



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

**Untersuchung der raumluftechnischen Anlage einer
Hamburger Stadtteilschule auf Möglichkeiten der
energieeffizienten und nachhaltigen Modernisierung**

Bachelorarbeit im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Jonas Simon ([REDACTED])

Hamburg am 19. September 2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Armin Gregorzewski (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl. Ing. Christian Meinecke (Inros Lackner SE)

Die Bachelorarbeit wurde in Zusammenarbeit
mit dem Unternehmen Inros Lackner SE erstellt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Ziel einer Entscheidungsvorlage.....	2
2 Informationen zum Hintergrund	5
2.1 Historischer Kontext	5
2.2 Normative Grundlagen	7
2.3 Beschreibung der Bestandssituation.....	8
2.3.1 RLT- und Heizungsanlage.....	8
2.3.2 Versorgungsbereich.....	10
3 Nachhaltigkeit	12
3.1 Definition und Bewertungskriterien.....	12
3.2 Ökologische Qualität	14
3.2.1 Wirkungen auf die globale Umwelt.....	14
3.2.2 Ressourceninanspruchnahme	15
3.2.3 Methodik: Ökobilanz	16
3.3 Ökonomische Qualität.....	20
3.3.1 Lebenszykluskosten	20
3.3.2 Methodik: Lebenszykluskostenrechnung.....	20
3.4 Soziale Qualität.....	22
3.4.1 Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit.....	22
4 Energieeffizienz	30
4.1 Definition	30
4.2 RLT-Anlagen	31
4.2.1 Nutzenübergabe	31
4.2.2 Verteilung	32
4.2.3 Erzeugung/Aufbereitung	33
4.2.4 Betriebsführung und Automatisierung	33
4.2.5 Wärme bzw. Kälterückgewinnung.....	34
4.3 Heizungsanlagen.....	35
4.3.1 Nutzenübergabe	35

4.3.2	Verteilung	35
4.3.3	Erzeugung und erneuerbare Energien	37
5	Bestandsanlagen	38
5.1	Berechnung des Endenergiebedarfs der Bestandsanlagen.....	38
5.1.1	Datengrundlage	38
5.1.2	Erfassung der Gebäudegeometrie und Bauphysik	38
5.1.3	Nutzungsrandbedingungen und Zonierung	40
5.1.4	Erfassung der Anlagentechnik	42
5.1.5	Ergebnis der Endenergiebedarfsberechnung.....	44
6	Grundsätzliche Überlegungen	47
6.1	DIN EN 15251.....	47
6.2	Freie Lüftung/RLT-Anlage	47
6.3	Innenraumlufthygiene	48
6.4	Thermischer Komfort im Winter	50
6.4.1	Operative Temperatur.....	50
6.4.2	Luftfeuchte	53
6.5	Thermischer Komfort im Sommer.....	53
6.5.1	Operative Temperatur.....	53
6.5.2	Luftfeuchte	56
6.6	Variantenübersicht.....	57
7	Variante 1	60
7.1	Systemübersicht	60
7.2	Dimensionierung	63
7.2.1	Heizungsanlage.....	63
7.2.2	RLT-Anlage	66
7.3	Endenergiebedarf	72
7.4	Ökobilanz	73
7.4.1	Bilanzierung	73
7.4.2	Ergebnis	76
7.5	Lebenszykluskosten	77
7.5.1	Berechnung.....	77
7.5.2	Ergebnis	81
8	Variante 2	83
8.1	Systembeschreibung	83
8.2	Dimensionierung	84
8.2.1	RLT-Anlage	84

8.2.2	Endenergiebedarf	86
8.3	Ökobilanz	88
8.4	Lebenszykluskosten	89
9	Variante 3	90
9.1	Systembeschreibung	90
9.2	Dimensionierung	90
9.3	Endenergiebedarf	91
9.4	Ökobilanz	92
9.5	Lebenszykluskosten	93
10	Ergebnis	94
10.1	Endenergiebedarfe	94
10.2	Ökobilanz	95
10.2.1	Wirkungen auf die globale Umwelt	95
10.2.2	Ressourceninanspruchnahme	97
10.3	Lebenszykluskosten	99
10.4	Bewertungsmatrix	100
10.5	Entscheidungsvorlage und Ausführungsempfehlung	102
	Anhang	104
	Literaturverzeichnis	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Entwicklung der inflationsbereinigten Energiepreise 1970 – 2016.....	5
Abbildung 2-2: Schema der Bestandsanlage	8
Abbildung 2-3: 3D-Ansicht des versorgten Gebäudes.....	10
Abbildung 3-1: Die drei Dimensionen und Schutzgüter des Nachhaltigen Bauens.....	12
Abbildung 3-2: Ausgewählte Bewertungskriterien.....	13
Abbildung 3-3: BNB-Anforderungen an das Zugluftrisiko im Winter	25
Abbildung 3-4: BNB-Anforderungen an das Zugluftrisiko im Sommer.....	27
Abbildung 5-1: Zoneneinteilung nach DIN V 18599 (Obergeschoss)	41
Abbildung 5-2: Monatsbilanzierung der Endenergie – Bestandssituation.....	45
Abbildung 5-3: EnEV-Bewertung – Bestandssituation.....	46
Abbildung 6-1: Raumeinteilung nach DIN EN 12831 (Ober- und Erdgeschoss)	51
Abbildung 6-2: Raumheizlasten des Schulgebäudes (Obergeschoss)	52
Abbildung 6-3: Raumkühllasten des Schulgebäudes (Obergeschoss).....	55
Abbildung 6-4: Thermisches Verhalten des „Physik Raum 2“ mit Kühlung	55
Abbildung 6-5: Thermisches Verhalten des „Physik Raum 2“ ohne Kühlung.....	56
Abbildung 6-6: Jahresdauerlinie des Wärme- und Kältebedarfs.....	59
Abbildung 7-1: RLT-Anlage der Variante 1	60
Abbildung 7-2: EnEV-Bewertung – Variante 1.....	72
Abbildung 7-3: Endenergieeinsparungen – Variante 1 vs. Bestand	73
Abbildung 7-4: Endenergieeinsparungen (Energieträger) – Variante 1 vs. Bestand.....	73
Abbildung 7-5: Anteile der Nutzung an den Umweltwirkungen der Variante 1	77
Abbildung 7-6: Verringerung der Umweltwirkungen – Variante 1 vs. Bestand	77
Abbildung 7-7: Lebenszykluskosten der Bestandsanlagen.....	81
Abbildung 7-8: Lebenszykluskosten der Variante 1.....	82
Abbildung 8-1: RLT-Anlage der Variante 2	84
Abbildung 8-2: EnEV-Bewertung – Variante 2.....	87
Abbildung 8-3: Endenergieeinsparungen – Variante 2 vs. Variante 1.....	87
Abbildung 8-4: Endenergieeinsparungen (Energieträger) – Variante 2 vs. Variante 1 ..	88
Abbildung 8-5: Verringerung der Umweltwirkungen – Variante 2 vs. Variante 1	88
Abbildung 8-6: Lebenszykluskosten der Variante 2.....	89
Abbildung 9-1: EnEV-Bewertung – Variante 3.....	91
Abbildung 9-2: Endenergieeinsparungen – Variante 3 vs. Variante 2.....	92
Abbildung 9-3: Verringerung der Umweltwirkungen – Variante 3 vs. Variante 2	93
Abbildung 9-4: Lebenszykluskosten der Variante 3.....	93
Abbildung 10-1:Vergleich der Endenergiebedarfe	94
Abbildung 10-2: Vergleich der Endenergiebedarfe nach Energieträgern	94
Abbildung 10-3: Treibhauspotenzial (GWP) der Varianten	95
Abbildung 10-4: Ozonschichtabbaupotenzial (ODP) der Varianten	96
Abbildung 10-5: Ozonbildungspotenzial (POCP) der Varianten	96

Abbildung 10-6: Versauerungspotenzial (AP) der Varianten	97
Abbildung 10-7: Überdüngungspotenzial (EP) der Varianten	97
Abbildung 10-8: Primärenergiebedarf der Varianten – nicht erneuerbar	98
Abbildung 10-9: Primärenergiebedarf der Varianten – gesamt.....	98
Abbildung 10-10: Primärenergiebedarf der Varianten – erneuerbarer Anteil.....	99
Abbildung 10-11: Lebenszykluskosten der Varianten	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Leistungsphasen nach HOAI.....	3
Tabelle 2-1: Normative Grundlagen im historischen Vergleich.....	7
Tabelle 3-1: Lebenszyklusphasen und Module nach DIN EN 15978.....	17
Tabelle 3-2: Bilanzgrößen/Umweltwirkungen der Ökobilanz	18
Tabelle 3-3: Preissteigerungsraten und Kalkulationszinssatz.....	21
Tabelle 3-4: Spezifische Endenergiepreise	22
Tabelle 3-5: Wartungs-, Inspektions- und Instandhaltungskostenfaktoren.....	22
Tabelle 3-6: BNB-Qualitätsniveaus der operativen Temperatur im Winter.....	24
Tabelle 3-7: Zulässige Oberflächentemperaturen von Bauteilen im Winter	26
Tabelle 3-8: BNB-Qualitätsniveaus der operativen Temperatur im Sommer	27
Tabelle 3-9: Zulässige Oberflächentemperaturen von Bauteilen im Sommer	28
Tabelle 3-10: BNB-Qualitätsniveaus des Außenluftvolumenstroms	29
Tabelle 4-1: Mögliche Energieeffizienzmaßnahmen	31
Tabelle 4-2: SFP-Kategorien.....	33
Tabelle 4-3: Wärmerückgewinnungsklassen	34
Tabelle 5-1: Flächen und Gebäudedimensionen des Schulgebäudes	39
Tabelle 5-2: Wärmedurchgangskoeffizienten des Schulgebäudes.....	39
Tabelle 5-3: Zonierung des versorgten Gebäudes (Bestand)	40
Tabelle 5-4: Heizungsanlage	42
Tabelle 5-5: RLT-Anlage	43
Tabelle 5-6: Kälteanlage.....	43
Tabelle 5-7: Bilanzierte Beleuchtung.....	44
Tabelle 5-8: Anforderungen der EnEV 2016 an die Wärmedurchgangskoeffizienten ...	46
Tabelle 5-9: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Bestandssituation.....	46
Tabelle 6-1: Auslegungsvolumenströme der Modernisierungsvarianten	50
Tabelle 6-2: Luftfeuchtegehalte im Winter	53
Tabelle 6-3: Luftfeuchtegehalte im Sommer	57
Tabelle 7-1: Heizungsanlage	61
Tabelle 7-2: RLT-Anlage	62
Tabelle 7-3: Luftzustandsdaten im Winterbetrieb	68
Tabelle 7-4: Luftzustandsdaten im Sommerbetrieb	69
Tabelle 7-5: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Variante 1.....	72
Tabelle 7-6: Verwendete Datensätze für die Ökobilanz der Variante 1.....	74
Tabelle 7-7: Bilanzierte Mengen für die Ökobilanz der Bestandsanlage.....	76
Tabelle 7-8: Ökobilanz der Variante 1 – Nutzung.....	76
Tabelle 7-9: Bauteile der Variante 1 – Nutzung.....	78
Tabelle 7-10: Investitionskosten der Variante 1.....	79
Tabelle 7-11: Investitionskosten der Bestandsanlagen	81
Tabelle 8-1: RLT-Anlage	83

Tabelle 8-2: Luftzustandsdaten im Winterbetrieb	85
Tabelle 8-3: Luftzustandsdaten im Sommerbetrieb	86
Tabelle 8-4: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Variante 2	87
Tabelle 8-5: Ökobilanz der Variante 2 – Nutzung	88
Tabelle 8-6: Investitionskosten der Variante 2	89
Tabelle 9-1: Druckverluste – Zuluft	90
Tabelle 9-2: Druckverluste – Abluft	91
Tabelle 9-3: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Variante 3	91
Tabelle 9-4: Ökobilanz der Variante 3 – Nutzung	92
Tabelle 10-1: Bewertungsmatrix	100
Tabelle 10-2: Entscheidungsvorlage	102

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungen

ABL	Abluft
AP	Acid Potential (dt.: Versauerungspotenzial)
Äqv.	Äquivalent
ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten
AUL	Außenluft
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CFKW	Chlorfluorkohlenwasserstoffe
DGNB	Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen
EnEV	Energieeinsparverordnung
GWP	Global Warming Potential (dt.: Treibhauspotenzial)
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HW	Heizungswasser
KG	Kostengruppe
KKM	Kompressionskältemaschine
KW	Kaltwasser
LCA	Life Cycle Assessment (dt.: Ökobilanz)
LCC	Life Cycle Costing (dt.: Lebenszykluskostenrechnung)
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MVOC	Microbial Volatile Organic Compounds (dt.: Mikrobiologisch produzierte flüchtige organische Verbindungen)
NL	Nebenleitungen
NRF	Netto-Raumfläche (ehemals Netto-Grundfläche)
ODP	Ozone Depletion Potential (dt.: Ozonschichtabbaupotenzial)
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential (dt.: Ozonbildungspotenzial)
RAL	Raumluft
RL	Rücklauf
RLT(-Anlage)	Raumlufttechnik/Raumlufttechnische Anlage
SBH	Schulbau Hamburg
VL	Vorlauf
VOC	Volatile Organic Compounds (dt.: Flüchtige organische Verbindungen)
WRS	Wärmerückgewinnungssystem
ZUL	Zuluft

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

A_{BGF}	m^2	Brutto-Grundfläche
$A_{F,KL,e}$	m^2	Mindestöffnungsfläche für kontinuierliche Lüftung
$a_{F,KL,e}$	$m^2/Pers.$	Spezifische Mindestöffnungsfläche für kontinuierliche Lüftung
$A_{F,KL,v}$	m^2	Vorhandene Öffnungsfläche für kontinuierliche Lüftung
$A_{F,SL,e}$	m^2	Mindestöffnungsfläche für Stoßlüftung
$a_{F,SL,e}$	m^2/m^2	Spezifische Mindestöffnungsfläche für Stoßlüftung
$A_{F,SL,v}$	m^2	Vorhandene Öffnungsfläche für Stoßlüftung
A_{NRF}	m^2	Netto-Raumfläche (vormals: Netto-Grundfläche)
B_F	m	Fensterbreite
bw_0	EUR/m^2	Flächenbezogener Barwert
BW_0	EUR	Barwert
c	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
c_p	$kJ/(kgK)$	Spezifische Wärmekapazität
DR	$\%$	Draft Risk (dt.: Zugluftrisiko)
$f_{OBD,i,j}$	kg kWh	Ökobaudat-Datenbank entnommener spezifischer Wirkfaktor für die Umweltwirkung des Indikators i durch das Bauteil j
$f_{OBD,i,k}$	kg kWh	Ökobaudat-Datenbank entnommener spezifischer Wirkfaktor für die Umweltwirkung des Indikators i durch den Energieträger k
G_K	Kh	Kühlgradstunden
$g_{k,max}$	$\%$	Überschreitungshäufigkeit
h	kJ/kg	Spezifische Enthalpie
H_F	m	Fensterhöhe
k_k	EUR/kWh	Spezifischer Endenergiepreis des Energieträgers k
K_k	EUR	Energiekosten des Energieträgers k
$K_{V,EK}$	EUR/a	Energiekosten im ersten Nutzungsjahr
l	m	Länge
m_j	kg Stückzahl	Menge des Bauteils j
$n_{E,j}$	–	Häufigkeit der Erneuerung des Bauteils j
n_F	–	Fensteranzahl
n_P	–	Personenanzahl
p	$\%$	Jährliche Preissteigerung
$Q_{E,k}$	kWh	Jährlicher Endenergiebedarf an Energieträger k

q_G	$(\text{m}^3/\text{h})/\text{m}^2$	Flächenbezogener, gebäudeemissionsbedingter Volumenstrom
q_P	$(\text{m}^3/\text{h})/\text{Pers.}$	Personenbezogener Volumenstrom
R	Pa/m	Rohrreibungsgefälle
t_{LCA} oder T	a	Betrachtungszeitraum
$t_{N,j}$	a	Nutzungsdauer des Bauteils j
Tu	%	Turbulenzgrad
$UWG_{E,i}$	kg/a kWh/a	Jährliche Umweltwirkung des Indikators i durch Erneuerung
$uwg_{\text{ges},i}$	kg/m ² a kWh/m ² a	Jährliche flächenbezogene Gesamtumweltwirkung des Indikators i
$UWG_{\text{ges},i}$	kg/a kWh/a	Jährliche Gesamtumweltwirkung des Indikators i
$UWG_{H,i}$	kg/a kWh/a	Jährliche Umweltwirkung des Indikators i durch die Herstellung
$UWG_{L,i}$	kg/a kWh/a	Jährliche Umweltwirkung des Indikators i durch die Lebensendphase
$UWG_{N,i}$	kg/a kWh/a	Jährliche Umweltwirkung des Indikators i durch die Nutzung
$UW_{H,i,j}$	kg kWh	Umweltwirkung des Indikators i durch das Bauteils j in Folge der Herstellung
$UW_{L,i,j}$	kg kWh	Umweltwirkung des Indikators i durch das Bauteils j in Folge der Lebensendphase
$UW_{N,i,k}$	kg/a kWh/a	Jährliche Umweltwirkung des Indikators i durch die Nutzung des Energieträgers k
w	g/h	Stündlich abgegebene Wassermenge
x	g/kg tr. Luft	absolute Luftfeuchte
z	%	Kalkulationszinssatz

Griechische Buchstaben

ρ	kg/m ³	Dichte
Δp	Pa	Druckverlust
\dot{q}	W/m	Längenspezifische Wärmeleistung
\dot{m}	kg/h	Massenstrom
\bar{v}	m/s	Mittlere (Strömungs-)Geschwindigkeit
ϑ	° C	Temperatur
η_t	–	Temperaturänderungsgrad
\dot{V}	m ³ /h	Volumenstrom
\dot{Q}	W	Wärmestrom/-leistung
Δx	g/kg	Wasseraufnahme der Raumluft
η	–	Wirkungsgrad

1 Einleitung

Inros Lackner SE bietet seit 80 Jahren mit derzeit über 450 Beschäftigten Architektur- und Ingenieurleistungen weltweit. Neben Infrastrukturplanung, Wasserbau und Hafenlogistik sind Energie-, Umwelt- und Gebäudeplanung Kernkompetenzen des Unternehmens. In diesen Bereichen werden alle Planungsstufen sowohl in der Fach- als auch in der Generalplanung abgedeckt. Dabei bestimmt eine umwelt- und ressourcenschonende Denkweise immer mehr die tägliche Unternehmensarbeit [1, S. 4–8]. Gerade im Bereich der komplexen Gebäudeplanung werden nachhaltige ingenieurtechnische Lösungen, wie die Nutzung Erneuerbarer Energien zunehmend ein planerischer Schwerpunkt [1, S. 20].

Als Landesbetrieb ist die SBH Schulbau Hamburg (SBH) ein öffentliches Unternehmen und Teil der Freien und Hansestadt Hamburg. Die SBH ist für die Unterhaltung und Sanierung der über 400 Schulen Hamburgs zuständig. Mit einem Investitionsvolumen von 234,5 Mio. Euro pro Jahr bewirtschaftet die SBH fast 3500 Gebäude mit einer Gesamtfläche von rund 3 Mio. m². Neben Unterhaltung und Sanierung der Hamburger Grundschulen, weiterführenden und beruflichen Schulen ist die SBH auch für die Planung und Durchführung von Baumaßnahmen verantwortlich. Insbesondere im Rahmen von Neubau-, Umbau- und Instandhaltungsmaßnahmen obliegt es der SBH Planungsbüros und Bauunternehmen mit Planungs- und Bauleistungen zu beauftragen. Als öffentlicher Auftraggeber ist die SBH dabei an das Vergaberecht gebunden [2]. Die SBH hat sich außerdem mit ihrem Energiemanagement das Ziel gesetzt, die Energieverbräuche und -kosten der Hamburger Schulen durch eine Kombination von gezielten Sanierungsmaßnahmen, Steigerung der Energieeffizienz und verstärktem Einsatz von Erneuerbaren Energien zu reduzieren [3].

Im Jahr 2016 bekommt das Unternehmen Inros Lackner SE am Standort Hamburg den Auftrag von der SBH für die Modernisierung einer Stadtteilschule¹. Ein Teil der Hamburger Stadtteilschule ist seit einem Brandschaden durch ein in einem Laborraum ausgebrochenes Feuer im Juni 2014 nicht mehr nutzbar und muss grundlegend saniert werden. Die vorliegende Arbeit soll die bestehende raumluftechnische Anlage (RLT-Anlage) der Hamburger Stadtteilschule unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Ressourcenschonung auf Modernisierungsmöglichkeiten untersuchen. Hierzu sollen zunächst die Bestandssituation und der damit verbundene historische Hintergrund dokumentiert werden. Daraufhin müssen geeignete Kriterien gefunden werden, auf deren Grundlage die Modernisierungsvarianten vor den Aspekten Nachhaltigkeit,

¹ Auf Wunsch der „Schulbau Hamburg“ bleibt der Name der Schule in dieser Arbeit ungenannt.

Energieeffizienz und Ressourcenschonung entwickelt und bewertet werden können. Als Ziel der Arbeit soll so eine Entscheidungsvorlage für den Bauherrn/die Bauherrin entstehen.

Nachfolgend wird die Vorgehensweise bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung und der damit verbundene Aufbau der Untersuchung beschrieben. Zunächst wird der historische Kontext der Anlagenentstehung erläutert. Dazu werden die energie- und bauwirtschaftliche Situationen zum Planungszeitpunkt sowie die damals relevanten Normen und technischen Regeln dargestellt und der Vergleich zur Gegenwart gezogen. Darüber hinaus erfolgt ein erster Überblick über die Bestandsituation durch die Beschreibung der bestehenden RLT- und Heizungsanlage und der von den Anlagen versorgten Räumlichkeiten (Abschnitt 2). Als Grundlage der weiteren Untersuchung werden Kriterien und Methodiken eingeführt, die den Vergleich der Modernisierungsvarianten vor dem Aspekt der Nachhaltigkeit ermöglichen (Abschnitt 3). In einem weiteren Schritt wird die Basis für die Entwicklung von energieeffizienten Modernisierungsvarianten erarbeitet (Abschnitt 4). Daraufhin wird der Endenergiebedarf der Bestandsanlagen ermittelt (Abschnitt 5). Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen der Dimensionierung sowie grundsätzliche Überlegungen bei der Auswahl der Modernisierungsvarianten beschrieben. Die eigentliche Beschreibung, Dimensionierung und Berechnung der Lebenszykluskosten sowie eine Ökobilanzierung der einzelnen Varianten erfolgt in den Abschnitten 7–9. Die Ergebnisse werden anschließend ausgewertet und in einer Entscheidungsmatrix zusammengefasst. Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse wird eine Ausführungsempfehlung ausgesprochen, die zusammen mit der entwickelten Entscheidungsvorlage dem Bauherrn/der Bauherrin einen Überblick über die relevanten Informationen dieser Untersuchung gibt (Abschnitt 10).

1.1 Ziel einer Entscheidungsvorlage

Allgemein lässt sich der Entscheidungsprozess in fünf Phasen unterscheiden [4]. Am Anfang steht die Problemformulierung, in der das durch Anzeichen negativer Entwicklungen auftretende Entscheidungsproblem formuliert wird. Konkret für diese Untersuchung handelt es sich dabei um das Problem, wie mit der nicht mehr dem Stand der Technik entsprechenden raumluftechnischen Anlage der Stadtteilschule im Rahmen der Sanierung zu verfahren ist. In einem zweiten Schritt erfolgt eine Präzisierung der Zielvorstellung, die die Alternativensuche und -bewertung ermöglicht. Für die Untersuchung der RLT-Anlage bedeutet dies wiederum eine möglichst nachhaltige, energieeffiziente und ressourcenschonende Alternative zur Bestandsanlage zu entwickeln. In einem dritten Schritt werden Alternativen gesucht und die Ergebnisse der Alternativen

prognostiziert. Die eigentliche Entscheidung wird in Schritt vier mit der Auswahl einer Alternative getroffen. Für die ausgewählte Handlungsalternative werden nun in der abschließenden Realisationsphase weitere Entscheidungen notwendig, da nicht alle Detailmaßnahmen im dritten Schritt erfasst werden können. Nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) unterteilt sich die Bauplanung (für Technische Ausrüstung eines Gebäudes) in die in Tabelle 1-1 dargestellten neun Leistungsphasen [5, S. 35]. Während dieser Leistungsphasen sind vom Bauherrn bzw. der Bauherrin eine Vielzahl von Entscheidungen zu treffen.

Tabelle 1-1: Leistungsphasen nach HOAI [5, S. 35]

Leistungsphasen nach HOAI								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Grundlagenermittlung	Vorplanung	Entwurfplanung	Genehmigungsplanung	Ausführungsplanung	Vorbereitung der Vergabe	Mitwirkung bei der Vergabe	Objektüberwachung/ Bauüberwachung	Objektbetreuung

Die Entwicklung, Bewertung und Beurteilung von Alternativen ist ein elementarer Bestandteil der Bauplanung, da sich optimale Lösungen nur durch das gründliche Prüfen mehrerer Alternativen ergeben. Der Großteil der planerischen Alternativen findet sich in der Vorplanung (Leistungsphase 2), in der die wesentlichen Konzeptentscheidungen getroffen werden [6, S. 128–129]. In dieser Leistungsphase muss nach HOAI für die Technische Ausrüstung u. a. ein Planungskonzept inklusive alternativer Lösungsmöglichkeiten erarbeitet werden. Das Konzept sollte die überschlägige Auslegung wichtiger Systeme und Anlagen mitsamt derer Funktionsschemata sowie die Erläuterungen der wichtigsten technischen Daten und Zusammenhänge umfassen. Darüber hinaus sollte eine Kostenschätzung nach DIN 276 erfolgen [5, S. 115–116]. Eine Entscheidungsvorlage dient in diesem Zusammenhang dazu, den Entscheidungsprozess für den Bauherrn/die Bauherrin zu vereinfachen. Die Entscheidungsvorlage fasst die komplexen Planungsüberlegungen in einer vergleichenden Betrachtung zusammen und ermöglicht so die Auswahl der optimalen Lösungsvariante. Dabei sollte die Entscheidungsvorlage die wichtigsten Informationen zur Variantenuntersuchung enthalten. Dazu gehört die Formulierung der Aufgabenstellung, grundlegende Anforderungen an die untersuchten Varianten und die Kurzbeschreibung der Varianten, die Bewertung nach den vorab defi-

nierten Kriterien, die voraussichtlichen Kosten und ein aus der Untersuchung resultierendes Fazit bzw. eine Empfehlung sowie die Möglichkeit für den Bauherrn/die Bauherin eine Variante auszuwählen und zu beauftragen [6, S. 130–132].

2 Informationen zum Hintergrund

2.1 Historischer Kontext

Die im Mittelpunkt dieser Arbeit stehende RLT-Anlage wurde im Jahr 1974 installiert und versorgt Teile einer Hamburger Stadtteilschule. Die Anlage ist im Rahmen des Schulbaus Anfang der 1970er Jahre und damit zu einer Zeit entworfen worden, in der die Energiekosten verglichen mit der Gegenwart relativ gering sind und in der Ressourcenschonung, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit noch keinen großen Stellenwert in der Bauplanung haben. Abbildung 2-1 zeigt die Energiepreisentwicklung in den Jahren 1970 bis 2016. Dargestellt sind die inflationsbereinigten Endverbraucherpreise für die Energieträger Strom, Heizöl und Erdgas.

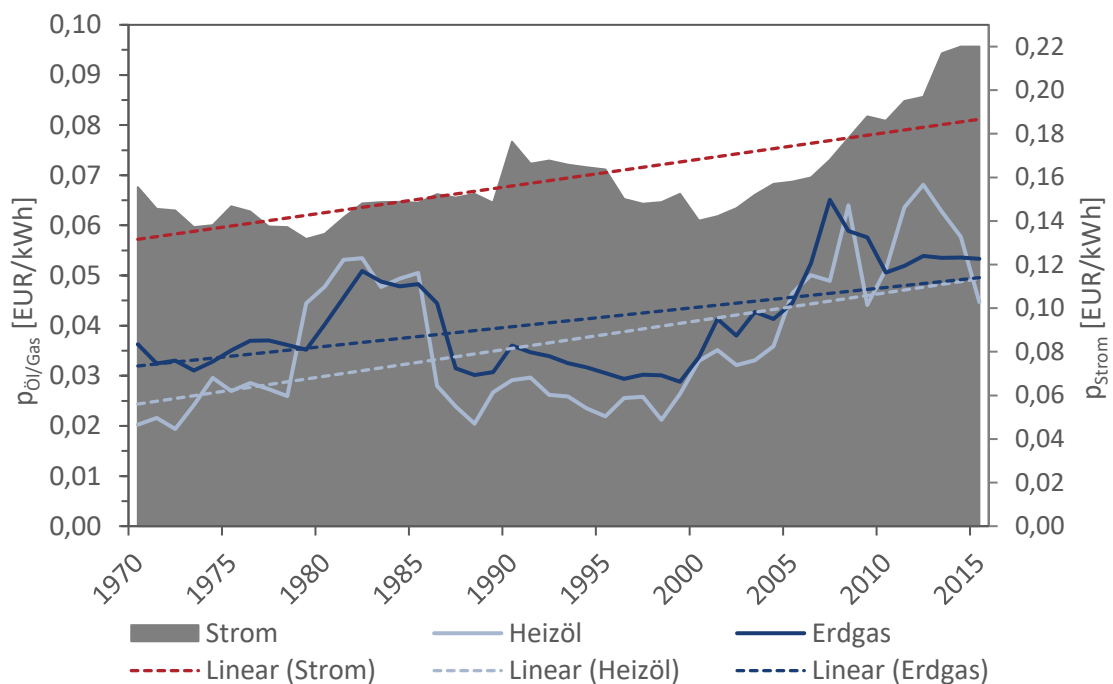


Abbildung 2-1: Entwicklung der inflationsbereinigten Energiepreise 1970 – 2016
(eigene Darstellung nach [7])

Auf der Abszisse ist der Jahresverlauf von 1970 – 2016 und auf der Ordinate der Heizöl- und Erdgas- sowie auf der sekundären Ordinate der Strompreis pro kWh aufgetragen. Deutlich ist der Einfluss der zweiten Ölpreiskrise Ende der 1980er Jahre auf die Heizöl- und Erdgaspreise zu erkennen, ansonsten bleiben die Preise für Heizöl und Erdgas bis Anfang dieses Jahrhunderts aber annähernd konstant. Ab den 2000er Jahren ist ein starker Preisanstieg zu erkennen. Der Strompreis weist begründet durch die höherwertige Energieform der elektrischen Energie eine Preisdifferenz zu Erdöl und Erdgas auf, davon abgesehen entwickeln sich die Preise bis Anfang dieses Jahrhunderts aber ähnlich und

steigen nach der Jahrtausendwende stark an. Die Regressionsgeraden aller drei Energieträger machen deutlich, dass die Energiepreise in den letzten 45 Jahren selbst unter Berücksichtigung der Inflationsbereinigung deutlich angestiegen sind und sich diese Entwicklung mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit auch in der Zukunft fortsetzen wird. Zu dieser Einschätzung kommt auch eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aus dem Jahr 2014 [8, S. 70–73]. Vor diesem Hintergrund muss Energieeffizienz bei der Anlagenplanung allein aus wirtschaftlichem Interesse in der heutigen Zeit einen höheren Stellenwert als in den 1970er Jahren haben.

Die 1970er Jahre sind von wirtschaftlichem Aufschwung und Modernisierung geprägt. Die Bauwirtschaft durchläuft bedingt durch die starke Nachfrage in dieser Zeit eine Phase der Hochkonjunktur. Steigende Lohn- und Rohstoffkosten treiben die Baukosten allerdings immer weiter in die Höhe. Der Lohnkostenanteil im Hochbau beträgt im Jahr 1970 bereits ca. 42 % [9] und macht 2014 fast die Hälfte der Baukosten aus [10]. Öffentliche Auftraggeber müssen wegen der immensen Preissteigerungen zunehmend Projekte zurückstellen oder Ausschreibungen aufheben [11].

Großsiedlungsbau an den Stadträndern scheint in dieser Phase eine wohnungspolitische Antwort auf akuten innerstädtischen Wohnraummangel. So entstehen vielerorts wie auch in Hamburg Großsiedlungen in vergleichsweise kostengünstiger Beton-Fertigteilm Bauweise mit stark zentralisierter Infrastruktur [12, S. 247–248]. Teil einer solchen Infrastruktur ist auch die Hamburger Stadtteilschule, die Anfang der 1970er Jahre im Rahmen des Baus einer Großsiedlung in Hamburgs Westen errichtet worden ist.

Der Gebäudekomplex, indem sich die Hamburger Stadtteilschule befindet, besteht aus einer Stahlskelett-Konstruktion mit vorgehängten Fassadenplatten aus Leichtmetall. Fundamente und Geschossdecken bestehen aus Stahlbeton. Der Komplex gliedert sich in mehrere Teile und hat insgesamt eine Länge von 300 m und eine Breite von 80 m. Einer der westlichen Gebäudeteile dient der Unterbringung des naturwissenschaftlichen Bereichs der Schule und wird von der zu modernisierenden RLT-Anlage versorgt. Bei dem Gebäudeteil handelt es sich um ein zweigeschossiges Gebäude von 49,5 m Länge und 36 m Breite, das sich im Osten und im Süden an den restlichen Komplex anschließt. Die RLT-Anlage ist in der Technikzentrale im Dachgeschoss des sich anschließenden Gebäudekomplexes installiert.

2.2 Normative Grundlagen

Die Grundlagen für die Auslegung und Berechnung der RLT-Anlage bildeten die im Jahr 1974 geltenden Normen und Richtlinien. Tabelle 2-1 zeigt die damals wichtigsten Normen und Richtlinien im Vergleich mit den relevanten normativen Grundlagen im Jahr 2016.

Tabelle 2-1: Normative Grundlagen im historischen Vergleich

1974	2016
DIN 4701:1959-01 Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden	DIN 12831, Beiblatt 1
VDI 2078:1972-02 Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume	VDI 2078
DIN 1946-2:1960-04 Lüftungstechnische Anlagen: Lüftung von Versammlungsräumen	DIN EN 13779

Die DIN 4701 ist der Vorgänger der heute gültigen DIN EN 12831 Beiblatt 1:2008-07 mit dem Titel „Heizsysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast“. Die Norm-Heizlast dient als Grundlage für die Auslegung von Heizsystemen in Gebäuden. Die 1974 gültige DIN 4701 geht zurück auf die erste Ausgabe im Jahr 1929 und ist bis zur Überarbeitung 1983/89 im Wesentlichen unverändert geblieben. Die Überarbeitung 1983/89 führte bei der Berechnung von Heizlasten zu ca. 25 % geringeren Werten im Vergleich mit der Ausgabe von 1959. Die DIN EN 12831 sowie das 2004 erschienene Beiblatt 1 (Nationaler Anhang) mit Standardkenngrößen für die Norm-Heizlastberechnung von Gebäuden in Deutschland nähern sich bei den Berechnungsergebnissen wieder den ursprünglichen Werten der Norm von 1959 an. Die neue Norm enthält aber zahlreiche Änderungen, so z. B., dass die Gebäudeaußenmaße mit denen in der Energiebedarfsberechnung von Gebäuden nach der „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“ (EnEV) verwendeten Werten nun übereinstimmen [13, S. 950–951]. Die Berechnung der Norm-Heizlast für zu beheizende Räume ergibt sich aus den Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten. Diese erfassen dabei jeweils die Verluste durch die Gebäudehülle nach außen und zwischen unterschiedlich beheizten Räumen innerhalb des Gebäudes [14, S. 10].

Die VDI 2078 bildet die Grundlage für die Auslegung von Kühlsystemen in Gebäuden und trägt in der neuesten Version den Titel „Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)“. Die VDI 2078 ist seit dem Erscheinen der ersten Ausgabe im Jahr 1972 mehrfach überarbeitet worden. Ein ausschließlich EDV-gestütztes Berechnungsverfahren trägt in der Version aus dem Juni 2015 der fortschreitenden Digitalisierung bei der Planung der Technischen Gebäudeausrüstung Rechnung [15, S. 4]. Die EDV-Unterstützung erlaubt neben der Berechnung der

Kühllasten für zu klimatisierende Räume auch die Berechnung von Raumluft und operativer Raumtemperatur [15, S. 8–9].

Die DIN EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme“ ersetzt den zweiten Teil der 1974 gültigen DIN 1946 und enthält die wesentlichen Informationen zur Auslegung und Planung von Anlagen der Raumlufttechnik für Räumlichkeiten, die für den Aufenthalt von Personen bestimmt sind [16, S. 7].

2.3 Beschreibung der Bestandssituation

2.3.1 RLT- und Heizungsanlage

Bei der RLT-Anlage handelt es sich um eine aus den 1970er-Jahren stammende Zweikanal-Hochdruck-Anlage mit einem Zuluft- und Abluft-Volumenstrom von $87600 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Anlage verfügt über alle vier thermodynamischen Behandlungsfunktionen (Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten) einer Klimaanlage und ist in der Technikzentrale im Dachgeschoss des angrenzenden Gebäudekomplexes aufgestellt, von wo aus sie die Nutzungsfläche des naturwissenschaftlichen Bereichs der Schule sowie weitere Gebäudeteile versorgt. Abbildung 2-2 zeigt ein Schema der Anlage.

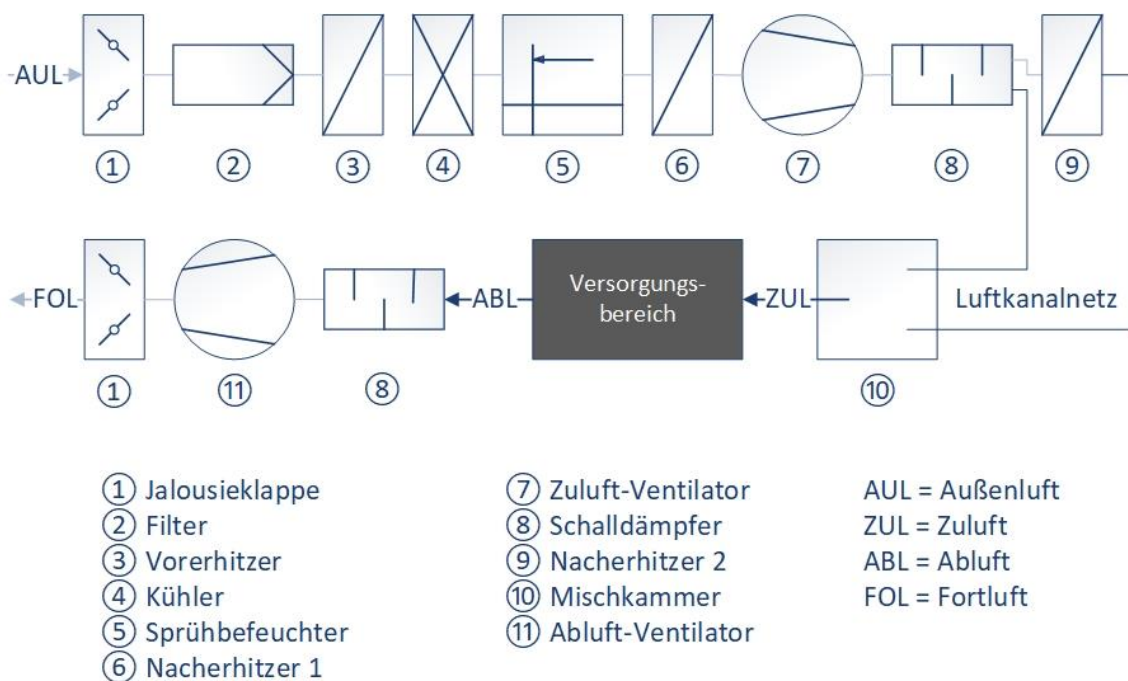


Abbildung 2-2: Schema der Bestandsanlage

Die Außenluft wird durch eine mit einem Wetterschutzgitter versehene Wandöffnung im Dachgeschoss angesaugt und passiert zunächst die Jalousieklappen (1). In der Anlage werden daraufhin Verunreinigungen der Frischluft mittels eines Filters (2) reduziert. Anschließend wird die gereinigte Luft im Vorerhitzer erwärmt (3). Der so erwärmte Luftstrom wird über einen Umlaufsprühbefeuchter (5) befeuchtet und im ersten Nacherhitzer (6) auf ca. 15 °C erwärmt. Dann wird der Luftstrom in einen Kalt- und Warmluftstrom aufgeteilt und vom Zuluft-Ventilator (7) mit nachgeschaltetem Schalldämpfer (8) durchs Zweikanalnetz zu den Luftauslässen in den zu versorgenden Räumen gefördert, wobei der Warmluftstrom über einen zweiten Nacherhitzer (9) auf Temperaturen von 30 – 50 °C erwärmt wird. Den Luftauslässen in den zu versorgenden Räumen sind Mischkästen (10) vorgeschaltet. Gelangt der Warm- und Kaltluftstrom aus dem Zweikanalnetz in die Mischkästen, wird die Luft hier zunächst entspannt und dann über ein Ventil in dem für die erforderliche Zulufttemperatur benötigten Verhältnis gemischt. Im Kühlfall wird die Luft durch den Kühler (4) zunächst unter Auskondensieren von Wasser bis unter die Sättigungstemperatur gekühlt und anschließend im zweiten Nacherhitzer (9) auf eine Zulufttemperatur von ca. 14 – 17 °C erwärmt. Die erforderliche Zulufttemperatur wird mittels Raumthermostaten geregelt. Die Luftauslässe sind als quadratische und deckenbündige Drallauslässe in einer Größe von 600 x 600 mm ausgeführt. Das Luftleitungssystem besteht aus Stahlblech mit rechteckigem und rundem Querschnitt in Nennweiten von 450 mm bis 100 mm. Die Abluft ist als Einkanalnetz mit einem zentralen Abluft-Ventilator (11) realisiert, wobei Teile der Abluft auch über die manuell schaltbaren Abzüge in den Chemieräumen abgesaugt werden können. Die Anlage gewährleistet Raumtemperaturen von 26 °C im Sommer und 20 °C im Winter bei einer relativen Raumluftfeuchte von 40 – 60 %.

Die die Unterrichtsräume umgebenden Flurbereiche werden über an der Außenfassade angeordnete Heizkörper mit Wärme versorgt. Die Heizkörper sind an das Verteilnetz der Warmwasserpumpenheizung angeschlossen. Die Warmwasserpumpenheizung wird durch Fernwärme aus einem mit Erdgas betriebenen Blockheizkraftwerk versorgt. Die Fernwärmeübergabestation befindet sich im Keller des ans versorgte Gebäude grenzenden Komplexes. Von der Fernwärmeübergabestation gelangt das Warmwasser über eine zentrale Unterverteilung zum versorgten Gebäude. Die Heizungsleitungen sind im Kriechkeller des Gebäudes verlegt und die Heizkörper der Flurbereiche über Steigstränge angeschlossen. Die Heizregister der Lüftungsanlage sind über eine weitere sich in der Technikzentrale im Dachgeschoss des angrenzenden Gebäudes befindende Unterverteilung angebunden.

Das Kühlregister der Lüftungsanlage wird über eine zentrale, ebenfalls im Keller des angrenzenden Gebäudekomplexes untergebrachte, aus den 1970er-Jahren stammende

Kälteanlage versorgt. Der Rückkühler der Kälteanlage ist auf dem Dach des Komplexes installiert.

2.3.2 Versorgungsbereich

Das Gebäude, das durch die im vorigen Abschnitt beschriebene Lüftungs- und Heizungsanlage versorgt wird, befindet sich im mittleren Bereich des Schulkomplexes auf der Westseite. Es verfügt über zwei oberirdische Vollgeschosse. Länge und Breite des Gebäudes betragen 49,5 m und 36 m. Das Dach ist mit einer Höhe von 9,50 m als Flachdach ausgeführt. Konstruktiv ist das Gebäude wie der restliche Komplex in Stahlskelett-Bauweise mit Vorhangfassaden ausgeführt. Bodenplatte und Geschossdecke bestehen aus Stahlbeton. Abbildung 2-3 zeigt das versorgte Gebäude in einer dreidimensionalen Darstellung.

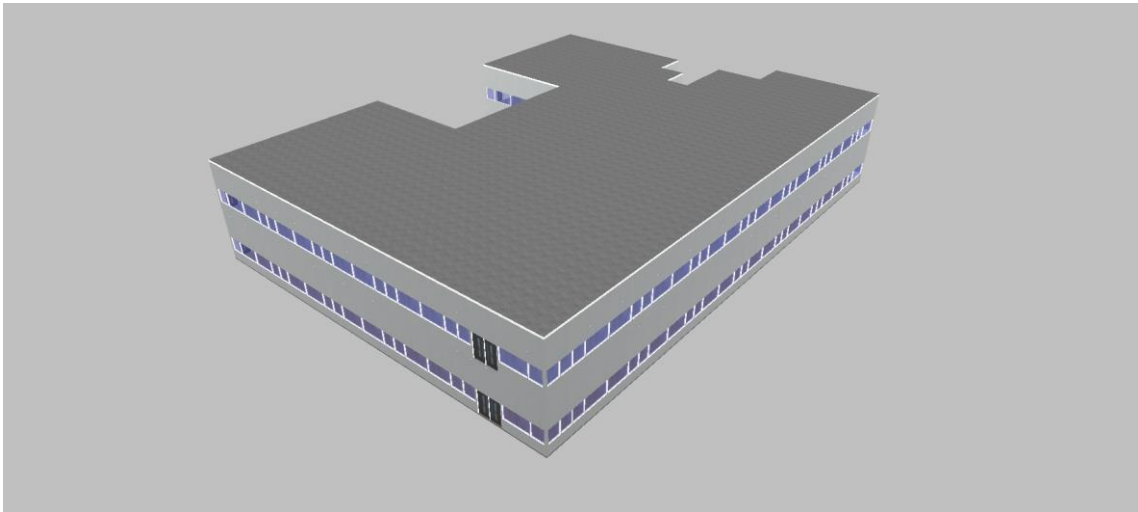


Abbildung 2-3: 3D-Ansicht des versorgten Gebäudes

Der Gebäudeanschluss an den restlichen Komplex erfolgt teilweise an der Süd- und hauptsächlich an der Ostseite. An der Ostseite verfügt der sich anschließende Komplex über ein drittes Vollgeschoss, indem sich eine Technikzentrale mit der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen RLT- und Heizungsanlage befindet. An der Südseite ist das Gebäude auf gleicher Dachhöhe jedoch nur auf einer Länge von ca. 25 m mit dem restlichen Komplex verbunden. An der Nordseite befindet sich in ca. 25 m Entfernung ein anderer gleichhoch ausgeführter Gebäudetrakt der Schule. Die Westseite wird in einer Entfernung von 10 m – 50 m von 8-geschossigen Plattenbauten flankiert. Das Gebäude verfügt auf der Ostseite über ein Atrium, welches an drei Seiten vom Gebäude selbst und an der östlichen Seite vom angrenzenden Schulkomplex eingeschlossen wird. Die Außenwände sind in einer Höhe von 90 cm ab Geschossoberkante von einem 1,24 m hohen Fensterband durchzogen. Die Außenfenster sind doppelt verglast. Die Haupteinschließung des Gebäudes erfolgt über das Treppenhaus im angrenzenden Schulkomplex an der südöstlichen

Seite des Gebäudes oder über einen ebenerdigen Zugang durch die Aufzugsanlage. An der Nord- und Südseite sind sowohl im Erdgeschoss als auch im Obergeschoss über außenliegende Treppen Fluchtwege ins Freie vorhanden.

Im Obergeschoss des Gebäudes sind Unterrichtsräume des naturwissenschaftlichen Bereichs der Schule untergebracht. Über die zukünftige Nutzung des Erdgeschosses sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Angaben vorhanden. Nachfolgend wird der Gebäudeausbau des Obergeschosses beschrieben. Ein Grundriss des Obergeschosses liegt in Anhang A bei. Die Geschosshöhe des Obergeschosses liegt bei 4,50 m, die lichte Raumhöhe beträgt 3,00 m. Zwischen Dachkonstruktion und abgehängter Decke ist das Kanalnetz des Lüftungssystems untergebracht. Die Innenwände sind in Metallständer-Bauweise ausgeführt. Den Hauptverkehrsweg bildet ein die restlichen Räume des Geschosses umschließender und durch die Außenwände des Gebäudes begrenzter Flurbereich, der einzig an der Westseite von zwei symmetrisch ausgeführten Biologie-Unterrichtsräumen unterbrochen wird. An die beiden Biologieräume schließen sich um die Flurbreite von der Außenwand zurückversetzt in nördlich und südlicher Richtung jeweils Räume für die Unterbringung von Unterrichtsmaterialien und ein Multifunktionsraum im Norden sowie ein Raum zur Unterrichtsvorbereitung im Süden an. Ein sich im Osten der genannten Räume anschließender und in Nord-Süd-Richtung verlaufender Flur dient als möglicher Fluchtweg und mündet in den Eingangsbereich mit Aufzugsanlage und Räumlichkeiten für den Sanitärbereich. Im nordöstlichen Teil sind zwei Klassenräume für den Physikunterricht, zwei Sammlungsräume und ein weiterer Multifunktionsraum untergebracht. Im südöstlichen Teil des Obergeschosses befinden sich zwei Klassenräume für den Chemieunterricht, zwei Sammlungsräume für die Unterbringung von Unterrichtsmaterialien und ein Chemikalienlager. Die Räume für den Chemieunterricht sind für die Durchführung von Versuchen mit jeweils vier Laborabzügen ausgestattet. Wenn im Folgenden von „Schulgebäude“ gesprochen wird, ist das in diesem Abschnitt beschriebene Gebäude gemeint und nicht der gesamte Schulkomplex.

3 Nachhaltigkeit

3.1 Definition und Bewertungskriterien

Der „Rat für Nachhaltige Entwicklung“ definiert Nachhaltigkeit als eine Entwicklung, die ökologische, soziale und ökonomische Aspekte gleichermaßen beachtet, so dass nachfolgenden Generationen ein intaktes Gefüge hinterlassen werden kann [17]. Der Begriff „Nachhaltiges Bauen“, dem auch das Bauen im Bestand und damit die Modernisierung zugeordnet werden kann, wird ebenfalls durch eine zukunftsverträgliche Entwicklungspolitik und die drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziokulturelles bestimmt. Abbildung 3-1 zeigt die drei Dimensionen des Nachhaltigen Bauens mit ihren dazugehörigen Schutzgütern.

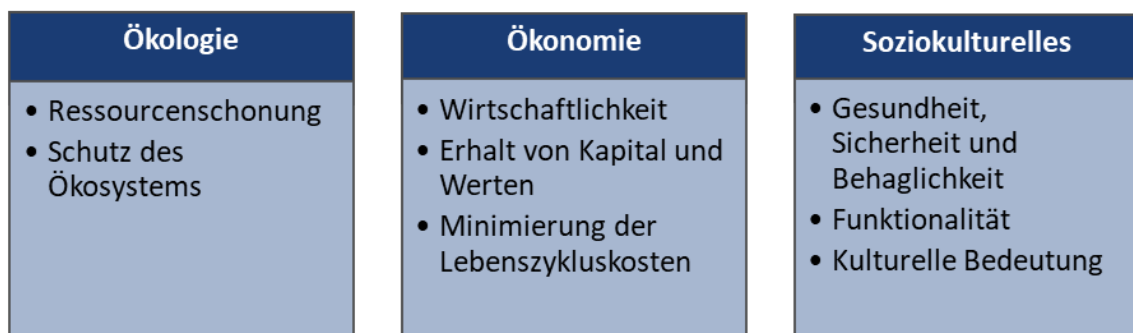


Abbildung 3-1: Die drei Dimensionen und Schutzgüter des Nachhaltigen Bauens
(eigene Darstellung nach [18, S. 15–16])

Die ökologische Dimension hat die Ziele das Ökosystem zu schützen und die natürlichen Ressourcen zu schonen. Die ökonomische Dimension stellt die Optimierung der Wirtschaftlichkeit und den Erhalt von Kapital und Werten in den Mittelpunkt. Die soziokulturelle Dimension soll Gesundheit, Sicherheit und Behaglichkeit bei gleichzeitiger Funktionalität und kultureller Wertschöpfung bewahren.[18, S. 15–16].

Um die Nachhaltigkeit eines Gebäudes zu bewerten, existieren im Bauwesen weltweit über 30 verschiedene Zertifizierungssysteme, zu den bekanntesten gehören das US-amerikanische LEED-, das britische BREEAM- und das deutsche DGNB-Zertifikat [19, S. 206–207]. Das Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) orientiert sich bei der Bewertung stark an den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit [19, S. 217], dabei wird u. a. die ökologische, ökonomische, soziokulturelle und funktionale Qualität des Gebäudes anhand verschiedener Bewertungskriterien beurteilt, um so die Nachhaltigkeit des Gebäudes messbar zu machen. Während das DGNB-Zertifikat für privat Bauende nach eigenem Belieben anwendbar ist, existiert für Bundesgebäude eine verpflichtende Zertifizierung nach dem analogen Bewertungssystem

Nachhaltiges Bauen (BNB). Das BNB-Zertifikat findet darüber hinaus bereits freiwillig auf Länderebene Anwendung, wie z. B. beim Technologiezentrum Holz und dem Bildungs- und Gemeinschaftszentrum Neugraben-Fischbek in Hamburg [20, S. 40–41]. Um den Begriff der Nachhaltigkeit in konkreten Zahlen ausdrücken und so eine Vergleichbarkeit erreichen zu können, werden die zu untersuchenden Modernisierungsvarianten an ausgewählten Kriterien des BNB bewertet. Die Abbildung 3-2 zeigt die Kriterien mit ihren Indikatoren nach ökologischer, ökonomischer und sozialer Qualität gegliedert. Die Vorgaben des BNB zur sozialen Qualität dienen als Grundlage der Dimensionierung der Modernisierungsvarianten. Eine Auflistung der vollständigen Kriterien und Indikatoren des BNB für die Bewertung von Unterrichtsgebäuden ist im Anhang B zu finden.

Ökologische Qualität	Ökonomische Qualität	Soziokulturelle Qualität
<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungen auf die globale Umwelt <ul style="list-style-type: none"> • Treibhauspotenzial • Ozonschichtabbau-potenzial • Ozonbildungspotenzial • Versauerungspotenzial • Überdüngungspotenzial • Ressourcen-inanspruchnahme <ul style="list-style-type: none"> • Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf • Gesamtprimärenergiebedarf und erneuerbarer Anteil 	<ul style="list-style-type: none"> • Lebenszykluskosten <ul style="list-style-type: none"> • Variantenbezogene Kosten im Lebenszyklus 	<ul style="list-style-type: none"> • Gesundheit, Behaglichkeit u. Nutzerzufriedenheit <ul style="list-style-type: none"> • Thermischer Komfort im Sommer • Thermischer Komfort im Winter • Innenraumlufthygiene

Abbildung 3-2: Ausgewählte Bewertungskriterien

Die ökologische Qualität der jeweiligen Modernisierungsvariante wird anhand ihrer Wirkungen auf die globale Umwelt und am Ressourcenverbrauch bewertet. Die Indikatoren der Bewertungskriterien für die Wirkungen auf die globale Umwelt sind dabei das Treibhauseffekt-, Ozonschichtabbau-, Ozonbildungs-, Versauerungs- und Überdüngungspotenzial durch die variantenbedingten Emissionen. Die durch die Variante beanspruchten Ressourcen werden anhand des Primärenergieverbrauchs aus nicht erneuerbaren Ressourcen, dem Gesamtprimärenergieverbrauch und dem Anteil erneuerbarer Energien beurteilt. Die Bewertung der ökonomischen Qualität erfolgt auf Grundlage der Lebenszykluskosten. Die soziale Qualität der Modernisierungsvariante spiegelt sich im Wesentlichen in den Aspekten der Gesundheit, Behaglichkeit und Zufriedenheit der Nutzenden wieder. Indikatoren sind der thermische Komfort im Winter und im Sommer sowie die Innenraumlufthygiene. In den Abschnitten 3.2 – 3.3 wird nachfolgend detaillierter auf

die Indikatoren der Bewertungskriterien und die Methodik bei deren Berechnung eingegangen.

3.2 Ökologische Qualität

3.2.1 Wirkungen auf die globale Umwelt

Als Teil eines Gebäudes verursachen RLT- sowie Heizungsanlagen über ihren gesamten Lebenszyklus Emissionen, die Luft, Gewässer und Böden belasten und negative Wirkungen auf die Umwelt haben. Neben der globalen Erwärmung, der Zerstörung der Ozonschicht und Smogbildung zählen die Versauerung und Überdüngung von Gewässern und Böden zu diesen emissionsbedingten Umweltwirkungen.

Treibhauspotenzial (GWP)

Die wichtigsten Treibhausgase sind laut Kyoto-Protokoll Kohlendioxid, Methan, Distickstoffmonoxid sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase) [21]. Der Treibhauseffekt wird durch die sogenannten Treibhausgase in der Erdatmosphäre ausgelöst. Die kurzwellige Strahlung der Sonne wird von der Erdoberfläche teils absorbiert und teils als langwellige Infrarotstrahlung reflektiert. Treibhausgase in der Troposphäre absorbieren die Infrarotstrahlung zum einen Teil und reflektieren den anderen Teil in Richtung Erdoberfläche. Dies führt zu einer Erwärmung der bodennahen Luftschichten und ist zunächst ein natürlicher und lebensnotwendiger Effekt. Anthropogene Treibhausgasemissionen verstärken diesen Effekt jedoch und tragen so wesentlich zum Klimawandel bei. Das Treibhauspotenzial (GWP) beschreibt den Beitrag, den ein Stoff an dem anthropogenen Erwärmungsvorgang hat. Das Treibhauspotenzial eines Stoffes wird in Relation zum Treibhauspotenzial von Kohlendioxid als CO₂-Äquivalent (CO₂-Äqv.) angegeben [22, S. 1].

Ozonschichtabbaupotenzial (ODP)

Das in der Stratosphäre der Erde befindliche Ozon verhindert durch Absorption der von der Sonne ausgehenden kurzwelligen Strahlung eine zu starke Erwärmung der Erdoberfläche und schützt Menschen, Tiere und Pflanzen vor zu hoher UVA- und UVB-Strahlung. Gelangen Chlorfluorkohlenwasserstoffe (CFKW) in die Stratosphäre reagieren diese mit dem vorhandenen Ozon, wodurch die Menge des Ozons reduziert wird. Langfristig führt dies zum Abbau der Ozonschicht mit dem Ergebnis des sogenannten „Ozonlochs“. Das Ozonschichtabbaupotenzial (ODP) beschreibt den Anteil, den ein Stoff am Abbau der Ozonschicht hat. Es wird in Relation zum Ozonschichtabbaupotenzial von Trichlorfluormethan (R11-Äqv.) angegeben. [23, S. 1].

Ozonbildungspotenzial (POCP)

Während das Ozon in der Stratosphäre positive Wirkungen hat, ist die Verunreinigung der bodennahen Luftschichten durch Ozon schädlich. Spurengase in der Troposphäre wie Stickoxide und Kohlenwasserstoffe bilden in Verbindung mit UV-Strahlung Ozon und schädigen in erhöhter Konzentration sowohl Flora als auch Fauna. Der auftretende Effekt ist allgemein als Sommersmog bekannt. Das Ozonbildungspotenzial (POCP) wird in Relation zum Ozonbildungspotenzial des Kohlenwasserstoffs Ethen (C_2H_4 -Äqv.) angegeben [24, S. 1].

Versauerungspotenzial (AP)

Schadstoffe wie Schwefel- und Stickstoffverbindungen in der Luft reagieren mit Wasser zu Schwefel- bzw. Salpetersäure, so dass der pH-Wert des Niederschlags sinkt. Als „Saurer Regen“ schädigt der Niederschlag Böden, Gewässer und Lebewesen. Die Versauerung von Böden und Gewässern kann zu schwerwiegenden Folgen wie Wald- und Fischsterben führen. Eine Nebenerscheinung des sauren Niederschlags kann darüber hinaus die Schädigung von historischen Gebäuden sein. Das Versauerungspotenzial (AP) gibt die Auswirkungen auf die Umwelt durch versauernde Emissionen an. Es wird in Relation zu Schwefeldioxid (SO_2 -Äqv.) gemessen [25, S. 1].

Überdüngungspotenzial (EP)

Gelangen vermehrt Phosphor- und Stickstoffverbindungen in Gewässer und Böden kann dies zu einer Überdüngung (Eutrophierung) führen. Durch das erhöhte Nährstoffangebot kommt es in Gewässern zu einem vermehrten Algenwachstum und einem Rückgang des Sauerstoffgehalts. Dies kann ein Fischsterben zur Folge haben. Bei großen Nährstoffeinträgen in Böden kann es außerdem zu einem Anstieg der Nitratkonzentration im Grund- und Trinkwasser kommen. Das Überdüngungspotenzial wird in Relation zu der Umweltwirkung von Phosphat (PO_4 -Äqv.) angegeben [26, S. 1].

3.2.2 Ressourceninanspruchnahme

Neben den Emissionen, die ein Gebäude und die darin integrierten Anlagen der Raumluft- und Heizungstechnik über ihren gesamten Lebenszyklus verursachen, benötigt die Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Anlagen Ressourcen. Zu den benötigten Ressourcen gehören vor allem Energieressourcen für den Betrieb der Anlagen. Energieressourcen lassen sich in nicht erneuerbare und erneuerbare Ressourcen unterteilen. Die erneuerbaren Ressourcen unterscheiden sich in natürliche Energiequellen wie Solarstrahlung, Erdwärme, Wind- und Wasserkraft und in nachwachsende Energiequellen aus Biomasse. Natürliche Energiequellen stehen überall zur Verfügung, unterscheiden sich

aber je nach Region in zeitlicher Verfügbarkeit und Leistung. Nachwachsende Energiequellen wie Holz (z. B. in Form von Hackschnitzeln oder Pellets), Energiepflanzen und Biogas entziehen der Atmosphäre während der Entstehungsphase die gleiche Menge Kohlendioxid wie sie später beim Verbrennungsprozess emittieren und gelten daher als klimaneutral [27, S. 52]. Zu den nicht erneuerbaren und damit endlichen Energieressourcen zählen Stein- und Braunkohle, Rohöl, Erdgas und Uran [13, S. 356–358]. Die in den genannten Energieressourcen zur Verfügung stehende Energie vor der Gewinnung, Aufbereitung und Umwandlung in Endenergie ist die Primärenergie [13, S. 356]. Die Umweltwirkung der Modernisierungsvarianten durch den Verbrauch von Ressourcen wird an deren Primärenergiebedarf bewertet.

Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PE_{ne}),
Gesamtprimärenergiebedarf (PE_{ges}) u. Anteil erneuerbarer Energien (PE_e)

Der Gebäudebereich und damit auch die integrierte Versorgungstechnik wie u. a. RLT- und Heizungsanlagen hat einen Anteil von 40 % am Endenergieverbrauch Deutschlands und ist damit für ein Drittel der deutschen CO_2 -Emissionen verantwortlich. Im Rahmen der Energiewende strebt die Bundesregierung bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand und eine Minderung des Primärenergiebedarfs von 80 % an. Um dies zu erreichen sollen die Gebäude nur noch einen minimalen Energiebedarf aufweisen, der überwiegend durch regenerative Energien gedeckt wird [28, S. 22]. Neben einem geringen Gesamtprimärenergiebedarf (PE_{ges}) spielt daher auch der verwendete Primärenergieträger eine entscheidende Rolle und wird als Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtprimärenergiebedarf (PE_e) in die Bewertung miteinbezogen [29, S. 1]. Der Verbrauch endlicher Energieträger geht durch den Indikator nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (PE_{ne}) in die Bewertung mit ein [30, S. 1].

3.2.3 Methodik: Ökobilanz

Die Berechnung der in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 vorgestellten Indikatoren erfolgt im Rahmen einer Ökobilanz (LCA) nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Eine LCA besteht aus den vier Elementen „Definition von Ziel- und Untersuchungsrahmen“, „Sachbilanz“, „Wirkungsabschätzung“ und „Auswertung“. Dabei werden alle sogenannten In- und Outputflüsse des Produkts im Verlauf seines Lebenswegs erfasst und bewertet [31, S. 7,15]. Das Produkt ist in diesem Fall die jeweils betrachtete Modernisierungsvariante. Das Ziel der LCA ist eine Beurteilung der Variante in Bezug auf ihre Umweltwirkungen durch Emissionen (Outputs) und Ressourcenverbräuche (Inputs). Die Systemgrenzen sind für die Herstellung und das Lebensende der jeweiligen Modernisierungsvariante die Kostengruppe (KG) 400 nach DIN 276 und für die Nutzung die KG 300 und

400 nach DIN 18960. Die Sachbilanz beinhaltet die quantitative Zusammenstellung der einzelnen In- und Outputs über den kompletten Lebensweg der jeweiligen Variante. Der Lebensweg gliedert sich in die drei Hauptphasen Herstellung, Nutzung und Lebensende. Tabelle 3-1 zeigt die unterschiedlichen Phasen im Lebensweg und deren modulare Einteilung nach DIN EN 15978.

Tabelle 3-1: Lebenszyklusphasen und Module nach DIN EN 15978 [32, S. 4]

Lebensweg-phasen	A 1-3			A 4-5		B 1-7				C 1-4			D				
	Herstellungsphase			Errichtungsphase		Nutzungsphase				Ende des Lebenszyklus			Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze				
	Rohstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport	Errichtung / Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Instandsetzung	Austausch	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallverwertung	Entsorgung	Potential für Wiederverwertung, 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)		(x)		x	(x)			x	x	x

Die nach dem BNB zu bilanzierenden Module sind in der letzten Zeile mit einem x gekennzeichnet. Für die Herstellungsphase werden Rohstoffbeschaffung, der Transport zum Hersteller und die Herstellung der Variante bilanziert (Module A1 bis A3). In der Nutzungsphase wird der Energieverbrauch im Betrieb sowie die Instandhaltung und die Erneuerung berücksichtigt (Module B6, B2 und B4). In der Lebensendphase werden die Verwertung, die Entsorgung der Variante (Module C3 und C4) bilanziert. Das Recyclingpotenzial der Variante (Modul D) wird außerhalb des Lebenszyklus der Variante bilanziert. Die Umweltwirkung der Modernisierungsvariante wird in Abweichung zum durch das BNB vorgegebenen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren auf einen der Nutzungsdauer von RLT- und Heizungsanlagen entsprechenden Wert von 25 Jahren bilanziert [33, S. 10]. Die hierfür benötigten Datensätze werden der Datenbank „OEKOBAUDAT“ des „Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit“ in der Version 2016-I vom 18.05.2016 entnommen². Tabelle 3-2 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der in der Ökobilanz berücksichtigten Bilanzgrößen.

² www.oekobaudat.de

Tabelle 3-2: Bilanzgrößen/Umweltwirkungen der Ökobilanz

Bilanzgröße/ Umweltwirkung	Abkürzung	Einheit der Umweltwirkung	Flussgröße
Treibhauspotenzial	GWP	kg CO ₂ -Äqv.	Output
Ozonschichtabbaupotenzial	ODP	kg R11-Äqv.	Output
Ozonbildungspotenzial	POCP	kg C ₂ H ₄ -Äqv.	Output
Versauerungspotenzial	AP	kg SO ₂ -Äqv.	Output
Überdüngungspotenzial	EP	kg PO ₄ -Äqv.	Output
Primärenergiebedarf			
- nicht erneuerbar	PE _{ne}	kWh	Input
- gesamt	PE _{ges}		
- erneuerbar	PE _e		

Für jede Variante werden die in Tabelle 3-2 aufgeführten Umweltwirkungen berechnet. Nachfolgend wird der damit verbundene Rechenweg beschrieben. Die Umweltwirkung der Bilanzgröße i wird als Jahresdurchschnittswert ($UWG_{ges,i}$) bezogen auf die Netto-Grundfläche bzw. Netto-Raumfläche (NRF) des Schulgebäudes ($uwg_{ges,i}$) angegeben. Die Netto-Grundfläche wird nach der neuen Fassung der DIN 277 aus dem Jahr 2016 als NRF bezeichnet. Sie umfasst „sämtliche Grundflächen der nutzbaren Räume aller Grundrissebenen des Bauwerks“ [34, S. 4]. Zur NRF sind demnach die Nutzungsfläche, die Technikfläche und die Verkehrsfläche des Schulgebäudes zu zählen.

$$uwg_{ges,i} = \frac{UWG_{ges,i}}{A_{NRF}} \quad (1)$$

Die durchschnittliche jährliche Umweltwirkung der jeweiligen Bilanzgröße ($UWG_{ges,i}$) wird aus der Summe des jährlichen Durchschnittswerts der Umweltwirkung für die Herstellung ($UWG_{H,i}$), für die Erneuerung ($UWG_{E,i}$), für die Nutzung ($UWG_{N,i}$) und für das Lebensende ($UWG_{L,i}$) der Variante ermittelt.

$$UWG_{ges,i} = UWG_{H,i} + UWG_{E,i} + UWG_{N,i} + UWG_{L,i} \quad (2)$$

Die jahresbezogene Umweltwirkung für die Herstellung ergibt sich aus der Summe der Umweltwirkungen aller Bauteile (j) der Modernisierungsvariante bezogen auf den Betrachtungszeitraum (t_{LCA}).

$$UWG_{H,i} = \frac{\sum_j UW_{H,i,j}}{t_{LCA}} \quad (3)$$

Dabei wird die Umweltwirkung des einzelnen Bauteils ($UW_{H,i,j}$) nach Gl. (4) durch Multiplikation der Menge des Bauteils (m_j) mit dem spezifischen Wirkfaktor aus der OEKO-BAUDAT-Datenbank ($f_{OBD,i,j}$) ermittelt.

$$UW_{H,i,j} = m_j \cdot f_{OBD,i,j} \quad (4)$$

Die jährliche Umweltwirkung für die Erneuerung resultiert aus der Summe des Produkts aus den Umweltwirkungen aller zu erneuernder Bauteile (j) der Variante und deren jeweiliger Erneuerungshäufigkeit ($n_{E,j}$) im Betrachtungszeitraum bezogen auf den Betrachtungszeitraum.

$$UWG_{E,i} = \frac{\sum_j n_{E,j} \times UW_{H,i,j}}{t_{LCA}} \quad (5)$$

Für alle Bauteile der Modernisierungsvarianten mit einer Nutzungsdauer unter 25 Jahren wird die Umweltwirkung für die Erneuerung berechnet. Die Nutzungsdauer der Bauteile wird nach VDI 2067 ermittelt. Für die Erneuerung wird der Austausch des Bauteils mit dem ursprünglichen Bauteil angenommen. Die jährliche Umweltwirkung für Herstellung und Lebensende wird für jeden notwendigen Austausch abermals veranschlagt. Die Austauschhäufigkeit berechnet sich über den Quotienten aus Betrachtungszeitraum und Nutzungsdauer (t_N) des Bauteils. Das Ergebnis wird auf die nächste ganze Zahl abgerundet.

$$n_{E,m} = \left\lceil \frac{t_{LCA}}{t_{N,j}} \right\rceil \quad (6)$$

Die Umweltwirkung für die Nutzung errechnet sich aus der Summe der Umweltwirkungen sämtlicher eingesetzter Energieträger ($UW_{N,i,k}$).

$$UWG_{N,i} = \sum_k UW_{N,i,k} \quad (7)$$

Als Eingangsgröße zur Berechnung der Umweltwirkung durch die Nutzung wird der durch den Betrieb resultierende Endenergiebedarf ($Q_{E,k}$) der Variante unterschieden nach den Energieträgern (k) benötigt. Dieser wird auf Grundlage der EnEV bzw. auf die in der EnEV verwiesene DIN V 18599 berechnet. Die Berechnung des Energiebedarfs beruht auf einem iterativen Verfahren und erfolgt mit Hilfe der Software „Energieberater 18599 3D PLUS“³. Der errechnete Endenergiebedarf wird mit dem für den jeweiligen Energieträger spezifischen Wirkfaktor aus der OEKOBAUDAT-Datenbank ($f_{OBD,i,k}$) multipliziert und ergibt die durchschnittliche jährliche Umweltwirkung der Bilanzgröße für die Nutzung des jeweiligen Energieträgers ($UW_{N,i,k}$).

$$UW_{N,i,k} = Q_{E,k} \times f_{OBD,i,k} \quad (8)$$

Der Jahresdurchschnittswert der Umweltwirkung für das Lebensende ergibt sich aus der Summe der Umweltwirkung fürs Lebensende aller Anlagenbauteile ($UW_{L,i,j}$) bezogen auf den Betrachtungszeitraum.

³ www.hottgenroth.de

$$UWG_{L,i} = \frac{\sum_j UW_{L,i,j}}{t_{LCA}} \quad (9)$$

Die Ökobilanzen der Modernisierungsvarianten wird mit dem kostenlosen „eLCA-Tool“ (Version 0.9.4)⁴ des „Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ durchgeführt.

3.3 Ökonomische Qualität

3.3.1 Lebenszykluskosten

Ein Gebäude und dessen Anlagen der Raumluft- und Heizungstechnik können über den gesamten Lebenszyklus hohe Kosten verursachen. Durch die Betrachtung der Lebenszykluskosten einer Anlage werden nicht nur die Baukosten, sondern auch die durch die Nutzung und Entsorgung entstehenden Kosten berücksichtigt, so dass die wirtschaftlichen Auswirkungen der Planungsentscheidungen besser abgeschätzt werden können und nachhaltiges und zukunftsfähiges Handeln ermöglicht wird. Die Bewertung der Modernisierungsvariante bezüglich der Lebenszykluskosten erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse einer Lebenszykluskostenanalyse nach der Barwertmethode. Die Bewertung der Lebenszykluskosten erfolgt über den direkten Vergleich der untersuchten Varianten. Die der variantenbezogenen Berechnung der Lebenszykluskosten zu Grunde liegende Methodik ist Bestandteil des folgenden Abschnitts.

3.3.2 Methodik: Lebenszykluskostenrechnung

Für die variantenbezogenen Kosten im Lebenszyklus werden die Herstellungskosten und die Nutzungskosten unter Berücksichtigung der Energie-, Inspektions-, Wartungs- und Instandsetzungskosten der jeweiligen Variante berechnet und anschließend aufsummiert [35, S. 1]. Nachfolgend wird die damit verbundene Berechnungsmethodik erläutert.

Herstellungskosten

Die Herstellungskosten werden in Analogie zur Ökobilanz (Abschnitt 3.2.3) für die KG 400 nach DIN 276 berechnet. Die Berechnung wird im Kontext der Ökobilanzierung durchgeführt. Durch die Multiplikation der benötigten Mengen eines Anlagenbauteils mit den jeweiligen Kosten je Menge (Kostenkennwert) ergeben sich die Kosten je Anlagenbauteil. Diese werden anschließend aufsummiert und ohne Umsatzsteuer (netto)

⁴ www.bauteileeditor.de

auf den Quadratmeter Brutto-Grundfläche (BGF) des Schulgebäudes bezogen angegeben. Die BGF ist nach DIN 277-1 als „Gesamtfläche aller Grundrissebenen des Gebäudes“ definiert [34, S. 4].

Nutzungskosten

Für die Berechnung der Nutzungskosten sind die KG 300 und 400 nach DIN 18960 relevant. Die Nutzungskosten werden für einen Betrachtungszeitraum (T) von 25 Jahren bilanziert und wie Gl. (10) zeigt als Barwert (BW_0) bezogen auf die BGF angegeben.

$$bW_0 = \frac{BW_0}{A_{BGF}} \quad (10)$$

Der Barwert berechnet sich nach Gl. (11) aus der Summe der Teilbarwerte (BW_i).

$$BW_0 = \sum BW_i \quad (11)$$

Die Teilbarwerte werden nach Gl. (12) aus der Summe der Versorgungskosten ($K_{N,i}$) unter Berücksichtigung der Preissteigerung (p) und dem Kalkulationszinssatz (z) des jeweiligen Jahres (t) bestimmt.

$$BW_i = \sum_{t=0}^{T-1} \frac{K_{N,i} \times (1+p)^t}{(1+z)^t} \quad (12)$$

Wie in Tabelle 3-3 aufgeführt wird von einer allgemeinen jährlichen Preissteigerung von 2 % und einem Kalkulationszinssatz von 1,5 % ausgegangen. Für die Energiekosten werden jährliche Preissteigerungen von 5 % angenommen.

Tabelle 3-3: Preissteigerungsraten und Kalkulationszinssatz [33, S. 13]

Jährliche Preissteigerungen f. Bau- und Dienstleistungen	2,0 %
Jährliche Energiepreissteigerung	5,0 %
Kalkulationszinssatz	1,5 %

Energiekosten

Die Energiekosten ($K_{V,EK}$) der jeweiligen Modernisierungsvariante für das erste Nutzungsjahr werden nach Gl. (13) aus der Summe der Kosten der einzelnen Energieträger (K_k) ermittelt.

$$K_{V,EK} = \sum_k K_k \quad (13)$$

Die Kosten je Energieträger ergeben sich nach Gl. (14) aus der Multiplikation des nach DIN V 18599 berechneten Endenergiejahresbedarfs für den einzelnen Energieträger ($Q_{E,k}$) mit dem entsprechenden energieträgerspezifischen Endenergiepreis (k_k).

$$K_k = Q_{E,k} \times k_k \quad (14)$$

Als Teilergebnis wird der Barwert regelmäßiger Energiekosten angegeben. Die Werte für die Energiepreise sind in Tabelle 3-4 angeführt. Auf Grund größerer Aktualität sind die Werte dem BNB-Steckbrief „Büro- und Verwaltungsgebäude“ mit dem Stand 2015 entnommen.

Tabelle 3-4: Spezifische Endenergiepreise [33, S. 12]

Energieträger	Spezifischer Endenergiepreis
Strom	0,200 EUR/kWh
Fernwärme/KWK	0,077 EUR/kWh

Inspektions- und Wartungskosten, Instandsetzungskosten

Die Versorgungskosten für Inspektion und Wartung sowie die Instandsetzung der Modernisierungsvariante werden als Prozentsatz der Herstellungskosten unter Berücksichtigung der jährlichen Preissteigerung (vgl. Tabelle 3-3) berechnet. Angaben zu den verwendeten Prozentsätzen sind in Tabelle 3-5 zu finden. Für die Berechnung der Wartungs- und Inspektions- sowie der Instandhaltungskosten werden je nach Kostengruppe unterschiedliche Prozentsätze angesetzt. Als Teilergebnisse werden die Barwerte regelmäßiger Kosten für die Inspektion und Wartung sowie die Instandsetzung angegeben [35, S. 4–7].

Tabelle 3-5: Wartungs-, Inspektions- und Instandhaltungskostenfaktoren [33, S. 10]

	Kosten- gruppe	Jährliche Wartungs- und Inspektionskosten in % der Herstellkosten	Jährliche Instandset- zungskosten in % der Herstellkosten
Heizungsanlage	420	0,41 %	0,66 %
RLT-Anlage	430	0,96 %	1,10 %

3.4 Soziale Qualität

3.4.1 Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit

Ein effizientes und leistungsförderndes Arbeiten ist nur in Umgebungen möglich, die ein Raumklima sicherstellen, welches für Behaglichkeit sorgt und eine Nutzung der Räumlichkeiten im Sinne des vorgesehenen Zweckes ermöglicht. Neben dem der Luftqualität hat der thermische Komfort, den eine RLT- und Heizungsanlage bereitstellt, erhebliche Auswirkungen auf das empfundene Raumklima.

Thermischer Komfort im Winter

Der thermische Komfort ist dann am höchsten, wenn die Raumtemperatur weder zu kalt noch zu warm und die Raumluftfeuchtigkeit weder zu trocken noch zu feucht ist. Darüber hinaus sollte es keine Zugluft geben. Eine optimale Raumkonditionierung ist abhängig von jahreszeitlichen Schwankungen, weshalb nach Heizperiode im Winter und Kühlperiode im Sommer unterschieden wird. Der Indikator thermischer Komfort setzt sich in beiden Fällen aus den Teilaspekten operative Temperatur, Zugluft, relative Luftfeuchte sowie Strahlungsasymmetrie und Fußbodentemperatur zusammen. Dabei führt eine zu warme oder zu kalte operative Temperatur zu einem thermischen Unbehaglichkeitsgefühl am ganzen Körper. Das Empfinden von Zugluft, hohe vertikale Temperaturunterschiede im Bereich zwischen Kopf und Fußgelenken, eine große Asymmetrie zwischen den Strahlungstemperaturen der Raumbooberflächen und zu warme oder kalte Fußbodentemperaturen können hingegen lokale Unbehaglichkeit auslösen. Da derzeit noch kein einheitliches Bewertungsverfahren für den vertikalen Temperaturgradienten vorliegt, wird dieser im Rahmen des thermischen Komforts nicht berücksichtigt [36, S. 1].

Operative Temperatur

Die operative Temperatur wird umgangssprachlich auch als empfundene Temperatur oder einfach als Raumtemperatur bezeichnet. Sie lässt sich bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten ($< 0,2 \text{ m/s}^2$) und geringen Unterschieden zwischen der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur ($< 4 \text{ °C}$) als Mittelwert der Raumlufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur aller Raumbooberflächen (Wände, Fußboden, Decke, Fenster, Heizkörper usw.) beschreiben [16, S. 28]. In dem Fall, dass sich die Temperatur des überwiegenden Teils der Raumbooberflächen nur unwesentlich von der Raumlufttemperatur unterscheidet, kann statt der operativen Temperatur die mittlere Raumlufttemperatur für die Auslegung verwendet werden [16, S. 28]. Im Fall des betrachteten Schulgebäudes wird diese Vereinfachung als zutreffend angenommen. Bis auf zwei Ausnahmen sind sämtliche Räume mit Nutzungsflächen innenliegend und nur die umgebenden Verkehrsflächen verfügen über Außenwandflächen. Da die umgebenden Verkehrsflächen beheizt werden, ist mit keinen großen Unterschieden zwischen Raumluft- und Raumbooberflächentemperatur in den für die Auslegung relevanten Nutzungsräumen zu rechnen.

Die operative Temperatur für die Heizperiode wird in drei Qualitätsniveaus unterschieden [36, S. 7]. Das Qualitätsniveau drei zeigt die niedrigste Qualität an und erfüllt die gesetzlichen Mindestanforderungen der Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) bezüglich der Raumtemperatur nicht. Die ASR A3.5 schreibt für eine leichte Arbeit im Sitzen mindestens eine Raumtemperatur von 20 °C vor [37, S. 4]. Die Qualitätsniveaus

zwei und eins orientieren sich bei den Anforderungen an die Raumtemperatur an der DIN EN 15251, dabei wird neben der vorgegebenen Temperatur zusätzlich das vorausgesagte mittlere Votum (PMV) und der vorausgesagte Prozentsatz von Unzufriedenen (PPD) angegeben. Das PMV sagt die durchschnittliche Beurteilung einer sich im selben Raum befindenden Personengruppe voraus. Die Beurteilung des Klimas erfolgt mittels einer siebenstufigen Skala von heiß über neutral zu kalt [38, S. 6]. Der PPD prognostiziert den durchschnittlichen Anteil einer Gruppe von Menschen in einem Raum, die das Klima als zu warm oder zu kalt empfinden [38, S. 8]. Tabelle 3-6 zeigt die Qualitätsniveaus des BNB mit den geforderten operativen Temperaturen für Klassenräume und die dazugehörigen PMV- und PPD-Werten. Dabei wird von einer sitzenden Tätigkeit mit einem Energieumsatz der im Unterrichtsraum befindlichen Personen von 1,2 met bzw. 70 W/m² und einer bekleidungsbedingten Isolation von 1,0 clo bzw. 0,155 m²K/W ausgegangen [39, S. 25].

Tabelle 3-6: BNB-Qualitätsniveaus der operativen Temperatur im Winter

BNB-Qualitätsniveau	Minimale Lufttemperatur	Zulässige Unterschreitungszeit (als Anteil an Nutzungszeit)	PMV	PPD
1	21 °C	3 %	± 0,2	< 6 %
2	20 °C	3 %	± 0,5	< 10 %
3	< 20 °C			

Für das Qualitätsniveau zwei gibt die DIN EN 15251 eine Lufttemperatur von 20,0 °C vor, das entspricht einem PMV von ± 0,5 und PPD einem < 10 %. Für das Qualitätsniveau eins sieht die Norm eine Auslegungstemperatur von 21 °C bzw. ein PMV von 0,2 und ein PPD < 6 % vor. Nach BNB Vorgabe dürfen die Lufttemperaturen maximal 3 % der Nutzungszeit unterschritten werden [36, S. 7]. Der thermische Komfort im Winter wird über eine Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 nachgewiesen. Die Heizlastberechnung wird mit Hilfe der Software „TGA Heizung 5“⁵ durchgeführt. Das Ergebnis der Heizlastberechnung dient als Grundlage für die Dimensionierung der Modernisierungsvarianten.

Zugluft

Neben der Raumtemperatur hat auch die Luftgeschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf den thermischen Komfort. Viele Menschen reagieren sehr empfindlich auf stärkere Luftbewegungen in klimatisierten oder belüfteten Räumen. Das BNB bezieht sich bei der Bewertung des Teilaspektes Zugluft auf die DIN EN ISO 7730. Der vorausgesagte Prozentsatz an Menschen, die sich auf Grund von Zugluftempfinden beeinträchtigt

⁵ www.hottgenroth.de

fühlen, muss < 20 % sein. Das entspricht Kategorie B der Norm [38, S. 17]. Die Beeinträchtigung durch Zugluft, auch Zugluftrisiko (DR) genannt, berechnet sich nach Gl. (15) [38, S. 10], wobei der Eingangsparameter lokale Lufttemperatur ($\vartheta_{A,l}$) aus der im Rahmen des Teilaspektes operative Temperatur durchgeführten Heizlastberechnung resultiert. Die Gleichung hat Gültigkeit für Personen mit einer sitzenden Tätigkeit (Energieumsatz = 1,2 met) und für eine lokale Lufttemperatur im Bereich von 20 °C – 26 °C. Bei einer lokalen mittleren Luftgeschwindigkeit ($\bar{v}_{A,l}$) < 0,05 m/s ist $\bar{v}_{A,l} = 0,05$ zu setzen. Der Turbulenzgrad in Prozent (Tu) wird der VDI 3804 entnommen, wobei für Quelllüftung ein Turbulenzgrad von 20 – 25 % und für Mischlüftung 40 – 50 % (typischerweise 40 %) angenommen wird.

$$DR = (34 - \vartheta_{A,l}) \cdot (\bar{v}_{A,l} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot \bar{v}_{A,l} \cdot Tu + 3,14) \quad (15)$$

Abbildung 3-3 zeigt das Zugluftrisiko während der Heizperiode in Abhängigkeit von der lokalen mittleren Luftgeschwindigkeit für die Auslegungstemperatur $\vartheta_{A,l} = 20$ °C (operative Temperatur: Qualitätsniveau zwei) bei einem Turbulenzgrad von 40 %. Für die Auslegungstemperatur $\vartheta_{A,l} = 20$ °C ist die Anforderungen des BNB bezüglich der Zugluft $DR < 20$ % für $\bar{v}_{A,l} \leq 0,16$ erfüllt. Zur Vermeidung von Zugluft im gesamten Aufenthaltsbereich eines Raumes ist eine Raumluchtströmungssimulation unabdingbar. Mit Hilfe der Kenndaten für Luftauslässe der herstellenden Firma ist aber eine näherungsweise Berechnung der Luftaustrittsgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich möglich, die auch als Nachweis im Rahmen des BNB für den Teilaspekt Zugluft dient [36, S. 3].

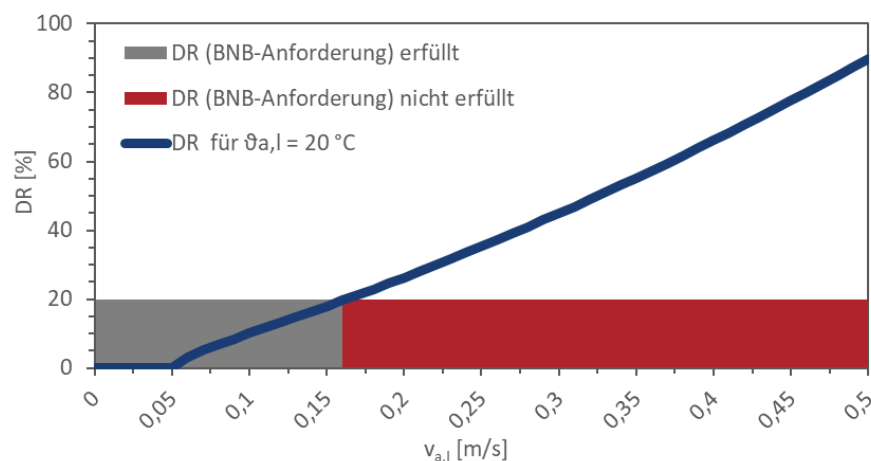


Abbildung 3-3: BNB-Anforderungen an das Zugluftrisiko im Winter

Strahlungstemperaturasymmetrie und Fußbodentemperatur

Eine Strahlungsasymmetrie entsteht durch unterschiedliche Oberflächentemperaturen von Wänden/Fenster, Decke oder Fußboden. Die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen resultieren meistens aus kalten oder warmen Glasflächen, Heiz-/Kühldecken, Fußbodenheizung/-kühlung und/oder Bauteilaktivierung und können durch das Erwärmen bzw. Abkühlen der zugewandten Körperbereiche zu Unbehaglichkeit beim Menschen führen [40, S. 12–13]. Die Strahlungstemperaturasymmetrie und die Fußbodentemperatur wird durch das BNB in Abweichung zur Zugluft nicht mittels der DIN EN ISO 7730, sondern anhand von konkreten Temperaturvorgaben für die Umschließungsflächen eines Raumes gemäß VDI 3804 bewertet. Tabelle 3-7 zeigt die einzuhaltenden Oberflächentemperaturen im Winter.

Tabelle 3-7: Zulässige Oberflächentemperaturen von Bauteilen im Winter

Bauteil	Temperaturanforderung
Decke	$\leq 35 \text{ °C}$
Glasflächen der Fassade/Wand	$\geq 18 \text{ °C}$
Glasflächen der Fassade/Wand	$\leq 35 \text{ °C}$
Fußboden	$\leq 29 \text{ °C}$

Der Nachweis für die Erfüllung der Anforderungen erfolgt für beheizte Bauteile durch die Auslegungsdokumentation. Für unbeheizte opake Bauteile gelten die Temperaturen als eingehalten, wenn der spezifische Transmissionswärmeverlust nach der EnEV eingehalten wird, weil in diesem Fall von einer der Raumtemperatur gleichen Oberflächentemperatur ausgegangen werden kann. Für Gebäude mit einem Fensterflächenanteil unter 40 % kann auf den Nachweis der Oberflächentemperaturen der Glasfassaden verzichtet werden [36, S. 4].

Relative Luftfeuchte

Eine zu geringe Raumluftfeuchte kann zu Trockenheit sowie Reizungen der Augen und Atemwege beim Menschen führen, während eine zu hohe Luftfeuchte ein Schwüleempfinden auslösen kann und mikrobielles Wachstum fördert. Das BNB verweist bezüglich der Auslegung von Be- und Entfeuchtungsanlagen auf die DIN EN 15251 [36, S. 4]. Die für den Neubau und die Sanierung empfohlene Kategorie II der Norm sieht Auslegungswerte von 60 % relative Luftfeuchte für die Entfeuchtung und 25 % für die Befeuchtung vor [39, S. 35]. In jedem Fall darf eine relative Luftfeuchte von 25 % nicht unterschritten werden und die absolute Luftfeuchte muss weniger als 12 g Wasser auf ein Kilogramm trockene Luft betragen [36, S. 8].

Thermischer Komfort im Sommer

Operative Temperatur

Die operative Temperatur für die Kühlungsperiode wird in fünf Qualitätsniveaus unterschieden, wobei das Qualitätsniveau eins die gesetzlichen Mindestanforderungen nicht erfüllt. Die Erfüllung der Vorgaben nach DIN 4108-2 bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes bildet die Grundlage für das Erreichen der Qualitätsniveaus zwei bis fünf. Darüber hinaus müssen für die Qualitätsniveaus drei bis fünf unterschiedliche Anforderungen der DIN EN 15251 erfüllt werden. Tabelle 3-8 stellt die Anforderungen des BNB an die operative Temperatur im Sommer zusammenfassend dar. Den Anforderungen liegt die Annahme zu Grunde, dass der Energieumsatz der im Raum befindlichen Personen 1,2 met bzw. 70 W/m² und die bekleidungsbedingte Isolation 0,5 clo bzw. 0,080 m²K/W beträgt. Der Nachweis erfolgt über die Kühllastberechnung nach VDI 2078.

Tabelle 3-8: BNB-Qualitätsniveaus der operativen Temperatur im Sommer

BNB-Qualitätsniveau	Anforderungen nach DIN 4108-2	Maximale Lufttemperatur	Zulässige Überschreitungszeit (als Anteil an Nutzungszeit)	PMV	PPD
5	erfüllt	25 °C	3 %	± 0,2	< 6 %
4	erfüllt	26 °C	5 %	± 0,5	< 10 %
3	erfüllt	27 °C	5 %	± 0,7	< 15 %
2	erfüllt				
1	nicht erfüllt				

Zugluft

Für das Zugluftmodell nach DIN EN ISO 7730 ergibt sich für die Kühlperiode mit Gl. (15) die Abbildung 3-4.

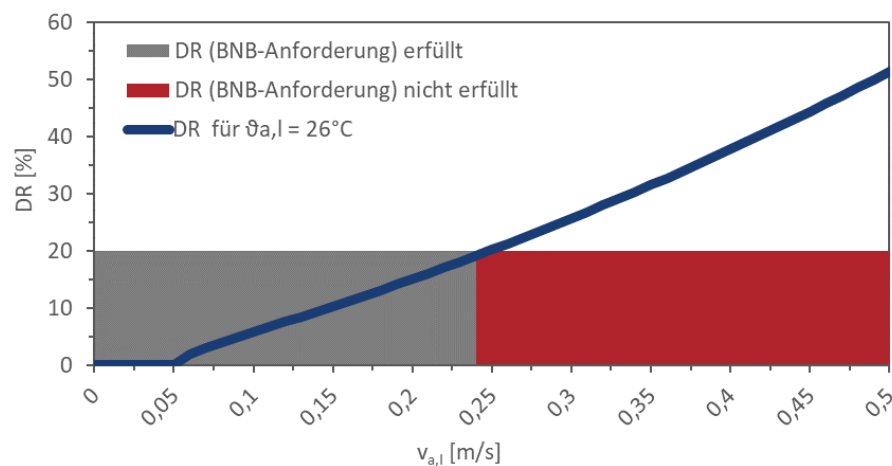


Abbildung 3-4: BNB-Anforderungen an das Zugluftisiko im Sommer

Die Abbildung zeigt das Zugluftrisiko während der Kühlperiode für die Auslegungstemperatur von 26 °C in Abhängigkeit von der mittleren lokalen Luftgeschwindigkeit bei einem Turbulenzgrad von 40 %. Das BNB schreibt ein $DR \leq 20 \%$ vor. Die Vorgabe ist bei $\vartheta_{A,l} = 26 \text{ °C}$ (Qualitätsniveau vier) mit $v_{A,l} = 0,24 \text{ m/s}$ erfüllt.

Strahlungstemperaturasymmetrie und Fußbodentemperatur, Relative Luftfeuchte

Für den Teilaspekt Strahlungstemperaturasymmetrie und Fußbodentemperatur während der Kühlungsperiode sind die in Tabelle 3-9 aufgeführten Oberflächentemperaturen einzuhalten.

Tabelle 3-9: Zulässige Oberflächentemperaturen von Bauteilen im Sommer

Bauteil	Temperaturanforderung
Decke	$\geq 16 \text{ °C}$
Glasflächen der Fassade/Wand	$\geq 18 \text{ °C}$
Glasflächen der Fassade/Wand	$\leq 35 \text{ °C}$
Fußboden	$\geq 19 \text{ °C}$

An die Raumluftfeuchte sind während der Kühlungsperiode die gleichen Anforderungen wie während der Heizperiode gestellt (vgl. 0 Thermischer Komfort im Winter: Relative Luftfeuchte).

Innenraumlufthygiene

Die Raumluftqualität hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit beim Schreiben von Texten, Korrekturlesen und Rechnen [13, S. 80]. Die Qualität der Raumluft wird dabei im Wesentlichen durch Schadstoffemissionen und die Belüftung beeinflusst. Die Raumluftqualität eines Gebäudes kann an der Quantität von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) unter besonderer Beachtung der Formaldehydkonzentration und am Kohlendioxidgehalt in der Raumluft bewertet werden [41, S. 1]. VOC entstehen u. a. durch Ausdünstungen aus Baustoffen, Anstrichen, Bodenbelägen und Möbeln, können aber auch von Schimmelpilzen gebildet werden und werden dann als mikrobiologisch produzierte flüchtige organische Verbindungen (MVOC) bezeichnet [13, S. 86].

Kohlendioxid entsteht in Innenräumen hauptsächlich durch die menschliche Atmung der im Raum befindlichen Personen. Dies ist für Unterrichtsgebäude von besonderer Relevanz, da die Belegungsdichte in Klassenräumen meist relativ hoch ist. Die CO_2 -Konzentration hängt stark von der Anzahl, Aufenthaltsdauer und Aktivität der im Raum anwesenden Personen ab, wobei eine Konzentration $< 1000 \text{ ppm}$ in der Raumluft als hygienisch unbedenklich gilt [42, S. 37–38]. Die ASR A3.6 schreibt die Einhaltung dieses Wer-

tes vor [43, S. 4]. Die Raumluft wird anhand des CO₂-Gehalts in unterschiedliche Qualitätsstufen eingeteilt. Die CO₂-Konzentration dient außerdem als Maßstab für andere gasförmige Verunreinigungen in der Raumluft. Die Bewertung erfolgt über den Ersatzindikator Außenluftvolumenstrom je Person. Die Angaben des BNB „Unterrichtsgebäude“ zum Außenluftvolumenstrom sind in der momentan aktuellsten Version 2013 noch nicht an die ASR A3.6 angepasst worden. Eine diesbezügliche Anfrage beim „Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ wurde mit dem Verweis auf das BNB „Büro- und Verwaltungsgebäude“ mit dem Stand 2015 beantwortet. Die dort verwendeten Qualitätsniveaus werden auch in dem in Kürze erscheinenden BNB „Unterrichtsgebäude“ in der Version 2017 Gültigkeit haben und dienen daher im Rahmen dieser Arbeit als Indikator für die Innenraumlufthygiene. Tabelle 3-10 zeigt die verschiedenen Raumluftqualitäten und deren Bewertung durch das BNB. Bei einem personenbezogenen Außenluftvolumenstrom < 36 m³/h ist keine Zertifizierung möglich.

Tabelle 3-10: BNB-Qualitätsniveaus des Außenluftvolumenstroms [41, S. 18]

BNB-Qualitätsniveau	Außenluftvolumenstrom pro Person
1	≥ 54 m ³ /h
2	≥ 36 m ³ /h

4 Energieeffizienz

4.1 Definition

Auf der Ebene der Energieumwandlung wird Energieeffizienz im Allgemeinen mit dem Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad gleichgesetzt [44, S. 4–5], wobei der Wirkungsgrad η als Quotient aus einer zugeführten und der abgegebenen Leistung definiert ist. Der Nutzungsgrad entspricht dem mittleren Wirkungsgrad über einen längeren Zeitraum (in der Regel einem Jahr) und ist meist geringer als der maximale Wirkungsgrad, da Verluste durch das reale Betriebsverhalten der Anlage berücksichtigt werden [44, S. 26–27]. Auf der Ebene der Energienachfrageseite wird Energieeffizienz als die Menge der eingesetzten Energie für die Erfüllung einer Energiedienstleistung verstanden. Energiedienstleistungen können dabei die Versorgung eines Gebäudes mit Frischluft oder die Bereitstellung von thermisch behaglichen Räumen sein. Eine Steigerung der Energieeffizienz kann durch die Veränderung der vorhandenen Strukturen, des Nutzungsverhaltens und der eingesetzten Technik erfolgen [44, S. 4–5].

Anlagen der Versorgungstechnik tragen nicht nur wesentlich zum Komfort und zur Behaglichkeit innerhalb eines Gebäudes bei, sondern haben in den meisten Fällen auch einen erheblichen Einfluss auf dessen Energiebedarf. Vor diesem Hintergrund ist die Optimierung der Energieeffizienz solcher Anlagen (bei gleichzeitiger Sicherstellung der Funktionalität) für die Nutzungskosten eines Gebäudes von großer Bedeutung. Die Frischluftversorgung und Luftkonditionierung (je nach vorhandener Behandlungsfunktion: Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten) durch RLT-Anlagen sowie die Raumwärmeversorgung des Gebäudes durch Heizungsanlagen können zur Analyse und Bewertung ihrer Energieeffizienz in vier verschiedene Prozessschritte unterteilt werden. Ausgehend von der Nutzenübergabe über die Verteilung im Gebäude hin zur Speicherung und Erzeugung orientieren sich die Prozessschritte am sogenannten Konzept der Bedarfsentwicklung. Diesem Konzept liegt ein Bedarf zur Grunde, der z. B. für die Belüftung eines Gebäudes benötigte elektrische Energie oder für die Beheizung des Gebäudes notwendige Wärmeenergie sein kann. Die auf dem Bedarf aufbauenden Prozessschritte sind jeweils mit Verlusten durch die Energieumwandlung verbunden, so dass mit jedem Prozessschritt ein Mehrbedarf entsteht. Aus dem Konzept der Bedarfsentwicklung resultieren unterschiedliche Bilanzebenen wie z. B. die tatsächliche Nutzenergie innerhalb eines versorgten Gebäudebereichs, die notwendige Endenergie für die Verteilung, Speicherung und Erzeugung innerhalb der Gebäudehülle und die benötigte Primärenergie außerhalb der Gebäudehülle [44, S. 227–228]. Das Konzept der Bedarfsentwicklung liegt auch der Endenergiebedarfsberechnung nach DIN V 18599 zu Grunde. Die Norm bildet

die Berechnungsgrundlage für die Endenergiebedarfe der Modernisierungsvarianten. Die Endenergiebedarfe werden sowohl für die Bewertung der ökologischen als auch der ökonomischen Qualität mittels Ökobilanzierung und Berechnung der Lebenszykluskosten als Eingangsgrößen benötigt (vgl. Abschnitte 3.2.3 und 3.3.2).

Aus dem Konzept der Bedarfsentwicklung ergeben sich für die Steigerung der Energieeffizienz von gebäudetechnischen Anlagen die in Tabelle 4-1 aufgeführten möglichen Maßnahmen.

Tabelle 4-1: Mögliche Energieeffizienzmaßnahmen [44, S. 228–229]

Mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz	
1	(Verminderung des Nutzenergiebedarfs durch Verbesserung der Gebäudehülle)
2	Optimierung der Nutzenübergabe
3	Effizientere Systeme zur Erzeugung, (Speicherung) und Verteilung der benötigten Energie
4	Bedarfsgerechte Betriebsführung und Automatisierung
5	Nutzung von Wärme- bzw. Kälterückgewinnung
6	(Einbindung von Erneuerbaren Energien)

Die in der Tabelle zusammengefassten Möglichkeiten stellen Einzelmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz dar, jedoch sollte stets eine ganzheitliche Betrachtung und Optimierung der Prozessschritte mitsamt verbundener Wechselwirkungen vorgenommen werden. In den nachfolgenden Abschnitten wird detaillierter auf die Energieeffizienz von RLT- und Heizungsanlagen eingegangen. Die Gebäudehülle mit ihren Transmissionsverlusten wirkt sich wesentlich auf den Heizenergie- und damit auch auf den Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes aus [44, S. 204–205], ist aber nicht Bestandteil der Betrachtungen dieser Untersuchung. Die fachgerechte Dämmung der Gebäudehülle kann jedoch zu enormen Steigerungen der Energieeffizienz des Gebäudes führen.

4.2 RLT-Anlagen

4.2.1 Nutzenübergabe

RLT-Anlagen lassen sich in Nur-Luft-Anlagen und Luft-Wasser-Anlagen unterscheiden. Bei Luft-Wasser-Anlagen werden im Gegensatz zu Nur-Luft-Anlagen zusätzlich wassergeführte Systeme zur Beheizung bzw. Kühlung eingesetzt. Wassergeführte Heiz- und Kühlsysteme können dabei z. B. Flächenheizungen an Fußboden, Wand oder Decke oder für die ausschließliche Beheizung auch statische Heizkörper sein. Luft-Wasser-Anlagen bieten den Vorteil einer besseren Energieeffizienz durch den Einsatz von Wasser als Wärmeträger (höhere spezifische Wärmekapazität und Dichte) verbunden mit einem

erhöhten Komfort durch geringere Luftgeschwindigkeiten und Temperaturasymmetrien [45, S. 378–379]. Zusätzlich besteht bei Nur-Luft-Anlagen die Problematik, dass der geförderte Volumenstrom auf Grund der zu erbringenden Heizlast nicht beliebig abgesenkt werden kann. Prinzipiell besteht eine Luft-Wasser-Anlagen aus der eigentlichen RLT-Anlage, die durch ein zusätzliches wasserbasierendes Heiz- und ggf. Kühlsystem ergänzt wird. Die Heiz- bzw. Kühllast wird in diesem Fall über das wasserbasierende System erbracht, während die RLT-Anlage für den erforderlichen Luftwechsel sorgt. Der Einsatz von Nur-Luft-Anlagen ist aus wirtschaftlichen wie energetischen Aspekten nur bei Gebäuden mit extremen Wärmeschutz und geringen Heizlasten wie z. B. Passivhäusern sinnvoll [45, S. 203].

4.2.2 Verteilung

Ein Maß für die Energieeffizienz der Luftverteilung ist die spezifische Ventilatorleistung. Die spezifische Ventilatorleistung für die Gesamtanlage lässt sich aus der Summe der elektrischen Leistungen aller Ventilatoren der Anlage im Verhältnis zum geförderten Gesamtvolumenstrom bei Auslegungslast ermitteln. Die spezifische Ventilatorleistung eines Ventilators errechnet sich über den Quotienten von elektrischer Leistungsaufnahme des Ventilators und dem geförderten Nennvolumenstrom und ist abhängig vom Ventilatorwirkungsgrad und dem Gesamtdruckverlust [16, S. 9]. Der Gesamtdruckverlust resultiert aus dem Luftwiderstand durch die Oberflächenrauigkeit des Luftleitungsnetzes und den Einzelwiderständen durch dessen Einbauten sowie der Anlagenbauteile im RLT-Gerät selbst [45, S. 368]. Da die Druckverluste proportional zur zweiten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit bzw. zur dritten Potenz der Leistungsaufnahme des Ventilators sind, beträgt das Energieeinsparpotenzial bei einer Halbierung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. des Volumenstroms theoretisch bis zu 87,5 % [44, S. 243]. Für die Luftkanäle einer RLT-Anlage bedeutet das in Bezug auf die Energieeffizienz eine möglichst geradlinige Kanalführung ohne unnötige Strömungsumlenkungen und große Kanalquerschnitte, um die Strömungsgeschwindigkeiten gering zu halten [44, S. 249]. Die Bestandsanlage ist als Hochdruck-Anlage (HD-Anlage) ausgeführt. HD-Anlagen fördern die Luft mit hohen Geschwindigkeiten (10 – 25 m/s) durch relative kleine Kanalquerschnitte, was einen erhöhten Druckverlust und damit einen höheren Energiebedarf der Ventilatoren zur Folge hat.

Die spezifische Ventilatorleistung erlaubt die Einteilung einer RLT-Anlage nach DIN EN 13779 in die in Tabelle 4-2 aufgeführten Kategorien. Die EnEV 2016 fordert bei Neubau und Erneuerung von RLT-Anlagen mit einem Luftvolumenstrom $\geq 4000 \text{ m}^3/\text{h}$ die Einhaltung der Kategorie SFP 4 [46, S. 11].

Tabelle 4-2: SFP-Kategorien [16, S. 24]

Kategorie	P_{SFP} in $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$
<i>SFP 1</i>	< 500
<i>SFP 2</i>	500 – 750
<i>SFP 3</i>	750 – 1 250
<i>SFP 4</i>	1 250 – 2 000
<i>SFP 5</i>	2 000 – 3 000
<i>SFP 6</i>	3 000 – 4 500
<i>SFP 7</i>	> 4 500

4.2.3 Erzeugung/Aufbereitung

Nur-Luft-Anlagen können in Ein- und Zweikanalanlagen eingeteilt werden. Bei Einkanalanlagen wird die Luft im Zentralgerät den Anforderungen entsprechend komplett aufbereitet und temperiert, um über das Luftkanalnetz dem Versorgungsbereich zugeführt zu werden. Zweikanalanlagen fördern die Luft nach der Aufbereitung durch das Zentralgerät in zwei unterschiedlichen Zuständen (i. d. R. unterschiedliche Temperaturen) durch zwei separate Kanäle zum Versorgungsbereich. Die Luft aus beiden Kanälen wird dann vor Eintritt in den Versorgungsbereich dem Bedarf entsprechend zusammengesetzt [45, S. 367]. Nachteilig bei Zweikanalanlagen sind neben dem größeren Platzbedarf für das Luftkanalnetz vor allem der hohe Energieaufwand für die Luftförderung, da beide Kanäle für einen Großteil des gesamten Luftvolumenstroms ausgelegt werden müssen. Aus genannten Gründen werden Zweikanalanlagen heute nicht mehr installiert [13, S. 1114] und sind nur noch im Bestand anzutreffen. Zweikanalanlagen sollten einer entsprechenden Modernisierung unterzogen werden [45, S. 367].

4.2.4 Betriebsführung und Automatisierung

Einkanalanlagen können mit einem konstanten Luftvolumenstrom und variabler Temperatur oder mit variablem Volumenstrom und konstanter Temperatur betrieben werden. Bei letztgenannter Ausführung wird der Luftvolumenstrom an den tatsächlichen Bedarf angepasst, da der Auslegungsvolumenstrom der RLT-Anlage nicht zu jedem Betriebszeitpunkt benötigt wird. Mögliche Regelgrößen können hierbei die Raumtemperatur oder der CO_2 -Gehalt der Raumluft sein. Variabel-Volumenstrom-Anlagen (VVS-Anlagen) erreichen gegenüber Konstant-Volumenstrom-Anlagen (KVS-Anlagen) Einsparungen von bis zu 70 % und sind damit, entsprechende Anwendungsfälle vorausgesetzt, besonders energieeffizient [44, S. 250].

4.2.5 Wärme bzw. Kälterückgewinnung

Zur Verbesserung der Lesbarkeit wird im folgenden Abschnitt ausschließlich von Wärmerückgewinnungssystemen (WRS) gesprochen, die getroffenen Aussagen lassen sich aber analog auch auf die Kälterückgewinnung anwenden. Wärmerückgewinnungssysteme bestehen wie Heiz- und Kühlregister der RLT-Anlage aus einem Wärmeübertrager und ermöglichen die Senkung des Energiebedarfs von RLT-Anlagen für die thermische Luftbehandlung in Abhängigkeit von der Bauform um bis zu 70 % und mehr [44, S. 251]. Die verbreitetsten Bauformen von WRS sind der Plattenwärmeübertrager, das Kreislaufverbundsystem und der Rotationswärmeübertrager, wobei nur bei letzterem neben der Wärme auch Feuchte zurückgewonnen werden kann. WRS werden zur Luftvorerwärmung der Abluft im Winter eingesetzt, dabei wird thermische Energie aus der Abluft über das WRS an die einströmende Außenluft übertragen. Auf diese Weise wird der Zuluftstrom erwärmt, wodurch die Temperatur des Abluftstromes sinkt. Eine wichtige Kenngröße für die Energieeffizienz des WRS ist die Rückwärmezahl (auch Temperaturänderungsgrad oder Temperaturübertragungsgrad η_t).

$$\eta_t = \frac{\vartheta_{\text{WRS}} - \vartheta_{\text{AUL}}}{\vartheta_{\text{ABL}} - \vartheta_{\text{AUL}}} \quad (16)$$

Die Rückwärmezahl ist der Quotient aus den Differenzen der Lufttemperatur nach dem WRS (ϑ_{WRS}) zur Außenluft- (ϑ_{AUL}) und Abluft- (ϑ_{ABL}) zur Außenlufttemperatur [47, S. 27]. Die Rückwärmezahl gibt damit an, wieviel thermische Energie von der Abluft auf die Zuluft übertragen werden kann. Aus der Rückwärmezahl lässt sich nach DIN EN 13053 die Energieeffizienz des WRS berechnen. Tabelle 4-3 zeigt die in der Norm definierten und durch die Berechnung der Energieeffizienz resultierenden Wärmerückgewinnungsklassen.

Klasse	$\eta_{e\ 1:1}$ min [%]
Klasse H1	≥ 71
Klasse H2	≥ 64
Klasse H3	≥ 55
Klasse H4	≥ 45
Klasse H5	≥ 36
Klasse H6	Keine Anforderungen
ANMERKUNG 5 Die Werte gelten für ausgeglichene Massenströme (1:1). Die Klassen definieren die Qualität der WRG und haben einen starken Einfluss auf den thermischen Energieverbrauch. In Nordischen Ländern sind höhere und in südlichen Ländern geringere Klassen gebräuchlich.	

Tabelle 4-3: Wärmerückgewinnungsklassen [47, S. 29]

Laut EnEV 2016 ist der Einbau eines WRS mit einer Wärmerückgewinnungsklasse H3 oder besser bei Neubau oder Erneuerung einer RLT-Anlage mit einem Volumenstrom $\geq 4000 \text{ m}^3/\text{h}$ verpflichtend [46, S. 11].

4.3 Heizungsanlagen

4.3.1 Nutzenübergabe

Erfolgt die Wärmeübergabe der Heizungsanlage nicht über die Luft, kommen Heizflächen zum Einsatz. Heizflächen unterscheiden sich in bauteilintegrierte und freie Heizflächen. Die bauteilintegrierten Heizflächen sind fest mit Boden, Wänden oder Decke des Gebäudes verbunden. Alle üblichen Heizkörper werden zu den freien Heizflächen gezählt [44, S. 229]. Heizflächen unterscheiden sich in der Praxis nach der Art der Wärmeübertragung (Strahlungs- bzw. Konvektionsanteil), der Betriebstemperatur, der Masse der Konstruktion sowie dem vom Heizungswasser durchflossenen Volumen. Bei gleicher Heizlast gilt generell je größer die Heizfläche desto geringer die Betriebstemperatur. Eine größere Heizfläche geht jedoch auch immer mit einer größeren thermischen Trägheit einher. Da die Heizlast im Anlagenbetrieb keine konstante Größe ist, sondern ständig variiert, ist die Energieeffizienz von Flächenheizsystemen mit niedrigen Betriebstemperaturen nicht zwingend besser, als die von sehr gut geregelten Heizkörpern mit höheren Betriebstemperaturen. Der Vorteil von Flächenheizungen liegt aber in den geringeren Verteilungsverlusten sowie der möglichen Einbindung von Erneuerbaren Energien, deren Energieeffizienz in niedrigeren Temperaturbereichen am höchsten ist [44, S. 231].

4.3.2 Verteilung

Für die Verteilung des Heizungswassers zu den Heizflächen sind Umwälzpumpen notwendig, die bei der Förderung des Wassers die aus den Rohrleitungen, Wärmetauschern, Ventilen und Heizflächen resultierenden Druckverluste überwinden müssen. Neue optimal aufeinander abgestimmte Komponenten ermöglichen im Vergleich mit konventionellen Bestandssystemen eine Energieeinsparung von bis zu 90 %. Die Energieeffizienzsteigerungen ergeben sich dabei aus dem Einsatz (hoch-)effizienter Umwälzpumpen, einer bedarfsgerechten Leistungsauslegung mit entsprechender Regelung der Pumpen, dem hydraulischen Abgleich und der optimierten Regelventilauslegung [44, S. 240].

Hocheffizienzpumpen erreichen als Nassläuferpumpen Wirkungsgrade bis zu 50 %, während der Wirkungsgrad von Standard-Nassläuferpumpen im Bereich von 15 % liegt. Für

in größeren Anlagen eingesetzte Trockenläuferpumpen sind Wirkungsgrade von bis zu 85 % möglich [44, S. 240–241].

Der maximale Wirkungsgrad von Umwälzpumpen liegt etwa bei halber maximaler Förderleistung und Nenndrehzahl. Die Verluste durch die innere Reibung der Pumpe vergrößern sich mit steigendem Volumenstrom, während die Rückströmungsverluste mit sinkendem Volumenstrom zunehmen. Bei halber Förderleistung sind beide Verluste minimal, woraus der maximale Wirkungsgrad der Pumpe resultiert. Für die Leistungsauslegung der Pumpe bedeutet dies bei volumenstromvariablen Systemen den Nennbetriebspunkt bei etwa $2/3$ der maximalen Förderleistung zu wählen, um in dem in der Praxis häufig auftretenden Fall des Teillastbetriebs im Bereich des Wirkungsgrad-Maximums der Pumpe zu liegen [44, S. 241–242].

Die Regelung der Umwälzpumpen erfolgt für ein volumenstromvariables System in den überwiegenden Fällen über den Druck. Die sogenannte Differenzdruckregelung unterscheidet sich nach Konstant- und Proportionaldruckregelung. Bei einer unregelmäßig betriebenen Pumpe erhöht sich im Teillastbetrieb durch geschlossene (Thermostat-)Ventile der Förderdruck. Differenzdruckgeregelter Pumpen hingegen reduzieren bei einer Erhöhung des Förderdrucks die Drehzahl. Pumpen mit einer Konstantdruckregelung halten dabei den Förderdruck stets konstant, während Pumpen mit Proportionaldruck-Regelung den Förderdruck bis zu 50 % absenken können. Die Proportionaldruckregelung ist dadurch energieeffizienter als die Konstantdruckregelung [44, S. 243–244].

Sind einzelne Heizflächen oder andere Wärmeverbraucher parallel angebunden, werden die pumpennahen Verbraucher bei fehlendem hydraulischem Abgleich überversorgt, da der Volumenstrom den Weg des geringsten Widerstandes nimmt und sich die Druckverluste gleichmäßig auf die parallelen Heizungsstränge aufteilen. Bei ungleichen Rohrlängen resultiert ein geringerer Volumenstrom für die weiter von der Pumpe entfernten Verbraucher, dem in der Praxis häufig mit einem Anheben der Förderleistung entgegengewirkt wird. Dies wiederum führt zu einer verstärkten Überversorgung der pumpennahen Verbraucher und damit einhergehend zu einem deutlich höheren Energieverbrauch. Um dem entgegenzuwirken müssen einregulierbare Drosselventile vor den Heizflächen installiert werden, so dass nur der jeweils benötigte Volumenstrom durch den Verbraucher fließt. Der so erreichte hydraulische Abgleich geht zwar mit einem erhöhten Druckverlust durch die zusätzlichen Ventile einher, ist jedoch deutlich energieeffizienter als das Anheben der Förderleistung [44, S. 245].

Ist das Wärmeverteilsystem in verschiedene Heizkreise aufgeteilt, werden Regelarmaturen wie Ventile und Mischer notwendig. Da die Regelarmaturen durch ihren Druckverlust mit einem erhöhten Energiebedarf einhergehen, ist eine optimale Auslegung der

Ventile unabdingbar. Eine hohe Regelgüte des Ventils ist immer mit einem erhöhten Leistungsbedarf der Pumpe verbunden, weshalb ein Kompromiss zwischen Regelgüte und Leistungsbedarf anzustreben ist und Pumpe, Regelventil und Regelung optimal aufeinander abgestimmt werden sollten [44, S. 246].

Bei der Heizungs- ist wie bei der RLT-Anlage aus energetischer Sicht neben den bereits angeführten Maßnahmen ebenso auf eine Minimierung der Druckverluste und Volumenströme zu achten. In Analogie zum Luftkanalnetz (Abschnitt 4.2.2) sollten für die Verteilung des Heizungswassers größere Rohrdurchmesser Verwendung finden und nach Möglichkeit mit einer relativ großen Temperaturspreizung zwischen Vorlauf (VL) und Rücklauf (RL) gearbeitet werden, um die zu fördernden Volumenströme gering zu halten [44, S. 244–245].

4.3.3 Erzeugung und erneuerbare Energien

Wärmeerzeugungsanlagen für Gebäude verwenden in der Regel Wasser (seltener Luft) als Wärmeträger. Die überwiegende Mehrzahl der installierten Wärmeerzeugungsanlagen verwendet als Primärenergieträger Erdgas oder Heizöl, das in Heizkesseln bei einer Temperatur von ca. 1000 °C verbrannt wird und über einen Wärmeübertrager die Wärmeenergie an das Wasser abgibt. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollte die Verbrennung von fossilen Energieträgern minimiert werden.

5 Bestandsanlagen

5.1 Berechnung des Endenergiebedarfs der Bestandsanlagen

5.1.1 Datengrundlage

Für die Bilanzierung der Endenergiebedarfe notwendige Daten werden weitestgehend der vorhandenen anlagen- und gebäudetechnischen Dokumentation entnommen. Für fehlende Informationen wird auf die im Bundesanzeiger erschienene „Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand“ in der Fassung vom 7. April 2015 zurückgegriffen [48].

Auch wenn die zukünftige Nutzung des Schulgebäudes zum Zeitpunkt der Untersuchung nur für das Obergeschoss feststeht und noch keine Pläne zum Ausbau des sich im Rohbau befindlichen Erdgeschosses existieren, muss das Erdgeschoss im Rahmen der Bilanzierung der Endenergiebedarfe und der Heizlastberechnung auf Grund seines Einflusses auf die Transmissionswärmeverluste des Obergeschosses berücksichtigt werden. Eine zukünftige Nutzung wirkt sich ebenfalls auf die vorzuhaltenden Luftvolumenströme der RLT-Anlage aus. Aus den genannten Gründen wird dem Erdgeschoss für die nachfolgenden Ausführungen eine dem Obergeschoss gleichartige Nutzung unterstellt, da der zukünftige Innenausbau unklar ist, wird für diese Untersuchung eine dem Obergeschoss identische Raumaufteilung angenommen. Nachfolgend wird das Vorgehen für die Berechnung des Endenergiebedarfs nach DIN V 18599 am Beispiel des Schulgebäudes und der bestehenden Anlagentechnik beschrieben.

5.1.2 Erfassung der Gebäudegeometrie und Bauphysik

In einem ersten Schritt werden die geometrischen Daten des Schulgebäudes und dessen bauphysikalische Eigenschaften erfasst. Zur geometrischen Erfassung wird der Grundriss des Obergeschosses des Gebäudes in einem CAD-Programm⁶ hinterlegt und alle Außen- und Innenwände sowie Türen und Fenster nachgezeichnet. Das fertiggezeichnete Gebäude wird durch Angabe von Geschosshöhe und -anzahl in eine dreidimensionale Zeichnung überführt (vgl. Abbildung 2-3). In Tabelle 5-1 sind die für die Endenergiebedarfsberechnung wichtigsten Flächen und Volumina sowie die Gebäudedimensionen dargestellt.

⁶ Hottgenroth HottCAD 3D

Tabelle 5-1: Flächen und Gebäudedimensionen des Schulgebäudes

Netto-Raumfläche	2896 m ²
Brutto-Geschossfläche	3051 m ²
Wärmeübertragende Hüllfläche	6957 m ²
Anzahl der Vollgeschosse	2
Geschosshöhe	3,00 m
Beheiztes Volumen	8688 m ³

Die Angaben zu den bauphysikalischen Eigenschaften des Schulgebäudes werden den Bestandsunterlagen entnommen, danach wurde die Fassade Anfang der 1990er Jahre saniert. Mit der Software „U-Therm“ wird der Schichtaufbau der Gebäudebauteile erfasst. Generell ist es für die Berechnung der Endenergiebedarfe nach DIN V 18599 ausreichend Standardwerte nach Typologie zu verwenden, allerdings sind diese Werte mangels detailliertem Schichtaufbau für eine spätere Kühllastberechnung nach der aktuellen VDI 2078 nicht verwendbar. Daher erfolgt an dieser Stelle die detaillierte Erfassung der Wärmedurchgangskoeffizienten, so dass diese dann konsistent für beide Berechnungen verwendet werden können. Tabelle 5-2 zeigt die verwendeten Wärmedurchgangskoeffizienten.

Tabelle 5-2: Wärmedurchgangskoeffizienten des Schulgebäudes

Gebäudebauteil	Wärmedurchgangskoeffizient	Fläche
	W/m²K	m²
Bodenplatte: Stahlbeton	3,70	1525
Kellerwand: Stahlbeton	4,88	292
Kellerdecke: Stahlbeton	0,80	1525
Außenwand: Vorhangfassade	0,51	916
Außentür: Metalltür mit Glasanteil	3,28	65
Fenster: Isolierverglaste Kunststofffenster	2,95	304
Geschossdecke: Stahlbeton	0,80	1525
Innenwand: Metallständerwand	0,35	1753
Innentür: Holztür	2,05	147
Abhangdecke: Plattendecke aus Rigips	3,23	3051
Dach: Trapezblechdach aus Stahl	0,68	1525

Da keine Informationen über die Bodenplatte vorliegen, wird diese als ungedämmt angenommen, weil der Keller als Kriechkeller ausgeführt ist und eine Dämmung in den 1970er Jahren nicht üblich war. Etwaige Feuchteschutzbarrieren haben kaum Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten der Bodenplatte und werden daher vernachlässigt. Die Kellerwand ist laut Bestandsplänen ebenfalls ungedämmt. Die Außenwand ist eine Vorhangfassade aus Aluminium-Tafelementen mit Mineralfaserplatten in Dämmstärken von 80 – 100 mm. Der Berechnung ihres Wärmedurchgangskoeffizienten wird eine durchgehende Dämmung mit 80 mm zu Grunde gelegt. Die Berechnung des Wär-

medurchgangskoeffizienten von Abhangdecken, Innenwänden und -türen beruht auf typischen Bauteilaufbauten nach Herstellerangaben. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster wird aus dem bei der Begehung aufgenommenen Bauteilaufbau errechnet. Für Keller- und Geschossdecke aus Stahlbeton werden gleichartige Aufbauten aus Estrich und Dämmstoff mit einer Gesamtdicke von 20 cm angenommen. Die Außentüren werden vereinfacht mit einem Metallanteil von 40 % und in Analogie zu den Fenstern mit einer Isolierverglasung angenommen. Das aus Trapezblech bestehende Flachdach verfügt über eine 60 mm starke Dämmschicht aus Mineralfaserplatten und ist mit einer 50 mm dicken Kiesschicht abgedeckt. Alle Bauteilaufbauten sind mit Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten im Anhang C aufgeführt.

Das so erfasste Gebäude wird anschließend in die Software zur Energiebilanzierung⁷ exportiert, in der weitere Eingaben notwendig werden. Zunächst wird die bauphysikalische Erfassung des Gebäudes abgeschlossen. Die Berücksichtigung vorhandener Wärmebrücken erfolgt mit einem pauschalen Wert für Gebäude im Bestand von $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ [49, S. 52]. Für die wirksame Speicherfähigkeit als Maß für die „thermische Trägheit“ des Gebäudes wird auf Grund der abgehängten Decken ein Wert von $50 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ gewählt [49, S. 86]. Die Luftdichtigkeit des Gebäudes beschrieben durch die Luftwechselrate bei 50 Pa wird auf $4,00 \text{ 1/h}$ festgelegt. Nachdem die geometrische und bauphysikalische Erfassung abgeschlossen ist, wird eine Zonierung des Gebäudes vorgenommen.

5.1.3 Nutzungsrandbedingungen und Zonierung

Zunächst werden die Nutzungsrandbedingungen bestimmt, auf deren Grundlage das versorgte Gebäude in Zonen eingeteilt wird. Die Zonen werden auf der Basis von Bereichen gleicher Nutzung und Konditionierung sowie gleichartiger Versorgungstechnik gebildet. Die Nutzung des Gebäudes lässt sich nach Verkehrswegen und Schulräumen unterscheiden, wobei die Schulräume wiederum nach der Konditionierung in Nebenräume (zur Unterrichtsvorbereitung) und Unterrichtsräume zu unterteilen sind. Letztere erfordern einen höheren nutzungsbedingten Außenluftvolumenstrom durch die Lüftungsanlage [50, S. 55]. Für die Zonierung ergibt sich die in Tabelle 5-3 dargestellte Einteilung.

Tabelle 5-3: Zonierung des versorgten Gebäudes (Bestand)

Nr.	Zonen- Bezeichnung	Nutzungsprofil nach- DIN V 18599-10	Konditionierung	Netto- Raum- fläche
1	Unbeheizte Zone: K, AD (Keller, abgehängte Decken)	19 – unbeheizte Zone		4484 m ²

⁷ Hottgenroth Energieberater 18599 3D Plus

2	Verkehrsfläche (EG)	19 – Verkehrsfläche	Heizung	342 m ²
3	Verkehrsflächen (OG)	19 – Verkehrsfläche	Heizung	342 m ²
4	Unterrichtsräume (EG)	8 - Klassenzimmer (Schulen)	Lüftung (heizen, kühlen, be- und entfeuchten)	1106 m ²
5	Unterrichtsräume (OG)	8 - Klassenzimmer (Schulen)	Lüftung (heizen, kühlen, be- und entfeuchten)	679 m ²
6	Nebenräume (OG)	8 - Klassenzimmer (Schulen)	Lüftung (heizen, kühlen, be- und entfeuchten)	427 m ²

Die bestehende Lüftungsanlage konditioniert die Unterrichts- und Nebenräume (Zone 5 und 6) des Obergeschosses sowie die Unterrichtsräume des Erdgeschosses (Zone 4) im Winter durch Beheizung und Befeuchtung der Raumluft. Im Sommer kühlt und entfeuchtet die Anlage die Zonen über die Zuluft. Allen Zonen wird die Nutzung als Klassenzimmer bzw. Schulraum zugeordnet. Die Verkehrsflächen des Ober- und Erdgeschosses werden über die installierten Heizkörper des bestehenden Warmwasserpumpensystems beheizt (Zone 2 und 3). Die abgehängten Decken und der Kriechkeller gehen als unbeheizte Zonen in die Bilanzierung mit ein (Zone 1). Für das Erdgeschoss wird wie bereits beschrieben eine Nutzung als Unterrichtsraum angenommen, wobei keine Unterscheidung nach Unterrichts- und Nebenräume vorgenommen wird (Zone 4). Abbildung 5-1 zeigt die dreidimensionale Draufsicht des Obergeschosses mit den definierten Zonen. Die Unterrichtsräume sind rot, die Nebenräume blau und die Verkehrsflächen weiß markiert.



Abbildung 5-1: Zoneneinteilung nach DIN V 18599 (Obergeschoss)

Die DIN V 18599 gibt in Teil 10 empirisch ermittelte Profile in Abhängigkeit von der jeweiligen Nutzung vor. Die Standardprofile der Norm für die Nutzung von Verkehrsflächen und Unterrichtsräumen sind dem Anhang D beigelegt. Wird im Folgenden von den Vorgabewerten der Standardprofile abgewichen, dann nur um die Bestandssituation im Hinblick auf die Endenergiebedarfsbilanzierung möglichst genau darzustellen. Die Abweichungen finden entsprechend Erwähnung.

5.1.4 Erfassung der Anlagentechnik

Es folgt die detaillierte Erfassung der Anlagentechnik. Die verwendeten Daten stammen größtenteils aus der Anlagendokumentation und aus Informationen, die bei einer Begehung aufgenommen worden sind. Für die Heizungs- Lüftungs- und Kälteanlage gehen die in den nachfolgenden drei Tabellen zusammengefassten Daten in die Bilanzierung ein.

Tabelle 5-4: Heizungsanlage

Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Fernwärme aus fossiler Kraft-Wärme-Kopplung • Energieträger: Warmwasser, niedrige Temperatur 105 °C Dämmklasse: Sekundär-/Primärseite = 1/2 • Aufstellung: außerhalb der Zonen im unbeheizten Gebäudebereich • Betriebsweise: durchgehender Betrieb mit Nacht- und Wochenendabsenkung
Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> • kein Heizungspufferspeicher vorhanden
Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Vorlauf-Temperatur: 70 °C • Rücklauf-Temperatur: 50 °C • Zweirohrnetz (Steigstrang) mit Dämmung vor 1980 (U-Wert = 0,400 W/mK) • Strang- und Anbindeleitungen in beheizter Umgebung • Länge der Verteilleitungen (VL und RL) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsflächen (OG und EG): 124 m ▪ RLT-Anlage: 124 m • Länge der Strangleitungen (VL und RL) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsflächen (OG und EG): 216 m • Länge der Anbindeleitungen (VL und RL) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsflächen (OG und EG): 240 m ▪ RLT-Anlage: 30 m • Heizungspumpe(-n): unregelt, nicht bedarfsausgelegt • Heizungskreislauf nicht hydraulisch abgeglichen
Übergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeträgermedium: Wasser • Versorgung des Heizregisters der RLT-Anlage sowie der Heizkörper in den Zonen „Verkehrsflächen OG“ und „EG“ • Regelung: P-Regler vor 1988

Tabelle 5-5: RLT-Anlage

Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Zentrale Zu- und Abluftanlage zur vollständigen Belüftung • Betriebsweise: durchgehend • Konstanter Volumenstrom • Auslegungsvolumenstrom: 49.000 m³/h • Heizung der Zuluft auf 20 °C Raumtemperatur im Winter • Kühlung der Zuluft auf 26 °C Raumtemperatur im Sommer • Befeuchtung: Umlaufsprühbefeuchter Regelung: ungeregelt, ganzjähriger Betrieb Soll-Wert: 6 g/kg Vorlauf-Temperatur: 16 °C Rücklauf-Temperatur: 18 °C Pumpe: ungeregelt, nicht bedarfsausgelegt Leitungslänge des Pumpenverteilkreises: 30 m
Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> • SFP des Zu- und Abluftventilators: 2,00 kW/(m³s) • Alle Luftkanäle nicht an Außenluft
Übergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeträgermedium: Luft • Versorgung der Zonen „Unterrichtsräume (OG)“, „Nebenräume (OG)“ und „Unterrichtsräume (EG)“ über Drallluft-Auslässe

Die Wärmeverluste im Luftkanalnetz und durch die Übergabe werden über einen pauschalen Faktor von 0,9 abgebildet.

Tabelle 5-6: Kälteanlage

Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Kompressionskältemaschine mit Kolbenverdichter • Regelung: mehrstufig schaltbar • Kältemittel: R134/unbekannt • Betriebsweise: saisonale sowie Nacht- und Wochenendabschaltung • Kaltwasserkreislauf mit VL-/RL-Temperaturen von 6/12 °C • Rückkühler: Verdunstungsrückkühler • Rückkühl-/Kühlwasserkreislauf mit VL-/RL-Temperaturen von 27/33 °C
Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> • kein Kältespeicher vorhanden
Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Leitungslänge des Kaltwasserkreislaufs: 30 m • Leitungslänge des Kühlwasserkreislaufs: 30 m • Kühl- und Kaltwasserpumpe: ungeregelt, nicht bedarfsausgelegt • Kühl- und Kaltwasserkreislauf nicht hydraulisch abgeglichen
Übergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Kälteüberträgermedium: Kältemittel/Wasser • Versorgung des Kühlregisters der RLT-Anlage

Für die Energiebilanzierung werden die durch die Standardnutzungsprofile vorgegebenen Raum-Solltemperaturen für Heiz- und Kühlbetrieb an die tatsächlichen Sollwerte der Bestandsanlage angepasst. Für die Neben- und Unterrichtsräume werden für den Heizfall 20 °C und für den Kühlfall 26 °C Raumtemperatur bilanziert. Der Bilanzierung der Verkehrsflächen wird eine Raumtemperatur von 15 °C zu Grunde gelegt. Der Auslegungsvolumenstrom ist der Anlagendokumentation entnommen und wird ebenfalls angepasst. Aus dem Auslegungsvolumenstrom der Bestandsanlage resultiert für Neben-

und Unterrichtsräume im Erd- und Obergeschoss eine ungefähre Luftwechselrate von 7 1/h.

Da die Beleuchtungstechnik des versorgten Gebäudes nicht Bestandteil der Untersuchung ist, aber als interne Wärmequelle einen eventuellen Einfluss auf die Berechnung des Endenergiebedarfs hat, wird die Beleuchtungstechnik des Gebäudes mitbilanziert. Um die Beleuchtungstechnik für die Modernisierungsvarianten nicht erneut variieren zu müssen, wird für Bestand und Modernisierung eine einheitliche Beleuchtungsausführung angenommen, die den aktuellen Planungsunterlagen der Inros Lackner SE entnommen ist. Die angenommene Beleuchtung wird für jede Zone einzeln definiert und ist in Tabelle 5-7 zusammengefasst.

Tabelle 5-7: Bilanzierte Beleuchtung

Nr.	Zonen- Bezeichnung	Leuchtentyp	Art	Installierte Leistung	Präsenzer- fassung
1	Unbeheizte Zone: K, AD (Keller, abgehängte Decken)				
2, 3	Verkehrsfläche (EG) u. Verkehrsflächen (OG)	LED-Downlights (12 W)	direkt	2 x 480 W	vorhanden
4	Unterrichtsräume (EG)	Leuchtstofflampe, stabförmig (54 W)	direkt	17064 W	nicht vorhanden
5	Unterrichtsräume (OG)	Leuchtstofflampe, stabförmig (54 W)	direkt	10368 W	nicht vorhanden
6	Nebenträume (OG)	Leuchtstofflampe, stabförmig (54 W)	direkt	6698 W	nicht vorhanden

Der Trinkwarmwasserbedarf darf für Schulen mit einzelnen Trinkwarmwasserstellen wie z. B. Handwaschbecken vernachlässigt werden [51, S. 30] und wird daher und weil die Trinkwarmwasserversorgung nicht Teil dieser Untersuchung ist, von der Endenergiebedarfsberechnung ausgenommen.

5.1.5 Ergebnis der Endenergiebedarfsberechnung

Mit den gemachten Eingaben wird nun mittels Software der Endenergiebedarf des versorgten Gebäudes und dessen vorhandene Heizungs-, Lüftungs- und Kälteanlage berechnet. Abbildung 5-2 zeigt die resultierende Monatsbilanzierung der Endenergiebedarfe für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung des Gebäudes.

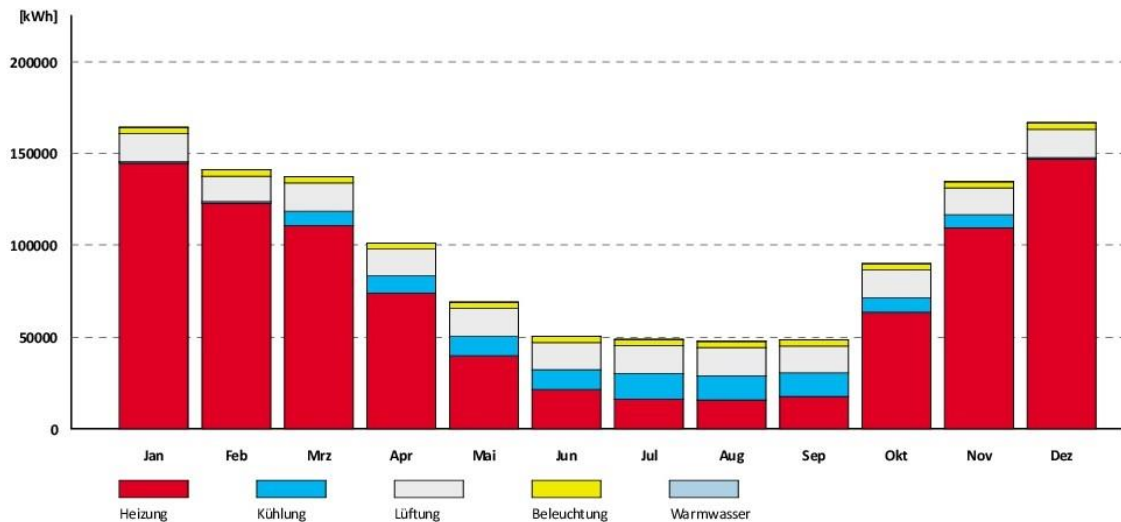


Abbildung 5-2: Monatsbilanzierung der Endenergie – Bestandssituation

Aus Abbildung 5-2 ist erkennbar, dass ein Großteil des Endenergiebedarfs der Bestandsanlagen auf die Beheizung des Gebäudes entfällt. Die Heizung hat einen Anteil von ca. 73 % am Jahresendenergiebedarf der Bestandsanlagen. Auf die verbleibende Anlagentechnik entfallen relativ geringe Anteile. Der Anteil der Lüftung liegt bei ca. 15 % und der der Kühlung bei knapp 8 % des Gesamtendenergiebedarfs. Die Beleuchtung macht mit knapp 4 % den geringsten Anteil aus. In der Abbildung wird ebenfalls die saisonale Abhängigkeit durch einen erhöhten Heizbedarf in den Wintermonaten und das Ansteigen des Kühlbedarfs im Sommer deutlich. Der Endenergiebedarf für die Lüftung hingegen ist in der Monatsbilanz annähernd konstant, da die Außenluftzufuhr ganzjährig sichergestellt sein muss. Der Bedarf für die Beleuchtung ist ebenso geringen jahreszeitlichen Schwankungen unterlegen, da durch die im Gebäudeinneren angeordneten Unterrichtsräume auch in den Sommermonaten mit mehr Tageslichtanteil nicht auf künstliche Beleuchtung verzichtet werden kann.

Für die Gesamtbewertung des Gebäudes unter EnEV-Randbedingungen ergibt sich ein Primärenergiebedarf von $411 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{NRFA}})$, was zu der in Abbildung 5-3 dargestellten Einordnung des Gebäudes und der integrierten Anlagentechnik führt. Zur Ermittlung des nach EnEV zulässigen Höchstwertes für den auf die Netto-Raumfläche bezogenen Primärenergiebedarf wird der Primärenergiebedarf eines nach EnEV-Vorgaben berechneten Referenzgebäudes mit gleicher Geometrie, Netto-Raumfläche, Ausrichtung, Nutzung wie das Bestandsgebäude und einer integrierten Referenzanlagentechnik berechnet. Der Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes wird mit einem je nach EnEV-Fassung unterschiedlichen Faktor multipliziert und ergibt den zulässigen Höchstwert für einen EnEV-konformen Neubau. In der für die Berechnung aktuell gültigen EnEV-Fassung von 2016 wird der 0,75-fache Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes veranschlagt.

Für modernisierte Altbauten ist dabei ein 40 % höherer Primärenergiebedarf zulässig. Damit ergibt sich ein zulässiger Höchstwert von 216 kWh/(m²_{NRFA}).



Abbildung 5-3: EnEV-Bewertung – Bestandssituation

Der Primärenergiebedarf von 411 kWh/(m²_{NRFA}) ist nicht ausschließlich auf die Anlagentechnik zurückzuführen. Nachfolgende Tabelle stellt die bilanzierten Wärmedurchgangskoeffizienten des Schulgebäudes den nach EnEV 2016 geforderten Werten gegenüber. Bis auf die Fenster der Verkehrsflächen (opake Außenbauteile für Zonen mit Temperatur unter 19 °C) liegen alle Wärmedurchgangskoeffizienten über den Anforderungswerten.

Tabelle 5-8: Anforderungen der EnEV 2016 an die Wärmedurchgangskoeffizienten

	Ist-Wert	mod. Altbau
Jahres-Primärenergiebedarf q_p [kWh/(m ² a)]	411,39	216,07
Mittlere U-Werte [W/(m ² K)]		
- Opake Außenbauteile	0,988	0,490
- Transparente Außenbauteile	2,948	2,660
Zonen mit Temperatur unter 19°C :		
- Opake Außenbauteile	0,925	0,700
- Transparente Außenbauteile	2,948	3,920

Die Endenergiebedarfe der Bestandsanlagen bezogen auf die eingesetzten Energieträger sind in Tabelle 5-9 dargestellt. Daraus resultiert ein Gesamtendenergiebedarf für Strom von 319941 kWh/a und für die Fernwärme von 879055 kWh/a. Diese Werte bilden die Grundlage für die folgende Ökobilanzierung und die Berechnung der Lebenszykluskosten.

Tabelle 5-9: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Bestandssituation

Energie-träger	Gesamt in kWh/a	Heizung in kWh/a	Kühlung in kWh/a	Lüftung in kWh/a	Beleuchtung in kWh/a
Strom-Mix	319.941	3.696	95.488	178.850	41.907
Fernwärme	879.055	879.055			

6 Grundsätzliche Überlegungen

6.1 DIN EN 15251

Die Auslegung der Modernisierungsvarianten erfolgt anhand der DIN EN 15251. Die Norm definiert „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden“. Das in Abschnitt 3 beschriebene „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ nimmt bei der Bewertung der operativen Temperatur und der relativen Luftfeuchte Bezug auf die Norm (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die DIN EN 15251 empfiehlt explizit die Kategorie II als Grundlage der Planung und Auslegung für den Neubau und die Sanierung von Gebäuden [39, S. 4]. Die Kategorie II der Norm deckt sich mit den Vorgaben des BNB, weshalb diese der Auslegung der Modernisierungsvarianten zu Grunde gelegt wird. Daraus resultiert eine operative Temperatur von 20 °C im Winter und 26 °C im Sommer als Grundlage für die Auslegung der Varianten. Mit diesen Werten als Auslegungsgrundlage ist sichergestellt, dass alle Modernisierungsvarianten die soziale Qualität des BNB bezüglich des thermischen Komforts bzw. der operativen Temperatur erreichen werden und gleichzeitig eine energieeffiziente Auslegung der Anlagentechnik erfolgt. Die Norm findet ebenfalls Anwendung bei der Berechnung des Auslegungsvolumenstroms, wo wiederum die Kategorie II der Norm angesetzt wird. Ein Volumenstrom der Kategorie II entspricht einem CO₂-Gehalt der Raumluft von 500 ppm über dem Gehalt der Außenluft. Mit einem anzunehmenden CO₂-Außenluftgehalt von 400 ppm ist danach die Einhaltung des durch die ASR A3.6 geforderten Maximalwerts von 1000 ppm in der Raumluft sichergestellt.

6.2 Freie Lüftung/RLT-Anlage

Die Fensterlüftung scheidet für die mit Außenluft zu versorgenden Unterrichts- und Nebenräume als Variante aus, weil diese durch die umgebenden Flure in der Mehrheit keine direkte Verbindung zur Fassade des Gebäudes haben und eine Nutzung der Fensterlüftung daher nicht möglich ist. Für die vorhandenen Unterrichtsräume mit einer Außenwand sind die Öffnungsflächen deutlich zu klein, um den erforderlichen Luftwechsel zu ermöglichen. Eine mechanische Belüftung ist für die Unterrichts- und Nebenräume unumgänglich. Für die an den Außenwänden gelegenen Verkehrsflächen ist die Fensterlüftung theoretisch denkbar, allerdings reichen die bestehenden Fenster nicht aus, um den Mindestluftwechsel nach ASR A3.6 zu gewährleisten. Die Gleichungen (17) bis (20) beschreiben die mit der Ermittlung der Mindestöffnungsflächen verbundene Berechnung.

$$A_{F,SL,e} = a_{F,SL,e} \cdot A_{VF} = \frac{1,05 \text{ m}^2}{10 \text{ m}^2} \cdot 197 \text{ m}^2 = 20,69 \text{ m}^2 \quad (17)$$

$$A_{F,KL,e} = a_{F,KL,e} \cdot n_P = 0,35 \frac{\text{m}^2}{\text{Pers.}} \cdot \frac{1 \text{ Pers.}}{10 \text{ m}^2} \cdot 197 \text{ m}^2 = 6,90 \text{ m}^2 \quad (18)$$

$$A_{F,SL,v} = n_F \cdot B_F \cdot H_F = 9 \cdot 1 \text{ m} \cdot 1,24 \text{ m} = 11,16 \text{ m}^2 \quad (19)$$

$$A_{F,KL,v} = n_F \cdot a_F \cdot (B_F + H_F) = 9 \cdot 0,2 \text{ m} \cdot (1 \text{ m} + 1,24 \text{ m}) = 4,03 \text{ m}^2 \quad (20)$$

Die durch die ASR A3.6 geforderte Mindestöffnungsfläche beträgt bei einseitiger Stoßlüftung ($a_{F,SL,e}$) und einer Raumtiefe, die kleiner als das 2,5-fache der Raumhöhe ist, $1,05 \text{ m}^2$ pro 10 m^2 Raumfläche. Damit ergibt sich aus Gl. (17) mit der aus dem Grundriss ermittelten vorhandenen Fläche der außenliegenden Verkehrswege (A_{VF}) eine erforderliche Mindestöffnungsfläche ($A_{F,SL,e}$) von $20,69 \text{ m}^2$. Die vorhandene Öffnungsfläche errechnet sich aus Gl. (19) anhand der Fensteranzahl (n_F) und deren Öffnungsfläche ($B_F \cdot H_F$) und beträgt $11,16 \text{ m}^2$. Für die einseitige kontinuierliche Lüftung ist der vorgeschriebene Wert für die Mindestöffnungsfläche ($a_{F,KL,e}$) $0,35 \text{ m}^2$ pro Person. Da die Personenbelegung für die Verkehrsflächen unbekannt ist, ist nach ASR A 3.6 ein Wert von einer Person auf 10 m^2 anzunehmen. Durch Gl. (18) ergibt sich so eine erforderliche Mindestöffnungsfläche für die kontinuierliche Lüftung ($A_{F,KL,e}$) von $6,90 \text{ m}^2$. Die vorhandene Öffnungsfläche ($A_{F,KL,v}$) wird aus dem Produkt der Fensteranzahl, der oberen Spaltbreite des gekippten Fensters (a_F) und der Summe aus Fensterbreite (B_F) und Fensterhöhe (H_F) nach Gl. (20) ermittelt und beträgt $4,03 \text{ m}^2$. Aus der Berechnung nach ASR A 3.6 [43, S. 8–15] resultiert das Ergebnis, dass die vorhandenen Öffnungsflächen weder für die Stoß- noch für die kontinuierliche Lüftung ausreichend sind, weshalb für die Verkehrsflächen ebenfalls eine mechanische Be- und Entlüftung vorzusehen ist. Auf die Betrachtung einer Hybridlösung mit Kombination von freier und mechanischer Lüftung wird verzichtet, da diese Lösung der Energieeffizienz eines potenziellen WRS der RLT-Anlage mangels Energierückgewinnung aus der verbrauchten Fortluft entgegensteht.

6.3 Innenraumlufthygiene

Für die Innenraumlufthygiene ist vor allem der Auslegungsvolumenstrom der RLT-Anlage entscheidend. Der Volumenstrom wird für die Unterrichts- und Nebenräume des versorgten Gebäudes personen- und flächenbezogen nach DIN EN 15251 ermittelt. Die Zu- und Abluftvolumenströme werden dabei gleichgroß gewählt. Die maximale Personenbelegung in den Unterrichtsräumen des Obergeschosses wird den Architektenplänen entnommen, zu der maximalen Schülerbelegung werden jeweils zwei Lehrkräfte addiert. Mit diesen Annahmen wird raumweise die Berechnung der Auslegungsvolumen-

ströme vorgenommen. Für die Chemieräume sind auf Grund der vorhandenen Laborabzüge größere Volumenströme vorzusehen. Für die acht Nebenräume im Obergeschoss wird eine maximale Raumbelastung mit drei Lehrkräften angenommen. Als Vorhaltung fürs Erdgeschoss werden 16 Unterrichtsräume mit der gleichen Belegung wie im Obergeschoss angenommen. Für die Verkehrsflächen des versorgten Gebäudes, die nach Abschnitt 6.2 ebenfalls über eine mechanische Lüftung versorgt werden müssen, wird mit keinem dauerhaften Aufenthalt von Personen gerechnet. Der Berechnung wird die Kategorie II der Norm zu Grunde gelegt. Die Kategorie II steht für ein normales Maß an Erwartungen an die Luftqualität und ist wie bereits erwähnt für Neubauten und zu renovierende Gebäude anzusetzen. Der Auslegungsvolumenstrom berechnet sich danach aus der Summe des personen- und flächenbezogenen Volumenstroms. Der flächenbezogene Volumenstrom wird anhand der Schadstoffemissionen durch das Gebäude ermittelt. Dabei wird in nicht schadstoffarme, schadstoffarme und sehr schadstoffarme Gebäude unterschieden. Für das Schulgebäude wird von einem nicht schadstoffarmen Gebäude ausgegangen, da anzunehmen ist, dass beim Bau in den 1970er Jahren kein Aufwand betrieben wurde, Baustoffe zu wählen, die Verunreinigungen nur in geringem Maße freisetzen. Für Kategorie II ergibt sich hier ein flächenbezogener Volumenstrom durch die Gebäudeemissionen (q_G) von $5,04 \text{ (m}^3/\text{h)/m}^2$. Für den personenbezogenen Volumenstrom (q_P) wird nach Kategorie II der Wert von $25,2 \text{ (m}^3/\text{h)/Pers.}$ verwendet. Mit dem Auslegungswert für die Personenanzahl (n_P) und der Netto-Raumfläche der versorgten Zone (A_{NRF}) ergibt sich die Gl. (21). Basierend auf dieser Gleichung werden die Auslegungsvolumenströme berechnet. Die Berechnung erfolgt in Gl. (22) am Beispiel des „Chemie Raum 1“ im Obergeschoss. Die Berechnung der Auslegungsvolumenströme der restlichen Räume erfolgt über ein Excel-Arbeitsblatt, die Ergebnisse sind dem Anhang E beigefügt.

$$\dot{V} = n_P \cdot q_P + A_{NRF} \cdot q_G = n_P \cdot 25,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + A_{NRF} \cdot 5,04 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \quad (21)$$

$$\dot{V}_{OG-CR1} = 30 \frac{\text{Pers.}}{\text{Raum}} \cdot 12,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 94,57 \text{ m}^2 \cdot 5,04 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} = 1232,63 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (22)$$

Der „Chemie Raum 1“ weist in Bezug auf die RLT die höchsten Anforderungen auf, da das Vorhandensein von Laborabzügen und eines Lösungsmittelschranks eine gesonderte Abluft notwendig machen. Die Laborabzüge in den Chemieräumen haben einen maximalen Abluftvolumenstrom von $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Raum. Der nach Norm berechnete Auslegungsvolumenstrom ist geringer, weshalb dieser an die Abluftvolumenströme der Abzüge angepasst wird. Dieses Vorgehen ist notwendig, da der auf die Netto-Raumflä-

che bezogene Abluftvolumenstrom größer als $9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ist. Für den Abzug des vorhandenen Lösungsmittelschranks im „Chemie Raum 1“ werden zusätzlich noch einmal $60 \text{ m}^3/\text{h}$ berücksichtigt [52, S. 2070]. Aus dem gewählten Qualitätsniveau 2 des BNB ergibt sich die Forderung eines personenbezogenen Außenluftvolumenstroms von $36 \text{ (m}^3/\text{h)/Pers.}$ für die Nutzflächen des Gebäudes. Tabelle 6-1 fasst die berechneten Auslegungsvolumenströme noch einmal für die im Rahmen der Endenergiebedarfsberechnung erstellten Nutzungszonen zusammen und stellt zusätzlich die dazugehörigen personenbezogenen Volumenströme dar.

Tabelle 6-1: Auslegungsvolumenströme der Modernisierungsvarianten

Zone	Personenanzahl	Auslegung nach DIN EN 15251: Kategorie II	Personenbezogener Volumenstrom
Verkehrsfläche (EG)		1725 m^3/h	
Unterrichtsräume (EG)	480 Pers.	17678 m^3/h	36,8 $\text{(m}^3/\text{h)/Pers.}$
Gesamt (EG)	480 Pers.	19403 m^3/h	
Verkehrsflächen (OG)		1725 m^3/h	
Unterrichtsräume (OG)	240 Pers.	11891 m^3/h	49,5 $\text{(m}^3/\text{h)/Pers.}$
Nebenträume (OG)	24 Pers.	2760 m^3/h	115 $\text{(m}^3/\text{h)/Pers.}$
Gesamt (OG)	264 Pers.	16376 m^3/h	
Gesamt (EG u. OG)	744 Pers.	35779 m^3/h	48,1 $\text{(m}^3/\text{h)/Pers.}$

Aus der Tabelle wird deutlich, dass die personenbezogenen Auslegungsvolumenströme nach DIN EN 15251 für alle Nutzflächen sowie der Gesamt-Auslegungsvolumenstrom durchweg über dem vom BNB geforderten Wert von $36 \text{ (m}^3/\text{h)/Pers.}$ liegen. Damit ist die Einhaltung des Qualitätsniveaus 2 des BNB bezüglich der sozialen Qualität „Innenraumlufthygiene“ garantiert. Der ermittelte Auslegungsvolumenstrom dient daher als Grundlage für die raumluftechnische Anlage der Modernisierungsvarianten und beträgt $35779 \text{ m}^3/\text{h}$. Der Auslegungsvolumenstrom beträgt nur noch ca. 73 % des Volumensstroms der Bestandsanlage. Der höhere Volumenstrom der Bestandsanlage ist im Wesentlichen auf die Bauart in Form einer 2-Kanal-Anlage zurückzuführen. Diese fördert Kalt- und Warmluft in separaten Luftkanälen, was eine größere zu fördernde Luftmenge nach sich zieht. Außerdem kann der Volumenstrom der Bestandsanlage auf Grund der zu erbringenden Heizlast nicht beliebig abgesenkt werden.

6.4 Thermischer Komfort im Winter

6.4.1 Operative Temperatur

Der Nachweis für die Einhaltung der in Abschnitt 6.1 festgelegten operativen Temperatur im Winter erfolgt über die Heizlastberechnung nach DIN EN 12831, Beiblatt 1 (Nati-

onaler Anhang: Deutschland). Die Heizlastberechnung wird mit der Software „TGA Heizung 5“⁸ durchgeführt. Zunächst wird die Norm-Außentemperatur auf Grundlage der geographischen Lage des Gebäudes ermittelt. Für Hamburg ist eine Norm-Außentemperatur von -12 °C anzusetzen. Da das Gebäude im Rahmen der Endenergiebilanzierung der Bestandsanlagen bereits geometrisch und bauphysikalisch erfasst wurde (vgl. Abschnitt 5.1.2), kann auf diesen Schritt verzichtet werden und das Gebäude wird mittels Exportfunktion direkt an die Software zur Heizlastberechnung übergeben. Für die Heizlastberechnung werden also die gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten wie für die Endenergiebilanzierung (Tabelle 5-2) verwendet. Den Räumen des versorgten Gebäudes werden auf Grundlage der Nutzung verschiedene Konditionierungen zugewiesen. Die Differenzierung fällt nicht so detailliert wie bei der Endenergieberechnung aus. Es wird in drei Raumkategorien nach Unterrichtsräumen, Fluren und unbeheizten Bereichen unterschieden. Die unbeheizten Bereiche sind die Abhangdecken im Ober- und Erdgeschoss sowie der Kriechkeller. Ober- und Erdgeschoss werden gleichermaßen in Flure mit einer Norm-Innentemperatur von 15 °C und Unterrichtsräume gemäß des BNB Kategorie 2 bzw. der DIN EN 15251 Kategorie II mit einer Temperatur von 20 °C eingeteilt, so dass für Ober- und Erdgeschoss eine Einteilung wie in Abbildung 6-1 dargestellt resultiert.

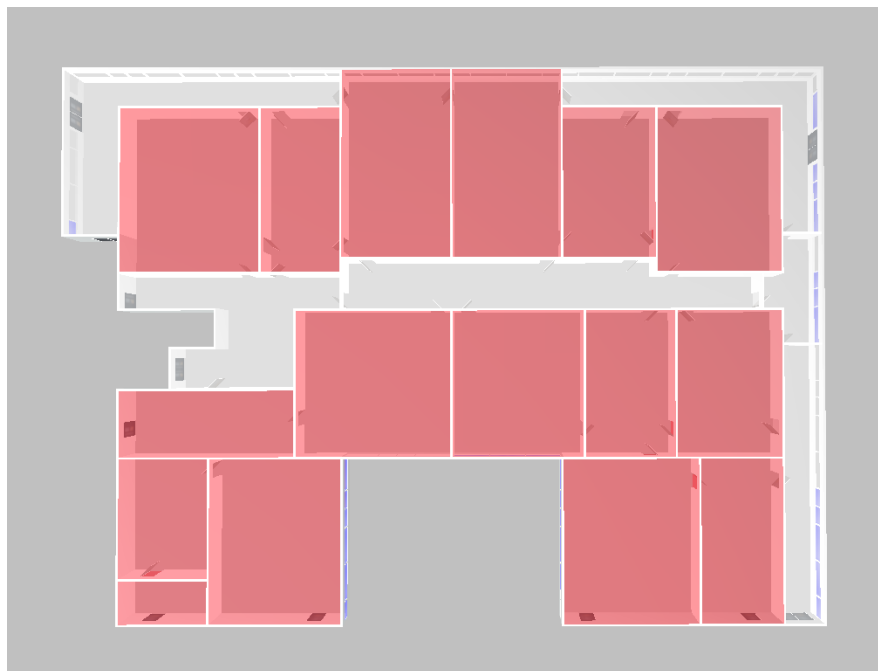


Abbildung 6-1: Raumeinteilung nach DIN EN 12831 (Ober- und Erdgeschoss)

Die im vorausgegangenen Abschnitt ermittelten Volumenströme der RLT-Anlage werden im Rahmen der Heizlastberechnung berücksichtigt und den jeweiligen Räumen zu-

⁸ www.hottgenroth.de

gewiesen, da sie in Abhängigkeit von der Zulufttemperatur Auswirkungen auf die Lüftungswärmeverluste des Gebäudes haben. Als Ergebnis der Berechnung ergeben sich die Raumheizlasten und die Gebäudeheizlast des versorgten Gebäudes. Die Raumheizlasten berücksichtigen alle Transmissions- und Lüftungswärmeverluste der Räume untereinander sowie über die Gebäudehülle nach außen. Die Raumheizlasten werden benötigt, um die notwendigen Leistungen der Raumheizeinrichtungen zu bestimmen. Die Gebäudeheizlast dient der Auslegung des Wärmeerzeugers. Die Gebäudeheizlast beinhaltet nur die Transmissionswärmeverluste durch die Gebäudehülle nach außen und anteilig die Lüftungswärmeverluste. Die Gebäudeheizlast ist daher geringer als die Summe der Raumheizlasten und beträgt für das betrachtete Schulgebäude 157 kW. Nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Heizlastberechnung für das Obergeschoss des Schulgebäudes.

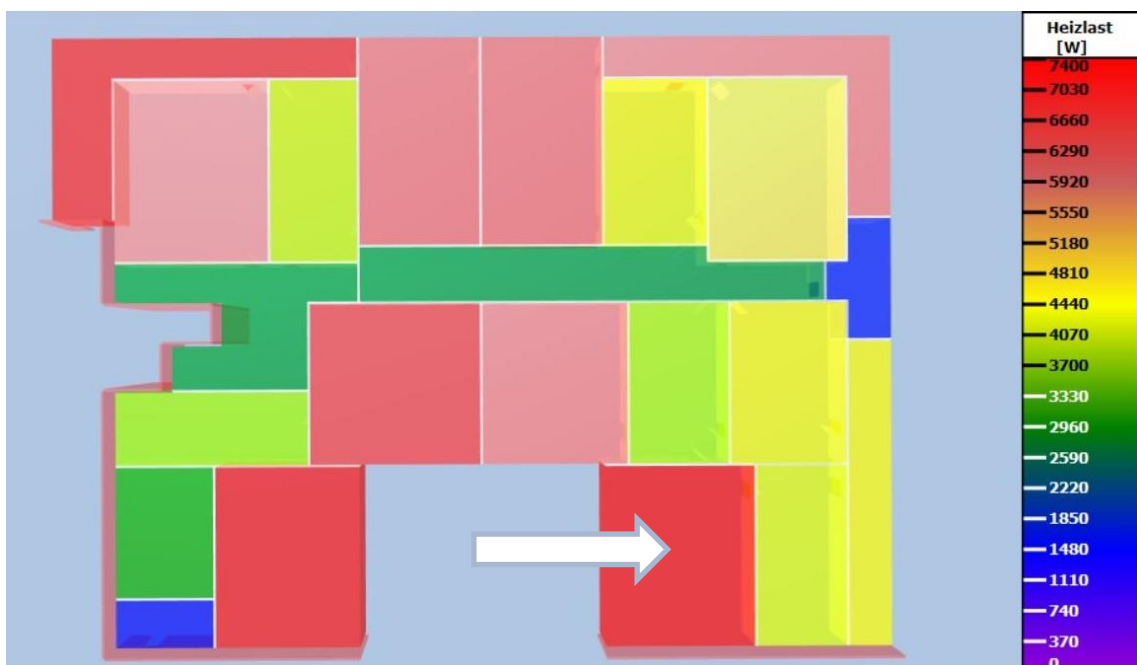


Abbildung 6-2: Raumheizlasten des Schulgebäudes (Obergeschoss)

Die Abbildung basiert auf einer ebenfalls durchgeführten thermischen Gebäudesimulation nach VDI 6007 und nicht auf der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831, so dass bedingt durch andere Klimadaten und das andere Berechnungsverfahren geringe Abweichungen von der Berechnung nach DIN EN 12831 auftreten. Qualitativ ähneln sich die Ergebnisse beider Verfahren. Aus der Grafik wird deutlich, dass die ans Atrium grenzenden Räume „Chemie Raum 02“ und „Physik Raum 02“ die höchsten Raumheizlasten aufweisen. Die Heizlast des „Physik Raum 02“ ist mit 6,85 kW nach DIN EN 12831 bzw. 7,35 kW nach VDI 6007 am höchsten und wird daher im Folgenden beispielhaft für die Auslegung der Raumheizeinrichtungen der Modernisierungsvarianten verwendet. Die

Raumheizlast des „Physik Raum 02“ ist dem Anhang F beigefügt. Die Heizlastberechnung fürs gesamte Schulgebäude ist im digitalen Anhang zu finden.

6.4.2 Luftfeuchte

Die Berechnung der Luftfeuchte im Winter wird am Beispiel des Raumes mit dem größten Außenluftluftvolumenstrom durchgeführt, da dort der Effekt der „trockenen Winterluft“ am deutlichsten zum Tragen kommt. Dies ist für das Obergeschoss der „Chemie Raum 1“. Für die Berechnung wird der Auslegungsvolumenstrom nach DIN EN 15251 verwendet, da für die Laborabzüge über einen Schultag gesehen nur mit einem kurzzeitigen Betrieb zu rechnen ist. Die Wasseraufnahme der Raumluft durch die Nutzenden (Δx) ergibt sich mit der stündlich abgegebenen Wassermenge (w), dem Auslegungsvolumenstrom (q) und der Dichte der Luft (ρ_L) aus Gl. (25). Für die personenspezifische Wasserdampfabgabe wird nach VDI 2078 bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C ein Wert von 35 g/h angenommen [13, S. 21]. Der Gleichzeitigkeitsfaktor der variablen Volumenstromregelung findet keine Berücksichtigung, da er von der Personenbelegung abhängig ist.

$$\Delta x_{\text{OG-CR1}} = \frac{w}{\dot{V}_{\text{OG-CR1}} \cdot \rho} = \frac{30 \text{ Pers.} \cdot 35 \frac{\text{g}}{\text{h} \cdot \text{Pers.}}}{1233 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,71 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \approx 0,7 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \quad (23)$$

Mit der Auslegungstemperatur nach DIN EN 12831 von -12 °C und einer angenommenen relativen Feuchte von 90 % für die Außenluft im Winter ergibt sich im Mollier-Diagramm für die Raumluft eine relative Feuchte von 13,3 %. Die absolute Feuchte der Raumluft beträgt in diesem Fall 1,91 g/kg trockene Luft. Die relative Luftfeuchte liegt deutlich unter dem Mindestwert des BNB von 25 %, weshalb die Zuluft befeuchtet werden muss.

Tabelle 6-2: Luftfeuchtegehalte im Winter

Luftzustand	Temperatur	Relative Feuchte	Absolute Feuchte
	°C	%	g/kg
Außenluft	-12,0	90	1,2
Raumluft	20,0	13,3	1,9

6.5 Thermischer Komfort im Sommer

6.5.1 Operative Temperatur

Der Nachweis für das Teilkriterium „Operative Temperatur“ im Sommer erfolgt über die Kühllastberechnung nach VDI 2078. Das Verfahren nach VDI 2078 basiert auf einem Rechenverfahren der VDI 6007 „Berechnung des instationären thermischen Verhaltens

von Räumen und Gebäuden“ und ermöglicht die Simulation des Gebäudes unter Berücksichtigung der vorhandenen Anlagentechnik. Als Ergebnis resultieren Gebäude- und Raumkühllasten, die für die Auslegung der Kühlung benötigt werden. Für die Kühllastberechnung werden die gleichen Gebäudedaten wie für die Endenergiebedarfs- und Heizlastberechnung verwendet, zusätzlich wird die Verschattung durch benachbarte und angrenzende Gebäude berücksichtigt. Für die im Rahmen der Endenergiebedarfsberechnung gebildeten Zonen werden erneut Nutzungsprofile gebildet. Die Nutzungsprofile umfassen die Sollwerte für Heizung und Kühlung, den Infiltrationsluftwechsel auf Grund der Luftdichtheit des Gebäudes, den vorhandenen Sonnenschutz und die Wärmeabgabe durch die vorhandenen Personen und Maschinen. Die Nutzungsprofile werden nach Schul- und Wochenendtagen differenziert, wobei für die Schultage für die Unterrichtsräume eine Nutzung in der Zeit von 8:00 bis 15:00 Uhr angenommen wird. Für die Verkehrsflächen wird für die Kühlung kein Sollwert definiert, da eine Kühlung nur für die Nutzflächen vorgesehen ist. Für die restlichen Räume wird für die Nutzungszeit der Sollwert gemäß Qualitätsniveau 4 des BNB bzw. Kategorie II der DIN EN 15251 auf 26 °C festgelegt. Die Luftdichtheit des Gebäudes bzw. der daraus resultierende Infiltrationsluftwechsel wird gemäß DIN V 18599 für alle Zonen aus der Endenergiebedarfsrechnung zu 0,28 1/h übernommen. Die Personenanzahl wird wie in Tabelle 6-1 dargestellt gewählt, wobei von einem Belegungsgrad von 80 % ausgegangen wird. Für die Personen wird eine sitzende Aktivität mit einer Wärmeabgabe von 80 W/m² und einem Konvektivanteil von 50 % bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C angenommen. Für die Wärmeabgabe durch Geräte wird für die Nutzflächen ein pauschaler Wert von 4 W/m² gemäß DIN V 18599 Nutzungsprofil „Klassenzimmer“ gewählt. Den Unterrichtsräumen mit Außenfenstern und den an Außenwände grenzenden Verkehrsflächen des Obergeschosses wird ein außenliegender manuell zu betätigender Sonnenschutz zugewiesen. Mit diesen Eingabewerten und unter Berücksichtigung der Außenluftvolumenströme einer RLT-Anlage, die über ein WRS mit einem Wirkungsgrad von 55 % verfügt und die Außenluft mit einer Zulufttemperatur von 20 °C ins Gebäude einbringt, resultiert am 19. Juli zwischen 13 und 14 Uhr eine Auslegungs-Kühllast von 84,51 kW. Abbildung 6-3 zeigt die Ergebnisse der thermischen Gebäudesimulation nach VDI 6007 für das Obergeschoss. Die Werte der Abbildung weichen ebenfalls geringfügig von der Kühllastberechnung nach VDI 2078 ab, da sich die zu Grunde liegenden Klimadaten unterscheiden. Die Kühllast des Schulgebäudes beträgt nach VDI 6007 88,94 kW.



Abbildung 6-3: Raumkühllasten des Schulgebäudes (Obergeschoss)

Aus der Abbildung wird deutlich, dass wiederum der „Physik Raum 02“ die höchsten Lasten aufweist. Am Beispiel des „Physik Raum 2“ wird daher die Kälteversorgung des Gebäudes dimensioniert. Die Kühllastberechnung des gesamten Schulgebäudes ist als digitaler Anhang vorhanden. Wie sich der Raum bei nicht vorhandener Kühlung in einem extremen Sommer thermisch verhält, wird nachfolgend mit der Gebäudesimulation nach VDI 6007 und den Klimadaten des „Deutschen Wetter Dienstes“ für das Testreferenzjahr 2011 demonstriert. Die beiden nachgestellten Abbildungen zeigen das thermische Verhalten des Raumes zunächst mit Kühlung und dann ohne Kühlung am 9. August. Die grauen und violetten Graphen stellen die Temperatur der Innenluft bzw. die operative Temperatur dar. Die Außenluft ist in hellblau und die Nutzungszeit mit dem Sollwert von 26 °C für die Raumlufttemperatur ist dunkelblau dargestellt. Bei den Temperaturen handelt es sich um Stundenmittelwerte.

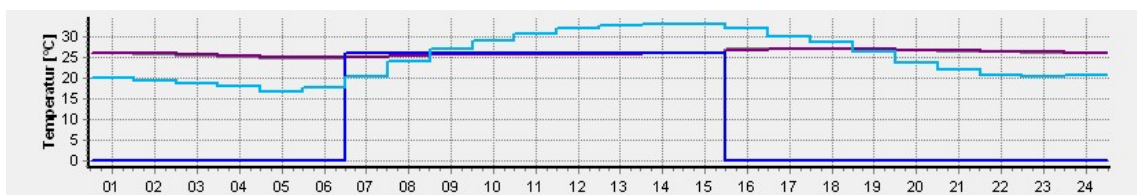


Abbildung 6-4: Thermisches Verhalten des „Physik Raum 2“ mit Kühlung

Abbildung 6-4 stellt das thermische Verhalten des Raumes unter Annahme der Kühlung mit der nach VDI 2078 ermittelten maximalen Kühllast dar. Die Innenluft- und operative Temperatur bleibt für die Nutzungszeit auf dem Sollwert von 26 °C und auch danach relativ konstant.

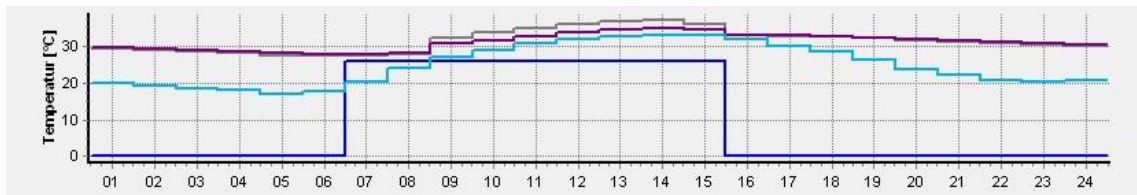


Abbildung 6-5: Thermisches Verhalten des „Physik Raum 2“ ohne Kühlung

Abbildung 6-5 zeigt das thermische Verhalten des Raumes ohne Kühlung. Trotz vorhandenem Sonnenschutz steigt die Innenlufttemperatur zwischen 13 und 14 Uhr auf 37,36 °C, die operative Temperatur beträgt in diesem Zeitraum 35,2 °C. Damit beträgt die maximale operative Temperaturüberschreitung 9,2 °C. Der Raum ist nach ASR A3.5 zu diesem Zeitpunkt nicht mehr als Arbeitsraum geeignet [37, S. 7]. Die operativen Über-temperaturgradstunden bzw. die Kühlgradstunden (G_K) betragen für das Testreferenzjahr und den Fall ohne Kühlung 1020,7 Kh. Mit einer angenommenen Nutzungszeit von 1400 h/a nach DIN V 18599 ergibt sich ohne Kühlung des Raumes die Überschreitungshäufigkeit ($g_{k,max}$) gemäß DIN EN 15251 nach Gl. (24).

$$g_{k,max} = \frac{G_K}{(h_{Nutz} \cdot d_{Nutz}) \cdot \Delta\vartheta_{max}} = \frac{1020,7 \text{ Kh}}{\left(7 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 200 \frac{\text{d}}{\text{a}}\right) \cdot 2 \text{ K}} = 0,3645 = 36,45 \% \quad (24)$$

Für das Qualitätsniveau 4 des BNB ist eine maximale Überschreitungshäufigkeit von 5 % mit einer maximalen Temperaturdifferenz von 2 K zulässig. Um das Qualitätsniveau 4 zu erfüllen, wird für die Modernisierungsvarianten eine Kühlung des Gebäudes vorgesehen.

6.5.2 Luftfeuchte

Die Wasseraufnahme der Raumluft im Sommer wird für den Unterrichtsraum mit dem geringsten Außenluftvolumenstrom durchgeführt, weil die Feuchteabgabe durch die anwesenden Personen in diesem Fall am meisten Einfluss hat. Dies ist der „Multi Raum 2“. Für die personenspezifische Wasserdampf-abgabe wird nach VDI 2078 bei einer Raumlufttemperatur von 26 °C ein Wert von 65 g/h angenommen [13, S. 21]. Ansonsten wird die Berechnung in Analogie zur Luftfeuchteberechnung im Winter durchgeführt.

$$\Delta x_{OG-MR1} = \frac{w}{\dot{V}_{OG-MR1} \cdot \rho} = \frac{30 \text{ Pers.} \cdot 65 \frac{\text{g}}{\text{h} \cdot \text{Pers.}}}{1079 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,51 \approx 1,5 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \quad (25)$$

Mit den Auslegungsannahmen der VDI 2078 ergibt sich bei einer Außenlufttemperatur von 31 °C und einer relativen Luftfeuchte von 43 % im Mollier-Diagramm für die Raumluft eine relative Feuchte von 64,1 % und ein absoluter Wert von 13,5 g/kg trockene Luft. Dies liegt über den Vorgabewerten des BNB von 60 % bzw. 12 g/kg. Wie oft dieser Fall in der Praxis vorliegt, lässt sich durch eine dynamische Raumluftsimulation oder eine

einfache dynamische Feuchtebilanzierung anhand von Wetterdaten überprüfen. Im Rahmen dieser Arbeit wird aber wegen der relativ geringen Abweichung von den Vorgaben des BNB und aus energetischen Gründen auf eine Befeuchtung der Zuluft verzichtet. Auch nach der DIN EN 15251 ist die Raumluft auf Grund des geringen Einflusses auf das thermische Empfinden üblicherweise nicht zu entfeuchten, trotzdem muss das Unterkriterium des BNB „Relative Luftfeuchte“ im Sommer durch den Verzicht auf die Entfeuchtung als nicht eingehalten angesehen werden.

Tabelle 6-3: Luftfeuchtegehalte im Sommer

Luftzustand	Temperatur	Relative Feuchte	Absolute Feuchte
	°C	%	g/kg
Außenluft	31,0	42,7	12,0
Raumluft	26,0	64,1	13,5

6.6 Variantenübersicht

Generell kann die Luftzufuhr und -aufbereitung durch mehrere dezentrale RLT-Geräte oder eine zentrale RLT-Anlage erfolgen. Um den Vorgaben des BNB und damit der Nachhaltigkeit Rechnung zu tragen, wird den Modernisierungsvarianten eine zentrale RLT-Anlage zu Grunde gelegt. Dies hat den Vorteil, dass die im zu versorgenden Gebäude bereits vorhandenen Schächte der Bestandsanlage für die Verteilung genutzt werden können. Außerdem ist beim Einsatz von vielen dezentralen Einzelgeräten mit einem erhöhten Wartungs- und Instandhaltungsaufwand zu rechnen. Darüber hinaus kann die bestehende RLT-Anlage mit vergleichsweise geringem technischen und finanziellen Aufwand an ein neues Anlagenkonzept angepasst und umgerüstet werden. Aus Abschnitt 4 ergeben sich unter Berücksichtigung der Energieeffizienz für die Modernisierung der Bestandsanlagen nachfolgende Rahmenbedingungen.

RLT-Anlage:

- Luft-Wasser-Anlage
- Niederdruck-Anlage
- Spezifische Ventilatorleistung $\leq 2000 \text{ Ws/m}^3$
- Einkanalanlage
- VVS-Anlage
- WRS mit Energieeffizienzgrad $\geq 55 \%$

Aus energetischer Sicht sind im Allgemeinen für die Lüftung von Unterrichtsräumen in Schulen bedarfsgesteuerte Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung zu bevorzugen

[52, S. 1990–1992]. Daher wird die RLT-Anlage zunächst auf ein Luft-Wasser-System umgerüstet (Variante 1). Auf Grund der höheren Energieeffizienz gegenüber einer Zweikanal-Hochdruck-Anlage wird die Anlage außerdem als Einkanal-Niederdruck-System ausgeführt, das mit einem bedarfsgesteuerten Volumenstrom betrieben wird. In der zweiten Variante wird ein WRS mit einem Energieeffizienzgrad $\geq 55\%$ in die Anlage integriert. In einer dritten Variante wird die Erneuerung der Zu- und Abluftventilatoren beschrieben.

Wärmeversorgungsanlage:

- Heizkörper/Flächenheizung
- Effiziente, bedarfsausgelegte und differenzdruckgeregelte Pumpen
- Auf Regelung abgestimmte und optimierte Ventile
- Hydraulisch abgeglichenes System

Als bestes Heizungssystem für die Beheizung von Schulen gilt die zentrale Warmwasserpumpenheizung [52, S. 1374–1375]. Durch den bestehenden Anschluss- und Nutzungszwang der Fernwärme ergeben sich im Bereich der Wärmeerzeugung keinerlei Optimierungsmöglichkeiten. Es stellt sich die Frage, wie die Wärmeübergabe in den einzelnen Räumen erfolgen soll. Generell sind Radiatoren, Konvektoren und Flachheizkörper sowie Flächenheizungen möglich. Nasssysteme (einbetonierte Flächenheizungen) sind dabei auf Grund ihrer Trägheit nicht zweckmäßig. Trockensysteme sind geeigneter, decken meist jedoch nur 60 – 70 % der Heizlast, so dass die verbleibende Heizlast über schnell regelbare Zusatzheizkörper abgedeckt werden muss [52, S. 1375]. Für die Modernisierung wird daher ein hydraulisch abgeglichenes Warmwasserpumpensystem mit Flachheizkörpern in Verbindung mit effizienten, bedarfsausgelegten und differenzdruckgeregelten Pumpen sowie auf die Regelung abgestimmten und optimal ausgelegten Regelventilen gewählt.

Abbildung 6-6 zeigt die geordnete Jahresdauerlinie des Wärme- und Kältebedarfs des Schulgebäudes. Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass die Jahresbetriebszahl der Heizungsanlage ca. 4500 h beträgt. Für die Kälteanlage ergibt sich eine sehr viel geringere Jahresnutzungszeit von nur ca. 600 h. Das Energieeinsparpotenzial wird daher als eher gering eingeschätzt, weshalb auf detailliertere Betrachtungen im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet wird. Die Umwälzpumpen des Primär- und Sekundärkreislaufs werden aber im Rahmen der Variante 1 durch drehzahlgeregelte, bedarfsgesteuerte Hocheffizienzpumpen ersetzt.

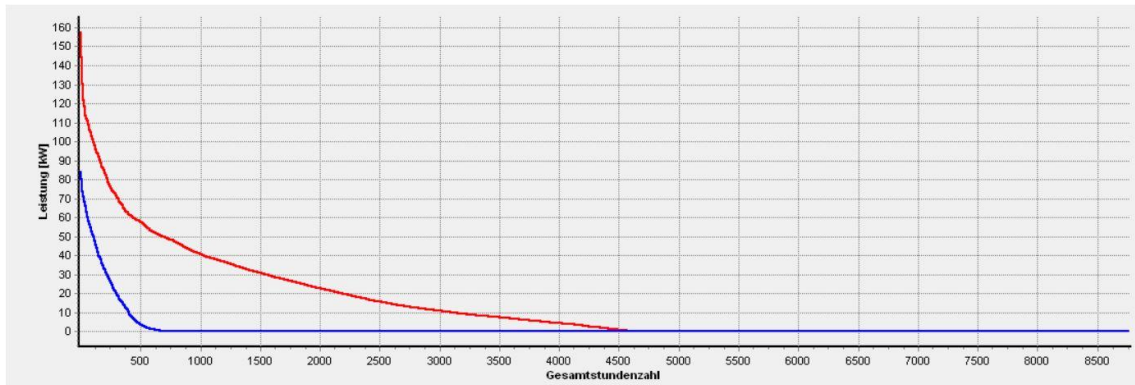


Abbildung 6-6: Jahresdauerlinie des Wärme- und Kältebedarfs

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben zunächst jeweils kurz die für die Modernisierungsvariante notwendigen Änderungen an der Heizungs- und RLT-Anlage sowie eine schematische Übersicht. Anschließend wird eine überschlägige Dimensionierung der jeweiligen Variante anhand eines Referenzraumes vorgenommen. Die so ermittelten Bauteilmengen und -dimensionen werden zunächst auf den Quadratmeter Netto-Raumfläche bezogen und dann auf das gesamte Schulgebäude hochgerechnet. Die resultierenden Werte dienen als Eingangsgrößen für die Ökobilanz und die Berechnung der Lebenszykluskosten. Die Endenergiebedarfe der Modernisierungsvarianten werden nach der DIN V 18599 mit dem bereits in Abschnitt 5.1 beschriebenen Vorgehen ermittelt.

7 Variante 1

7.1 Systemübersicht

Bei allen Modernisierungsvarianten wird für die Wärmeerzeugung die vorhandene Fernwärme-Übergabestation genutzt. Die Wärme wird von der Übergabestation im Leitungsnetz der zentralen Warmwasserpumpenheizung über die Unterverteilungen in Etagenringen an die Flachheizkörper in den Räumen des Schulgebäudes übergeben. Für Ober- und Erdgeschoss werden jeweils zwei Etagenringe vorgesehen, die an die in die jeweiligen Etagen verlaufenden Bestandsleitungen angeschlossen werden. Die Stränge werden über eine Einspritzschaltung reguliert. Die Flachheizkörper werden nach dem Tichelmann-System angeschlossen. Da die Summe der Leitungslängen für alle Wärmeverbraucher bei diesem System annähernd gleich ist, ergibt sich ein hydraulisch abgeglichenes System. Die Umwälzpumpen der Etagenringe werden mit variablem Differenzdruck geregelt. Diese Regelungsart eignet sich durch geringere Förderdrücke im Teillastbetrieb im Vergleich zur Konstantdruckregelung besonders in Verbindung mit dem Tichelmann-System [52, S. 1273].

Die RLT-Anlage wird auf eine 1-Kanal-Niederdruck-Anlage mit einer variablen Volumenstromregelung umgerüstet. Abbildung 7-1 zeigt das Schema der RLT-Anlage.

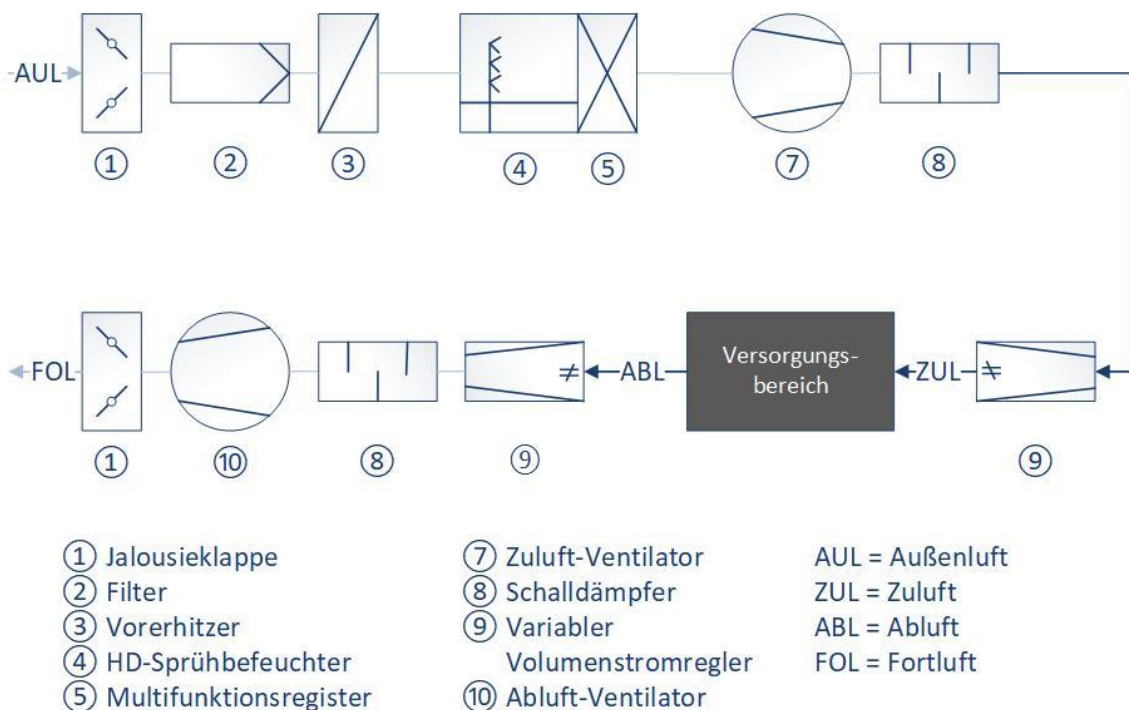


Abbildung 7-1: RLT-Anlage der Variante 1

Die bestehenden Ventilatoren werden mit einem Frequenzumrichter nachgerüstet. Die Steuerung erfolgt differenzdruckgeregelt. Im Winterbetrieb wird die Zuluft im Schulbetrieb konstant auf 20 °C temperiert und zusätzlich nach Bedarf durch einen Hochdruck-Sprühbefeuchter befeuchtet. Der bestehende Umlaufsprühbefeuchter wird aus hygienischen und energetischen Gründen ersetzt. Der Hochdruck-Sprühbefeuchter wird in Kombination mit einem Multifunktionsregister, das als Tropfenabscheider und Nacherhitzer dient, anstelle des bestehenden Umlaufsprühbefeuchter in die RLT-Anlage eingebaut. Die Befeuchterleistung wird über eine drehzahlgeregelte Pumpe stufenlos geregelt. Im Befeuchtungsbetrieb verdunstet das über die Düsen des Befeuchters eingebrachte fein zerstäubte Wasser im Luftstrom bzw. beim Auftreffen auf das beheizte Multifunktionsregister. Zusätzlich wird die so befeuchtete Luft durch das Multifunktionsregister auf die Zulufttemperatur von 20 °C erwärmt. Das Heizwasser wird hierbei im Gleichstrom geführt, so dass der Wasserverlust unter 5 % liegt und eine Wasserrückführung entfällt. Durch die Geometrie des Registers gelangen keine Tropfen ins Luftkanalnetz. Als Befeuchterwasser wird durch Umkehrosmose aufbereitetes Permeat verwendet. Der Hochdruck-Sprühbefeuchter entspricht allen Anforderungen der VDI 6022 „Raumlufttechnik, Raumluftqualität – Hygieneanforderungen an Raumlufttechnische Anlagen und Geräte“ und benötigt weder Chemikalien noch umlaufendes Wasser. Die Aufbereitung des Befeuchterwassers übernimmt eine Umkehrosmoseanlage. Im Sommerbetrieb kühlt die RLT-Anlage die Zuluft nach Bedarf mittels Multifunktionsregister im Gegenstrombetrieb. Für die bedarfsabhängige Regelung der Anlage werden alle Räume mit Temperatursensoren und die Unterrichtsräume zusätzlich mit CO₂-Sensoren ausgestattet. Im Winterbetrieb erfolgt die Regelung der Anlage nach den CO₂-Sensoren, im Sommerbetrieb wird die Anlage bei der Überschreitung einer Raumtemperatur von 26 °C über eine Vorrangschaltung temperaturgeführt betrieben. Außerhalb des Schulbetriebs wird die Anlage auf den bauphysikalisch notwendigen Außenluftvolumenstrom mit einem Luftwechsel von 0,5 1/h abgesenkt. Die Rahmendaten der Heizungs- und RLT-Anlage sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Heizungsanlage

Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Fernwärme aus fossiler Kraft-Wärme-Kopplung • Energieträger: Warmwasser, niedrige Temperatur 105 °C Dämmklasse: Sekundär-/Primärseite = 1/2 • Aufstellung: außerhalb der Zonen im unbeheizten Gebäudebereich • Betriebsweise: außentemperaturgeführte Regelung mit Nacht- und Wochenendabsenkung
Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> • kein Heizungspufferspeicher vorhanden
Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Vorlauf-Temperatur: 70 °C • Rücklauf-Temperatur: 50 °C

	<ul style="list-style-type: none"> • Zweirohrnetz (Etagenring) mit Dämmung gemäß EnEV (U-Wert = 0,035 W/mK) • Strang- und Anbindeleitungen in beheizter Umgebung • Länge der Verteilleitungen (VL und RL) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsflächen und Unterrichtsräume (OG und EG): 124 m ▪ RLT-Anlage: 124 m • Länge der Strangleitungen (VL und RL) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsflächen (OG und EG): 2x 250 m ▪ Unterrichtsräume (OG und EG): 2x 350 m • Länge der Anbindeleitungen (VL und RL) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsflächen (OG und EG): 2x 40 m ▪ Unterrichtsräume (OG und EG): 2x 15 m ▪ RLT-Anlage: 30 m • Heizungspumpen: leistungsgeregt, Proportionaldruckregelung, bedarfsausgelegt • Hydraulisch abgeglicher Heizungskreislauf
Übergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeträgermedium: Wasser • Versorgung des Heizregisters der RLT-Anlage sowie der Heizkörper der Verkehrsflächen und Unterrichtsräume • Regelung: Thermostat (2K)/P-Regler

Tabelle 7-2: RLT-Anlage

Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Zentrale Zu- und Abluftanlage zur vollständigen Belüftung • Betriebsweise: bedarfsgeregt • Variabler Volumenstrom • Auslegungsvolumenstrom: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 35.800 m³/h ▪ 41.900 m³/h im Kühlbetrieb • Heizung der Zuluft auf 20 °C im Winter • Kühlung der Raumluft auf 26 °C im Sommer • Befeuchtung: Hochdruck-Sprühbefeuchter Regelung: stufenlos geregelt Soll-Wert: 25 % relative Feuchte Pumpe: drehzahlgeregt, bedarfsausgelegt Leitungslänge des Pumpenverteilkreises: 30 m
Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> • SFP des Zu- und Abluftventilators: 2,00 kW/(m³s) • Alle Luftkanäle nicht an Außenluft
Übergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeträgermedium: Luft • Versorgung der Verkehrsflächen und Unterrichtsräume über Drallluft-Auslässe

7.2 Dimensionierung

7.2.1 Heizungsanlage

Verteilung

Die Beschreibung der Heizungsanlage erfolgt ab dem Unterverteiler des Schulgebäudes, da die restliche Anlage als Bestand unverändert bleibt. Vom Unterverteiler des Schulgebäudes erfolgt die Verteilung für Ober- und Erdgeschoss in jeweils zwei Heizkreisen, die nach dem Tichelmann-System mit gleichlangen Leitungslängen für Vor- und Rücklauf jedes Heizkörpers angeschlossen werden. Die Vor- und Rücklauftemperaturen des Warmwasserpumpensystems betragen wie bereits bei den Bestandsanlagen beschrieben 70 bzw. 50 °C. Die Leitungen werden für das Obergeschoss zwischen Abhangdecke des Erdgeschosses und Geschosdecke und für das Erdgeschoss im Kriechkeller verlegt, wobei für die Rohrleitungen im unbeheizten Keller wie bereits beschrieben eine Rohrisolierung nach EnEV vorgesehen wird. Die Anbindung erfolgt durch die Geschoss- bzw. Kellerdecke mit entsprechenden Brandschutzvorkehrungen. Aus dem Grundriss resultieren überschlägig ermittelte Leitungslängen von 250 m für den die Verkehrsflächen versorgenden Heizkreis sowie 350 m für den Heizkreis, der die Wärmeversorgung der Unterrichtsräume sicherstellt. Die Summe der Raumheizlasten beträgt nach der Heizlastberechnung (vgl. Abschnitt 6.4.1) für das Obergeschoss 82056 W. Für die beiden Heizkreise im Obergeschoss ergeben sich nach Aufsummieren der Raumheizlasten maximale Heizlasten von 15199 W für den Heizkreis der Verkehrsflächen und 66857 W für den Heizkreis der Unterrichtsräume. Nach Gl. (26) und (27) resultieren die erforderlichen Massenströme der beiden Heizkreise.

$$\dot{m}_{\text{OG-VF}} = \frac{\dot{Q}_{\text{OG-VF}}}{c_{p,W} \cdot (\vartheta_{\text{VL}} - \vartheta_{\text{RL}})} = \frac{15,199 \text{ kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (70 - 50) \text{ K}} = 0,18 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 648 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{\text{OG-UR}} = \frac{\dot{Q}_{\text{OG-UR}}}{c_{p,W} \cdot (\vartheta_{\text{VL}} - \vartheta_{\text{RL}})} = \frac{66,857 \text{ kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (70 - 50) \text{ K}} = 0,80 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 2880 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (27)$$

Aus einer Rohrreibungstabelle für mittelschwere Gewinderohre werden Rohre mit den Nennweiten DN 25 für die Verkehrsflächen und DN 50 für die Unterrichtsräume bei einem Druckgefälle (R) von 50 und 30 Pa/m gewählt. Zu hohe Druckgefälle beeinflussen auf Grund des höheren Pumpenenergiebedarfs die Betriebskosten negativ, während zu große Rohrdurchmesser die Investitionskosten unnötig in die Höhe treiben. Wirtschaftliche Rohrreibungsdruckgefälle liegen im Bereich von 20 bis 50 Pa/m [52, S. 1274]. Um überschlägig die Leistungen der Umwälzpumpen der beiden Heizkreise zu bestimmen, wird zunächst der Druckverlust ($\Delta p_{\text{OG-HK}}$) im ungünstigsten Fließweg der Rohrleitungen

des jeweiligen Heizkreises in den Gl. (28) und (29) berechnet. Da die Heizkörper im Tichelmannsystem angeschlossen sind, ist die Summe der Leitungslängen für Vor- und Rücklaufleitung jedes Heizkörpers annähernd gleich, weshalb für die Berechnung die Hälfte der Summe der gesamten Leitungslänge des jeweiligen Heizkreises verwendet wird. Die Druckverluste der Anbindeleitungen werden hierbei auf Grund des geringen Einflusses aufs Endergebnis vernachlässigt.

$$\Delta p_{\text{OG-VF}} = l_{\text{OG-VF}} \cdot R_{\text{OG-VF}} = \left(\frac{250 \text{ m} + 70 \text{ m}}{2} \right) \cdot 50 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} = 8000 \text{ Pa} \quad (28)$$

$$\Delta p_{\text{OG-UR}} = l_{\text{OG-UR}} \cdot R_{\text{OG-UR}} = \left(\frac{350 \text{ m} + 70 \text{ m}}{2} \right) \cdot 30 \frac{\text{Pa}}{\text{m}} = 6300 \text{ Pa} \quad (29)$$

Die Einzelwiderstände werden mit der Hälfte des Gesamtdruckverlustes geschätzt und in den Gl. (30) und (31) zum Gesamtdruckverlust der Heizkreise ermittelt [52, S. 1277].

$$\Delta p_{\text{OG-VF,ges}} = 2 \cdot \Delta p_{\text{OG-VF}} = 16000 \text{ Pa} \quad (30)$$

$$\Delta p_{\text{OG-UR,ges}} = 2 \cdot \Delta p_{\text{OG-UR}} = 12600 \text{ Pa} \quad (31)$$

Mit den Volumenströmen und den berechneten Gesamtdruckverlusten bzw. den Förderhöhen werden entsprechende Umwälzpumpen nach Herstellerangaben ausgewählt.

Übergabe

Die Wärmeübergabe erfolgt über freie Heizflächen in Form von Flachheizkörpern, da diese einen sehr geringen Einbauraum benötigen und durch den vergleichsweise geringen Wasserinhalt eine schnelle Leistungsanpassung ermöglichen. Durch eine große Heizleistung je verbauten Meter in Verbindung mit einem geringen Preis bei ansprechender Optik [52, S. 789], eignen sie sich sehr gut für den Einbau in den Unterrichtsräumen, da durch die vorhandenen technischen Einrichtungen in den Fachunterrichtsräumen nicht unbegrenzt Installationsfläche zur Verfügung steht. Die Auslegung erfolgt wie bereits in Abschnitt 6.4.1 erwähnt beispielhaft für den „Physik Raum 2“, da er die höchste Raumheizlast nach DIN EN 12831 aufweist. Die Heizflächen werden nach Möglichkeit an den Außenwänden unter den vorhandenen Fenstern installiert, um kalter Abstrahlung und Fallluftströmung, die sich auf die Behaglichkeit der Nutzenden auswirkt, entgegenzuwirken. Außerdem werden die Heizkörper mit einem Mindestabstand von 50 mm zu den Wänden und 150 mm zum Boden eingebaut, so dass deutliche Leistungsminderungen auf Grund zu geringer Einbauabstände vermieden werden [52, S. 1303]. Der „Physik Raum 2“ wird mit Flachheizkörpern vom Typus „30/PPP“ nach Vorgabe in Hygieneausführung [53, S. 40] mit Mittelanschluss und einer durch die Fensterbrüstung

bedingten Bauhöhe von 600 mm ausgestattet. Der Mittelanschluss ermöglicht eine einfachere und schnellere Installation und die Vorverrohrung des Gebäudes. Bei der Hygieneausführung wird auf die bei anderen Ausführungen üblichen Konvektorbleche zu Gunsten der unkomplizierteren Reinigung verzichtet.

Die im Datenblatt eines Herstellers angegebene längenspezifische Heizkörperleistung (\dot{q}_N) beruht auf der Normwärmeleistung nach DIN EN 442 und wird mit Gl. (32) auf die Wärmeleistung (\dot{q}_A) bei Auslegungsvor- ($\vartheta_{VL,A}$) und Rücklauf- ($\vartheta_{RL,A}$) umgerechnet. Die Raumtemperaturen von Normangabe (Index „N“) und Auslegung (Index „A“) sind im vorliegenden Fall identisch ($\vartheta_{RAL,N} = \vartheta_{RAL,A} = 20\text{ °C}$). Die Rücklauf- ($\vartheta_{RL,A}$) Temperatur darf nach Vorgabe des Fernwärmeversorgungsunternehmens maximal 50 °C betragen. Die bestehenden Systemtemperaturen für Vor- und Rücklauf ($70/50\text{ °C}$) werden beibehalten, da die hohe Spreizung durch geringere zu fördernde Massenströme energetisch günstig ist. Außerdem ist die Regelung der Heizflächen durch geringere Massenströme flexibler und schneller, um Wärmelastschwankungen durch innere Wärmequellen wie nutzende Personen zu kompensieren. Den höheren Verteilungsverlusten auf Grund der hohen Systemtemperaturen wird durch eine EnEV-konforme Rohrdämmung entgegengewirkt. Der Heizkörperexponent (n) wird ebenfalls dem Datenblatt eines Herstellers entnommen und beschreibt die Abhängigkeit der Heizkörperleistung von der Heizkörpertemperatur, der aus dem Anteil von Strahlungs- und Konvektionswärmeabgabe des Heizkörpers resultiert [13, S. 912].

$$\dot{q}_A = \dot{q}_N \cdot \left[\frac{\frac{\vartheta_{VL,A} - \vartheta_{RL,A}}{\ln\left(\frac{\vartheta_{VL,A} - \vartheta_{RAL,A}}{\vartheta_{RL,A} - \vartheta_{RAL,A}}\right)}}{\frac{\vartheta_{VL,N} - \vartheta_{RL,N}}{\ln\left(\frac{\vartheta_{VL,N} - \vartheta_{RAL,N}}{\vartheta_{RL,N} - \vartheta_{RAL,N}}\right)}} \right]^n = 1082 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot \left[\frac{\frac{70\text{ °C} - 20\text{ °C}}{\ln\left(\frac{70\text{ °C} - 20\text{ °C}}{50\text{ °C} - 20\text{ °C}}\right)}}{\frac{70\text{ °C} - 55\text{ °C}}{\ln\left(\frac{70\text{ °C} - 20\text{ °C}}{55\text{ °C} - 20\text{ °C}}\right)}} \right]^{1,3} = 986 \frac{\text{W}}{\text{m}} \quad (32)$$

Mit der Raumheizlast von 6850 W resultiert nach Gl. (33) eine zu installierende Heizkörperlänge von $6,9\text{ m}$. Es werden drei Heizkörper mit jeweils $2,30\text{ m}$ Länge und einer Wärmeleistung von 2267 W für den „Physik Raum 2“ ausgewählt.

$$l_{\text{FHK},30} = \frac{\dot{Q}_{\text{HL,PR2}}}{\dot{q}_A} = \frac{6850\text{ W}}{986 \frac{\text{W}}{\text{m}}} = 6,9\text{ m} \quad (33)$$

Der Massenstrom durch die gewählten Flachheizkörper ($\dot{m}_{\text{FHK},30}$) ergibt sich nach Gl. (34) aus deren Wärmeleistung ($\dot{Q}_{\text{FHK},30}$), der Differenz der Vor- (ϑ_{VL}) und Rücklauf- (ϑ_{RL}) Temperaturen des Heizkreises und der spezifischen Wärmekapazität von Wasser ($c_{p,W}$).

$$\dot{m}_{\text{FHK},30} = \frac{\dot{Q}_{\text{FHK},30}}{c_{p,W}(\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL})} = \frac{2,267\text{ kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (70 - 50)\text{ K}} = 0,027 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 97,16 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (34)$$

Die Rohre der Anbindeleitungen sind nach Vorgabe vandalismussicher in Stahl ausgeführt [53, S. 40]. Für die Anbindeleitungen wird wiederum aus der Rohrreibungstabelle ein geeigneter Rohrdurchmesser mit Nennweite DN 15 bei einem Druckverlust von 20 Pa/m ermittelt. Geeignete Fließgeschwindigkeiten liegen im Bereich von 0,3 bis 1,5 m/s. Zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten führen zu erhöhten Geräuschemission, was den Komfort beeinträchtigen kann. Zu niedrigere Geschwindigkeiten führen indes zu längeren Aufheizzeiten durch die damit verbundene thermische Trägheit sowie zu höheren Investitionskosten und einem schlechten Entlüftungsverhalten im Betrieb [52, S. 1274].

7.2.2 RLT-Anlage

Erzeugung/Aufbereitung im Winterbetrieb

Die Dimensionierung der RLT-Anlage erfolgt für den Winterbetrieb auf eine Zulufttemperatur von 20 °C bei mindestens 25 % relativer Raumluftfeuchte (absolute Feuchte: 3,6 g/kg trockene Luft). Die Zulufttemperatur von 20 °C ist unter Vernachlässigung von Wärmeverlusten durch die Verteilung ausreichend, da mit der Anlage im Vergleich zur Bestandsanlage nun nicht mehr aktiv geheizt wird. In nachfolgenden Berechnungen wird auf die Differenzierung von feuchter und trockener Luft wegen des geringen Einflusses auf das Endergebnis verzichtet. Auf Grund der variablen Volumenstromregelung wird der Auslegungsvolumenstrom (\dot{V}_{RLT}) der RLT-Anlage für die Dimensionierung mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor ($f_{g,\text{VVS}}$) von 0,8 beaufschlagt [13, S. 1101].

$$\dot{V}_{\text{VVS,W}} = f_{g,\text{VVS}} \cdot \dot{V}_{\text{RLT}} = 0,8 \cdot 35779 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 28623,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (35)$$

$$\dot{m}_{\text{VVS,W}} = 28623,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 9,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (36)$$

Der Vorerhitzer erwärmt die Außenluft auf mindestens 10 °C, um die anschließende adiabate Befeuchtung mittels Hochdruck-Sprühbefeuchter zu ermöglichen. Die Wärmeleistung des Vorerhitzers (\dot{Q}_{VE}) ergibt sich mit dem Massenstrom aus Gl. (36), der spezifischen Wärmekapazität der Luft (c_{p_L}), der Temperaturdifferenz der Außenluft (ϑ_{AUL}) und der Luft hinter dem Vorerhitzer (ϑ_{VE}) nach Gl. (37).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{VE}} &= \dot{m}_{\text{VVS,W}} \cdot c_{p_L} \cdot (\vartheta_{\text{VE}} - \vartheta_{\text{AUL}}) \\ &= 9,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (10 + 12)\text{K} = 213,8 \text{ kW} \end{aligned} \quad (37)$$

Der erforderliche Massenstrom des Heizwassers ($\dot{m}_{\text{HW,VE}}$) wird dann nach Gl. (38) berechnet.

$$\dot{m}_{\text{HW,VE}} = \frac{\dot{Q}_{\text{VE}}}{c_{p\text{HW}} \cdot (\vartheta_{\text{VL,HW}} - \vartheta_{\text{RL,HW}})} = \frac{213,8 \text{ kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (70 - 50)\text{K}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 9216 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (38)$$

Damit ergibt sich nach Gl. (39) ein Volumenstrom von 9,38 m³/h.

$$\dot{V}_{\text{HW,VE}} = \frac{\dot{m}_{\text{HW,VE}}}{\rho_{\text{HW}}} = \frac{9216 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{983 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 9,38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (39)$$

Der Hochdruck-Sprühbefeuchter sorgt anschließend für die adiabate Befeuchtung der Zuluft auf die nach DIN EN 15251 erforderlichen 25 % relative Feuchte. Die zu verdunstende Wassermenge des Luftbefeuchters ($\dot{m}_{\text{BW,LB}}$) wird mit dem maximalen Außenluftmassenstrom der variablen Volumenstromregelung (\dot{m}_{VVS}) und der Differenz von absoluter Feuchte der Außenluft zu dem mit dem Mollier-Diagramm ermittelten Vorgabewert der DIN EN 15251 von 25 % relativer Feuchte bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C in Gl. (40) ermittelt.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{BW,LB}} &= \dot{m}_{\text{VVS,W}} \cdot (x_{\text{ZUL}} - x_{\text{AUL}}) \\ &= 34634 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (3,6 - 1,2) \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 83121 \frac{\text{g}}{\text{h}} \end{aligned} \quad (40)$$

Unter Berücksichtigung von 5 % Wasserverlust ergibt sich eine zu verdunstende Wassermenge von ca. 89 l/h. Die Heizleistung des Multifunktionsregisters wird aus der Differenz der mit Hilfe des Mollier-Diagramms ermittelten Enthalpie des Luftzustands der Zuluft (h_{ZUL}) und des Luftzustands nach dem Luftbefeuchter (h_{LB}) sowie dem maximalen variablen Außenluftmassenstrom im Winterbetrieb ($\dot{m}_{\text{VVS,W}}$) ermittelt.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{MFR,W}} &= \dot{m}_{\text{VVS,W}} \cdot (h_{\text{ZUL}} - h_{\text{LB}}) \\ &= 9,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (29,2 - 13,1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 154,9 \text{ kW} \end{aligned} \quad (41)$$

Der erforderliche Massenstrom des Heizwassers im Multifunktionsregister ergibt sich in Analogie zu Gl. (38).

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{HW,MFR}} &= \frac{\dot{Q}_{\text{MFR,W}}}{c_{p\text{HW}} \cdot (\vartheta_{\text{VL,HW}} - \vartheta_{\text{RL,HW}})} = \frac{154,9 \text{ kW}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (70 - 50)\text{K}} \\ &= 1,85 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 6660 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned} \quad (42)$$

Der Volumenstrom des Heizungswassers zur Versorgung des Multifunktionsregisters ($\dot{V}_{\text{HW,MFR}}$) beträgt damit nach Gl. (43) $6,78 \text{ m}^3/\text{h}$.

$$\dot{V}_{\text{HW,MFR}} = \frac{\dot{m}_{\text{HW,MFR}}}{\rho_{\text{HW}}} = \frac{6660 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{983 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 6,78 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (43)$$

Nachfolgende Tabelle fasst die Luftzustände für den beschriebenen Betriebsfall im Winter zusammen. Die Luftfeuchte der Raumluft resultiert aus der Summe der Feuchte der Zuluft und der in Gl. (23) ermittelte Feuchteabgabe durch die nutzenden Personen.

Tabelle 7-3: Luftzustandsdaten im Winterbetrieb

Luftzustand		Temperatur	Relative Feuchte	Spezifische Enthalpie	Absolute Feuchte
		°C	%	kJ/kg	g/kg
Außenluft	AUL	-12,0	90,0	-9,1	1,2
Vorerhitzer	VE	10,0	15,9	13,1	1,2
Luftbefeuchter	LB	4,0	71,8	13,1	3,6
Zuluft	ZUL	20,0	25	29,2	3,6
Raumluft	RAL	20,0	29,8	31,0	4,3

Erzeugung/Aufbereitung im Sommerbetrieb

Im Sommerbetrieb wird die RLT-Anlage auf eine Raumlufttemperatur von 26 °C ausgelegt. Um die Raumluft im Sommer auf 26 °C zu kühlen, darf eine minimale Untertemperatur der Zuluft (ϑ_{ZUL}) von 20 °C aus Behaglichkeitsgründen nicht unterschritten werden. Der Volumenstrom der Anlage im Sommerbetrieb wird dementsprechend nach Gl. (44) berechnet. Dabei ist \dot{Q}_{KL} die nach VDI 2078 ermittelte Kühllast des Gebäudes.

$$\dot{V}_{\text{VVS,S}} = \frac{\dot{Q}_{\text{KL}}}{\rho_{\text{L}} \cdot c_{p,\text{L}} \cdot (\vartheta_{\text{RAL}} - \vartheta_{\text{ZUL}})} = \frac{84,5 \text{ kW}}{1,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (26 - 20)\text{K}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 41900,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (44)$$

$$\dot{m}_{\text{VVS,S}} = 41900,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 14,08 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (45)$$

Das Multifunktionsregister dient im Sommerbetrieb als Kühler im Gegenstromverfahren. Die Leistung des Multifunktionsregisters wird nach Gl. (46), der Massen- und Volumenstrom des Kaltwassers (KW) nach den Gl. (47) und (48) berechnet.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{MFR,S}} &= \dot{m}_{\text{VVS,S}} \cdot c_{p,\text{L}} \cdot (\vartheta_{\text{ZUL}} - \vartheta_{\text{AUL}}) \\ &= 14,08 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (20 - 31)\text{K} = -154,9 \text{ kW} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\dot{m}_{\text{KW,MFR}} = \frac{\dot{Q}_{\text{MFR,S}}}{c_{p,\text{KW}} \cdot (\vartheta_{\text{VL,KW}} - \vartheta_{\text{RL,KW}})} = \frac{-154,9 \text{ kW}}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (6 - 12)\text{K}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 22181 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (47)$$

$$\dot{V}_{KW,MFR} = \frac{\dot{m}_{KW,MFR}}{\rho_{KW}} = \frac{22181 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 22,18 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (48)$$

Tabelle 7-4 zeigt die Luftzustände im Sommerbetrieb.

Tabelle 7-4: Luftzustandsdaten im Sommerbetrieb

Luftzustand		Temperatur	Relative Feuchte	Spezifische Enthalpie	Absolute Feuchte
		°C	%	kJ/kg	g/kg
Außenluft	AUL	31,0	42,7	61,8	12,0
Zuluft	ZUL	20,0	82,0	50,5	12,0
Raumluft	RAL	26,0	64,1	60,5	13,5

Der Vorerhitzer und das Multifunktionsregister der RLT-Anlage werden über den bestehenden Unterverteiler an das bestehende Warmwasserpumpenheizungssystem angeschlossen. Für die RLT-Anlage sind für den Vorerhitzer 214 kW und für das Multifunktionsregister 155 kW Wärmeleistung vorzuhalten. Die Wärmeleistung der Heizungsanlage ergibt sich aus der Heizlastberechnung aus Abschnitt 6.4 und beträgt 158 kW. Das Multifunktionsregister der RLT-Anlage ist darüber hinaus über die Hydraulikstation an die Kälteversorgung der bestehenden Kompressionskältemaschine anzuschließen. Hierfür werden 155 kW Kälteleistung benötigt.

Verteilung

Der „Chemie Raum 1“ weist in Bezug auf die RLT die höchsten Anforderungen auf, da das Vorhandensein von Laborabzügen und eines Lösungsmittelschranks eine gesonderte Abluft notwendig machen. Obwohl der „Physik Raum 2“ mit 6,08 kW eine höhere Kühllast aufweist, erfolgt die Auslegung und Beschreibung der Luftverteilung und -übergabe daher beispielhaft anhand des „Chemie Raum 1“. Das Luftkanalnetz wird auf Grund der energetisch günstigeren Strömungseigenschaften im Vergleich mit rechteckigen Kanalquerschnitten mit runden Wickelfalzrohren aus Stahl ausgeführt. Um die Übertragung von Luft- und Körperschall von den nebeneinander angeschlossenen Räumen im Luftkanalnetz zu vermeiden, werden jeweils an den Abzweigungen sogenannte Telefonieschalldämpfer vorgesehen. Diese Schalldämpfer verhindern durch die Dämpfung im Frequenzbereich von 500 – 2000 Hz die Schallnebenwegübertragung übers Luftkanalnetz [52, S. 1755]. Für den Referenzraum werden für Zu- und Abluftkanäle insgesamt vier Telefonieschalldämpfer veranschlagt. Um den Zuluftvolumenstrom für den Referenzraum dem Bedarf anzupassen, ist ein CO₂-Sensor im Winterbetrieb und ein Temperatursensor für den Kühlbetrieb notwendig. Die Regelung der Zuluft erfolgt im Winter anhand des Abgleichs von Soll- und Istwerts der CO₂-Konzentration in der Abluft. Bei Betrieb der Laborabzüge wird der Zuluftvolumenstrom um die Summe der Abzugsvolumenströme angehoben. Das System wird über ein Bussystem in die Gebäudeleittechnik

integriert. Für die bedarfsgerechte Regelung der Zuluftvolumenströme wird im Luftkanalnetz der Einbau von zwei variablen Volumenstromreglern erforderlich. Um ungewollte Druckunterschiede im Referenzraum zu vermeiden, werden ebenso zwei Volumenstromregler für den Abluftkanal vorgesehen. Die Volumenstromregler werden nach minimalem und maximalen Zuluft- bzw. Abluftvolumenstrom ausgewählt. Der minimale Zuluft- und Abluftvolumenstrom ist dabei durch die bauphysikalisch erforderliche Mindest-Luftwechselrate von 0,5 1/h (= 0,5-faches Raumvolumen pro Stunde = 141,5 m³/h) begrenzt. Der maximale Zuluftvolumenstrom beträgt auf Grund der vorhandenen Abzüge und des Lösungsmittelschranks 2460 m³/h. Der maximale Abluftvolumenstrom ergibt sich aus dem für die Kühlung des „Chemie Raum 1“ im Sommerbetrieb benötigten Zuluftvolumenstrom ($\dot{V}_{OG-CR1,S}$). Mit einer maximalen Untertemperatur der Zuluft (ϑ_{ZUL}) von 20 °C und der Kühllast des Raumes ($\Phi_{KL,OG-CR1}$) wird dieser nach Gl. (49) berechnet.

$$\dot{V}_{OG-CR1,S} = \frac{\dot{Q}_{KL,OG-CR1}}{\rho_L \cdot c_{p,L} \cdot (\vartheta_{RAL} - \vartheta_{ZUL})} = \frac{4,64 \text{ kW}}{1,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (26 - 20) \text{K}} = 0,63 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2281 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (49)$$

Für die vier Laborabzüge ist jeweils ein weiterer Volumenstromregler vorzusehen ist. Die Abluftkanäle der Abzüge bestehen zwecks Chemikalienbeständigkeit aus PPs. Die Abluft der Abzüge wird separat vom herkömmlichen Luftkanalnetz über explosionsgeschützte Ventilatoren abgeführt. Die Luftgeschwindigkeit im Luftkanalnetz wird nach Erfahrungszahlen gewählt, dabei sind bei Komfortanlagen Luftgeschwindigkeiten von 4 – 8 m/s für die Haupt- und 3 – 5 m/s für die Abzweigkanäle üblich. Generell gilt, dass die Geschwindigkeit vom Ventilator zu den Auslässen allmählich abnehmend zu wählen ist [52, S. 1886]. Im Sinne der Energieeffizienz sollten niedrige Luftgeschwindigkeiten bevorzugt werden, um die Druckverluste im Luftleitungsnetz gering zu halten (vgl. Abschnitt 4.2). Die vorhandene Querschnittsfläche der Bestandsschächte des Schulgebäudes (A_S) beträgt 3,32 m². Die Auslegung erfolgt mit dem berechneten Auslegungsvolumenstrom der variablen Volumenstromregelung im Winterbetrieb für die Summe aus Zu- und Abluftvolumenstrom. Die Strömungsgeschwindigkeit in den Bestandsschächten resultiert aus Gl. (50). Für den Sommerbetrieb (Kühlbedarf vorausgesetzt) ergibt sich abweichend in Gl. (51) eine entsprechend höhere Luftgeschwindigkeit. Dies ist energetisch nicht optimal, lässt sich aber ohne größere bauliche Änderungen in Form der Erweiterung der Bestandsschächte nicht ändern. Da die Anlage nach Jahresdauerlinie des Kältebedarfs maximal 600 h im Jahr (vor Abzug der Schulferien im Sommer) im Kühlbetrieb laufen wird, ist diese Lösung aber akzeptabel.

$$c_{S,W} = \frac{2 \cdot \dot{V}_{VVS,W}}{A_S} = \frac{2 \cdot 28623,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}}}{3,32 \text{ m}^2} = 4,79 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (50)$$

$$c_{S,S} = \frac{2 \cdot \dot{V}_{VVS,S}}{A_S} = \frac{2 \cdot 41900,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600 \text{ s}}}{3,32 \text{ m}^2} = 7,01 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (51)$$

Die minimal mögliche Luftgeschwindigkeit mit dem Auslegungsvolumenstrom in den Schächten beträgt nach Gl. (50) 4,79 m/s. Es wird eine Luftgeschwindigkeit von 5 m/s für die Hauptleitungen gewählt. Für die Nebenleitungen wird die Luftgeschwindigkeit zu 3,5 m/s gewählt. Damit ergibt sich die Querschnittsfläche für die Nebenleitungen aus Gl. (52) und der benötigte Rohrdurchmesser aus Gl. (53). Für die Hauptleitungen wird der Querschnitt des gewählten Schachtes verwendet.

$$A_{CR1,ZUL,NL} = \frac{\dot{V}_{CR1,ZUL,NL}}{c_{NL}} = \frac{2460 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600 \text{ s}}}{3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,1952 \text{ m}^2 \quad (52)$$

$$d_{CR1,ZUL,NL} = \sqrt{\frac{4 A_{CR1,ZUL,NL}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1952 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,4985 \text{ m} \approx 500 \text{ mm} \quad (53)$$

Für die Nebenleitung zur Versorgung des Chemieraums wird ein Nennrohrdurchmesser von 500 mm gewählt. Die Zuleitung zu den Luftdurchlässen erfolgt dann basierend auf der obigen Rechnung in Luftleitungen mit 200 mm Durchmesser. Für die Abluftkanäle werden die gleichen Dimensionen gewählt. Das Luftkanalnetz wird mit einer Mindestdämmschichtdicke für innenliegende Luftleitungen nach VDI 2055 „Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen Anlagen der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung“ bzw. VDI 2087 „Luftleitungssysteme – Bemessungsgrundlagen“ versehen.

Übergabe

Für die Einhaltung der Vorgaben des BNB in Bezug auf die soziale Qualität „Thermischer Komfort: Zugluft“ ist bei einer Auslegungstemperatur von 20 °C im Winterbetrieb für turbulente Mischlüftung eine maximale Luftgeschwindigkeit von 0,16 m/s zulässig. Die maximal zulässige Luftgeschwindigkeit bei einer Auslegungstemperatur von 26 °C im Sommerbetrieb beträgt 0,24 m/s. Damit ist ein Zugluftrisiko ≤ 20 % garantiert. Die Luftgeschwindigkeit hängt im Wesentlichen von den eingesetzten Luftdurchlässen und deren Anordnung im Raum ab. Ausgehend vom Auslegungsvolumenstrom für den „Chemie Raum 1“ (Abschnitt 6.3) werden geeignete Luftdurchlässe nach Herstellerangaben gewählt. Für die Luftdurchlässe werden Drallauslässe gewählt, da diese hochinduktive Luftstrahlen erzeugen, die ihre Geschwindigkeit bis zum Eintritt in den Aufenthaltsbereich stark verringern [52, S. 1642]. Für die Zu- und Abluft werden jeweils sechs quadratische Drallauslässe mit 625 mm Kantenlänge, integriertem Anschlusskasten und einem Volumenstrom von je 410 m³/h und 380 m³/h gewählt. Der maximale Zuluftvolumenstrom beträgt damit 2460 m³/h und der Abluftvolumenstrom 2280 m³/h, da die Abzüge

im Betriebsfall bis zu 2400 m³/h abführen und die Abluftkanäle des regulären Luftkanalnetzes nur für den Betrieb ohne Abzüge ausgelegt werden müssen. Für den Schallschutz gibt das BNB für Unterrichtsräume einen maximal zulässigen Schalldruckpegel von 35 dB(A) vor. Diesem Umstand wird bei der Auswahl der Drallauslässe Rechnung getragen. Mit den beschriebenen Angaben resultieren in einer Höhe von 1,80 m Luftgeschwindigkeiten von 0,13 m/s, so dass die soziale Qualität „Thermischer Komfort: Zugluft“ erfüllt ist.

7.3 Endenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf der Modernisierungsvariante 1 liegt nach der DIN V 18599-Berechnung wie in Abbildung 7-2 dargestellt bei 240 kWh/(m²a). Durch die veränderte Anlagentechnik verändert sich der Referenzwert nach EnEV für modernisierte Altbauten auf 177 kWh/(m²a).



Abbildung 7-2: EnEV-Bewertung – Variante 1

Nachfolgende Tabelle fasst die für die Ökobilanzierung und die Lebenszykluskostenberechnung relevante Aufteilung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern zusammen.

Tabelle 7-5: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Variante 1

Energie-träger	Gesamt in kWh/a	Heizung in kWh/a	Kühlung in kWh/a	Lüftung in kWh/a	Beleuchtung in kWh/a
Strom-Mix	161.368	1.528	17.137	100.796	41.907
Fernwärme	578.170	578.170			

Die prozentualen Endenergieeinsparungen differenziert nach Heizungs-, Kühlungs- und Lüftungsbedarf im Vergleich zu den Bestandsanlagen sind in Abbildung 7-3 dargestellt. Auffällig ist die prozentuale Einsparung von 82 % im Bereich der Kühlung, die auf den Austausch der bestehenden Umwälzpumpen durch hocheffiziente und drehzahlregelte Pumpen zurückzuführen ist. Durch die Umstellung der RLT-Anlage auf die variable Volumenstromregelung und die Beheizung des Schulgebäudes mit statischen Heizflächen ergibt sich im Bereich der Lüftung eine Einsparung von 44 %. Die Einsparung von 34 % im Bereich der Heizung begründet sich hauptsächlich durch den geringeren Wärmebedarf der RLT-Anlage in Folge der Umrüstung auf ein Luft-Wasser-System und durch den Einsatz eines hydraulisch abgeglichenen Systems in Verbindung mit dem Austausch der Umwälzpumpen.

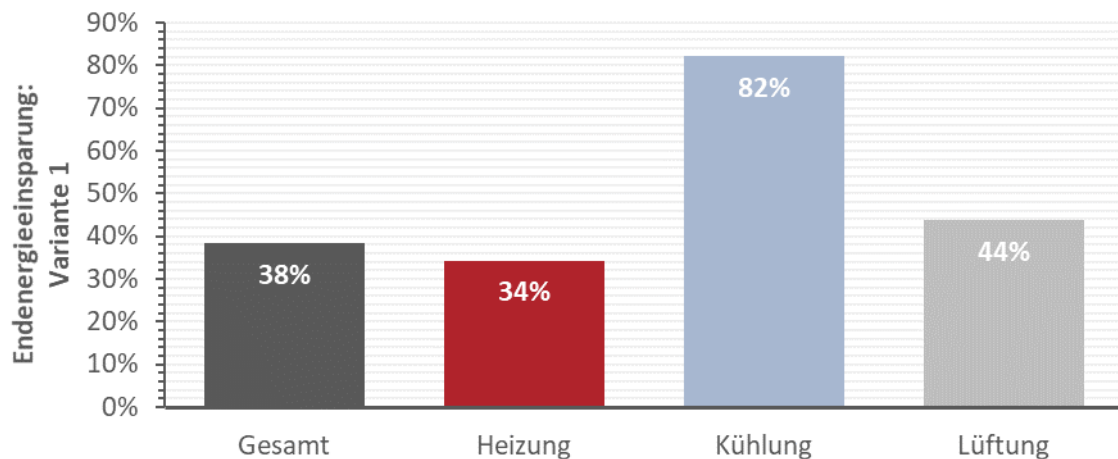


Abbildung 7-3: Endenergieeinsparungen – Variante 1 vs. Bestand

Abbildung 7-4 zeigt die prozentualen Endenergieeinsparungen im Vergleich mit den Bestandsanlagen nach Energieträgern unterschieden. Der Endenergiebedarf für die Verwendung des bundesdeutschen Strom-Mix reduziert sich mit dieser Variante um die Hälfte. Für die Verwendung der Fernwärme lässt sich ein Drittel des Bedarfs der Bestandsanlagen einsparen.

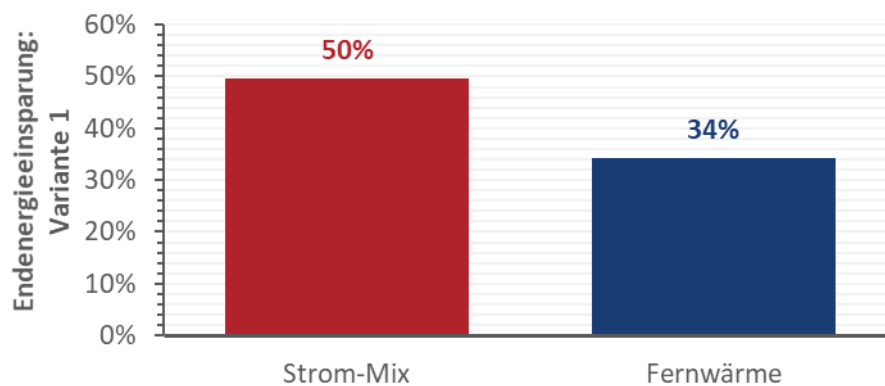


Abbildung 7-4: Endenergieeinsparungen (Energieträger) – Variante 1 vs. Bestand

7.4 Ökobilanz

7.4.1 Bilanzierung

Die Ökobilanz wird wie in Abschnitt 3.2.3 erläutert mit dem online zur Verfügung stehenden Tool „eLCA v0.9.4“ durchgeführt. Als Eingangsgrößen werden die im vorherigen Abschnitt ermittelten Endenergiebedarfe sowie die nach Gl. (4) zu ermittelnden Bauteilmengen benötigt. Ausgangsgrößen sind die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Umweltwirkungen. Die Ökobilanz wird für alle Modernisierungsvarianten nach der gleichen Methodik durchgeführt und im Folgenden einmal ausführlich für die Anlagen der Variante 1 beschrieben. Für die Ökobilanz der Variante 1 werden für die Heizungs- und RLT-Anlage

die in Tabelle 7-6 aufgeführten Datensätze der OEKOBAUDAT-Datenbank bilanziert. Für die Bilanz der Herstellungsphase der Variante 1 wird, wie aus Gl. (4) ersichtlich wird, als Eingangsgröße die zu bilanzierende Menge der Bauteile (m_j) benötigt. Nachfolgend werden die zur Ermittlung der bilanzierenden Mengen erfolgten Berechnungen dargelegt. Die im Rahmen der Ökobilanz verwendeten Datensätze sind dem digitalen Anhang beigefügt.

Tabelle 7-6: Verwendete Datensätze für die Ökobilanz der Variante 1

Bauteil/ Datensatz f. spezifische Wirkfaktoren	Bezugsmenge des Datensatzes ($n_{\text{fOBD},j}$)
Herstellung: RLT-Anlage	
Umwälzpumpe	1 Stück
Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)	1 kg
Herstellung: Heizungsanlage	
Umwälzpumpe	1 Stück
Heizungsrohr (Stahl)	1 kg
Heizkörper	1 kg
Nutzung	
Strom Mix 2015	1 kWh
Fernwärme Mix	1 kWh

Die Bilanzierung des Datensatzes „Umwälzpumpe“ erfolgt anhand der verbauten Stückzahlen bzw. der installierten Leistung. Für die Berechnung der zu bilanzierenden Menge an Umwälzpumpen von Heiz- und Multifunktionsregister- sowie Hochdruck-Sprühbefeuchter-Kreislauf werden die berechneten Leistungen der Energieberater-Software verwendet. Es wird dreimal der Datensatz „Umwälzpumpe 250 – 1000 W“ bilanziert. Für die ausgetauschte Kühl- und Kaltwasserpumpe ergeben sich Leistungen von ca. 2500 W. Hierfür wird der Datensatz „Umwälzpumpe 250 – 1000 W“ mit dem Faktor fünf verrechnet, so dass der Datensatz insgesamt 8 Mal verrechnet wird.

Die bilanzierende Menge des Datensatzes „Luftkanalnetz (verzinktes Stahlblech)“ erfolgt anhand der Masse. Die Leitungslängen des Luftkanalnetzes werden anhand des „Chemie-Raum 1“ überschlägig ermittelt und aufs Schulgebäude hochgerechnet. Für den „Chemie Raum 1“ ergeben sich überschlägige Leitungslängen von 20 und 20 m für die Durchmesser von 200 und 500 mm. Nach Herstellerangaben ergeben sich für Wickelfalzrohre aus Stahl mit den genannten Durchmessern längenbezogene Gewichte von 3,5 und 11,8 kg/m. Nach Gl. (54) resultiert für den „Chemie-Raum 1“ ein zu bilanzierendes Gewicht von 306 kg.

$$m_{\text{LK,OG-CR1}} = 20 \text{ m} \cdot 3,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}} + 20 \text{ m} \cdot 11,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 306 \text{ kg} \quad (54)$$

Das ermittelte Gewicht wird auf die Netto-Raumfläche des „Chemie-Raum 1“ bezogen und nach Gl. (55) auf die Netto-Raumfläche des gesamten Gebäudes hochgerechnet.

$$m_{\text{LK,Gebäude}} = \frac{306 \text{ kg}}{93 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 9500 \text{ kg} \quad (55)$$

Die auf Grund der notwendigen Chemikalien- und Korrosionsbeständigkeit in Polyphenylensulfid (PPs) ausgeführten Abluftkanäle der Laborabzüge werden im Rahmen der Ökobilanz nicht betrachtet. Auf die Bilanzierung der Einbauteile wird mangels vorhandener Datensätze in der OEKOBAUDAT-Datenbank ebenfalls verzichtet.

Die Leistung der Umwälzpumpen der Heizungsanlage wird abermals der Energieberater-Software entnommen. Für die Umwälzpumpen der Etagenringe wird vier Mal der Datensatz „Umwälzpumpe 50 – 250 W“ bilanziert.

Die Bilanzmengenberechnung des Heizungsrohrnetzes erfolgt über die Summierung der Massen der verbauten Heizungsrohre. Ausgehend von der Unterverteilung werden für die Strangleitungen der Unterrichtsräume und Verkehrsflächen vereinfacht durchschnittliche Rohrdurchmesser mit einer Nennweite von DN 50 bzw. DN 25 angenommen. Das längengezogene Rohrgewicht beträgt 2,44 und 5,10 kg/m. Für die Anbindeleitungen wird eine Nennweite von DN 15 mit einem Gewicht von 1,22 kg/m angenommen. Die Leitungslängen des Heizungsrohrnetzes sind Tabelle 7-2 entnommen. Auf eine Bilanzierung der Heizungsrohrisolierung wird verzichtet.

$$m_{\text{HR,DN15}} = (2 \cdot 40 \text{ m} + 2 \cdot 15 \text{ m}) \cdot 1,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 134 \text{ kg} \quad (56)$$

$$m_{\text{HR,DN25}} = 2 \cdot 250 \text{ m} \cdot 2,44 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 1220 \text{ kg} \quad (57)$$

$$m_{\text{HR,DN50}} = 2 \cdot 350 \text{ m} \cdot 5,10 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 3570 \text{ kg} \quad (58)$$

$$m_{\text{HR,Gebäude}} = 134 \text{ kg} + 1220 \text{ kg} + 3570 \text{ kg} \approx 4900 \text{ kg} \quad (59)$$

Die Heizkörperbilanz wird ebenfalls über die Massen errechnet, hierzu werden die in Abschnitt 7.2.1 für den „Physik Raum 2“ berechneten Heizkörperlängen über einen Flächenansatz auf das Gebäude hochgerechnet. Das längenbezogene Gewicht der Heizkörper beträgt 40,5 kg/m.

$$m_{\text{HK}} = 40,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \frac{6,9 \text{ m}}{93 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 8700 \text{ kg} \quad (60)$$

Die in Abschnitt 7.3 ermittelten Endenergiebedarfe der Variante 1 werden nachfolgend für die Ökobilanz der Nutzungsphase verwendet und mit dem Datensatz „Strom-Mix 2015“ und „Fernwärme-Mix“ verknüpft. Damit ergeben sich für die Ökobilanz der Bestandsanlagen die in Tabelle 7-7 aufgeführten Datensätze und zu bilanzierenden Men-

gen. Für Bauteile, die eine geringere Nutzungsdauer als den Betrachtungszeitraum aufweisen, wird wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben die Erneuerung berücksichtigt und die Herstellung abermals bilanziert.

Tabelle 7-7: Bilanzierte Mengen für die Ökobilanz der Bestandsanlage

Bauteil/ Datensatz f. spezifische Wirkfaktoren	Bilanzierte Menge des Bauteils (m_j)	Nutzungsdauer nach VDI 2067 in Jahren	Erneuerung im Betrachtungszeitraums
Herstellung: RLT-Anlage			
Umwälzpumpe (250 – 1000 W)	8	10	3
Lüftungskanal (verzinktes Stahlblech)	9.500	30	
Herstellung: Heizungsanlage			
Umwälzpumpe (50 – 250 W)	4	10	3
Heizungsrohr (Stahl)	4.900	40	
Heizkörper	8.700	30	
Nutzung			
Strom Mix 2015	161.368		
Fernwärme Mix	578.170		

7.4.2 Ergebnis

Das Ergebnis der Ökobilanz der Variante 1 ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Die Ergebnisse sind über den gewählten Betrachtungszeitraum von 25 Jahren ermittelte auf die Netto-Raumfläche bezogene Durchschnittswerte für die Umweltwirkungen in Folge der Nutzung der Anlagen der Variante 1.

Tabelle 7-8: Ökobilanz der Variante 1 – Nutzung

Indikator/ Umweltwirkung	Einheit	Gesamt
GWP	kg CO ₂ -Äqv./m ² _{NGFa}	81,97
ODP	kg R11-Äqv./m ² _{NGFa}	2,1172E-09
POCP	kg Ethen-Äqv./m ² _{NGFa}	9,8624E-03
AP	kg SO ₂ -Äqv./m ² _{NGFa}	0,1087405043
EP	kg PO ₄ -Äqv./m ² _{NGFa}	0,0168445424
PE _{ges}	kWh/m ² _{NGFa}	355,88
PE _{ne}	kWh/m ² _{NGFa}	279,09
PE _e	kWh/m ² _{NGFa}	76,79

Bei der Auswertung der Ergebnisse ist der vergleichsweise geringe Anteil aus Herstellung-, Entsorgung- und Instandhaltung auffällig. Der überwiegende Teil der Umweltwirkungen resultiert aus der Nutzungsphase. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht diesen Zusammenhang und zeigt den Anteil der einzelnen Umweltwirkungen für die Herstellung, Entsorgung und Instandhaltung in den blauen und den Anteil durch die Nutzung in den roten Säulen. Da der Anteil der Herstellung, Entsorgung und Instandhaltung bis

auf eine Ausnahme durchgängig unter 5 % liegt und mit einer relativ großen Ungenauigkeit behaftet ist, werden die Varianten ausschließlich anhand ihrer Umweltwirkungen durch die Nutzungsphase miteinander verglichen.

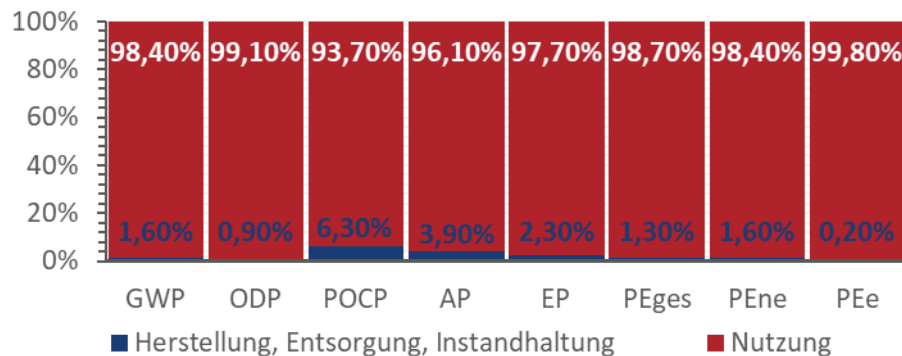


Abbildung 7-5: Anteile der Nutzung an den Umweltwirkungen der Variante 1

Abbildung 7-6 stellt die prozentuale Verringerung der Umweltwirkungen der Variante 1 im Vergleich zu den Bestandsanlagen dar. Durchschnittlich verringern sich die Umweltwirkungen im Vergleich zu den Bestandsanlagen um 43 %. Vor allem das Ozonschichtabbaupotenzial (ODP) lässt sich mit der beschriebenen Variante 1 um fast die Hälfte reduzieren.

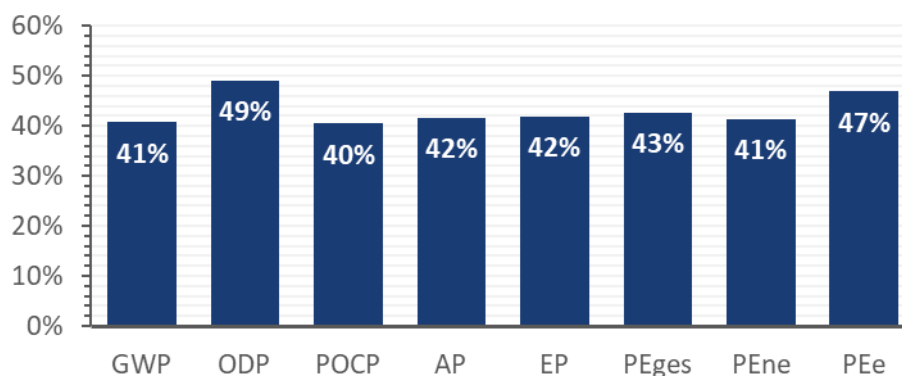


Abbildung 7-6: Verringerung der Umweltwirkungen – Variante 1 vs. Bestand

7.5 Lebenszykluskosten

7.5.1 Berechnung

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt mit Hilfe eines selbst erstellten Microsoft Excel-Arbeitsblattes. Im Folgenden wird die Berechnung am Beispiel der Modernisierungsvariante 1 dargestellt. Bei den nachfolgenden Varianten werden nur noch die angesetzten Investitionskosten und die Ergebnisse angegeben. Die Berechnung der Bar-

werte für die Instandhaltungs- sowie die Inspektions- und Wartungs- und Erneuerungskosten als Teilergebnis der Lebenszykluskosten erfolgt auf Grundlage der Herstellungs- bzw. Investitionskosten. Die Datengrundlage für die Investitionskosten der Variante 1 werden überschlägig nach unverbindlichen Preisauskünften der Hersteller ermittelt. Zur Berücksichtigung der Installationskosten und Kosten durch auf Grund des frühen Planungsstadiums nicht betrachteter Bauteile der RLT- und Heizungsanlage werden die ermittelten Preise mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 beaufschlagt.

Tabelle 7-9: Bauteile der Variante 1 – Nutzung

Kosten- gruppen- Nr.	Kostengruppen-Bezeichnung	Investitions- kosten (netto) in EUR
420	Wärmeversorgungsanlagen	
422	Wärmeverteilnetze:	
	Umwälzpumpen 4x	4.000
	Regelventile 4x	1.000
	Schmutzfänger 4x	400
	Absperrventile 16x	1.000
	Rückschlagklappen 4x	300
	Rohrleitungen DN 15 (110 m)	700
	Rohrleitungen DN 25 (500 m)	4.000
	Rohrleitungen DN 50 (700 m)	8.400
	Temperaturfühler 4x	400
	Rohrdämmung DN 15 (110 m)	600
	Rohrdämmung DN 25 (500 m)	3.000
	Rohrdämmung DN 50 (700 m)	8.400
423	Raumheizflächen:	
	Flachheizkörper mit Thermostatventilen	88.700
	Gesamt	120.900
	Gesamt mit Faktor 1,5	181.350
430	Lufttechnische Anlagen	
432	Teilklimaanlagen:	
	Luftkanäle 200 mm	12.200
	Luftkanäle 500 mm	24.400
	Luftdurchlässe	54.900
	Variable Volumenstromregler	30.500
	Schalldämpfer	12.200
434	Kälteanlagen:	
	Umwälzpumpen 2x	7000
	Gesamt	141.200
	Gesamt mit Faktor 1,5	211.800

Die Kosten für die Flachheizkörper, Luftkanäle und -durchlässe sowie Volumenstromregler und Schalldämpfer werden über den bereits im Rahmen der Ökobilanz beschriebenen Flächenansatz anhand der ermittelten Bauteilmengen der Referenzräume „Physik Raum 2“ und „Chemie Raum 1“ in den Gl. (61) bis (66) berechnet.

$$k_{HK} = 950 \frac{\text{EUR}}{\text{Stück}} \cdot \frac{3 \text{ Stück}}{93 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 88700 \text{ EUR} \quad (61)$$

$$k_{LK,200} = 20 \frac{\text{EUR}}{\text{m}} \cdot \frac{20 \text{ m}}{95 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 12200 \text{ EUR} \quad (62)$$

$$k_{LK,500} = 40 \frac{\text{EUR}}{\text{m}} \cdot \frac{20 \text{ m}}{95 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 24400 \text{ EUR} \quad (63)$$

$$k_{LD} = 150 \frac{\text{EUR}}{\text{Stück}} \cdot \frac{12 \text{ Stück}}{95 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 54900 \text{ EUR} \quad (64)$$

$$k_{VVS-R} = 250 \frac{\text{EUR}}{\text{Stück}} \cdot \frac{4 \text{ Stück}}{95 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 30500 \text{ EUR} \quad (65)$$

$$k_{SD} = 100 \frac{\text{EUR}}{\text{Stück}} \cdot \frac{4 \text{ Stück}}{95 \text{ m}^2} \cdot 2896 \text{ m}^2 \approx 12200 \text{ EUR} \quad (66)$$

Die Kosten für die Umrüstung der RLT-Zentrale mit Hochdruck-Sprühbefeuchter und Osmoseanlage sowie Multifunktionsregister und Hydraulikstation werden direkt beim Hersteller erfragt und belaufen sich wie aus einem unverbindlichen Angebot resultiert auf etwa 90.000 EUR. Sie werden der Kostengruppe 432 zugerechnet. Die nachfolgende Tabelle stellt die im Rahmen der Berechnung der Lebenszykluskosten veranschlagten Netto-Investitionskosten zusammenfassend dar.

Tabelle 7-10: Investitionskosten der Variante 1

Kostengruppen-Nr.	Kostengruppen-Bezeichnung	Investitionskosten (netto)
420	Wärmeversorgungsanlagen	181.350 EUR
430	Lufttechnische Anlagen	301.800 EUR

Um den Barwert der Instandhaltungskosten zu berechnen, werden zunächst die Nutzungskosten für die Instandhaltung ($K_{N,I}$) ermittelt. Diese resultieren unter Verwendung der in Tabelle 3-5 angeführten Prozentsätze für die Instandhaltung der einzelnen Kostengruppen ($p_{N,I,KG}$) aus Gl. (67).

$$K_{N,I} = K_{H,KG420} \cdot p_{N,I,KG420} + K_{H,KG430} \cdot p_{N,I,KG430}$$

$$= K_{H,KG420} \cdot 0,0066 + K_{H,KG430} \cdot 0,0110$$

$$= 181350 \text{ EUR} \cdot 0,0066 + 301800 \text{ EUR} \cdot 0,0110 = 4516,71 \text{ EUR} \quad (67)$$

Der Barwert der Instandhaltungskosten berechnet sich dann nach Gl. (12) unter Berücksichtigung der in Tabelle 3-3 aufgeführte Preissteigerungsrate von 2,0 % und einem Kalkulationszinssatz von 1,5 % zu dem resultierenden Ergebnis in Gl. (68).

$$BW_I = \sum_{t=0}^{24} \frac{K_{N,I} \cdot (1+0,02)^t}{(1+0,015)^t} = 114755,23 \text{ EUR} \quad (68)$$

Der Barwert der Inspektions- und Wartungskosten berechnet sich unter Verwendung der Prozentsätze für den Wartungs- und Inspektionskostenanteil an den Investitionskosten analog zu den Gl. (67) und (68).

$$BW_{IW} = \sum_{t=0}^{24} \frac{(K_{H,KG420} \cdot 0,0041 + K_{H,KG430} \cdot 0,0096) \cdot (1+0,02)^t}{(1+0,015)^t} = 92161,84 \text{ EUR} \quad (69)$$

Da für die Berechnung der Lebenszykluskosten ein Betrachtungszeitraum von 25 Jahren gewählt wird, ist die Betrachtung etwaiger Ersatzinvestitionen für Lüftungs- und Heizungsanlage nicht notwendig, weil deren vorausgesagte Nutzungsdauer mit 25 Jahren angegeben ist [33, S. 10]. Der Austausch etwaiger Anlagenbauteile ist im Rahmen der Instandhaltungskosten berücksichtigt.

Als Grundlage der Berechnung des Barwerts der Energiekosten der Bestandsanlagen dienen die ermittelten Endenergiebedarfe. Zunächst werden nach Gl. (14) die aktuellen jährlichen Kosten für Strom und Fernwärme in den Gleichungen (70) und (71) ermittelt. Der energieträgerspezifische Endenergiepreis wird Tabelle 3-4 entnommen.

$$K_{SM} = Q_{E,SM} \times k_{SM} = 161368 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,200 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}} = 32273,60 \frac{\text{EUR}}{\text{a}} \quad (70)$$

$$K_{FW} = Q_{E,FW} \times k_{FW} = 578170 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,077 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}} = 44519,09 \frac{\text{EUR}}{\text{a}} \quad (71)$$

Nach Gl. (13) resultieren die Energiekosten für die Nutzung der Bestandsanlagen im ersten Nutzungsjahr wie in nachfolgender Gleichung ausgeführt.

$$K_{N,EK} = K_{SM} + K_{FW} = 32273,60 \frac{\text{EUR}}{\text{a}} + 44519,09 \frac{\text{EUR}}{\text{a}} = 76792,69 \frac{\text{EUR}}{\text{a}} \quad (72)$$

Damit ergibt sich nach Gl. (12) mit dem Kalkulationszinssatz von 1,5 % und einer jährlichen Energiepreissteigerung von 5 % für den Barwert der regelmäßigen Energiekosten über den Betrachtungszeitraum von 25 Jahren das Ergebnis aus Gl. (72).

$$BW_{EK} = \sum_{t=0}^T \frac{K_{N,EK} \cdot (1+m_i)^t}{(1+z)^t} = \sum_{t=0}^{24} \frac{76792,69 \frac{\text{EUR}}{\text{a}} \cdot (1+0,05)^t}{(1+0,015)^t} = 2970569,45 \frac{\text{EUR}}{25\text{a}} \quad (73)$$

Die Barwerte werden abschließend gemäß Gl. (11) und (10) aufsummiert und auf die Brutto-Grundfläche des Gebäudes bezogen.

$$bw_0 = \frac{\sum BW_i}{A_{BGF}} = \frac{(114755,23 + 92161,84 + 2970569,45) \text{ EUR}}{3051 \text{ m}^2} = 1200 \frac{\text{EUR}}{\text{m}^2} \quad (74)$$

Die Lebenszykluskosten der Bestandsanlagen werden analog zum oben beschriebenen Vorgehen berechnet. Allerdings werden die Rohrleitungen aus Tabelle 5-1 verwendet und die Kosten für Heizkörper nur auf die Verkehrsflächen hochgerechnet. Für die RLT-

Anlage werden die aus der Umrüstung resultierenden Kosten für Hochdruck-Sprühbe- feuchter und Osmoseanlage sowie Multifunktionsregister und Hydraulikstation nicht berechnet. Die Kosten für das Luftkanalnetz der Variante 1 werden aber in gleicher Höhe für die Bestandsanlagen veranschlagt, da die Kanaldimensionen des Bestandes durch die Ausführung als Hochdruck-Anlage zwar geringer sind, die Ausführung als Zweikanalsys- tem aber mit dem Einbau eines annähernd redundanten Kanalsystems einhergeht. Die nachfolgende Tabelle zeigt die bilanzierten Investitions- bzw. Herstellkosten der Be- standsanlagen.

Tabelle 7-11: Investitionskosten der Bestandsanlagen

Kostengruppen-Nr.	Kostengruppen-Bezeichnung	Investitionskosten (netto)
420	Wärmeversorgungsanlagen	85.950 EUR
430	Lufttechnische Anlagen	211.800 EUR

7.5.2 Ergebnis

Abbildung 7-7 zeigt zusammenfassend die Barwerte sowie die Herstellungskosten der Bestandsanlagen. Für die Bestandsanlagen ergibt sich ein Anteil der regelmäßigen Ener- giekosten von etwa 92 % an den Gesamtlebenszykluskosten. Die auf die Brutto-Grund- fläche bezogenen Lebenszykluskosten betragen für den Bestand 1813 €/m².

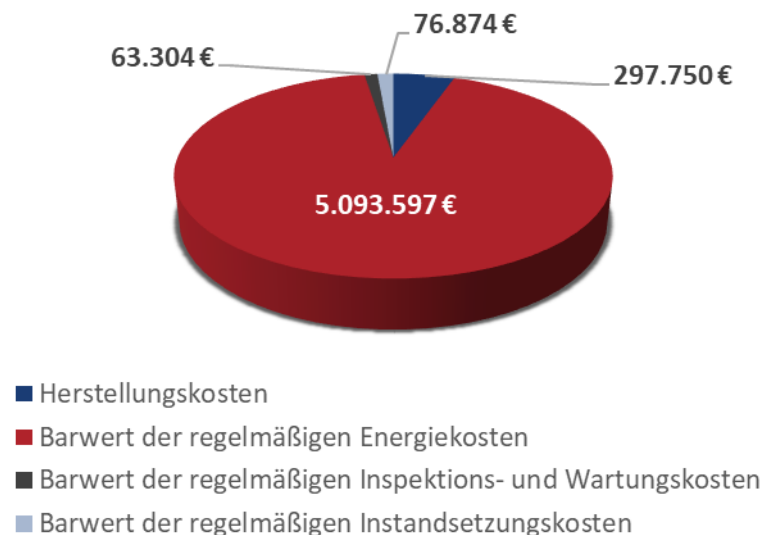
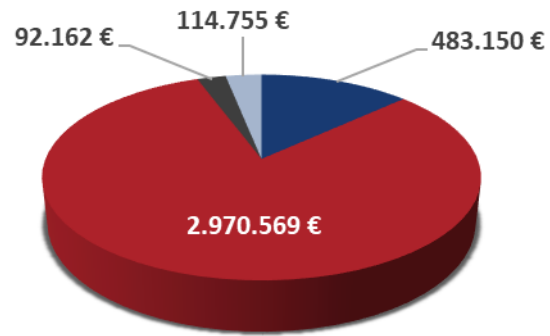


Abbildung 7-7: Lebenszykluskosten der Bestandsanlagen

Die im vorausgehenden Abschnitt berechneten Barwerte und Herstellungskosten der Modernisierungsvariante 1 sind in Abbildung 7-8 dargestellt. Die flächenbezogenen Le- benszykluskosten der Anlagenvariante 1 betragen mit diesen Werten 1200 EUR/m². Der Anteil der regelmäßigen Energiekosten an den Lebenszykluskosten liegt bei 80 %.



- Herstellungskosten
- Barwert der regelmäßigen Energiekosten
- Barwert der regelmäßigen Inspektions- und Wartungskosten
- Barwert der regelmäßigen Instandsetzungskosten

Abbildung 7-8: Lebenszykluskosten der Variante 1

8 Variante 2

8.1 Systembeschreibung

Die Wärmeversorgung des Gebäudes erfolgt über die bereits in Variante 1 beschriebene Heizungsanlage. Die RLT-Anlage wird ebenfalls wie in Variante 1 beschrieben ausgeführt, zusätzlich aber um ein Kreislaufverbundsystem zur Wärme- bzw. Kälterückgewinnung ergänzt. In der Abluft der RLT-Zentrale (bei eventuellem Platzmangel Einbau im Abluftkanal) wird hierbei ein Wärmeübertrager in Kombination mit einem Hochdruck-Luftbefeuchter zur indirekten Verdunstungskühlung installiert. Der Wärmeübertrager in der Zuluft ersetzt den Vorerhitzer und ehemaligen Kühler der Anlage. Zusätzlich wird eine Hydraulikstation installiert, in der alle Medienströme des WRS, des Befeuchters und Multifunktionsregisters zusammengeführt werden und so nach aktuellem Wärmebedarf über Misch- und Umschaltventile die optimale Versorgung der Anlage sicherstellen. Darüber hinaus ermöglicht die Hydraulikstation die Einbindung der RLT-Anlage in das bestehende BUS-System und damit die Aufschaltung der Anlage auf die Gebäudeleittechnik.

Tabelle 8-1: RLT-Anlage

Erzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Zentrale Zu- und Abluftanlage zur vollständigen Belüftung • Betriebsweise: bedarfsgeregelt • Variabler Volumenstrom • Auslegungsvolumenstrom: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 35.800 m³/h ▪ 41.900 m³/h im Kühlbetrieb • Heizung der Zuluft auf 20 °C im Winter • Kühlung der Raumluft auf 26 °C im Sommer • Befeuchtung: Hochdruck-Sprühbefeuchter Regelung: stufenlos geregelt Soll-Wert: 25 % relative Feuchte Pumpe: drehzahlgeregelt, bedarfsausgelegt Leitungslänge des Pumpenverteilkreises: 30 m • Wärme-/Kälterückgewinnungssystem: Kreislaufverbundsystem mit indirekter Verdunstungskühlung Rückwärmezahl: 0,60
Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> • SFP des Zu- und Abluftventilators: 2,00 kW/(m³s) • Alle Luftkanäle nicht an Außenluft
Übergabe	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeträgermedium: Luft • Versorgung der Verkehrsflächen und Unterrichtsräume über Drallluft-Auslässe

8.2 Dimensionierung

8.2.1 RLT-Anlage

Erzeugung/Aufbereitung im Winterbetrieb

Abbildung 8-1 zeigt das dazugehörige Schema der RLT-Anlage, wobei der Zuluft-Ventilator abweichend von dem gezeigten Schema nach dem Multifunktionsregister angeordnet ist.

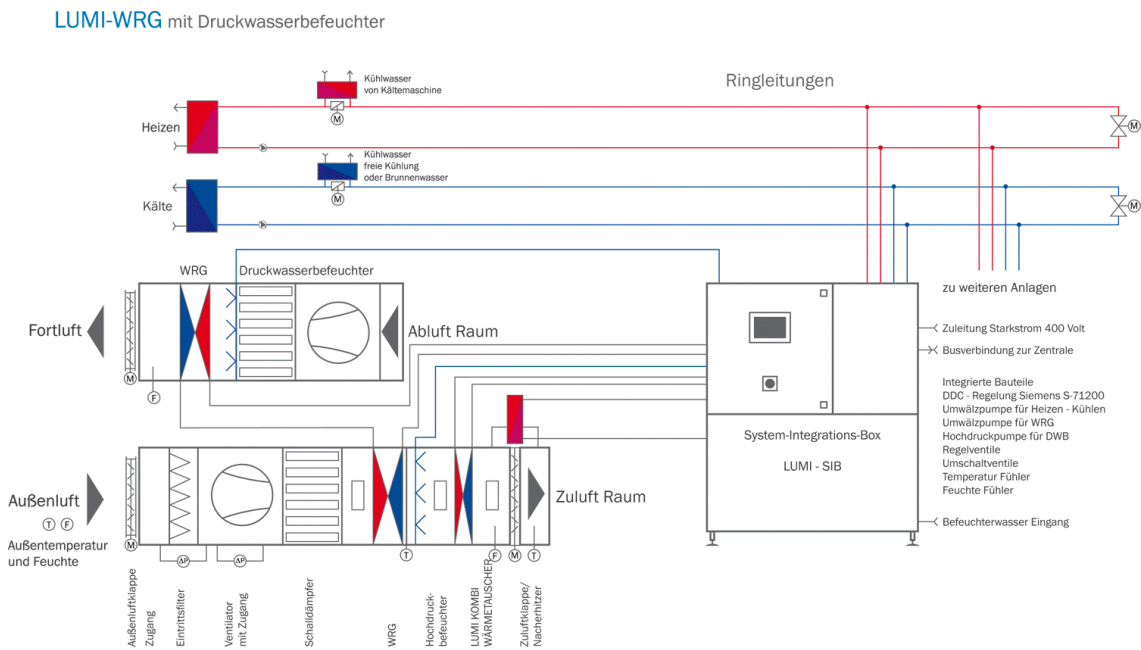


Abbildung 8-1: RLT-Anlage der Variante 2 [54]

Im Winterbetrieb wird Wärme aus der Abluft durch das Kreislaufverbundsystem auf die kalte Außenluft übertragen. Der Wärmeübertrager in der Zuluft muss die Außenluft dabei auf mindestens 10 °C erwärmen, um die anschließende adiabate Befeuchtung mittels Hochdruck-Luftbefeuchter zu ermöglichen. Um einer Vereisung des Kondensats der Fortluft auf den Lamellen des Wärmeübertragers des Kreislaufverbundsystems entgegenzuwirken, wird die Leistung des WRS über drehzahlgeregelte Umwälzpumpen begrenzt. Für den Auslegungsfall bei -12 °C Außentemperatur wird daher mit einer Zuluft-Temperaturerhöhung durch das WRS auf 3 °C gerechnet. Die darüber hinaus benötigte Wärme wird dem Zuluft-Wärmeübertrager über die Warmwasserpumpenheizung zugeführt. Die Fortlufttemperatur beträgt hinter dem WRS noch 5 °C. Die Rückwärmezahl des WRS liegt in diesem Fall bei 0,47 und wird basierend auf Gl. (75) ermittelt.

$$\eta_t = \frac{\vartheta_{WRS} - \vartheta_{AUL}}{\vartheta_{ABL} - \vartheta_{AUL}} = \frac{3\text{ °C} + 12\text{ °C}}{20\text{ °C} + 12\text{ °C}} = 0,47 \quad (75)$$

Die Wärmeleistung des Zuluft-Wärmeübertragers des WRS entspricht der Leistung des Vorerhitzers aus Variante 1.

$$\dot{Q}_{\text{WRS,W}} = \dot{Q}_{\text{VE}} = 213,8 \text{ kW} \quad (76)$$

Davon muss die nach Gl. (77) ermittelte Wärmeleistung durch das konventionelle Heizungssystem erbracht werden.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{WWPH}} &= \dot{m}_{\text{VVS,W}} \cdot c_{p_L} \cdot (\vartheta_{\text{WRS,W}} - \vartheta_{\text{WRS,A}}) \\ &= 9,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (10 - 3)\text{K} = 67,3 \text{ kW} \end{aligned} \quad (77)$$

Die Leistungen, Massenströme und der Wasserverbrauch des Luftbefeuchters und des Multifunktionsregisters bleiben gleich und entsprechen den bei Variante 1 berechneten Werten. Nachfolgende Tabelle fasst die Luftzustände für den beschriebenen Betriebsfall im Winter zusammen. Die Luftfeuchte der Raumluft resultiert aus der Summe der Feuchte der Zuluft und der in Gl. (23) ermittelte Feuchteabgabe durch die nutzenden Personen.

Tabelle 8-2: Luftzustandsdaten im Winterbetrieb

Luftzustand		Temperatur	Relative Feuchte	Spezifische Enthalpie	Absolute Feuchte
		°C	%	kJ/kg	g/kg
Außenluft	AUL	-12,0	90,0	-9,1	1,2
Wärmerückgewinnungssystem, Winter	WRS, W	3,0	25,7	6,0	1,2
Wärmerückgewinnungssystem, Austritt	WRS, A	10,0	15,9	13,1	1,2
Luftbefeuchter	LB	4,0	71,8	13,1	3,6
Zuluft	ZUL	20,0	25	29,2	3,6
Raumluft	RAL	20,0	29,8	31,0	4,3

Erzeugung/Aufbereitung im Sommerbetrieb

Im Sommerbetrieb wird die 26 °C warme Raumluft/Abluft vor dem WRS adiabatisch bis kurz vor den Sättigungszustand befeuchtet und kühlt sich dabei auf ca. 20 °C ab. Die dafür benötigte Wassermenge wird in Analogie zur Gl. (40) berechnet.

$$\dot{m}_{\text{W,LK}} = 41900,8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (15,4 - 13,5) \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 96330 \frac{\text{g}}{\text{h}} \quad (78)$$

Mit einer durchschnittlichen Rückwärmezahl von 0,6 resultiert eine Zulufttemperatur von 25 °C hinter dem WRS.

$$\begin{aligned}\vartheta_{\text{WRS}} &= \eta_t(\vartheta_{\text{ABL}} - \vartheta_{\text{AUL}}) + \vartheta_{\text{AUL}} \\ &= 0,6 \cdot (21 \text{ °C} - 31 \text{ °C}) + 31 \text{ °C} = 25 \text{ °C}\end{aligned}\quad (79)$$

Die Leistung des Multifunktionsregisters bzw. des Kühlers wird dann nach Gl. (80) berechnet.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{MFR,S}} &= \dot{m}_{\text{VVS,S}} \cdot c_{p_L} \cdot (\vartheta_{\text{ZUL}} - \vartheta_{\text{WRS,S}}) \\ &= 14,08 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot (20 - 25)\text{K} = -70,4 \text{ kW}\end{aligned}\quad (80)$$

Tabelle 8-3 zeigt die Luftzustände im Sommerbetrieb. Die Hydraulikstation wird an die vorhandene Unterverteilung der Warmwasserpumpenheizung angeschlossen. Für die RLT-Anlage sind gemäß Abschnitt 8.2.1 221 kW Wärmeleistung vorzuhalten. Die benötigte Kälteleistung am Multifunktionsregister der RLT-Anlage beträgt bei dieser Variante ca. 70 kW. Die Wärmeleistung der Heizungsanlage ergibt sich aus der Heizlastberechnung aus Abschnitt 6.4 und beträgt 158 kW.

Tabelle 8-3: Luftzustandsdaten im Sommerbetrieb

Luftzustand		Temperatur	Relative Feuchte	Spezifische Enthalpie	Absolute Feuchte
		°C	%	kJ/kg	g/kg
Fortluft	FOL	20,7	100	59,8	15,4
Außenluft	AUL	31,0	42,7	61,8	12,0
Wärmerückgewinnungssystem, Sommer	WRS,S	25	60,6	55,7	12,0
Zuluft	ZUL	20,0	82,0	50,5	12,0
Raumluft	RAL	26,0	64,1	60,5	13,5

8.2.2 Endenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf nach EnEV reduziert sich mit der Variante 2 im Vergleich zur Variante 1 um weitere 43 auf 197 kWh/m²a. Der Anforderungswert nach EnEV 2016 von 177 kWh/m²a wird nicht eingehalten.



Abbildung 8-2: EnEV-Bewertung – Variante 2

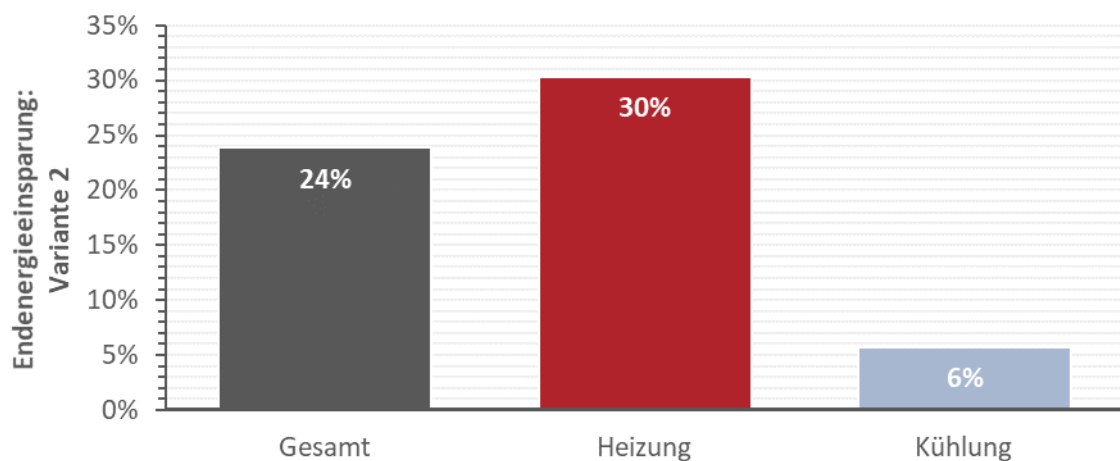
Die nachfolgende Tabelle fasst die Endenergiebedarfe der Variante 2 zusammen.

Tabelle 8-4: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Variante 2

Energie-träger	Gesamt in kWh/a	Heizung in kWh/a	Kühlung in kWh/a	Lüftung in kWh/a	Beleuchtung in kWh/a
Strom-Mix	159.776	925	16.160	100.796	41.907
Fernwärme	403.139	403.139			

Abbildung 8-3 stellt die prozentualen Einsparungen der Endenergie im Vergleich zur Variante 1 dar. Durch das WRS werden im Bereich der Heizung 30 % eingespart. Die geringe Einsparung im Bereich der Kühlung resultiert aus dem anteilig geringen Kühlbedarf sowie der fehlenden Möglichkeit zur Berücksichtigung der indirekten Verdunstungskühlung im Rahmen der Energiebedarfsbilanzierung mittels DIN V 18599. Auf den gesamten Endenergiebedarf bezogen ergeben sich im Vergleich mit Variante 2 Einsparungen von 24 %.

Abbildung 8-3: Endenergieeinsparungen – Variante 2 vs. Variante 1



Auf die Energieträger bezogen werden nicht merkliche Einsparungen bei der Verwendung des Strom-Mix erzielt. Die Einsparungen durch den reduzierten Strombedarf der Kältemaschine gleichen sich hier durch den zusätzlichen Energiebedarf der Pumpen des WRS aus, so dass keine nennenswerten Einsparungen resultieren. Anders stellt es sich bei der Fernwärme dar. Durch das WRS ist hier eine Verringerung des Bedarfs um 30 % im Vergleich zur Variante 1 festzustellen. Abbildung 8-4 stellt die Endenergieeinsparungen nach Energieträgern im Vergleich zu Variante 1 dar.

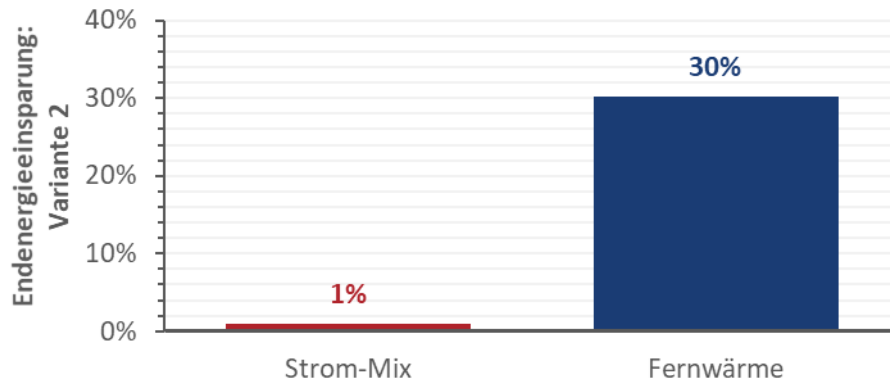


Abbildung 8-4: Endenergieeinsparungen (Energieträger) – Variante 2 vs. Variante 1

8.3 Ökobilanz

Nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Ökobilanz der Variante 2 zusammen. Im Vergleich zur Variante 1 lassen sich die durchschnittlichen prozentualen Umweltwirkungen um 15 % verringern.

Tabelle 8-5: Ökobilanz der Variante 2 – Nutzung

Indikator/ Umweltwirkung	Einheit	Gesamt
GWP	kg CO ₂ -Äqv./m ² _{NGFa}	65,88
ODP	kg R11-Äqv./m ² _{NGFa}	2,0715E-09
POCP	kg Ethen-Äqv./m ² _{NGFa}	7,8741E-03
AP	kg SO ₂ -Äqv./m ² _{NGFa}	0,0891480793
EP	kg PO ₄ -Äqv./m ² _{NGFa}	0,0139042354
PE _{ges}	kWh/m ² _{NGFa}	298,34
PE _{ne}	kWh/m ² _{NGFa}	227,16
PE _e	kWh/m ² _{NGFa}	71,18

Abbildung 8-5 verdeutlicht, dass bis auf das Ozonschichtabbaupotenzial alle Einsparungen bei den Umweltwirkungen im zweistelligen Prozentbereich liegen. Der Primärenergiebedarf reduziert sich insgesamt um weitere 16 %, wovon mit 19 % ein Großteil auf die Verringerung des nicht erneuerbaren Anteils zurückgeht.

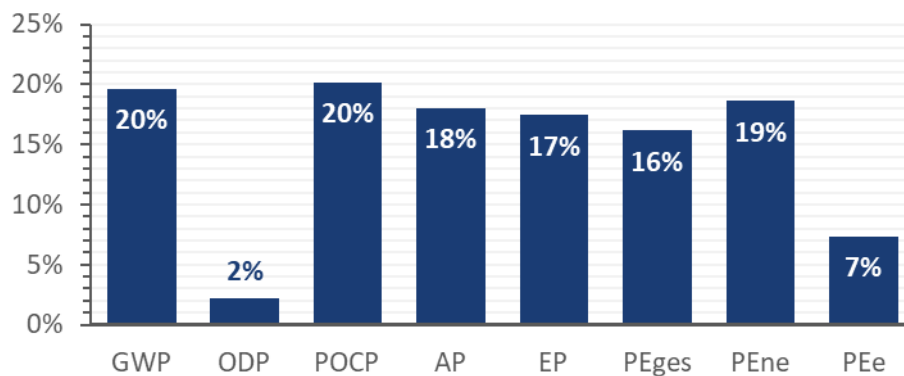


Abbildung 8-5: Verringerung der Umweltwirkungen – Variante 2 vs. Variante 1

8.4 Lebenszykluskosten

Für die Variante 2 sind die Investitionskosten in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Für das WRS in Verbindung mit Hochdruck-Sprühbefeuchter, Osmoseanlage sowie Multifunktionsregister und Hydraulikstation ergeben sich Investitionskosten in einer Höhe von 166.973 EUR.

Tabelle 8-6: Investitionskosten der Variante 2

Kostengruppen-Nr.	Kostengruppen-Bezeichnung	Investitionskosten (netto)
420	Wärmeversorgungsanlagen	181.350 EUR
430	Lufttechnische Anlagen	378.773 EUR

Die daraus resultierenden Lebenszykluskosten sind in Abbildung 8-6 dargestellt. Der Anteil der regelmäßigen Energiekosten macht noch 75 % der gesamten Lebenszykluskosten aus. Die flächenbezogenen Lebenszykluskosten berechnen sich zu 1067 EUR/m².

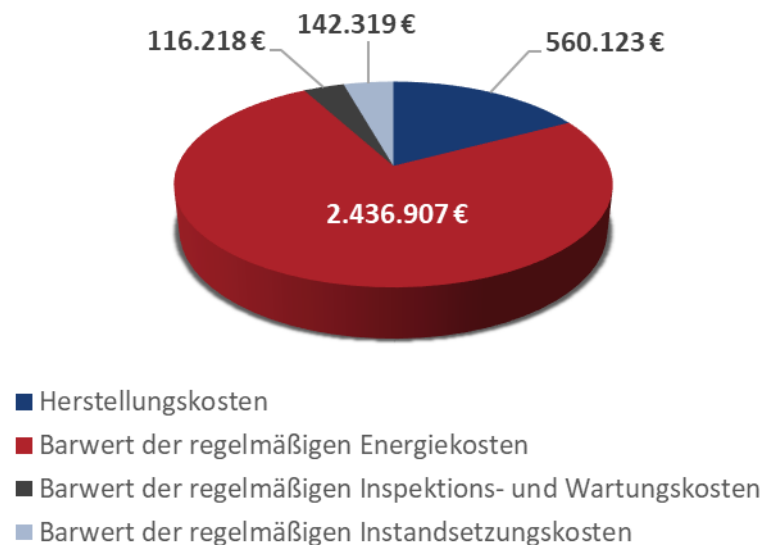


Abbildung 8-6: Lebenszykluskosten der Variante 2

9 Variante 3

9.1 Systembeschreibung

Die Heizungsanlage wird wie in Variante 1 beschrieben ausgeführt. Die Zu- und Abluft-Ventilatoren der RLT-Anlage werden gegen direkt angetriebene Radialventilatoren mit rückwärts gekrümmten Schaufeln ausgetauscht.

9.2 Dimensionierung

Neben dem Volumenstrom ist für die Dimensionierung des Ventilators die aufzubringende Gesamtdruckerhöhung entscheidend. Die Gesamtdruckerhöhung ist die Summe der Druckerhöhung infolge der Kanalreibung, der Kanaleinzel- und der Apparatwiderstände. Die Gesamtdruckerhöhung wird in dieser Untersuchung überschlägig ermittelt. Die Druckverluste sind mit einem mittleren Wert nach Recknagel/Sprenger angenommen [52, S. 1888] oder aus Herstellerangaben entnommen. Eine genaue Ermittlung der Druckverluste sollte wegen der Unsicherheit der Annahmen im Rahmen der Detailplanung erfolgen. Nachfolgende Tabellen fassen die überschlägig ermittelten Druckverluste der Apparate der RLT-Zentrale, der Einzelwiderstände des Zu- und Abluftkanalnetzes und der Kanäle zusammen.

Tabelle 9-1: Druckverluste – Zuluft

Druckverluste – Zuluft	
Bauteile	Druckverlust
	Pa
Filter	60
WRS	125
Multifunktionsregister mit Befeuchter	80
Schalldämpfer	60
Luftkanalnetz mit Abzweigungen und Bögen	150
Volumenstromregler und Telefonieschalldämpfer	100
Luftdurchlass	10
Gesamtdruckverlust	585

Tabelle 9-2: Druckverluste – Abluft

Druckverluste – Abluft	
Bauteile	Druckverlust
	Pa
Filter	60
WRS	125
Befeuchter	15
Luftkanalnetz inkl. Abzweigungen und Bögen	150
Schalldämpfer	60
Volumenstromregler und Telefonieschalldämpfer	100
Luftdurchlass	10
Gesamtdruckverlust	520

Unter Angabe von Auslegungsvolumenstrom im Sommerbetrieb und den Gesamtdruckverlusten aus den obigen Tabellen werden nach Herstellerangaben jeweils ein direktangetriebener Radialventilator mit rückwärts gekrümmten Schaufeln für Zu- und Abluft ermittelt. Nach Herstellerangaben ergeben sich SFP-Werte von 0,9 und 0,8 Ws/m³.

9.3 Endenergiebedarf

Der Primärenergiebedarf der Variante 3 beträgt 161 kWh/(m²a) und unterschreitet damit den EnEV-Anforderungswert von 177 kWh/(m²a) für modernisierte Altbauten mit gleichartiger Anlagentechnik.



Abbildung 9-1: EnEV-Bewertung – Variante 3

In Tabelle 9-3 sind die Ergebnisse der Endenergiebedarfsberechnung unterschieden nach Energieträgern zusammengefasst.

Tabelle 9-3: Endenergiebedarfe bezogen auf Energieträger – Variante 3

Energie-träger	Gesamt in kWh/a	Heizung in kWh/a	Kühlung in kWh/a	Lüftung in kWh/a	Beleuchtung in kWh/a
Strom-Mix	101.829	925	16.160	42.838	41.907
Fernwärme	403.139	403.139			

Abbildung 9-2 stellt die prozentualen Endenergieeinsparungen der Variante 3 im Vergleich zur Variante 2 dar. Durch den Austausch der Ventilatoren werden im Bereich der Lüftung über die Hälfte der Endenergie eingespart. Die Einsparungen am Gesamtendenergiebedarf betragen verglichen mit Variante 2 10 %. Bezogen auf die Energieträger wird mit Variante 3 gegenüber Variante 2 36 % des Stromendenergiebedarfs eingespart.

Im Bereich des Fernwärmebedarfs resultieren durch die Umrüstung der Ventilatoren keinerlei Einsparungen.

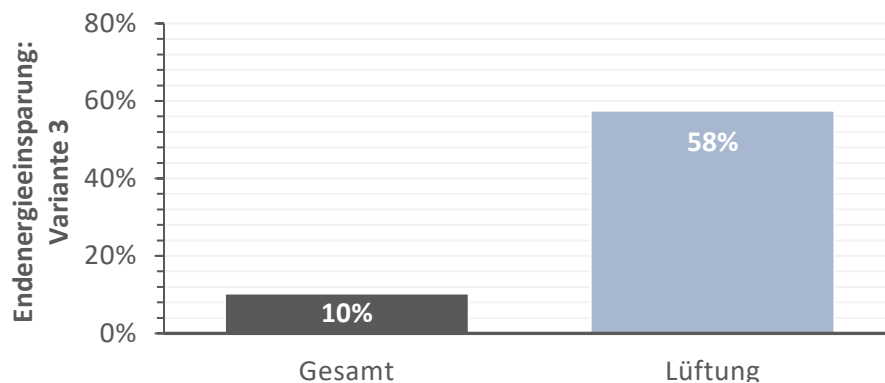


Abbildung 9-2: Endenergieeinsparungen – Variante 3 vs. Variante 2

9.4 Ökobilanz

Die nachfolgende Tabelle fasst das Ergebnis der Ökobilanz der Variante 3 zusammen. Im Vergleich zur Variante 2 lassen sich die Umweltwirkungen durchschnittlich um 22 % verringern. Aus Abbildung 9-3 ist zu erkennen, dass durch Variante 3 im Vergleich zu Variante 2 etwa ein Drittel der Umweltwirkungen des Ozonschichtabbaupotenzials vermeidbar ist. Der Primärenergiebedarf reduziert sich um 21 % im Vergleich zur Variante 2, wobei 30 % auf den erneuerbaren Anteil entfallen, was sich durch den vergleichsweise großen Beitrag der regenerativen Energien zum bundesdeutschen Strom-Mix erklären lässt

Tabelle 9-4: Ökobilanz der Variante 3 – Nutzung

Indikator/ Umweltwirkung	Einheit	Gesamt
GWP	kg CO ₂ -Äqv./m ² _{NGFa}	55,18
ODP	kg R11-Äqv./m ² _{NGFa}	1,3413E-09
POCP	kg Ethen-Äqv./m ² _{NGFa}	6,6508E-03
AP	kg SO ₂ -Äqv./m ² _{NGFa}	0,0728013070
EP	kg PO ₄ -Äqv./m ² _{NGFa}	0,0112558936
PE _{ges}	kWh/m ² _{NGFa}	236,77
PE _{ne}	kWh/m ² _{NGFa}	187,22
PE _e	kWh/m ² _{NGFa}	49,55

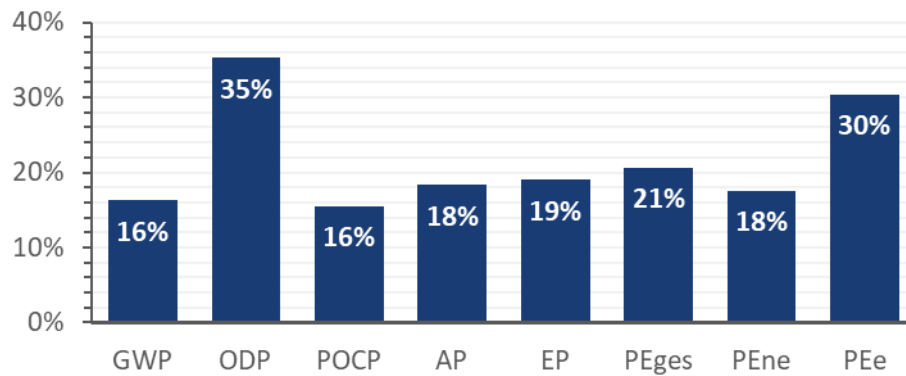


Abbildung 9-3: Verringerung der Umweltwirkungen – Variante 3 vs. Variante 2

9.5 Lebenszykluskosten

Durch die Variante 3 erhöhen sich die Investitionskosten für die Kostengruppe 430 „Lufttechnische Anlagen“ auf 478.773 EUR. Die Kosten der Kostengruppe 420 „Wärmeversorgungsanlagen“ bleiben wie für Variante 2 beschrieben bestehen. Für die einzubauenden Ventilatoren der Zu- und Abluft werden nach Herstellerangabe jeweils 30.000 EUR veranschlagt. Mit dem Einbau der Ventilatoren verringern sich die Lebenszykluskosten auf 946 EUR/m² und der Anteil der der regelmäßigen Energiekosten reduziert sich auf etwa 70 % der gesamten Lebenszykluskosten. Die Lebenszykluskosten der Variante 3 sind in Abbildung 9-4 dargestellt.

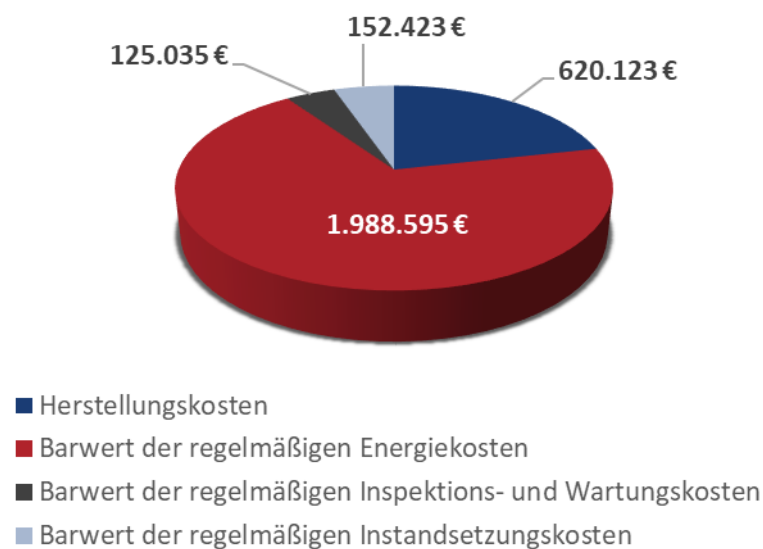


Abbildung 9-4: Lebenszykluskosten der Variante 3

10 Ergebnis

10.1 Endenergiebedarfe

In Abbildung 10-1 sind die Endenergiebedarfe der Anlagenvarianten als Anteil des Endenergiebedarfs der Bestandsanlagen zu sehen. Durch Variante 1 reduziert sich der Endenergiebedarf auf 62 % des ursprünglichen Bedarfs. Die Varianten 2 und 3 verringern den Endenergiebedarf um über die Hälfte auf 47 bzw. 42 % des Bedarfs der Bestandsanlagen.

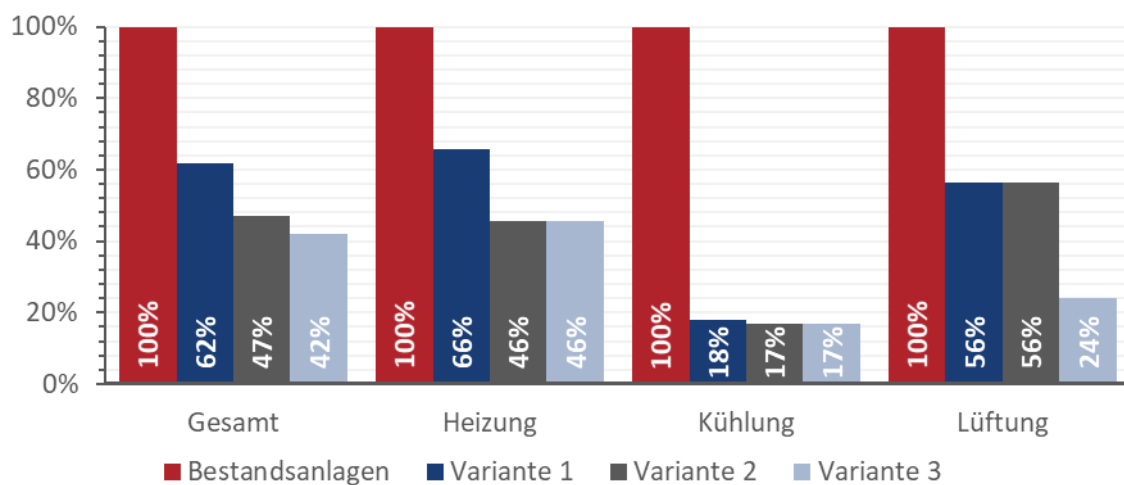


Abbildung 10-1: Vergleich der Endenergiebedarfe

Abbildung 10-2 stellt die auf den Bedarf der Bestandsanlagen bezogenen Endenergieverbräuche noch einmal nach Energieträgern unterschieden dar. Mit den Varianten 1 und 2 reduziert sich der Strombedarf um die Hälfte, mit Variante 3 auf ein Drittel des Ursprungsbedarfs. Für die Fernwärme ist mit Variante 1 eine Reduzierung des Bedarfs auf zwei Drittel und mit den Varianten 2 und 3 auf etwa die Hälfte möglich.

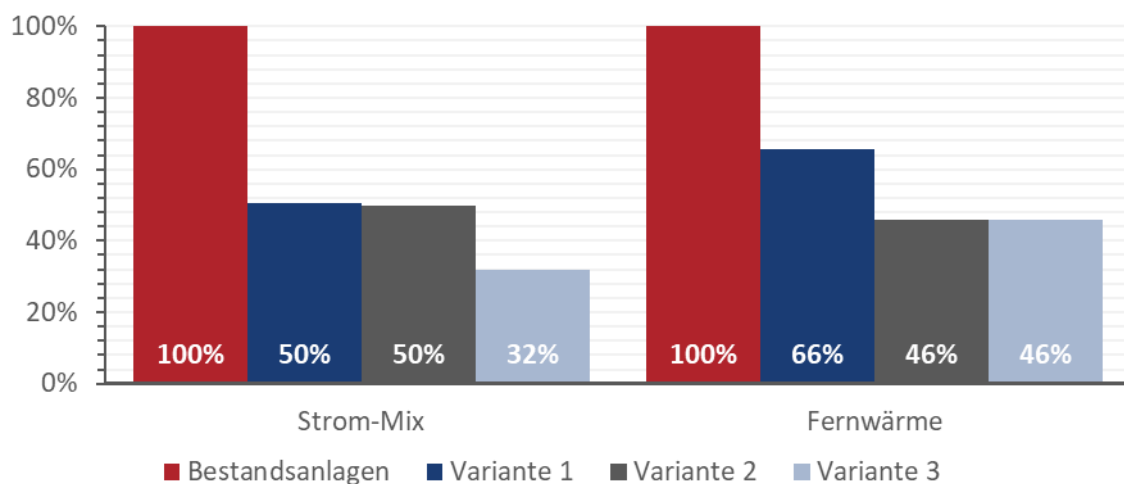


Abbildung 10-2: Vergleich der Endenergiebedarfe nach Energieträgern

10.2 Ökobilanz

10.2.1 Wirkungen auf die globale Umwelt

Abbildung 10-3 stellt das Treibhauspotenzial (GWP) der Bestandsanlagen und der untersuchten Varianten dar. Variante 3 weist das geringste Potenzial auf, die Bestandsanlagen das höchste. Für die Bestandsanlagen und die Variante 1 resultiert aus dem „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen“ eine Bewertung mit 10 von 100 möglichen Prozentpunkten. Der Grenzwert zur nächsthöheren Bewertung liegt bei 79,80 kg CO₂-Äqv./m²_{NGFa}. Die Variante 2 erzielt mit dem Wert von 65,88 kg CO₂-Äqv./m²_{NGFa} 34 Punkte. Für die Variante 3 ergeben sich nach dem BNB mit 55,18 kg CO₂-Äqv./m²_{NGFa} 55 Punkte.

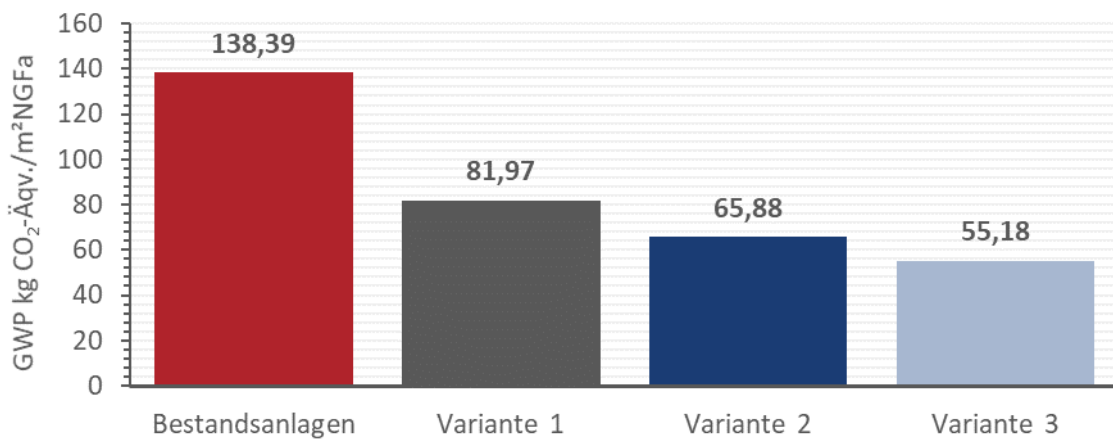


Abbildung 10-3: Treibhauspotenzial (GWP) der Varianten

Abbildung 10-4 zeigt das Ozonschichtabbaupotenzial (ODP) der Anlagen des Bestands und der untersuchten Varianten. Die Bestandsanlagen weisen das höchste und die Variante 3 weist das niedrigste Potenzial auf. Variante 1 und 2 haben ein etwa gleichgroßes Potenzial. Da das ODP der Bestandsanlagen mit dem höchsten Potenzial einen Anteil von etwa 4 % am Referenzwert des BNB hat und die untersuchten Varianten einen entsprechend geringeren Anteil aufweisen, wird das ODP von der Bewertung ausgenommen. Auf Grund des geringen Anteils am Referenzwert des ODPs wird es als ungeeigneter Indikator für die im Rahmen dieser Untersuchung erfolgende Bewertung der Anlagenvarianten eingestuft.

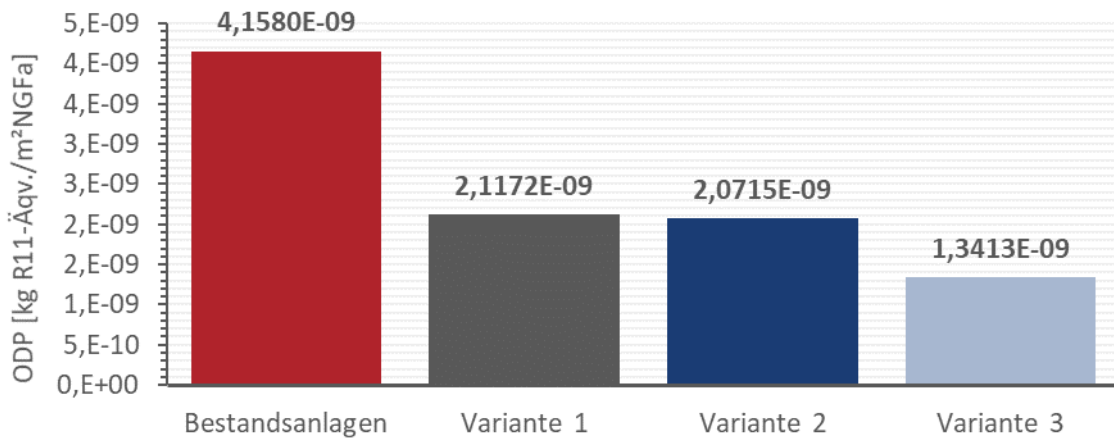


Abbildung 10-4: Ozonschichtabbaupotenzial (ODP) der Varianten

Abbildung 10-5 zeigt in Analogie zu den vorausgegangenen Darstellungen das Ozonbildungspotenzial (POCP). Qualitativ entspricht die Potenzialverteilung der des Treibhauspotenzials. Für die Bestandsanlagen resultiert aus dem BNB für das POCP von 0,0166 kg Ethen-Äqv./m²NGFa eine Bewertung mit 39 Punkten. Die Varianten 1 – 3 liegen allesamt unter dem Referenzwert des BNB und erhalten damit 100 von 100 möglichen Prozentpunkten.

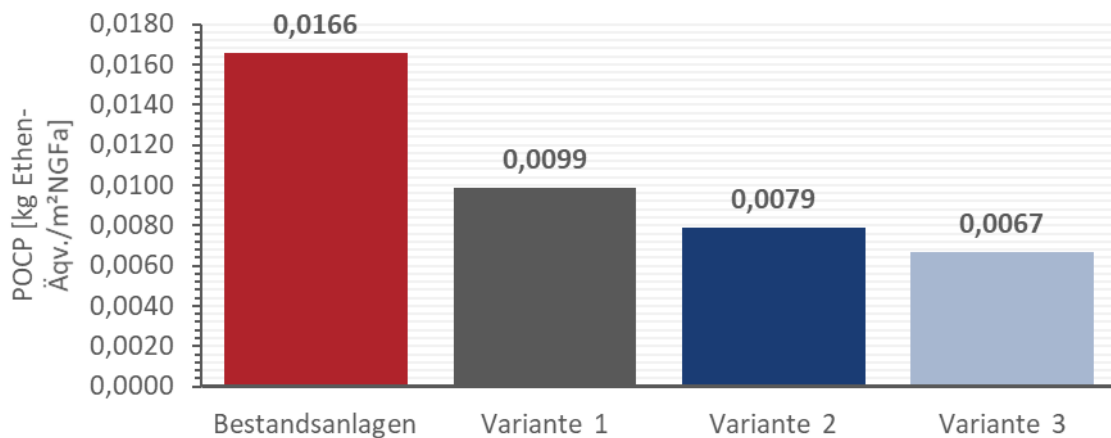


Abbildung 10-5: Ozonbildungspotenzial (POCP) der Varianten

Das Versauerungspotenzial (AP) wird von der Bewertung ausgenommen, da sowohl die Bestandsanlagen als auch die Anlagen der untersuchten Varianten 34 – 86 % unter dem Referenzwert des BNB liegen und mit den anderen Indikatoren eine ausreichende Bewertungsgrundlage vorliegt. Abbildung 10-6 stellt das AP aller untersuchten Varianten und des Bestands dar. Qualitativ ergibt sich ein mit der Darstellung des GWP und POCP vergleichbares Bild.

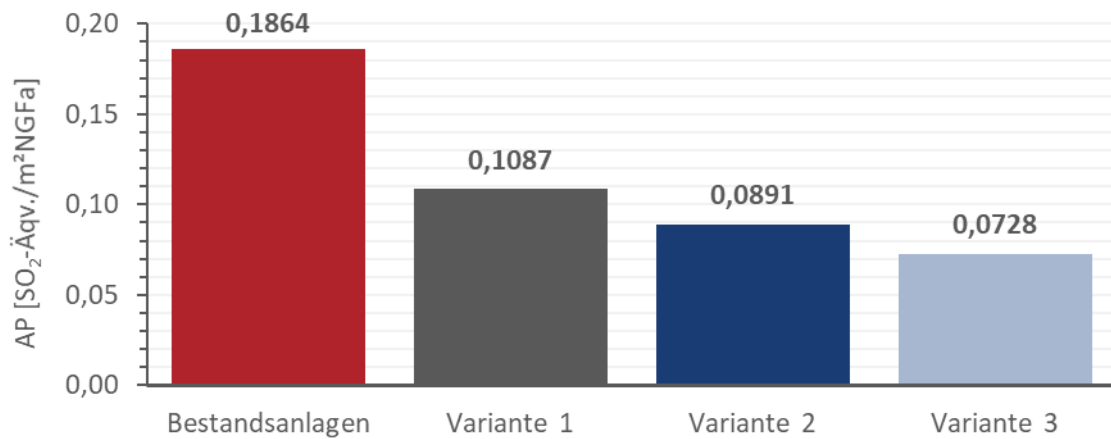


Abbildung 10-6: Versauerungspotenzial (AP) der Varianten

Aus Abbildung 10-7 ist das Überdüngungspotenzial (EP) der Bestands- und Variantenanlagen erkennbar. Für die Bestandsanlagen folgt aus dem BNB und einem EP von 0,0290 kg PO₄-Äqv./m²NGFa eine Bewertung mit 12 Punkten. Die Variante 1 erreicht mit dem EP von 0,0168 kg PO₄-Äqv./m²NGFa 83 Punkte. Für Variante 2 und 3 ergibt sich die maximale Punktzahl.

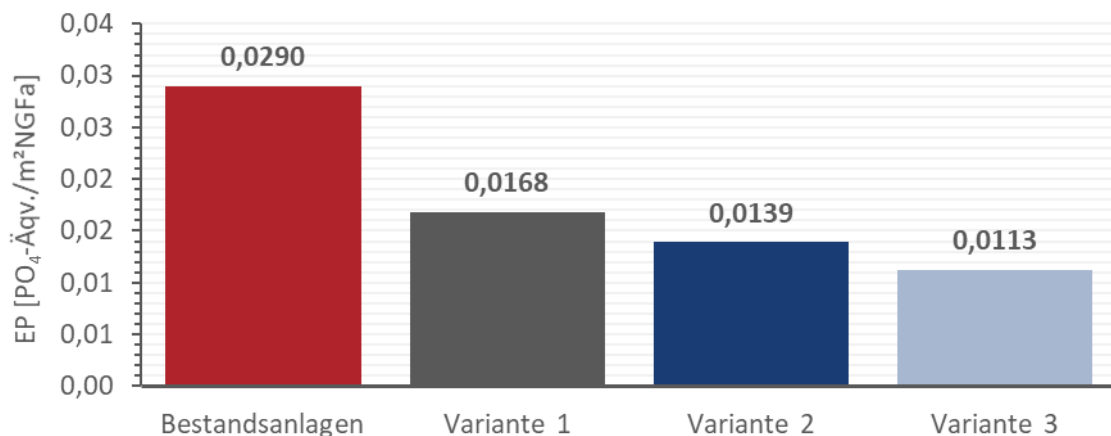


Abbildung 10-7: Überdüngungspotenzial (EP) der Varianten

10.2.2 Ressourceninanspruchnahme

In Abbildung 10-8 ist der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf der Bestandsanlagen und der untersuchten Varianten dargestellt. Die Bestandsanlagen haben mit 475,69 kWh/m²NGFa den höchsten Bedarf und erreichen nach den Kriterien des BNB 10 Punkte. Die Variante 1 und 2 erlangen mit Werten von 279,09 und 227,16 kWh/m²NGFa 56 und 86 Punkte. Variante 3 liegt unter dem Referenzwert des BNB von 203 kWh/m²NGFa und erreicht damit 100 von 100 möglichen Punkten.

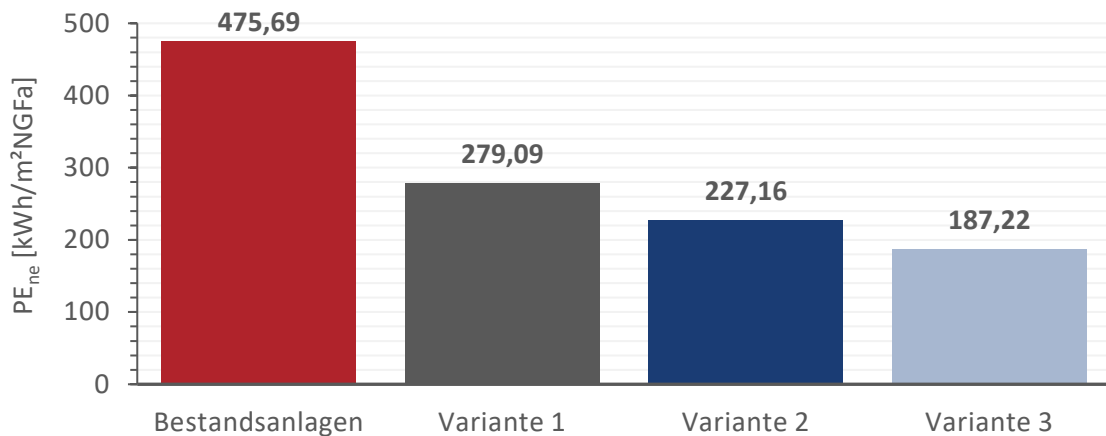


Abbildung 10-8: Primärenergiebedarf der Varianten – nicht erneuerbar

Der gesamte Primärenergiebedarf ist in Abbildung 10-9 veranschaulicht. Bei denen nach DIN V 18599 bzw. der EnEV berechneten und denen aus der Ökobilanzierung stammenden Primärenergiebedarfen kommt es durch die Verwendung von unterschiedlichen Primärenergiefaktoren zu erheblichen Abweichungen bei den Ergebnissen. Die nach BNB durch die Ökobilanz ermittelten Primärenergiebedarfe liegen etwa 50 % über denen der Berechnung nach DIN V 18599. Mit dem Gesamt-Primärenergiebedarf von 620,26 kWh/m²_{NGFa} erreichen die Bestandsanlagen nach BNB 0 Punkte. Für die Variante 1 ergibt sich aus dem Wert von 355,88 kWh/m²_{NGFa} eine Bewertung mit 8 Punkten. Variante 2 und 3 kommen mit 298,34 und 236,77 kWh/m²_{NGFa} auf 28 bzw. 45 Punkte.

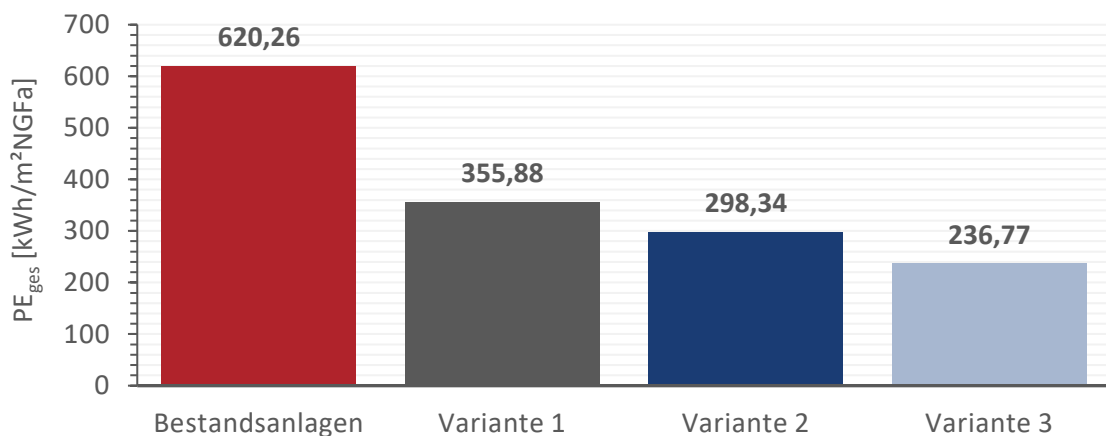


Abbildung 10-9: Primärenergiebedarf der Varianten – gesamt

Der Gesamtprimärenergiebedarf wird nach BNB zusammen mit dem erneuerbaren Anteil bewertet. Ein hoher Gesamtprimärenergiebedarf lässt sich so anteilig durch einen erhöhten Anteil erneuerbarer Energien kompensieren. Alle untersuchten Anlagenvarianten sowie die Bestandsanlagen kommen mit der Nutzung des bundesdeutschen Strom-Mix und der Fernwärme als Energieträger auf einen erneuerbaren Anteil am Primärenergiebedarf von über 20 %, was nach BNB mit jeweils 50 Punkten anzurechnen

ist. Abbildung 10-10 stellt die erneuerbaren Anteile am Primärenergiebedarf vergleichend dar.

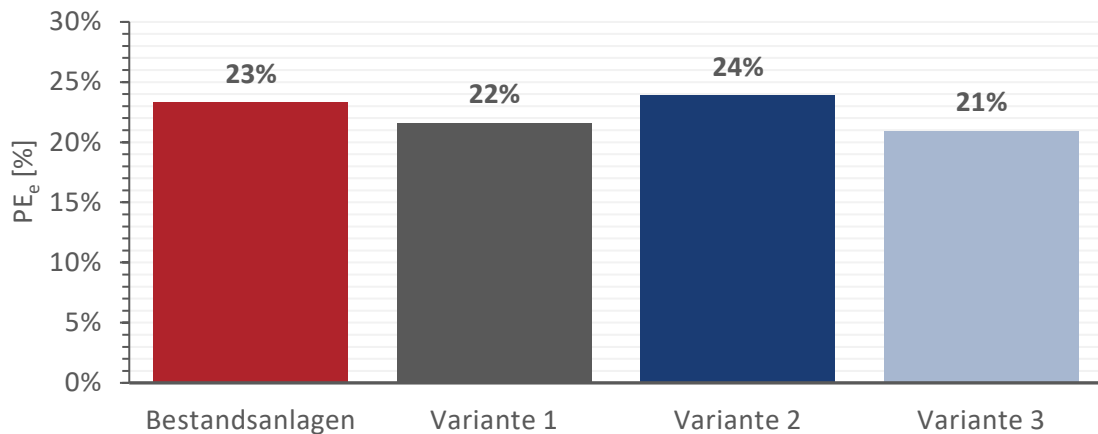


Abbildung 10-10: Primärenergiebedarf der Varianten – erneuerbarer Anteil

Für die beschriebene Bewertung der Ökobilanz der Bestandsanlagen und der Modernisierungsvarianten sind alle Zwischenwerte gemäß BNB abschnittsweise interpoliert worden. Die detaillierten Ergebnisse der Ökobilanzen sind dem digitalen Anhang beigefügt.

10.3 Lebenszykluskosten

In Abbildung 10-11 werden die auf die Brutto-Grundfläche bezogenen Lebenszykluskosten der Modernisierungsvarianten denen der Bestandsanlagen gegenübergestellt. Variante 3 weist mit 946 EUR/m² die geringsten, die Bestandsanlagen mit 1813 EUR/m² die höchsten Kosten auf. Für die Bewertung der Lebenszykluskosten wird der Variante 3 die höchstmögliche Punktzahl zugeordnet und davon ausgehend die darauffolgenden Varianten und die Bestandsanlagen nach den Intervallvorgaben des BNB bewertet. Dieses Vorgehen ist notwendig, da sich die Bewertungsskala des BNB auf die Lebenszykluskosten des gesamten Gebäudes und nicht ausschließlich auf die Anlagentechnik bezieht, so dass eine Bewertung der Lebenszykluskosten mit dem angesetzten Maßstab des BNB nicht möglich ist. Alle Zwischenwerte werden dabei in Analogie zur Bewertung der ökologischen Qualität abschnittsweise linear interpoliert. Mit diesem Vorgehen ergeben sich für die Variante 3 100 Punkte und für die Bestandsanlagen 10 Punkte. Variante 2 erreicht 85 und Variante 1 68 von 100 möglichen Punkten.

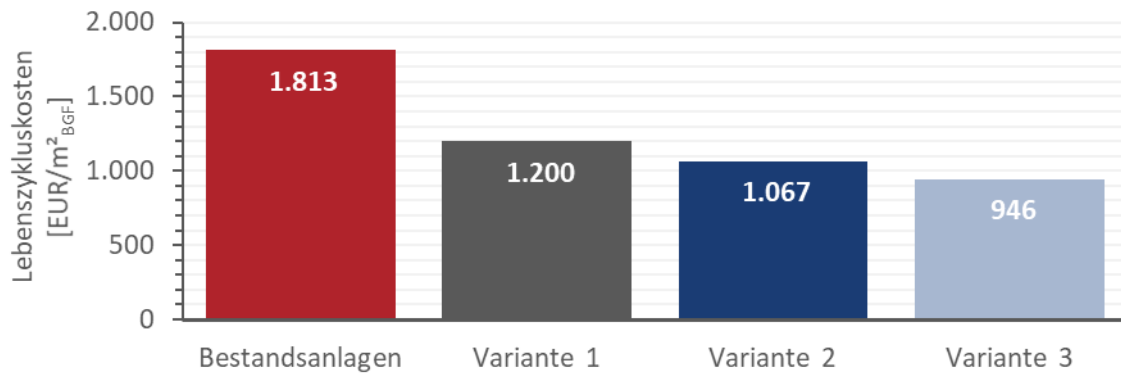


Abbildung 10-11: Lebenszykluskosten der Varianten

10.4 Bewertungsmatrix

Die nachfolgende Tabelle fasst die Bewertung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Qualität auf Grundlage der Ergebnisse der vorausgegangenen Abschnitte zusammen. Die Gewichtung der einzelnen Indikatoren ist dem BNB entnommen (vgl. Anhang B).

Tabelle 10-1: Bewertungsmatrix

Kriterium	Gewichtung	Bestandsanlagen	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Ökologische Qualität					
GWP	3	10	10	30	50
POCP	1	30	100	100	100
EP	1	20	80	100	100
PE _{ne}	3	10	56	86	100
PE _{ges} u. PE _e	2	0+50	8+50	28+50	45+50
Ökologische Qualität – gesamt		21,0	49,4	70,4	84,0
Ökonomische Qualität					
Lebenszykluskosten	1	10	68	85	100
Ökonomische Qualität – gesamt		10	68	85	100
Soziale Qualität					
Innenraumlufthygiene	3	100	74	74	74
Thermischer Komfort im Winter	2	40+10 +10	40+10 +10+10	40+10 +10+10	40+10 +10+10
Thermischer Komfort im Sommer	2	65+10	65+10 +10	65+10 +10	65+10 +10
Soziale Qualität – gesamt		81,4	76,0	76,0	76,0
Gesamtbewertung		37 %	64 %	77 %	87 %

Die Bewertung der sozialen Qualität erfolgt durch die Auslegung. Für die RLT-Anlage des Bestands ergibt sich auf Grund des hohen Außenluftvolumenstroms im Kriterium „Innenraumlufthygiene“ eine Bewertung mit 100 Punkten. Die Modernisierungsvarianten erhalten bedingt durch den für alle Varianten gleich gewählten Auslegungsvolumenstrom jeweils 74 Punkte. Eine Bewertung der mikrobiologischen Situation sowie der Konzentration flüchtiger organischer Verbindungen und Formaldehydkonzentration erfolgt im Rahmen dieser Untersuchung nicht, weshalb das Teilkriterium Kohlendioxidgehalt in der Raumluft auf 100 Punkte skaliert wird. Die Bewertung des thermischen Komforts im Winter erfolgt anhand der Teilkriterien operative Temperatur, Zugluft, Strahlungstemperatursymmetrie und Fußbodentemperatur sowie der relativen Luftfeuchte. Für alle betrachteten Varianten sowie die RLT-Anlage des Bestands ist die operative Temperatur gemäß Qualitätsniveau zwei des BNB erfüllt, woraus eine Bewertung mit 40 Punkten resultiert. Das Teilkriterium Zugluft wird von der Bestandsanlage als einzige Anlage nicht erfüllt, da die Ausführung nicht der aktuellen DIN EN ISO 7730 entspricht. Alle anderen Varianten erfüllen die Vorgabe der Norm und werden dafür mit 10 Punkten bewertet. Die Strahlungstemperatursymmetrie und Fußbodentemperatur wird ebenso wie die Einhaltung der relativen Luftfeuchte für alle Anlagen als erfüllt angesehen und mit jeweils 10 Punkten bewertet. Bei der Bewertung des thermischen Komforts im Sommer ergibt sich für die operative Temperatur für alle Anlagen die Einhaltung des Qualitätsniveaus vier des BNB und damit eine Bewertung mit 65 Punkten. Das Teilkriterium Zugluft (10 Punkte) wird wiederum von der Bestandsanlage nicht eingehalten. Die Anforderungen an Strahlungstemperatursymmetrie und Fußbodentemperatur (10 Punkte) gilt abermals für alle Varianten als erfüllt. Durch die fehlende Entfeuchtungsfunktion der RLT-Anlage der Modernisierungsvarianten ist aber das Teilkriterium relative Feuchte (10 Punkte) als unzureichend bewertet. Mit der Gewichtung des BNB ergibt sich aus den genannten Bewertungen für die soziale Qualität eine Gesamtbewertung von 81,4 Punkten für die Bestandsanlagen und 76,0 Punkten für die Modernisierungsvarianten. Ergänzend sei vermerkt, dass der hygienische Zustand des bestehenden Umlaufsprühbefeuchters in dieser Bewertung nicht berücksichtigt wird. Für die ökologische und die ökonomische Qualität ergeben sich durch die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebene Bewertung mit der Gewichtung durch des BNB für die Variante 3 die höchsten und für die Bestandsanlagen die jeweils niedrigsten Gesamtbewertungen. Für alle betrachteten Anlagen werden alle drei Qualitäten der Nachhaltigkeit mit gleicher Gewichtung zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst. Die Variante 3 erreicht in dieser Gesamtbewertung 87 %, die Variante 2 77 %, die Variante 1 64 % und die Bestandsanlagen 37 %.

10.5 Entscheidungsvorlage und Ausführungsempfehlung

Die nachfolgende Tabelle zeigt die auf den Ergebnissen der Untersuchung basierende Entscheidungsvorlage für den Bauherrn/die Bauherrin. Da die untersuchten Varianten in Bezug auf die soziale Qualität keine nennenswerten Unterschiede aufweisen, erfolgt die Ausführungsempfehlung anhand der ökologischen und ökonomischen Qualität. Nicht empfehlenswert ist die Neuplanung der RLT- und Heizungsanlage auf Grundlage der Bestandsanlage. Diese erreicht abgesehen von der sozialen Qualität in allen in dieser Untersuchung betrachteten Nachhaltigkeitsqualitäten die niedrigsten Bewertungen, woraus ebenfalls die schlechteste Gesamtbewertung resultiert. Bezüglich der ökologischen und ökonomischen Qualität sowie der Gesamtbewertung ist Variante 3 die von allen Varianten zu bevorzugende Modernisierungslösung, auch wenn die Investitionskosten der anderen Varianten und der Bestandsanlagen deutlich geringer sind, zeigt sich anhand der Lebenszykluskosten, dass die Variante 3 langfristig die wirtschaftlichere Lösung darstellt.

Tabelle 10-2: Entscheidungsvorlage

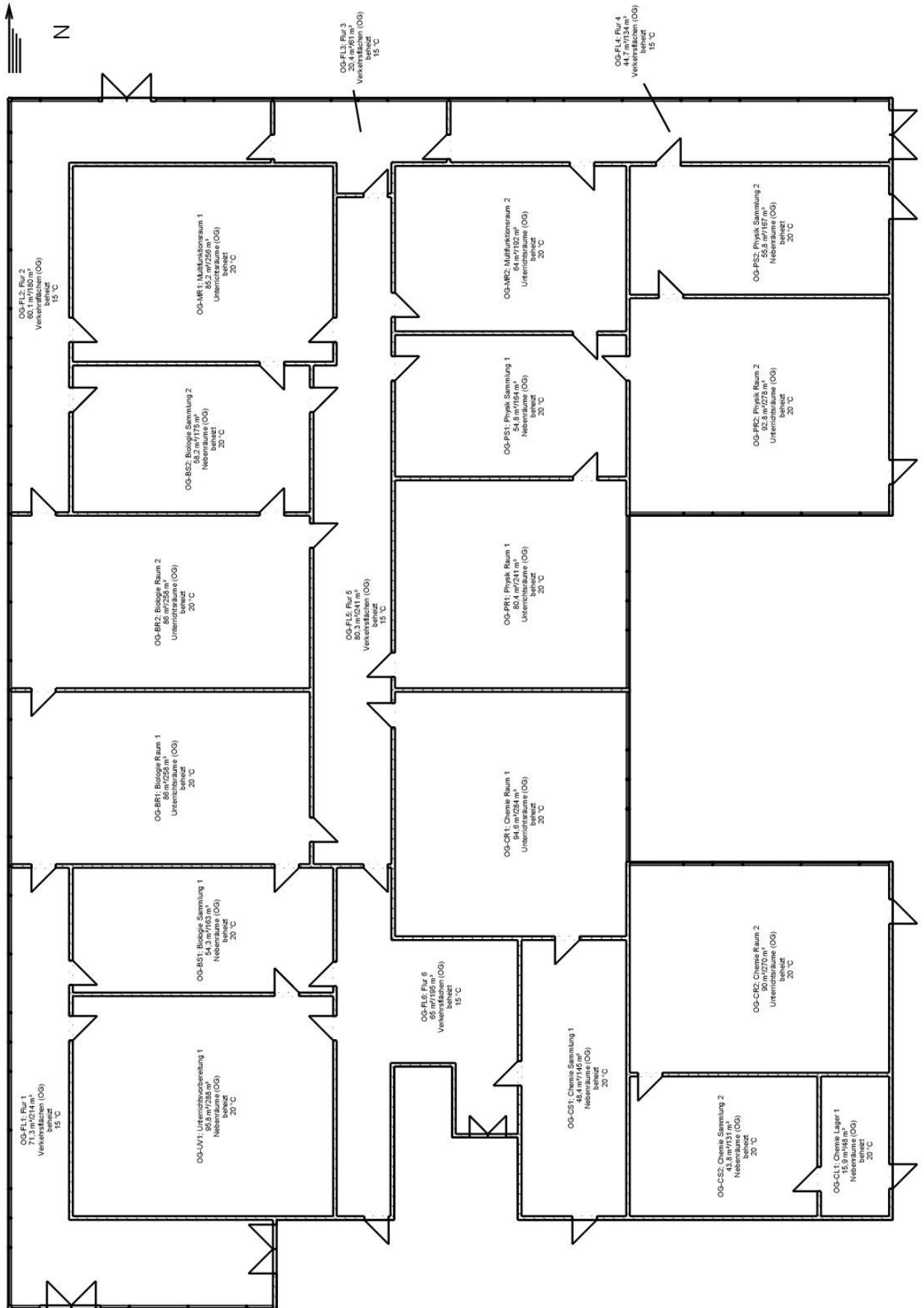
Variantenuntersuchung: RLT- und Heizungsanlage	
Aufgabe	Modernisierungsmöglichkeiten der RLT- und Heizungsanlage
Grundlagen	Anforderungsprofil der RLT- und Heizungs-Anlage: <ul style="list-style-type: none"> - Belüftung der Räumlichkeiten - Befeuchtung der Außenluft im Winter - Beheizung der Unterrichtsräume auf 20 °C im Winter - Beheizung der Verkehrsflächen auf 15 °C im Winter - Kühlung der Räumlichkeiten auf 26 °C im Sommer Einhaltung der Kategorie II nach DIN EN 15251
Varianten	<p>Bestand: RLT-Anlage als Zweikanal-Hochdruck-Anlage mit konstantem Volumenstrom zur Beheizung, Befeuchtung, Kühlung und Entfeuchtung der Unterrichtsräume des Schulgebäudes. Wärmeversorgung der Verkehrsflächen über Heizkörper.</p> <p>Variante 1: RLT-Anlage als Einkanal-Niederdruck-Anlage mit variablem Volumenstrom zur bedarfsgeregelten Belüftung, Befeuchtung und Kühlung des Schulgebäudes. Hygienische Befeuchtung über Hochdruck-Luftbefeuchter mit Umkehrosmoseanlage. Wärmeversorgung über in den Räumen installierte Flachheizkörper.</p> <p>Variante 2: Die RLT-Anlage wird wie Variante 1 ausgeführt und zusätzlich um ein energieeffizientes System zur Wärme- bzw. Kälterück-</p>

	<p>gewinnung mit indirekter Verdunstungskühlung im Sommerbetrieb ergänzt. Die Heizungsanlage ist wie bei Variante 1 beschrieben ausgeführt.</p> <p>Variante 3: Wie Variante 2 ausgeführt, aber für die RLT-Anlage ist der Austausch der bestehenden Ventilatoren mit direktangetriebenen, hocheffizienten Ventilatoren mit rückwärtsgekrümmten Laufradschaufeln vorgesehen.</p>			
Bewertung	Bestand	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Ökologische Qualität	21/100	49/100	70/100	84/100
Ökonomische Qualität	10/100	68/100	85/100	100/100
Soziale Qualität	79/100	76/100	76/100	76/100
Gesamtbewertung	37/100	64/100	77/100	87/100
Investitionskosten	<ul style="list-style-type: none"> - alle Kosten netto in EUR (Preisstand 3. Quartal 2017) - Kosten der KG 400 nach DIN 276 (ohne Berücksichtigung der KG 490 „Gebäudeautomation“) - Auswirkungen auf die KG 700 „Baunebenkosten“ bleiben unberücksichtigt 			
	Bestand	Variante 1	Variante 2	Variante 3
	297.750 EUR	483.150 EUR	560.123 EUR	620.123 EUR
Fazit/ Empfehlungen	<p>Bezüglich der sozialen Qualität unterscheiden sich die untersuchten Varianten und die Bestandsanlagen marginal. Variante 3 erreicht die besten Bewertungen im Bereich der ökologischen und ökonomischen Qualität sowie die beste Gesamtbewertung. Variante 3 ist daher trotz der höheren Investitionskosten die zu präferierende Lösung.</p>			
Entscheidung				

Anhang

Anhang A: Grundriss-Obergeschoss	i
Anhang B: Bewertungskriterien des BNB	ii
Anhang C.1: U-Werte des Schulgebäudes – Bodenplatte.....	iii
Anhang C.2: U-Werte des Schulgebäudes – Flachdach.....	iv
Anhang C.3: U-Werte des Schulgebäudes – Geschossdecke.....	v
Anhang C.4: U-Werte des Schulgebäudes – Plattendecke.....	vi
Anhang C.5: U-Werte des Schulgebäudes – Außenfenster.....	vii
Anhang C.6: U-Werte des Schulgebäudes – Außentür	viii
Anhang C.7: U-Werte des Schulgebäudes – Innentür	ix
Anhang C.8: U-Werte des Schulgebäudes – Kellerwand	x
Anhang C.9: U-Werte des Schulgebäudes – Außenwand	xi
Anhang C.10: U-Werte des Schulgebäudes – Innenwand.....	xii
Anhang D.1: Nutzungsprofil – Klassenzimmer	xiii
Anhang D.1: Nutzungsprofil – Verkehrsfläche	xiv
Anhang E: Auslegungsvolumenströme.....	xv
Anhang F: Raumheizlast nach DIN EN 12831 – OG-PR2.....	xvi
Digitaler Anhang auf CD-ROM	xviii

Anhang A: Grundriss-Obergeschoss



Anhang B: Bewertungskriterien des BNB

Nachhaltigkeitskriterien		Bedeutungsfaktor	Gewichtung Gesamtbewertung	Gewichtung Hauptkriterien-Gruppen Gesamtbewertung
Ökologische Qualität				22,5%
Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt				
1.1.1	Treibhauspotenzial (GWP)	3	3,375%	
1.1.2	Ozonschichtabbau­potenzial (ODP)	1	1,125%	
1.1.3	Ozonbildungspotenzial (POCP)	1	1,125%	
1.1.4	Versauerungspotenzial (AP)	1	1,125%	
1.1.5	Überdüngungspotenzial (EP)	1	1,125%	
1.1.6	Risiken für die lokale Umwelt	3	3,375%	
1.1.7	Nachhaltige Materialgewinnung / Holz	1	1,125%	
Ressourceninanspruchnahme				
1.2.1	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (PE _{ne})	3	3,375%	
1.2.2	Gesamtprimärenergiebedarf (PE _{ges}) u. Anteil erneuerbare Primärenergie (PE _e)	2	2,250%	
1.2.3	Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	2	2,250%	
1.2.4	Flächeninanspruchnahme	2	2,250%	
Ökonomische Qualität				22,5%
Lebenszykluskosten				
2.1.1	Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus	3	11,250%	
Wertentwicklung				
2.2.1	Drittverwendungsfähigkeit (Umnutzungsfähigkeit)	2	7,500%	
2.2.2	Vandalisprävention	1	3,750%	
Soziokulturelle und funktionale Qualität				22,5%
Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit				
3.1.1	Thermischer Komfort im Winter	2	1,500%	
3.1.2	Thermischer Komfort im Sommer	2	1,500%	
3.1.3	Innenraumluft­hygiene	3	2,250%	
3.1.4	Akustischer Komfort	2	1,500%	
3.1.5	Visueller Komfort	2	1,500%	
3.1.6	Einflussnahme des Nutzers	2	1,500%	
3.1.7	Aufenthaltsmerkmale im Außenraum	2	1,500%	
3.1.8	Sicherheit und Störfallrisiken	1	0,750%	
3.1.9	Innenraumqualität	2	1,500%	
3.1.10	Nutzungsflexibilität und Aneignung des Nutzers	3	2,250%	
Funktionalität				
3.2.1	Barrierefreiheit	2	1,500%	
-3.2.2	Flächeneffizienz (entfallen)	--	--	
-3.2.3	Umnutzungsfähigkeit (ersetzt durch 2.2.1)	--	--	
3.2.4	Zugänglichkeit	2	1,500%	
3.2.5	Fahrradkomfort	1	0,750%	
Sicherung der Gestaltungsqualität				
3.3.1	Gestalterische und städtebauliche Qualität	3	2,250%	
3.3.2	Kunst am Bau	1	0,750%	
Technische Qualität				22,5%
technische Ausführung				
4.1.1	Schallschutz (zurückgestellt)			
4.1.2	Wärme- und Tauwasserschutz	2	7,500%	
4.1.3	Reinigung und Instandhaltung	2	7,500%	
4.1.4	Rückbau, Trennung und Verwertung	2	7,500%	
Prozessqualität				10,0%
Planung				
5.1.1	Projektvorbereitung	3	1,429%	
5.1.2	Integrale Planung	3	1,429%	
5.1.3	Komplexität und Optimierung der Planung	3	1,429%	
5.1.4	Ausschreibung und Vergabe	2	0,952%	
5.1.5	Voraussetzungen für eine optimale Bewirtschaftung	2	0,952%	
Bauausführung				
5.2.1	Baustelle / Bauprozess	2	0,952%	
5.2.2	Qualitätssicherung der Bauausführung	3	1,429%	
5.2.3	Systematische Inbetriebnahme	3	1,429%	
Standortmerkmale				0,0%
Standortmerkmale				
6.1.1	Risiken am Mikrostandort	2	--	
6.1.2	Verhältnisse am Mikrostandort	2	--	
-6.1.3	Quartiersmerkmale (entfallen)	--	--	
6.1.4	Verkehrs­anbindung	3	--	
6.1.5	Nähe zu nutzungsrelevanten Einrichtungen	2	--	
6.1.6	Anliegende Medien / Erschließung	2	--	

Anhang C.1: U-Werte des Schulgebäudes – Bodenplatte

Projekt: Hamburger Stadtteilschule

Standort: 22115

Bodenplatte aus Stahlbeton

Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Beton nach EN 12524 (Rohdichte 2400 kg/m ³)	20,00	2,000	0,10	130	130	2400	1,00

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{s,i} + R_1 + R_{s,e} = 0,27 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 3,70 \text{ W/m}^2\text{K}$



Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen $R_{s,i}$	0,17 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen $R_{s,e}$	0,00 m ² K/W
Wärmestromrichtung	abwärts
Bauteil grenzt an	Erdreich

Zusammenfassung

U-Wert	3,70 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	0,10 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	0,90 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	72,00 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	240,00 kJ/m ² K
Flächengewicht	480,00 kg/m ²
Dicke	20,00 cm

Anhang C.2: U-Werte des Schulgebäudes – Flachdach

Projekt: Hamburger Stadteilschule

Standort: 22115

Flachdach (Trapezblech)

Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Stahl (DIN 12524)	0,20	50,000	0,00	1000000	1000000	7800	0,45
2	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (DIN 18165-1 - WLG 050)	6,00	0,050	1,20	1,0	1,0	260	1,00
3	Bitumendachbahn (DIN 52128)	1,00	0,170	0,06	10000	80000	1200	1,50
4	Sand, Kies, Splitt trocken (lose Schüttung, abgedeckt)	5,00	0,700	0,07	3,0	3,0	1800	1,00

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{s,i} + R_1 + R_2 + \dots + R_4 + R_{s,e} = 1,47 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 0,68 \text{ W/m}^2\text{K}$



Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen $R_{s,i}$	0,10 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen $R_{s,e}$	0,04 m ² K/W
Wärmestromrichtung	aufwärts
Bauteil grenzt an	Außenluft

Zusammenfassung

U-Wert	0,68 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	1,33 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	1,20 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	7,02 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	7,02 kJ/m ² K
Flächengewicht	133,20 kg/m ²
Dicke	12,20 cm

Anhang C.3: U-Werte des Schulgebäudes – Geschossdecke

Projekt: Hamburger Stadtteilschule

Standort: 22115

Geschossdecke aus Stahlbeton

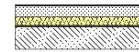
Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Linoleum (DIN 12524)	0,28	0,170	0,02	800	1000	1200	1,40
2	Zement-Estrich	5,00	1,400	0,04	15	35	2000	1,00
3	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (DIN 18165-1 - WLG 050)	4,00	0,050	0,80	1,0	1,0	260	1,00
4	Polyethylenfolie nach DIN 12524	0,02	0,330	0,00	400000	400000	960	1,50
5	Beton nach EN 12524 (Rohdichte 2400 kg/m ³)	10,70	2,000	0,05	130	130	2400	1,00

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_5 + R_{se} = 1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$



Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}	0,17 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}	0,17 m ² K/W
Wärmestromrichtung	abwärts
Bauteil grenzt an	Innenluft

Zusammenfassung

U-Wert	0,80 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	0,91 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	0,90 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	59,10 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	104,70 kJ/m ² K
Flächengewicht	370,75 kg/m ²
Dicke	20,00 cm

Anhang C.4: U-Werte des Schulgebäudes – Plattendecke

Projekt: Hamburger Stadtteilschule

Standort: 22115

Plattendecke aus Gipskarton

Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Gipskartonplatten (DIN 18180)	1,25	0,250	0,05	8,0	8,0	900	1,00

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{s,i} + R_1 + R_{s,e} = 0,31 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 3,23 \text{ W/m}^2\text{K}$

Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen $R_{s,i}$	0,13 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen $R_{s,e}$	0,13 m ² K/W
Wärmestromrichtung	horizontal
Bauteil grenzt an	Innenluft

Zusammenfassung

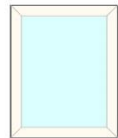
U-Wert	3,23 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	0,05 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	1,75 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	11,25 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	11,25 kJ/m ² K
Flächengewicht	11,25 kg/m ²
Dicke	1,25 cm

Anhang C.5: U-Werte des Schulgebäudes – Außenfenster

Projekt: Hamburger Stadteilschule

Standort: 22115

2-Scheiben-Vergl. (U: 2,80) - Kunststoffrahmen, 3 Kammern (U: 2,80)



Verglasung

Glas-Typ	2-Scheiben-Isolierverglasung
Glasfläche	0,83 m ²
U-Wert	2,80 W/m ² K
g-Wert	0,75

Randverbund

Material	Aluminium
Länge	3,68 m
ψ-Wert	0,050 W/m K

Rahmen

Bezeichnung	Kunststoffrahmen, 3 Kammern
Breite	0,100 m
Fläche	0,41 m ²
U-Wert	2,80 W/m ² K

Fenster

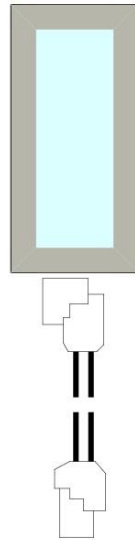
Breite	1,00 m
Höhe	1,24 m
Fläche	1,24 m ²
Glasanteil	67,1 %
Rahmenanteil	32,9 %
U-Wert	2,95 W/m ² K

Anhang C.6: U-Werte des Schulgebäudes – Außentür

Projekt: Hamburger Stadteilschule

Standort: 22115

Außentür aus Metall mit 50% Glasanteil



Verglasung	
Glas-Typ	2-Scheiben-Isolierverglasung
Glasfläche	1,05 m ²
U-Wert	2,80 W/m ² K
g-Wert	0,75
Randverbund	
Material	Aluminium
Länge	4,65 m
ψ-Wert	0,060 W/m K
Rahmen	
Bezeichnung	Aluminium, thermisch getrennt
Breite	0,194 m
Fläche	1,05 m ²
U-Wert	3,50 W/m ² K
Fenster	
Breite	1,00 m
Höhe	2,10 m
Fläche	2,10 m ²
Glasanteil	50,0 %
Rahmenanteil	50,0 %
U-Wert	3,28 W/m ² K

Anhang C.7: U-Werte des Schulgebäudes – Innentür

Projekt: Hamburger Stadteilschule

Standort: 22115

Innentür aus Holz

Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Holzfaserplatten, einschl. MDF (DIN 12524 - 800 kg/m ³)	0,30	0,180	0,02	10	10	800	1,70
2	Spanplatten (DIN 12524 - 600 kg/m ³)	4,40	0,140	0,31	15	50	600	1,70
3	Holzfaserplatten, einschl. MDF (DIN 12524 - 800 kg/m ³)	0,30	0,180	0,02	10	10	800	1,70

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} = 0,49 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 2,05 \text{ W/m}^2\text{K}$

Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}	0,10 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}	0,04 m ² K/W
Wärmestromrichtung	aufwärts
Bauteil grenzt an	Außenluft

Zusammenfassung

U-Wert	2,05 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	0,35 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	1,75 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	31,62 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	53,04 kJ/m ² K
Flächengewicht	31,20 kg/m ²
Dicke	5,00 cm

Anhang C.8: U-Werte des Schulgebäudes – Kellerwand

Projekt: Hamburger Stadtteilschule

Standort: 22115

Kellerwand aus Stahlbeton

Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Beton hohe Rohdichte (DIN 12524 - 2400 kg/m ³)	15,00	2,000	0,08	80	130	2400	1,00

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{s,i} + R_1 + R_{s,e} = 0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 4,88 \text{ W/m}^2\text{K}$



Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen $R_{s,i}$	0,13 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen $R_{s,e}$	0,00 m ² K/W
Wärmestromrichtung	horizontal
Bauteil grenzt an	Erdreich

Zusammenfassung

U-Wert	4,88 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	0,08 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	1,20 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	72,00 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	240,00 kJ/m ² K
Flächengewicht	360,00 kg/m ²
Dicke	15,00 cm

Anhang C.9: U-Werte des Schulgebäudes – Außenwand

Projekt: Hamburger Stadtteilschule

Standort: 22115

Vorhangfassade mit Tafелеlementen

Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Aluminiumlegierung (DIN 12524)	0,30	160,000	0,00	1000000	1000000	2800	0,88
2	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (DIN 18165-1 - WLG 050)	8,00	0,050	1,60	1,0	1,0	260	1,00
3	Aluminiumlegierung (DIN 12524)	0,30	160,000	0,00	1000000	1000000	2800	0,88
4	ruhende Luftschicht (vertikal) bis 300mm Dicke	6,00	0,333	0,18	1,0	1,0	1	1,00
5	Aluminiumlegierung (DIN 12524)	0,40	160,000	0,00	1000000	1000000	2800	0,88

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_5 + R_{se} = 1,95 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$



Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}	0,13 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}	0,04 m ² K/W
Wärmestromrichtung	horizontal
Bauteil grenzt an	Außenluft

Zusammenfassung

U-Wert	0,51 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	1,78 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	1,75 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	7,39 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	7,39 kJ/m ² K
Flächengewicht	48,86 kg/m ²
Dicke	15,00 cm

Anhang C.10: U-Werte des Schulgebäudes – Innenwand

Projekt: Hamburger Stadteilschule

Standort: 22115

Metallständerwand aus Gipskarton

Schichtenaufbau (von warm nach kalt)

Nr.	Bezeichnung	Dicke cm	λ W/m·K	R m ² K/W	μ_1 –	μ_2 –	ρ kg/m ³	c_p kJ/kg·K
1	Gipskartonplatten (DIN 18180)	1,25	0,250	0,05	8,0	8,0	900	1,00
2	Mineral. und pflanzl. Faserdämmstoff (DIN 18165-1 - WLG 050)	12,50	0,050	2,50	1,0	1,0	260	1,00
3	Gipskartonplatten (DIN 18180)	1,25	0,250	0,05	8,0	8,0	900	1,00

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

Wärmedurchgangswiderstand $R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} = 2,86 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_T = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$



Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}	0,13 m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}	0,13 m ² K/W
Wärmestromrichtung	horizontal
Bauteil grenzt an	Innenluft

Zusammenfassung

U-Wert	0,35 W/m ² K
Wärmedurchlasswiderstand	2,60 m ² K/W
Mindestwärmedurchlasswiderstand nach DIN 4108-2	1,75 m ² K/W
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 3 cm	22,50 kJ/m ² K
Wirksame Wärmespeicherfähigkeit CP 10 cm	22,50 kJ/m ² K
Flächengewicht	55,00 kg/m ²
Dicke	15,00 cm

Anhang D.1: Nutzungsprofil – Klassenzimmer

Tabelle A.8 — Nutzung Klassenzimmer (Schule), Gruppenraum (Kindergarten)

Klassenzimmer (Schule) ^a , Gruppenraum (Kindergarten)		Nr. 8			
Nutzungszeiten		von	bis		
tägliche Nutzungszeit	Uhr	8:00	15:00		
jährliche Nutzungstage $d_{\text{Nutz,a}}$	d/a	200			
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit t_{Tag}	h/a	1400			
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit t_{Nacht}	h/a	0			
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung	Uhr	6:00	15:00		
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d/a	200			
$d_{\text{op,a}}$	d/a	200			
tägliche Betriebszeit Heizung	Uhr	6:00	15:00		
Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)					
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,\text{soll}}$	°C	21			
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,c,\text{soll}}$	°C	24			
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,\text{min}}$	°C	20			
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,c,\text{max}}$	°C	26			
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$	K	4			
Feuchteanforderung	-	mit Toleranz			
Mindestaußenluftvolumenstrom \dot{V}_A					
personenbezogen	m ³ je Stunde und Person	30			
flächenbezogen	m ³ /(h · m ²)	10			
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_{A,\text{Geb}}$	m ³ /(h · m ²)	2,5			
Relative Abwesenheit RLT c_{RLT}	-	0,25			
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT}	-	0,9			
mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)		von	bis		
Luftwechsel	h ⁻¹	-	-		
Luftwechsel nur Luft	h ⁻¹	-	-		
Beleuchtung^b					
Wartungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m ^c	lx	300			
Höhe der Nutzebene h_{Ne}	m	0,8			
Minderungsfaktor k_A	-	0,97			
relative Abwesenheit C_A	-	0,25			
Raumindex k	-	2			
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit F_t	-	0,9			
Anpassungsfaktor Beleuchtung vertikaler Flächen k_{vB}	-	1			
Personenbelegung		gering	mittel	hoch	
maximale Belegungsdichte m ² je Person		3,5	3	2,5	
Interne Wärmequellen		max. spezifische Leistung (W/m ²)			
		Vollnutzungsstunden (h/d)	tief	mittel	hoch
Personen (60 W je Person)		5	17,1	20	24
Arbeitshilfen		5	2	4	6
Wärmezufuhr je Tag ($q_{l,p} + q_{l,\text{fac}}$)	Wh/(m ² · d)	96	120	150	
Automationsgrad		D	C	B	A
Summand Automation $\Delta\theta_{\text{EMS}}$	K	0	0	-0,5	-1
Faktor für adaptive Temperaturführung f_{adapt}	-	1	1	1,35	1,35
<p>^a Die aufgeführten Nutzungsbedingungen stellen Mittelwerte für Grundschule und weiterführende Schule dar.</p> <p>^b Die Beleuchtung der vertikalen Tafelfläche wird zusätzlich durch einen auf die Grundfläche der mit einer Tafelbeleuchtung ausgestatteten Klassenräume bezogenen jährlichen Endenergiebedarf $Q_{l,\text{TB},A}$ von 1,25 kWh/(m² a) · k_L berücksichtigt. Dabei ist k_L der Anpassungsfaktor für unterschiedliche Lampentypen nach DIN V 18599-4:2016-10, Tabelle 6.</p> <p>^c Fachklassenräume 500 lx</p>					

Anhang D.1: Nutzungsprofil – Verkehrsfläche

Tabelle A.19 — Nutzung Verkehrsfläche

Verkehrsfläche			Nr. 19	
Flur				
Nutzungszeiten			von	bis
tägliche Nutzungszeit	Uhr		7:00	18:00
jährliche Nutzungstage $d_{\text{Nutz,a}}$	d/a		250	
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit t_{Tag}	h/a		2543	
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit t_{Nacht}	h/a		207	
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung	Uhr		5:00	18:00
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung	d/a		250	
tägliche Betriebszeit Heizung	Uhr		5:00	18:00
Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)				
Raum-Solltemperatur Heizung $\theta_{i,h,\text{soll}}$ ^a	°C		21	
Raum-Solltemperatur Kühlung $\theta_{i,c,\text{soll}}$	°C		24	
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\theta_{i,h,\text{min}}$	°C		20	
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\theta_{i,c,\text{max}}$	°C		26	
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\theta_{i,NA}$	K		4	
Feuchteanforderung	-		keine	
Mindestaußenluftvolumenstrom \dot{V}_A				
personenbezogen	m ³ je Stunde und Person		-	
flächenbezogen ^b	m ³ /(h · m ²)		0	
Mindestaußenluftvolumenstrom für Gebäude $\dot{V}_{A,\text{Geb}}$	m ³ /(h · m ²)		-	
Relative Abwesenheit RLT c_{RLT}	-		-	
Teilbetriebsfaktor der Gebäudebetriebszeit F_{RLT}	-		-	
mechanischer Außenluftvolumenstrom (Praxis)			von	bis
Luftwechsel	h ⁻¹		-	-
	h ⁻¹		-	-
Beleuchtung				
Wartungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m	lx		100	
Höhe der Nutzebene h_{Ne}	m		0,2	
Minderungsfaktor k_A	-		1	
relative Abwesenheit C_A	-		0,8	
Raumindex k	-		0,8	
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit F_t	-		1	
Anpassungsfaktor Beleuchtung vertikaler Flächen k_{VB}	-		1	
Personenbelegung				
maximale Belegungsdichte m ² je Person			gering	mittel
			-	-
Interne Wärmequellen				
		Vollnutzungsstunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m ²)	
			tief	mittel
Personen (70 W je Person)		-	-	-
Arbeitshilfen		-	-	-
Wärmezufuhr je Tag ($q_{l,p} + q_{l,\text{fac}}$)	Wh/(m ² · d)	0	0	0
Automationsgrad				
		D	C	B
Summand Automation $\Delta\theta_{\text{EMS}}$	K	0	0	-0,5
Faktor für adaptive Temperaturführung	-	1	1	1,35
f_{adapt}				1,35
a Beträgt die Raum-Solltemperatur im Heizfall weniger als 19 °C (Nutzungen mit niedrigen Innentemperaturen), ist $\theta_{i,h,\text{soll}} = \theta_{i,h,\text{min}} = 17$ °C anzusetzen.				
b Belüftung in der Regel durch Überströmung.				

Anhang E: Auslegungsvolumenströme

Raumbez.	Netto- Raumfläche m ²	Kühllast Pers.	Volumenstrom nach DIN EN	
			15251 m ³ /h	Auslegungs- volumenstrom m ³ /h
OG-BR1	86,01	30	1189,49	1190,00
OG-BR2	86,01	30	1189,49	1190,00
OG-BS1	54,32	3	349,37	350,00
OG-BS2	58,19	3	368,88	369,00
OG-CL1	15,94	3	155,94	156,00
OG-CR1	94,57	30	1232,63	2460,00
OG-CR2	89,97	30	1209,45	2400,00
OG-CS1	48,38	3	319,44	320,00
OG-CS2	43,80	3	296,35	297,00
OG-FL1	71,28	0	359,25	360,00
OG-FL2	60,11	0	302,95	303,00
OG-FL3	20,43	0	102,97	103,00
OG-FL4	44,66	0	225,09	226,00
OG-FL5	80,30	0	404,71	405,00
OG-FL6	65,03	0	327,75	328,00
OG-MR1	85,20	30	1185,41	1186,00
OG-MR2	63,99	30	1078,51	1079,00
OG-PR1	80,39	30	1161,17	1162,00
OG-PR2	92,78	30	1223,61	1224,00
OG-PS1	54,80	3	351,79	352,00
OG-PS2	55,82	3	356,93	357,00
OG-UV1	95,82	3	558,53	559,00
EG-BR1	86,01	30	1189,49	1190,00
EG-BR2	86,01	30	1189,49	1190,00
EG-BS1	54,32	30	1029,77	1030,00
EG-BS2	58,19	30	1049,28	1050,00
EG-CL1	15,94	30	836,34	837,00
EG-CR1	94,57	30	1232,63	1233,00
EG-CR2	89,97	30	1209,45	1210,00
EG-CS1	48,38	30	999,84	1000,00
EG-CS2	43,80	30	976,75	977,00
EG-FL1	71,28	0	359,25	360,00
EG-FL2	60,11	0	302,95	303,00
EG-FL3	20,43	0	102,97	103,00
EG-FL4	44,66	0	225,09	226,00
EG-FL5	80,30	0	404,71	405,00
EG-FL6	65,03	0	327,75	328,00
EG-MR1	85,20	30	1185,41	1186,00
EG-MR2	63,99	30	1078,51	1079,00
EG-PR1	80,39	30	1161,17	1162,00
EG-PR2	92,78	30	1223,61	1224,00
EG-PS1	54,80	30	1032,19	1033,00
EG-PS2	55,82	30	1037,33	1038,00
EG-UV1	95,82	30	1238,93	1239,00
			33342,62	35779,00

Anhang F: Raumheizlast nach DIN EN 12831 – OG-PR2

Norm-Heizlast (ausführliches Verfahren) DIN EN 12831

Hamburger Stadtteilschule

Raum - Heizlast Datum: 13.08.2017 Seite: R 43

Wohninheit:		Geschoss: OG		Raum-Nr. / -Name: OG-PR2 / Physik Raum 2	
Innentemperatur	θ_{int}	20,00 °C	Lüftung		
Geometrie			Mindest-Luftwechsel	n_{min}	0,50 h ⁻¹
Raubbreite	b_R	8,75 m	Luftdurchlässigkeitswert	n_{50}	4,00 h ⁻¹
Raumlänge	l_R	10,61 m	Koeffizient Abschirmklasse	e	0,03 -
Raumfläche	A_R	92,78 m ²	Höhe über Erdreich	h	6,44 m
Geschosshöhe	h_G	3,01 m	Höhen-Korrekturfaktor	ϵ	1,00 -
Deckendicke	d	0,01 m	Zuluft-Volumenstrom	\dot{V}_{su}	1224,00 m ³ /h
Raumhöhe	h_R	3,00 m	-Zuluft-Temperatur	θ_{su}	20,00 °C
Raumvolumen	V_R	278,40 m ³	-Temperatur-Reduktionsfaktor	$f_{v,su}$	-
Erdreich			Abluft-Volumenstrom	\dot{V}_{ex}	1224,00 m ³ /h
Tiefe unter Erdreich	z	m	mech. Abluftüberschuss	$\dot{V}_{ex} - \dot{V}_{su}$	m ³ /h
Erdreichberührter Umfang	P	m	Überströmung Nachbarraum	$\dot{V}_{mech,inf,ij}$	m ³ /h
B' - Wert <input type="checkbox"/> raumweise	B'	m	-Zuluft-Temperatur	$\theta_{mech,inf,ij}$	°C
Zusatzheizung			-Temperatur-Reduktionsfaktor	$f_{v,mech,inf,ij}$	-
Wiederaufheizfaktor	f_{RH}	W/m ²	mech. Infiltration von außen	$\dot{V}_{mech,inf,e}$	m ³ /h

Orientierung	Bauteil	Anzahl	Breite	Länge/Höhe	Bruttofläche	Abzugfläche	Nettofläche	grenz an	angrenzende Temperatur	Korrekturfaktoren	U-Wert	Korrekturwert Wärmebrücken	korrigierter U-Wert	Wärmeverlust-Koeffizient	Transmissions-Wärmeverlust
			m			m ²			g/b	°C	f_{g2}/f_{f1}	W/m ² K		WK	W
-	DE	1	8,97	10,83	97,2	0,0	97,2	u	10	0,31	3,23	0,10	3,33	101,01	3232
N	IW	1	10,83	3,01	32,6	2,1	30,5	b	20	0,00	0,35	0,00	0,35	0,00	0
	IT	1	1,00	2,10	2,1	0,0	2,1	b	20	0,00	2,05	0,00	2,05	0,00	0
W	IW	1	5,94	3,01	17,9	2,1	15,8	b	20	0,00	0,35	0,00	0,35	0,00	0
	IT	1	1,00	2,10	2,1	0,0	2,1	b	20	0,00	2,05	0,00	2,05	0,00	0
W	IW	1	1,38	3,01	4,1	0,0	4,1	b	20	0,00	0,35	0,00	0,35	0,00	0
W	IW	1	1,50	3,01	4,5	0,0	4,5	b	20	0,00	0,35	0,00	0,35	0,00	0
S	AW	1	10,83	3,01	32,6	12,8	19,8	e		1,00	0,51	0,10	0,61	12,14	388
	AF	1	2,17	1,24	2,7	0,0	2,7	e		1,00	2,95	0,10	3,05	8,20	263
	AF	1	1,15	1,24	1,4	0,0	1,4	e		1,00	2,95	0,10	3,05	4,35	139
	AF	1	1,17	1,24	1,5	0,0	1,5	e		1,00	2,95	0,10	3,05	4,43	142
	AF	1	2,35	1,24	2,9	0,0	2,9	e		1,00	2,95	0,10	3,05	8,88	284
	AF	1	2,35	1,24	2,9	0,0	2,9	e		1,00	2,95	0,10	3,05	8,88	284
	AF	1	1,15	1,24	1,4	0,0	1,4	e		1,00	2,95	0,10	3,05	4,35	139
O	AW	1	0,00	0,00	25,0	0,0	25,0	b	8	0,36	0,51	0,00	0,51	4,60	147
O	AW	1	0,00	0,00	2,1	2,1	0,0	e		1,00	0,51	0,10	0,61	-0,01	0
	AT	1	1,00	2,10	2,1	0,0	2,1	e		1,00	3,28	0,10	3,38	7,10	227
-	FB	1	8,97	10,83	97,2	0,0	97,2	u	10	0,31	0,80	0,10	0,90	27,41	877
Transmissionswärmeverlust													H_T/Φ_T	191,34	6123

Mindest-Luftwechsel	\dot{V}_{min}	139,20 m ³ /h	1514
natürlicher Infiltration	\dot{V}_{inf}	66,82 m ³ /h	727
mechanischer Zuluftvolumenstrom	$\dot{V}_{su} * f_{v,su}$	0,00 m ³ /h	
Abluftvolumenüberschuss	$\dot{V}_{mech,inf,e}$	0,00 m ³ /h	
thermisch wirksamer Luftvolumenstrom	$\dot{V}_{therm} + \dot{V}_{mech,inf,ij} * f_{v,mech,inf,ij}$	66,82 m ³ /h	
Lüftungswärmeverlust	H_V/Φ_V		22,72
			727

Norm-Heizlast Φ_{HL} 73,83 W/m² 24,60 W/m³ 6850

Norm-Heizlast (ausführliches Verfahren)		DIN EN 12831	
Hamburger Stadtteilschule			
Zusatz - Heizleistung	Φ_{RH}	$f_{RH} =$	W/m ²
Auslegungs-Heizleistung	$\Phi_{HL, Ausleg}$		6850

SCHULVERSION

Digitaler Anhang auf CD-ROM

- Ergebnisse der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/14044
- Für die Ökobilanz verwendete Datensätze
- Berechnungsunterlagen der Endenergiebedarfe nach DIN V 18599 für die:
 - Bestandsanlagen
 - Variante 1
 - Variante 2
 - Variante 3
- Heizlastberechnung des Schulgebäudes nach DIN EN 12831
- Kühllastberechnung des Schulgebäudes nach VDI 2078
- Gebäudesimulation nach VDI 6007 mit den Klimadaten „Sommerextrem 2011“

Literaturverzeichnis

- [1] INROS LACKNER SE: INROS LACKNER Imagebroschüre, 2014 [PDF].
<http://www.inros-lackner.de/de/medien/publikationen/imagebroschuere>, abgerufen am: 09.12.2016
- [2] Finanzbehörde - Schulbau Hamburg: Über uns.
<http://www.hamburg.de/schulbau>, abgerufen am: 28.12.2016
- [3] Finanzbehörde - Schulbau Hamburg: Energie macht Schule.
<http://www.hamburg.de/fb/nav-energiemanagement/>, abgerufen am: 28.12.2016
- [4] Springer Gabler Verlag: Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Entscheidungsprozess.
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54256/entscheidungsprozess-v6.html>, abgerufen am: 10.06.2017
- [5] Jochem, R. u. Kaufhold, W. (Hrsg.): HOAI-Kommentar. Zur Honorarordnung für Architekten und Ingenieure. 2016
- [6] Preuß, N.: Projektmanagement von Immobilienprojekten. Entscheidungsorientierte Methoden für Organisation, Termine, Kosten und Qualität. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Mineralölwirtschaftsverband e.V. u. TECSON GmbH & Co KG: Inflationsbereinigte Energiepreise in Deutschland im Vergleich, 2017.
<http://energie-tools.ea-nrw.de/infografik/grafik.asp?TopCatID=3131&CatID=3131&RubrikID=3132>, abgerufen am: 05.02.2017
- [8] Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln u. Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung: Entwicklung der Energiemärkte. Energierferenzprognose, Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin, Basel, Köln, Osnabrück 2014 [PDF].
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publication-file&v=7, abgerufen am: 05.02.2016
- [9] Wirtschaft. Sind denn die Preise noch zu bremsen? | ZEIT ONLINE. Die Zeit 1970 16.
<http://www.zeit.de/1970/16/sind-denn-die-preise-noch-zu-bremsen>, abgerufen am: 26.06.2017

- [10] Statistisches Bundesamt: Baugewerbe. Kennzahlen der Unternehmen im Baugewerbe 2014.
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Bauen/Baugewerbe/Tabellen/KennzahlenBaugewerbe.html>, abgerufen am: 26.06.2017
- [11] Baumarkt/Preise. Karre fest | DER SPIEGEL ONLINE. DER SPIEGEL 1970 30.
<http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-44418304.html>, abgerufen am: 29.01.2017
- [12] Schröteler-von Brandt, H.: Stadtbau- und Stadtplanungsgeschichte. Eine Einführung. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014
- [13] Recknagel, H. u. Schramek, E.-R. (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. München: Oldenbourg 2007
- [14] DIN EN 12831; 2003-08. *Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*
- [15] VDI 2078; 2015-06. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*
- [16] DIN EN 13779; 2007-09. *Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme*
- [17] Rat für Nachhaltige Entwicklung: Was ist Nachhaltigkeit? [PDF].
http://www.nachhaltigkeitsrat.de/fileadmin/user_upload/dokumente/der_rat/fact_sheet/RNE_Factsheet_Deutsch.pdf, abgerufen am: 09.02.2017
- [18] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung u. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden [PDF].
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nachhaltiges_bauen_leitfaden_broschuere_bf.pdf, abgerufen am: 11.02.2017
- [19] Löser, J. K.: Die Praxis des Nachhaltigen Bauens. Das Adaptionsniveau der Nachhaltigkeit im Immobiliensektor. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2017
- [20] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Nachhaltige Unterrichtsgebäude. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen, 2014 .
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nachhaltige_unterrichtsgebaeude_broschuere_bf.pdf, abgerufen am: 01.03.2017
- [21] Umweltbundesamt: Klima/Energie. Treibhausgas-Emissionen. Die Treibhausgase, 2016.

- <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energie-politik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>, abgerufen am: 17.02.2017
- [22] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 1.1.1 Ökologische Qualität: Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt, Treibhauspotenzial (GWP), 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_111.pdf, abgerufen am: 17.02.2017
- [23] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 1.1.2 Ökologische Qualität: Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt, Ozonschichtabbau Potenzial (ODP), 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_112.pdf, abgerufen am: 17.02.2017
- [24] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 1.1.3 Ökologische Qualität: Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt, Ozonbildungspotenzial (POCP), 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_113.pdf, abgerufen am: 18.02.2017
- [25] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 1.1.4 Ökologische Qualität: Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt, Versauerungspotenzial (AP), 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_114.pdf, abgerufen am: 18.02.2017
- [26] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 1.1.5 Ökologische Qualität: Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt, Überdüngungspotenzial (EP), 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_115.pdf, abgerufen am: 25.02.2017
- [27] Bauer, M., Möhle, P. u. Schwarz, M.: Green Building. Leitfaden für nachhaltiges Bauen. Berlin, Heidelberg: Springer 2013
- [28] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energiekonzept. Für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin [PDF].

- <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiekonzept-2010,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, abgerufen am: 26.11.2016
- [29] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 1.2.2 Ökologische Qualität: Ressourceninanspruchnahme, Gesamtprimärenergiebedarf (PEges) u. Anteil erneuerbare Primärenergie (PEe), 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_122.pdf, abgerufen am: 23.02.2017
- [30] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 1.2.1 Ökologische Qualität: Ressourceninanspruchnahme, Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (PEne), 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_121.pdf, abgerufen am: 25.02.2017
- [31] DIN EN ISO 14040; 2009-11. *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*
- [32] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude, Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen, 2015 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2015/LCA-Bilanzierungsregeln_BNB_BN_2015.pdf, abgerufen am: 04.03.2017
- [33] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Büro- und Verwaltungsgebäude. 2.1.1 Ökonomische Qualität: Lebenszykluskosten, Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus, 2015 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2015/BNB_BN2015_211.pdf, abgerufen am: 27.04.2017
- [34] DIN 277-1; 2016-01. *Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen – Teil 1: Hochbau*
- [35] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 2.1.1 Ökonomische Qualität: Lebenszykluskosten, Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus, 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/BNB_Steckbriefe_Unterricht/BNB_UN2013_211.pdf, abgerufen am: 23.02.2017

- [36] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Unterrichtsgebäude. 3.1.1 Soziokulturelle Qualität: Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit, Thermischer Komfort im Winter, 2013 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/unterrichtsgebaeude/neubau/v_2013/BNB_UN2013_311.pdf, abgerufen am: 24.02.2017
- [37] ASR A3.5; 2010-06. *Raumtemperatur*.
<http://www.baua.de/cae/servlet/contentblob/1108456/publicationFile/89166/ASR-A3-5.pdf>, abgerufen am: 04.03.2017
- [38] DIN EN ISO 7730; 2006-05. *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*
- [39] DIN EN 15251; 2012-12. *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*
- [40] VDI 3804; 2009-03. *Raumlufttechnik Bürogebäude (VDI-Lüftungsregeln)*
- [41] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Büro- und Verwaltungsgebäude. Soziokulturelle Qualität: Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit, Innenraumlufthygiene, 2015 .
https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2015/BNB_BN2015_313.pdf, abgerufen am: 27.04.2017
- [42] Umweltbundesamt: Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. Erarbeitet von der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, 2008 .
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3689.pdf>
- [43] ASR A3.6; 2012-01. *Lüftung*.
http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/pdf/ASR-A3-6.pdf?__blob=publicationFile&v=7, abgerufen am: 22.03.2017
- [44] Pehnt, M. (Hrsg.): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Berlin: Springer 2010
- [45] Bohne, D.: Technischer Ausbau von Gebäuden. Und nachhaltige Gebäudetechnik. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014

- [46] Deutscher Bundestag: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Energieeinsparverordnung - EnEV. 2015
- [47] DIN EN 13053; 2012-02. *Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten*
- [48] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie u. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Nichtwohngebäudebestand, 2015.
https://www.bundesanzeiger.de/ebanzwww/wexsservlet?page.navid=to_bookmark_official&bookmark_id=Z5obbz2HxDPGAUkwGRa, abgerufen am: 30.06.2017
- [49] DIN V 18599-2; 2016-10. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*
- [50] DIN V 18599-1; 2016-10. *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*
- [51] DIN V 18599-10; 2016-10. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*
- [52] Sprenger, E., Albers, K.-J. u. Recknagel, H. (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH 2017
- [53] Freie und Hansestadt Hamburg: Technische Richtlinien zum Bau und zur Einrichtung Hamburger Schulen. TR-Schulen 2012, 2012
- [54] Michelbach GmbH LUMI - Systems: LUMI - 5 in 1 (Integrales Multifunktionsregister). mit adiabatischer Zu- und Abluftbefeuchtung und integriertem WRG-KVS-System.
<http://www.michelbach-gruppe.de/>