	20
2.19	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN32	6	St.	10	117,92	-7,45	5	3537,6	-223,4	20
2.20	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN40	2	St.	10	350,04	-22,10	5	3500,4	-221,0	20
2.21	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN50	3	St.	10	385,24	-24,32	5	5778,6	-364,8	20
2.22	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN65	1	St.	10	465,42	-29,39	5	2327,1	-146,9	20
2.23	HZG	Heizkörper	Radiatoren/Konvektoren	12209	kg	30	2,66	-1,59	2	64952,0	-38824,7	21
2.24	HZG	Deckenstrahlplatten	24x0,9m Turnhalle	2384	kg	30	4,16	-2,4	2	19843,2	-11443,2	22
2.25	HZG	Rockwool 800	DN15	3303	m	40	0,401	-0,004	2	2649,0	-26,4	Rockwool-Tool
2.26	HZG	Rockwool 800	DN20	518	m	40	0,438	-0,004	2	453,8	-4,1	Rockwool-Tool
2.27	HZG	Rockwool 800	DN25	501	m	40	0,818	-0,008	2	819,6	-8,0	Rockwool-Tool
2.28	HZG	Rockwool 800	DN32	380	m	40	1,341	-0,014	2	1019,2	-10,6	Rockwool-Tool
2.29	HZG	Rockwool 800	DN40	96	m	40	1,988	-0,021	2	381,7	-4,0	Rockwool-Tool
2.30	HZG	Rockwool 800	DN50	112	m	40	2,88	-0,031	2	645,1	-6,9	Rockwool-Tool
2.31	HZG	Rockwool 800	DN65	10	m	40	3,88	-0,043	2	77,6	-0,9	Rockwool-Tool
2.32	HZG	Rockwool 800	DN80	11	m	40	7,583	-0,087	2	166,8	-1,9	Rockwool-Tool
2.33	HZG	Rockwool 800	DN100	195	m	40	8,559	-0,098	2	3338,0	-38,2	Rockwool-Tool
2.34	HZG	Rockwool 800	DN125	169	m	40	9,308	-0,11	2	3146,1	-37,2	Rockwool-Tool
2.35	HZG	R90 Rohrschalen	DN15	62,4	m	50	0,624	-0,004	1	38,9	-0,2	Rockwool-Tool
2.36	HZG	R90 Rohrschalen	DN20	11,4	m	50	0,602	-0,004	1	6,9	0,0	Rockwool-Tool
2.37	HZG	R90 Rohrschalen	DN25	9	m	50	1,023	-0,007	1	9,2	-0,1	Rockwool-Tool
2.38	HZG	R90 Rohrschalen	DN32	15	m	50	0,962	-0,006	1	14,4	-0,1	Rockwool-Tool
2.39	HZG	R90 Rohrschalen	DN40	2,4	m	50	1,433	-0,009	1	3,4	0,0	Rockwool-Tool
2.40	HZG	R90 Rohrschalen	DN50	2,4	m	50	3,037	-0,023	1	7,3	-0,1	Rockwool-Tool
2.41	HZG	R90 Rohrschalen	DN65	2,4	m	50	4,594	-0,0325	1	11,0	-0,1	Rockwool-Tool
2.42	HZG	R90 Rohrschalen	DN80	2,4	m	50	6,491	-0,065	1	15,6	-0,2	Rockwool-Tool
2.43	HZG	R90 Rohrschalen	DN100	1,2	m	50	8,104	-0,048	1	9,7	-0,1	Rockwool-Tool
2.44	HZG	R90 Rohrschalen	DN125	0,6	m	50	9,561	-0,069	1	5,7	0,0	Rockwool-Tool
2.45	HZG	Befestigung	Stahl, Schrauben, Schellen	8200	kg	40	3,470	-1,69	2	56913,9	-27716,0	15
2.46	HZG	Lufttöpfe/Ausdehnungsgefäße	Masse Stahl	86,8	kg	10	3,470	-1,69	5	1506,1	-733,5	15
2.47	HZG	Verteiler mit Anschlüssen	Masse Stahl	147	kg	40	3,470	-1,69	2	1020,3	-496,9	15
2.48	HZG	Fernwärme	Übergabestation	700	kg	30	4,99	-1,23	2	6986,0	-1722,0	Ökobaudat
3.01	KLT	Armaflex	19mm	0,88	m³	40	330,00	-38,20	2	580,8	-67,2	14
3.02	KLT	Stahlrohr	Gewinderohr	400	kg	40	2,49	-1,32	2	1994,1	-1058,4	Ökobaudat
3.03	KLT	Kältemaschine	Direktverdampfer	6,85	kW	10	49,3	-24,2	5	1688,5	-828,9	Ökobaudat
4.01	SAN	Edelstahlrohr	Mapress	3500	kg	50	3,66	-1,32	1	12810,0	-4620,0	23
4.02	SAN	Edelstahlrohr	Fittinge	1583	St.	50	0,5	0,15	1	791,5	237,5	24
4.03	SAN	Abspernhahn	DN15-40	84	St.	25	1,22	-0,09	2	205,0	-15,1	18
4.04	SAN	Zirkulationspumpe	DN20	2	St.	10	41,65	-2,63	5	416,5	-26,3	20
4.05	SAN	Keramik	WT/WC/Urinal	5034	kg	40	1,26	-0,09	2	12638,4	-906,1	25
4.06	SAN	Spülkasten	Unterputz	79	St.	50	48,00	-18,50	1	3792,2	-1461,5	26
4.07	SAN	Trinkwasseranschlüsse	Armaturen	138	St.	40	36,85	-12,00	2	10171,2	-3312,0	27
4.08	SAN	Durchlauferhitzer	Elektro-Durchflußwärmer	29	St.	15	19,29	-5,50	4	2238,1	-638,0	Ökobaudat
4.09	SAN	Pufferspeicher	Edelstahl 1000L	330	kg	20	4,58	-1,05	3	4534,3	-1039,5	Ökobaudat
4.10	SAN	Hebeanlage	Abwasser	1	St.	10	465,42	-1,69	5	2327,1	-8,5	20
4.11	SAN	Armaflex	13mm	8,68	m³	50	330,00	-38,20	1	2865,3	-331,7	14
4.12	SAN	Rockwool 800	DN15	248	m	40	0,401	-0,004	2	198,9	-2,0	Rockwool-Tool
4.13	SAN	Rockwool 800	DN20	77	m	40	0,438	-0,004	2	67,5	-0,6	Rockwool-Tool
4.14	SAN	Rockwool 800	DN25	31	m	40	0,818	-0,008	2	50,7	-0,5	Rockwool-Tool
4.15	SAN	Rockwool 800	DN32	88	m	40	1,341	-0,014	2	236,0	-2,5	Rockwool-Tool
4.16	SAN	Abflussrohr	SML	16938	kg	50	1,54	0	1	26159,0	0,0	28
4.17	SAN	Abflussrohr	Bögen/Abzweige	2100	St.	50	2,1	0	1	4410,0	0,0	28
4.18	SAN	Abläufe	Boden/Dach	68	St.	25	10	-2	2	1360,0	-272,0	Ökobaudat
4.19	SAN	Fettabscheider	NS10	1710	kg	40	2,57	-2,11	2	8789,4	-7216,2	29
4.20	SAN	Schächte	Beton	1	m³	50	129,20	-5,19	1	129,2	-5,2	30
4.21	SAN	Befestigung	Stahl, Schrauben, Schellen	6800	kg	50	3,470	-1,69	1	23598,4	-11492,0	15

Anhang 3: Optimierte Heizlastermittlung für das Gesamtgebäude

In der Tabelle wird die Heizlastberechnung mit dem Reduktionsfaktor von 0,894 für alle Räume der Goetheschule dargestellt. Die Heizlast der Klassenzimmer in Bauteil D hat sich aufgrund der Lüftungswärmeverluste um 47 % erhöht.

Anlage 3.1: Berechnungstabelle Heizlast

Bauteil	Geschoss	Raumnummer	T [°C]	Heizlast [W]	Massenstrom [kg/h]	Heizlast Neu [W]	Massenstrom Neu [kg/h]
A	00	00.A.0.01	20	578	24,8	517	22,2
A	00	00.A.0.02a	20	872	37,5	780	33,5
A	00	00.A.0.02b	20	873	37,5	781	33,5
A	00	00.A.0.03	20	1981	85,1	1771	76,1
A	00	00.A.0.04	20	2137	91,8	1911	82,1
A	00	00.A.0.05	20	2140	91,9	1914	82,2
A	00	00.A.0.06	20	2132	91,6	1906	81,9
A	00	00.A.0.07	20	2699	115,9	2413	103,7
A	00	00.A.0.10	24	624	26,8	558	24,0
A	00	00.A.0.TR2	10	588	25,3	526	22,6
A	00	00.A.0.09	20	1046	44,9	935	40,2
A	00	00.A.0.11	20	699	30,0	625	26,9
A	00	00.A.0.13	20	954	41,0	853	36,6
A	00	00.A.0.TR3	10	514	22,1	460	19,7
A	00	00.A.0.B2	20	5329	228,9	4765	204,7
A	00	00.A.0.B1	20	4962	213,2	4437	190,6
A	00	00.A.0.21	20	618	26,5	553	23,7
A	00	00.A.0.19	20	2228	95,7	1992	85,6
A	00	00.A.0.20	20	3148	135,2	2815	120,9
A	00	00.A.0.18	20	2108	90,6	1885	81,0
A	00	00.A.0.17	20	2109	90,6	1886	81,0
A	00	00.A.0.16	20	2075	89,1	1855	79,7
A	00	00.A.0.14	20	2683	115,3	2399	103,1
A	01	01.A.1.01	24	2234	96,0	1998	85,8
A	01	01.A.1.02	20	724	31,1	647	27,8
A	01	01.A.1.03	20	1844	79,2	1649	70,8
A	01	01.A.1.04	20	1859	79,9	1662	71,4
A	01	01.A.1.05	20	1849	79,4	1653	71,0
A	01	01.A.1.06	20	1855	79,7	1659	71,3
A	01	01.A.1.07	20	2425	104,2	2168	93,2
A	01	01.A.1.10	24	719	30,9	643	27,6
A	01	01.A.1.09	20	952	40,9	851	36,6
A	01	01.A.1.11	20	626	26,9	560	24,0
A	01	01.A.1.13	20	869	37,3	777	33,4
A	01	01.A.1.B2	20	4508	193,7	4031	173,2
A	01	01.A.1.B1	20	4993	214,5	4465	191,8
A	01	01.A.1.22	20	624	26,8	558	24,0
A	01	01.A.1.19	20	1916	82,3	1713	73,6
A	01	01.A.1.20	20	2145	92,1	1918	82,4
A	01	01.A.1.18	20	1944	83,5	1738	74,7

Anhang

A	01	01.A.1.17	20	1943	83,5	1737	74,6
A	01	01.A.1.16	20	1916	82,3	1713	73,6
A	01	01.A.1.14	20	2493	107,1	2229	95,8
A	02	02.A.2.02	20	1697	72,9	1517	65,2
A	02	02.A.2.02	20	869	37,3	777	33,4
A	02	02.A.2.03	20	2353	101,1	2104	90,4
A	02	02.A.2.04	20	2370	101,8	2119	91,0
A	02	02.A.2.05	20	2370	101,8	2119	91,0
A	02	02.A.2.06	20	2359	101,3	2109	90,6
A	02	02.A.2.07	20	2415	103,7	2159	92,8
A	02	02.A.2.10	24	757	32,5	677	29,1
A	02	02.A.2.09	20	1157	49,7	1035	44,4
A	02	02.A.2.11	20	824	35,4	737	31,7
A	02	02.A.2.13	20	1048	45,0	937	40,3
A	02	02.A.2.B2	20	6816	292,8	6095	261,8
A	02	02.A.2.B1	20	6889	295,9	6160	264,6
A	02	02.A.2.21	20	1299	55,8	1162	49,9
A	02	02.A.2.19	20	2389	102,6	2136	91,8
A	02	02.A.2.20	20	2646	113,7	2366	101,6
A	02	02.A.2.18	20	2424	104,1	2168	93,1
A	02	02.A.2.17	20	2424	104,1	2168	93,1
A	02	02.A.2.16	20	2389	102,6	2136	91,8
A	02	02.A.2.14	20	2967	127,5	2653	114,0
Summe Bauteil A				129,997	5584,6	116	4993,7
B	00	00.B.0.01	20	4677	200,9	4182	179,7
B	00	00.B.0.02b	20	1678	72,1	1500	64,5
B	00	00.B.0.F4	18	695	29,9	621	26,7
B	00	00.B.0.14	21	272	11,7	243	10,4
B	00	00.B.0.15	21	611	26,2	546	23,5
B	00	00.B.0.14_	20	87	3,7	78	3,3
B	00	00.B.0.13_	20	187	8,0	167	7,2
B	00	00.B.0.13	21	235	10,1	210	9,0
B	00	00.B.0.F1	20	39207	1684,3	35059	1506,1
B	00	00.B.0.05	24	886	38,1	792	34,0
B	00	00.B.0.08	24	1278	54,9	1143	49,1
B	00	00.B.0.25a	20	1281	55,0	1145	49,2
B	00	00.B.0.25b	20	1188	51,0	1062	45,6
B	00	00.B.0.25c	20	520	22,3	465	20,0
B	00	00.B.0.24	22	2319	99,6	2074	89,1
B	00	00.B.0.23	20	1497	64,3	1339	57,5
B	00	00.B.0.22	20	333	14,3	298	12,8
B	00	00.B.0.F5	20	209	9,0	187	8,0
B	00	00.B.0.21	20	1370	58,9	1225	52,6
B	00	00.B.0.20a	20	4138	177,8	3700	159,0
B	00	00.B.0.20b	18	533	22,9	477	20,5
B	00	00.B.0.19a	18	325	14,0	291	12,5
B	00	00.B.0.19b	18	523	22,5	468	20,1
B	00	00.B.0.18	20	2110	90,6	1887	81,1
B	00	00.C.0.TR1	10	1236	53,1	1105	47,5

B	00	00.B.0.16	20	1760	75,6	1574	67,6
B	00	00.B.0.17	20	826	35,5	739	31,7
B	00	00.B.0.F6	20	217	9,3	194	8,3
B	00	00.B.0.F3	18	3128	134,4	2797	120,2
B	01	01.B.1.01	20	4253	182,7	3803	163,4
B	01	01.B.1.02	20	3023	129,9	2703	116,1
B	01	01.B.1.03	20	3331	143,1	2979	128,0
B	01	01.B.1.04	20	1239	53,2	1108	47,6
B	01	01.B.1.06	20	3391	145,7	3032	130,3
B	01	01.B.1.07	20	1810	77,8	1618	69,5
B	01	01.B.1.08	20	3056	131,3	2733	117,4
B	01	01.B.1.18	20	3691	158,6	3300	141,8
B	01	01.B.1.17	20	2199	94,5	1966	84,5
B	01	01.B.1.16	20	1883	80,9	1684	72,3
B	01	01.B.1.14	20	2980	128,0	2665	114,5
B	01	01.B.1.15	20	1247	53,6	1115	47,9
B	01	01.B.1.13	20	3150	135,3	2817	121,0
B	01	01.B.1.10b	20	1077	46,3	963	41,4
B	01	01.B.1.10a	20	1048	45,0	937	40,3
B	01	01.B.1.09	20	3676	157,9	3287	141,2
B	01	01.B.1.F3	20	4948	212,6	4424	190,1
B	01	01.B.1.05	18	1547	66,5	1383	59,4
B	01	01.B.1.12	18	283	12,2	253	10,9
B	01	01.B.1.F4	18	951	40,9	850	36,5
B	01	01.B.1.11	18	1570	67,4	1404	60,3
B	01	01.B.1.F2	18	979	42,1	875	37,6
Summe Bauteil B				124658	5355,2	111469	4788,6
C	00	00.C.0.F1	18	4197	180,3	3753	161,2
C	00	00.C.0.01	20	1628	69,9	1456	62,5
C	00	00.D.0.01	20	491	21,1	439	18,9
C	00	00.C.0.02b	20	880	37,8	787	33,8
C	00	00.C.0.02a	20	3927	168,7	3512	150,9
C	00	00.C.0.03	20	5043	216,6	4509	193,7
C	00	00.C.0.04	20	504	21,7	451	19,4
C	00	00.C.0.05	20	211	9,1	189	8,1
C	00	00.C.0.06	20	211	9,1	189	8,1
C	00	00.C.0.07	20	464	19,9	415	17,8
C	01	01.C.1.03a	20	28046	1204,8	25079	1077,4
C	01	01.C.1.01_2	20	1894	81,4	1694	72,8
C	01	01.C.1.01_	20	2418	103,9	2162	92,9
C	01	01.C.1.01	20	798	34,3	714	30,7
C	01	01.C.1.03b	20	1396	60,0	1248	53,6
Summe Bauteil C				52108	2238,5	46595	2001,7
D	00	00.D.0.F3	18	802	34,5	717	30,8
D	00	00.D.0.06	20	1089	46,8	1600	68,8
D	00	00.D.0.05	20	1034	44,4	1520	65,3
D	00	00.D.0.B1	20	1073	46,1	959	41,2
D	00	00.D.0.23	20	1357	58,3	1994	85,7
D	00	00.D.0.20	20	1195	51,3	1756	75,4

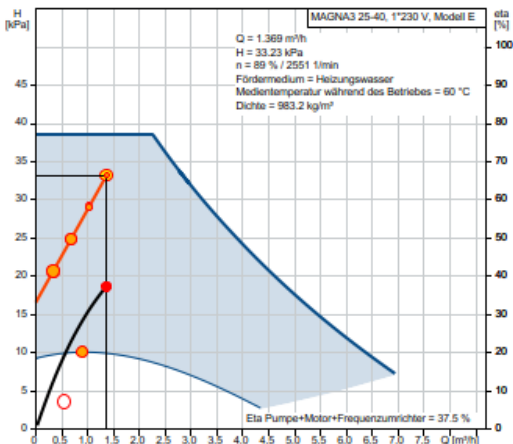
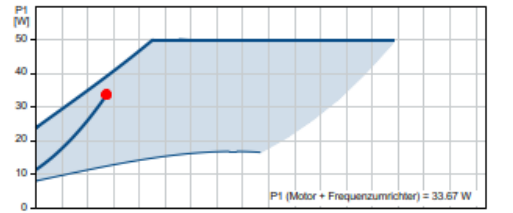
Anhang

D	00	00.D.0.B2	20	1044	44,8	934	40,1
D	00	00.D.0.F5	18	659	28,3	589	25,3
D	00	00.D.0.18	20	1396	60,0	2052	88,1
D	00	00.D.0.19	20	1288	55,3	1893	81,3
D	00	00.D.0.12	22	704	30,2	630	27,0
D	00	00.D.0.F4	19	1303	56,0	1165	50,1
D	00	00.D.0.07-WC	21	361	15,5	323	13,9
D	00	00.D.0.07-D	21	543	23,3	486	20,9
D	00	00.D.0.07	21	1031	44,3	922	39,6
D	00	00.D.0.09-D	21	257	11,0	230	9,9
D	00	00.D.0.09	21	611	26,2	546	23,5
D	00	00.D.0.09-WC	21	194	8,3	173	7,5
D	00	00.D.0.10	21	266	11,4	238	10,2
D	00	00.D.0.10-WC	21	201	8,6	180	7,7
D	00	00.D.0.11-D	21	192	8,2	172	7,4
D	00	00.D.0.11	21	562	24,1	503	21,6
D	00	00.D.0.11-WC	21	176	7,6	157	6,8
D	00	00.D.0.14-WC	21	176	7,6	157	6,8
D	00	00.D.0.14	21	572	24,6	511	22,0
D	00	00.D.0.14-D	21	196	8,4	175	7,5
D	00	00.D.0.15-WC	21	206	8,8	184	7,9
D	00	00.D.0.15	21	270	11,6	241	10,4
D	00	00.D.0.16-WC	21	192	8,2	172	7,4
D	00	00.D.0.16-D	21	248	10,7	222	9,5
D	00	00.D.0.16	21	643	27,6	575	24,7
D	00	00.D.0.17_	21	1033	44,4	924	39,7
D	00	00.D.0.17-D	21	545	23,4	487	20,9
D	00	00.D.0.17-WC	21	362	15,6	324	13,9
D	00	00.D.0.17	24	994	42,7	889	38,2
D	01	01.D.1.07	20	1993	85,6	2929	125,8
D	01	01.D.1.06	20	1429	61,4	2100	90,2
D	01	01.D.1.04	20	1409	60,5	2071	89,0
D	01	01.D.1.B2	20	3046	130,9	2724	117,0
D	01	01.D.1.B1	20	2393	102,8	2140	91,9
D	01	01.D.1.05	20	1929	82,9	2835	121,8
D	01	01.D.1.13	20	1747	75,1	2567	110,3
D	01	01.D.1.B3	20	2229	95,8	1993	85,6
D	01	01.D.1.09	20	1966	84,5	2889	124,1
D	01	01.D.1.10	20	1978	85,0	2907	124,9
D	01	01.D.1.11	18	886	38,1	792	34,0
D	01	01.D.1.Flur1	18	736	31,6	658	28,3
D	01	01.D.1.Flur2	18	546	23,5	488	21,0
D	01	Turnhalle	20	53280	2288,9	47643	2046,7
Summe Bauteil D				98342	4224,7	99335	4267,4
Heizlast Gesamtgebäude				405105	17403,1	531821	27835

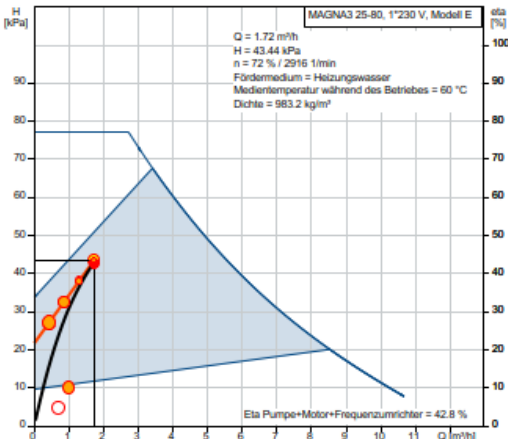
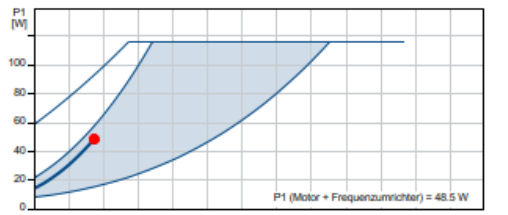
Anhang 4: Detaillierte Pumpenauslegung Heizkreis Klassenzimmer D

Hier werden die zwei Pumpenvarianten für den jeweiligen Auslegungsfall aufgezeigt, wobei die erste die ursprüngliche Planung und die zweite die Variante mit Fensterlüftung beschreibt.

Anlage 4.1: Pumpenauslegung Bestandsplanung [57]

		Name des Unternehmens: Angelegt von: Telefon:	
		Datum: 30.11.2024	
97924623 MAGNA3 25-40			
Eingabe		Auslegungsergebnis	
Ausgelegt von Anfahrt Pumpenbauart Pumpenbauart		Typ MAGNA3 25-40 Anzahl 1 Motoren	
Allgemein Anwendung wählen Anwendungsbereich Installationsart Installation Hydraulikart Q H GLT-Konnektivität Auswertungskriterium Schnelle Lieferung bevorzugt		Heizungs- öffentliche Gebäude Verteilung Primärkreispumpe Einzelpumpe 1.369 m³/h 33.23 kPa Ja Präferenzindex Nein	
Betriebsparameter Fördermedium Min. Medientemperatur Max. Medientemperatur Medientemperatur während des Betriebes Max. Betriebsdruck Min. Druck am Saugstutzen AllowUnderDim		Heizungs- Wasser 20 °C 60 °C 60 °C 10 bar 1.5 bar 0 %	
Regelungsart Regelungsart Abnahme bei niedrigem Förderstrom		Proportionaldruckregelung 50 %	
Pumpen mit externem Frequenzumrichter Schutzart Cabinet wanted Ungeregelte Pumpen zulassen Fernregelung über externe Steuerung		50 Hz und 60 Hz IP20 Nein Ja Nein	
Belastungsprofil ändern Heiz-Saison Lastprofil Nachtabenkung Ist die Pumpe über Nacht abgeschaltet? Dauer des reduzierten Nachtbetriebes		285 Tage Standardprofil Ja Nein 8 h/d	
Pumpenbauart Material der Pumpe Include alternative variants		Grauguss oder Edelstahl Ja	
Betriebsbedingungen Frequenz Phase Stern-Dreieck Einschaltung ab: Spannung Umgebungstemperatur		50 Hz 1 oder 3 5.5 kW 1 x 230 oder 3 x 400 V 20 °C	
Lebenszykluskosten Möchten Sie einen Vergleich durchführen? Einschließlich Einsparungen an Wärmeenergie Differenz der Wassertemperatur Verbrauchsregelung über Thermostatventil Thermostatventil mit einem P-Band von Hydraulischer Abgleich Wärmeenergiepreis (Öl, Gas usw.) Wärmeproduktion (Nennlast) Wärmeproduktion in Nennlastbetrieb		Kein Vergleich Ja 10 K 100 % 2 K Ja 0.07 €/kWh 15.81 kW 2400 h/a	
		Auslegungsergebnis Förderstrom Förderhöhe Min. Vordruck Leistungsaufnahme ges.(P1) Eta Aggregat Eta gesamt Stromaufnahme CO2 Emission Preis Kosten über die Lebensdauer	
		1.369 m³/h 33.23 kPa 0.2 bar (60 °C, gegen Atmosphäre) 0.034 kW 37.5 % = Eta Pumpe * Eta Motor 37.5 % = Eta bezogen auf den Betriebspunkt 106 kWh/Jahr 47 kg/Jahr € 1.036,83 € 1853 /15Jahre	
		 MAGNA3 25-40, 1*230 V, Modell E Q = 1.369 m³/h H = 33.23 kPa n = 89 % / 2551 1/min Fördermedium = Heizungs- Wasser Medientemperatur während des Betriebes = 60 °C Dichte = 983.2 kg/m³ Eta Pumpe+Motor+Frequenzumrichter = 37.5 %	
		 P1 (Motor + Frequenzumrichter) = 33.67 W	

Anlage 4.2: Pumpenauslegung für Variante Fensterlüftung [57]

		Name des Unternehmens: Angelegt von: Telefon:	
		Datum: 30.11.2024	
97924625 MAGNA3 25-80			
Eingabe		Auslegungsergebnis	
Ausgelegt von Anfahrt Pumpenbauart Allgemein Anwendung wählen Anwendungsbereich Installationsart Installation Hydraulikart Q H GLT-Konnektivität Auswertungskriterium Schnelle Lieferung bevorzugt Betriebsparameter Fördermedium Min. Medientemperatur Max. Medientemperatur Medientemperatur während des Betriebes Max. Betriebsdruck Min. Druck am Saugstutzen AllowUnderDim Regelungsart Regelungsart Abnahme bei niedrigem Förderstrom Pumpen mit externem Frequenzumrichter Schutzart Cabinet wanted Ungeregelte Pumpen zulassen Fernregelung über externe Steuerung Belastungsprofil ändern Heiz-Saison Lastprofil Nachtabsenkung Ist die Pumpe über Nacht abgeschaltet? Dauer des reduzierten Nachtbetriebes Pumpenbauart Material der Pumpe Include alternative variants Betriebsbedingungen Frequenz Phase Stern-Dreieck Einschaltung ab: Spannung Umgebungstemperatur Lebenszykluskosten Möchten Sie einen Vergleich durchführen? Einschließlich Einsparungen an Wärmeenergie Differenz der Wassertemperatur Verbrauchsregelung über Thermostatventil Thermostatventil mit einem P-Band von Hydraulischer Abgleich Wärmeenergiepreis (Öl, Gas usw.) Wärmeproduktion (Nennlast) Wärmeproduktion in Nennlastbetrieb		Typ MAGNA3 25-80 Anzahl 1 Motoren Förderstrom 1.72 m³/h Förderhöhe 43.44 kPa Min. Vordruck 0.2 bar (60 °C, gegen Atmosphäre) Leistungsaufnahme ges.(P1) 0.048 kW Eta Aggregat 42.8 % =Eta Pumpe * Eta Motor Eta gesamt 42.8 % =Eta bezogen auf den Betriebspunkt Stromaufnahme 142 kWh/Jahr CO2 Emission 63 kg/Jahr Preis € 1.375,53 Kosten über die Lebensdauer € 2467 /15Jahre	
Pumpenbauart Auslegung Umwälzpumpen Heizung öffentliche Gebäude Verteilung Primärkreispumpe Einzelpumpe 1.72 m³/h 43.44 kPa Ja Präferenzindex Nein Heizungswasser 20 °C 60 °C 60 °C 10 bar 1.5 bar 0 % Proportionaldruckregelung 50 % 50 Hz und 60 Hz IP20 Nein Ja Nein 285 Tage Standardprofil Ja Nein 8 h/d Grauguss oder Edelstahl Ja 50 Hz 1 oder 3 5.5 kW 1 x 230 oder 3 x 400 V 20 °C Kein Vergleich Ja 10 K 100 % 2 K Ja 0.07 €/kWh 19.87 kW 2400 h/a		 	

Anhang 5: Optimierte Ökobilanz nach Harter

In Anhang 5 wird das detaillierte Verfahren nach Harter für die gebäudetechnikoptimierte Variante dargestellt. Die Mengen der Rohre und Kanäle wurden angepasst sowie die dezentralen Lüftungsgeräte entfernt.

Anlage 5.1: Ökobilanz nach Harter mit optimierter TGA

Nummer	Gewerk	Komponenten	Beschreibung	Anzahl	Einheit	Lebensdauer [a]	GWP A1- A3, C3, C4 [kg CO ₂ e]	GWP D1	Faktor Lebensdauer	Summe GWP A1- A3, B4, B5, C3, C4 [kg CO ₂ e]	Summe GWP D1 [kg CO ₂ e]	EPD
1.1	RLT	Lüftungskanal	verzinktes Stahlblech	11663	kg	20	3,07	-1,23	3	107311,3	-43036,47	Ökobaudat
1.2	RLT	Wickelfalzrohr	verzinktes Stahlblech	2982	kg	20	3,07	-1,23	3	27437,4	-11003,58	Ökobaudat
1.3	RLT	Brandschutzklappe eckig	200x100	2	St	20	22,59	-1,88	3	135,6	-11,3	1
1.4	RLT	Brandschutzklappe eckig	200x200	43	St	20	31,63	-2,64	3	4080,4	-340,1	1
1.5	RLT	Brandschutzklappe eckig	300x100	3	St	20	27,11	-2,26	3	244,0	-20,3	1
1.6	RLT	Brandschutzklappe eckig	300x150	4	St	20	31,63	-2,64	3	379,6	-31,6	1
1.7	RLT	Brandschutzklappe eckig	300x200	6	St	20	36,15	-3,01	3	650,7	-54,2	1
1.8	RLT	Brandschutzklappe eckig	350x200	1	St	20	49,71	-4,14	3	149,1	-12,4	1
1.9	RLT	Brandschutzklappe eckig	400x200	2	St	20	45,19	-3,77	3	271,1	-22,6	1
1.10	RLT	Brandschutzklappe eckig	400x250	3	St	20	54,22	-4,52	3	488,0	-40,7	1
1.11	RLT	Brandschutzklappe eckig	400x400	4	St	20	72,30	-6,03	3	867,6	-72,3	1
1.12	RLT	Brandschutzklappe eckig	450x200	2	St	20	54,22	-4,52	3	325,3	-27,1	1
1.13	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x250	6	St	20	63,26	-5,27	3	1138,7	-94,9	1
1.14	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x300	1	St	20	67,78	-5,65	3	203,3	-16,9	1
1.15	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x350	6	St	20	76,82	-6,40	3	1382,7	-115,2	1
1.16	RLT	Brandschutzklappe eckig	500x400	3	St	20	81,34	-6,78	3	732,0	-61,0	1
1.17	RLT	Brandschutzklappe eckig	550x550	10	St	20	122,01	-10,17	3	3660,2	-305,1	1
1.18	RLT	Brandschutzklappe eckig	600x300	4	St	20	76,82	-6,40	3	921,8	-76,8	1
1.19	RLT	Brandschutzklappe eckig	600x600	1	St	20	135,56	-11,30	3	406,7	-33,9	1
1.20	RLT	Brandschutzklappe eckig	700x400	4	St	20	99,41	-8,29	3	1192,9	-99,4	1
1.21	RLT	Brandschutzklappe eckig	800x100	2	St	20	58,74	-4,90	3	352,5	-29,4	1
1.22	RLT	Brandschutzklappe eckig	800x500	9	St	20	149,12	-12,43	3	4026,2	-335,6	1
1.23	RLT	Brandschutzklappe eckig	1000x500	8	St	20	176,23	-14,69	3	4229,5	-352,5	1
1.24	RLT	Brandschutzklappe eckig	1200x400	8	St	20	176,23	-14,69	3	4229,5	-352,5	1
1.25	RLT	Brandschutzklappe rund	DN100	17	St	20	17,39	-2,13	3	886,6	-108,6	2
1.26	RLT	Brandschutzklappe rund	DN125	10	St	20	21,40	-2,62	3	641,9	-78,6	2
1.27	RLT	Brandschutzklappe rund	DN150	4	St	20	24,07	-2,95	3	288,9	-35,4	2
1.28	RLT	Brandschutzklappe rund	DN200	19	St	20	33,43	-4,10	3	1905,7	-233,5	2
1.29	RLT	Brandschutzklappe rund	DN250	10	St	20	44,13	-5,41	3	1323,9	-162,2	2
1.30	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	300/100	1	St	20	32,03	-1,59	3	96,1	-4,8	3
1.31	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	300/200	1	St	20	64,06	-3,18	3	192,2	-9,6	3
1.32	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	400/200	2	St	20	85,42	-4,25	3	512,5	-25,5	3
1.33	RLT	Schalldämpfer eckig L1000	400/300	1	St	20	128,12	-6,37	3	384,4	-19,1	3
1.34	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	300/100	1	St	20	48,05	-2,39	3	144,1	-7,2	3
1.35	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	300/200	2	St	20	96,09	-4,78	3	576,6	-28,7	3
1.36	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	300/250	1	St	20	120,12	-5,97	3	360,3	-17,9	3
1.37	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	400/200	1	St	20	128,12	-6,37	3	384,4	-19,1	3
1.38	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	400/400	2	St	20	256,25	-12,74	3	1537,5	-76,4	3
1.39	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	500/200	1	St	20	160,15	-7,96	3	480,5	-23,9	3
1.40	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	900/300	1	St	20	432,42	-21,50	3	1297,3	-64,5	3
1.41	RLT	Schalldämpfer eckig L1500	900/400	1	St	20	576,56	-28,66	3	1729,7	-86,0	3
1.42	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN100	54	St	20	59,74	-2,56	3	9677,8	-414,7	4
1.43	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN125	12	St	20	69,70	-2,99	3	2509,1	-107,5	4
1.44	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN150	11	St	20	79,65	-3,41	3	2628,5	-112,6	4
1.45	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN200	29	St	20	99,57	-4,27	3	8662,2	-371,2	4
1.46	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN250	8	St	20	129,44	-5,55	3	3106,5	-133,1	4
1.47	RLT	Schalldämpfer Rund L1000	DN315	4	St	20	149,35	-6,40	3	1792,2	-76,8	4
1.48	RLT	Volumenstromregler eckig	300/100	3	St	20	29,08	-1,36	3	261,8	-12,2	5
1.49	RLT	Volumenstromregler eckig	300/150	1	St	20	34,57	-1,62	3	103,7	-4,9	5
1.50	RLT	Volumenstromregler eckig	300/200	1	St	20	38,96	-1,82	3	116,9	-5,5	5
1.51	RLT	Volumenstromregler eckig	300/250	1	St	20	41,16	-1,93	3	123,5	-5,8	5
1.52	RLT	Volumenstromregler eckig	400/200	3	St	20	42,26	-1,98	3	380,3	-17,8	5
1.53	RLT	Volumenstromregler eckig	400/250	2	St	20	45,55	-2,13	3	273,3	-12,8	5
1.54	RLT	Volumenstromregler eckig	400/300	1	St	20	48,29	-2,26	3	144,9	-6,8	5
1.55	RLT	Volumenstromregler eckig	400/400	2	St	20	72,99	-3,41	3	437,9	-20,5	5
1.56	RLT	Volumenstromregler eckig	500/200	2	St	20	48,84	-2,28	3	293,0	-13,7	5
1.57	RLT	Volumenstromregler eckig	500/250	2	St	20	51,04	-2,39	3	306,2	-14,3	5
1.58	RLT	Volumenstromregler eckig	600/200	1	St	20	64,75	-3,03	3	194,3	-9,1	5
1.59	RLT	Volumenstromregler Rund	DN100	7	St	20	8,77	-0,37	3	184,3	-7,8	6
1.60	RLT	Volumenstromregler Rund	DN125	5	St	20	9,75	-0,41	3	146,2	-6,2	6
1.61	RLT	Volumenstromregler Rund	DN150	7	St	20	12,19	-0,51	3	255,9	-10,8	6
1.62	RLT	Volumenstromregler Rund	DN200	23	St	20	14,62	-0,62	3	1009,0	-42,6	6
1.63	RLT	Volumenstromregler Rund	DN250	11	St	20	17,06	-0,72	3	563,0	-23,7	6
1.64	RLT	Volumenstromregler Rund	DN315	3	St	20	23,40	-0,99	3	210,6	-8,9	6
1.65	RLT	Tellerventil	DN100	150	St	20	1,69	-0,22	3	759,5	-99,1	7
1.66	RLT	Tellerventil	DN125	58	St	20	1,97	-0,26	3	342,6	-44,7	7
1.67	RLT	Tellerventil	DN150	13	St	20	2,25	-0,29	3	87,8	-11,5	7
1.68	RLT	Tellerventil	DN200	27	St	20	2,81	-0,37	3	227,8	-29,7	7
1.69	RLT	Tellerventil	DN250	7	St	20	3,38	-0,44	3	70,9	-9,3	7
1.70	RLT	Tellerventil	DN315	21	St	20	4,22	-0,55	3	265,8	-34,7	7
1.71	RLT	Auslassgitter	Fläche	11,944	m ²	20	293,52	-119,27	3	10517,7	-4273,9	8
1.72	RLT	Einbauventilator	450	6,0	St	20	291,08	-31,70	3	5239,4	-570,6	9
1.73	RLT	Dachventilator DN200	DN200	6,0	St	20	561,32	-193,39	3	10103,7	-3481,1	10
1.74	RLT	Dachventilator DN710	DN710	1	St	20	1319,7	-454,7	3	3959,1	-1364,0	10
1.75	RLT	Deflektorhaube	DN200-315	8	St	30	70,3	-15,9	2	1124,6	-254,0	11
1.76	RLT	Geräte Zentralen	P08.04	4	St	20	6093,0	-532,5	3	73116,4	-6389,4	13
1.77	RLT	Geräte Zentralen	P12.06	3	St	20	13159,90	-1150,00	3	118439,1	-10350,0	13
1.78	RLT	Geräte Zentralen	P16.08	1	St	20	22003,35	-1922,80	3	66010,1	-5768,4	13
1.79	RLT	Lüftungsabdämmung	Klimarock 30mm	2007	m ²	20	1,94	-0,04	3	11691,9	-264,0	Rockwool-Tool
1.80	RLT	Lüftungsabdämmung	Armaflex 19mm	8,05	m ³	20	330,00	-38,20	3	7967,1	-922,3	14
1.81	RLT	Befestigung	Stahl, Schrauben, Schellen	12659	kg	20	3,47	-1,69	3	131790,7	-64179,6	15

Anhang

2.01	HZG	Stahlrohr	Gewinderohr	10735	kg	40	2,49	-1,32	2	53517,1	-28404,8	Ökobaudat
2.02	HZG	Stahlrohr	Fittinge	3575	St.	40	7,81	-2,40	2	55841,5	-17160,0	16
2.03	HZG	Regelventil	ABQM DN15	30	St.	10	7,573	-0,988916	5	1135,9	-148,3	17
2.04	HZG	Regelventil	ABQM DN20	16	St.	10	8,37	-1,09	5	669,6	-87,4	17
2.05	HZG	Regelventil	ABQM DN25	13	St.	10	10,76	-1,41	5	699,5	-91,3	17
2.06	HZG	Regelventil	ABQM DN32	19	St.	10	14,35	-1,87	5	1363,1	-178,0	17
2.07	HZG	Regelventil	ABQM DN40	12	St.	10	33,08	-4,32	5	1984,8	-259,2	17
2.08	HZG	Regelventil	ABQM DN50	7	St.	10	64,51	-8,42	5	2257,7	-294,8	17
2.09	HZG	Regelventil	ABQM DN65	2	St.	10	139,60	-18,23	5	1396,0	-182,3	17
2.10	HZG	Regelventil	ABQM DN80	2	St.	10	160,11	-20,91	5	1601,1	-209,1	17
2.11	HZG	Regelventil	ABQM DN100	2	St.	10	196,83	-25,70	5	1968,3	-257,0	17
2.12	HZG	Absperfhahn	DN15-40	74	St.	25	1,22	-0,09	2	180,6	-13,3	18
2.13	HZG	Absperklappe	DN50	23	St.	10	3,99	-0,53	5	458,7	-60,4	19
2.14	HZG	Absperklappe	DN65	20	St.	10	4,71	-0,62	5	470,7	-62,0	19
2.15	HZG	Absperklappe	DN80	13	St.	10	5,19	-0,68	5	337,1	-44,4	19
2.16	HZG	Absperklappe	DN100	8	St.	10	7,98	-1,05	5	319,1	-42,0	19
2.17	HZG	Absperklappe	DN125	4	St.	10	9,33	-1,23	5	186,7	-24,6	19
2.18	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN25	2	St.	10	114,20	-7,21	5	1142,0	-72,1	20
2.19	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN32	6	St.	10	117,92	-7,45	5	3537,6	-223,4	20
2.20	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN40	2	St.	10	350,04	-22,10	5	3500,4	-221,0	20
2.21	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN50	3	St.	10	385,24	-24,32	5	5778,6	-364,8	20
2.22	HZG	Heizungsumwälzpumpe	DN65	1	St.	10	465,42	-29,39	5	2327,1	-146,9	20
2.23	HZG	Heizkörper	Radiatoren/Konvektoren	11261	kg	30	2,66	-1,59	2	59907,3	-35809,3	21
2.24	HZG	Deckenstrahlplatten	24x0,9m Turnhalle	2198,8	kg	30	4,16	-2,40	2	18302,0	-10554,4	22
2.25	HZG	Rockwool 800	DN15	3442	m	40	0,40	0,00	2	2760,5	-27,5	Rockwool-Tool
2.26	HZG	Rockwool 800	DN20	495	m	40	0,44	0,00	2	433,6	-4,0	Rockwool-Tool
2.27	HZG	Rockwool 800	DN25	521	m	40	0,82	-0,008	2	852,4	-8,3	Rockwool-Tool
2.28	HZG	Rockwool 800	DN32	384	m	40	1,341	-0,014	2	1029,9	-10,8	Rockwool-Tool
2.29	HZG	Rockwool 800	DN40	30	m	40	1,988	-0,021	2	119,3	-1,3	Rockwool-Tool
2.30	HZG	Rockwool 800	DN50	115	m	40	2,88	-0,031	2	662,4	-7,1	Rockwool-Tool
2.31	HZG	Rockwool 800	DN65	228	m	40	3,88	-0,043	2	1769,3	-19,6	Rockwool-Tool
2.32	HZG	Rockwool 800	DN80	29	m	40	7,583	-0,087	2	439,8	-5,0	Rockwool-Tool
2.33	HZG	Rockwool 800	DN100	168	m	40	8,559	-0,098	2	2875,8	-32,9	Rockwool-Tool
2.34	HZG	Rockwool 800	DN125	2	m	40	9,308	-0,11	2	37,2	-0,4	Rockwool-Tool
2.35	HZG	R90 Rohrschalen	DN15	62,4	m	50	0,624	-0,004	1	38,9	-0,2	Rockwool-Tool
2.36	HZG	R90 Rohrschalen	DN20	11,4	m	50	0,602	-0,004	1	6,9	0,0	Rockwool-Tool
2.37	HZG	R90 Rohrschalen	DN25	9	m	50	1,023	-0,007	1	9,2	-0,1	Rockwool-Tool
2.38	HZG	R90 Rohrschalen	DN32	15	m	50	0,962	-0,006	1	14,4	-0,1	Rockwool-Tool
2.39	HZG	R90 Rohrschalen	DN40	2,4	m	50	1,433	-0,009	1	3,4	0,0	Rockwool-Tool
2.40	HZG	R90 Rohrschalen	DN50	2,4	m	50	3,037	-0,023	1	7,3	-0,1	Rockwool-Tool
2.41	HZG	R90 Rohrschalen	DN65	2,4	m	50	4,594	-0,0325	1	11,0	-0,1	Rockwool-Tool
2.42	HZG	R90 Rohrschalen	DN80	2,4	m	50	6,491	-0,065	1	15,6	-0,2	Rockwool-Tool
2.43	HZG	R90 Rohrschalen	DN100	1,2	m	50	8,104	-0,048	1	9,7	-0,1	Rockwool-Tool
2.44	HZG	R90 Rohrschalen	DN125	0,6	m	50	9,561	-0,069	1	5,7	0,0	Rockwool-Tool
2.45	HZG	Befestigung	Stahl, Schrauben, Schellen	6331,1	kg	40	3,470359	-1,69	2	43942,1	-21399,0	15
2.46	HZG	Lufttöpfe/Ausdehnungsgefäße	Masse Stahl	86,8	kg	10	3,470359	-1,69	5	1506,1	-733,5	15
2.47	HZG	Verteiler mit Anschlüssen	Masse Stahl	147	kg	40	3,470359	-1,69	2	1020,3	-496,9	15
2.48	HZG	Fernwärme	Übergabestation	700	kg	30	4,990	-1,23	2	6986,0	-1722,0	Ökobaudat
3.01	KLT	Armaflex	19mm	0,88	m³	40	330,000	-38,2	2	580,8	-67,2	14
3.02	KLT	Stahlrohr	Gewinderohr	400	kg	40	2,493	-1,323	2	1994,1	-1058,4	Ökobaudat
3.03	KLT	Kältemaschine	Direktverdampfer	6,85	kW	10	49,3	-24,2	5	1688,5	-828,9	Ökobaudat
4.01	SAN	Edelstahlrohr	Mapress	3500	kg	50	3,66	-1,32	1	12810,0	-4620,0	23
4.02	SAN	Edelstahlrohr	Fittinge	1583	St.	50	0,50	0,15	1	791,5	237,5	24
4.03	SAN	Absperfhahn	DN15-40	84	St.	25	1,22	-0,09	2	205,0	-15,1	18
4.04	SAN	Zirkulationspumpe	DN20	2	St.	10	41,65312382	-2,629857	5	416,5	-26,3	20
4.05	SAN	Keramik	WT/WC/Urinal	5034	kg	40	1,2553	-0,09	2	12638,4	-906,1	25
4.06	SAN	Spülkasten	Unterputz	79	St.	50	48,00	-18,50	1	3792,2	-1461,5	26
4.07	SAN	Trinkwasseranschlüsse	Armaturen	138	St.	40	36,85	-12,00	2	10171,2	-3312,0	27
4.08	SAN	Durchlauferhitzer	Elektro-Durchflußerwärmer	29	St.	15	19,29	-5,50	4	2238,1	-638,0	Ökobaudat
4.09	SAN	Pufferspeicher	Edelstahl 1000L	330	kg	20	4,58	-1,05	3	4534,3	-1039,5	Ökobaudat
4.10	SAN	Hebeanlage	Abwasser	1	St.	10	465,42	-1,69	5	2327,1	-8,5	20
4.11	SAN	Armaflex	13mm	8,68	m³	50	330,00	-38,20	1	2865,3	-331,7	14
4.12	SAN	Rockwool 800	DN15	248	m	40	0,40	0,00	2	198,9	-2,0	Rockwool-Tool
4.13	SAN	Rockwool 800	DN20	77	m	40	0,44	-0,004	2	67,5	-0,6	Rockwool-Tool
4.14	SAN	Rockwool 800	DN25	31,00	m	40	0,82	-0,01	2	50,7	-0,5	Rockwool-Tool
4.15	SAN	Rockwool 800	DN32	88	m	40	1,341	-0,014	2	236,0	-2,5	Rockwool-Tool
4.16	SAN	Abflusrohr	SML	16938	kg	50	1,54439946	0	1	26159,0	0,0	28
4.17	SAN	Abflusrohr	Bögen/Abzweige	2100	St.	50	2,1	0	1	4410,0	0,0	28
4.18	SAN	Abläufe	Boden/Dach	68	St.	25	10	-2	2	1360,0	-272,0	Ökobaudat
4.19	SAN	Fettabscheider	NS10	1710	kg	40	2,57	-2,11	2	8789,4	-7216,2	29
4.20	SAN	Schächte	Beton	1	m³	50	129,2	-5,19	1	129,2	-5,2	30
4.21	SAN	Befestigung	Stahl, Schrauben, Schellen	6800	kg	50	3,470359	-1,69	1	23598,4	-11492,0	15