



Blue-Tech-Tower, Holzhybridhochhäuser



WOODSCRAPER

Abschlussbericht des Forschungsprojektes
AZ: 34252/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
Antragsteller: *Partner und Partner Architekten*

**Entwicklung einer Strategie zur wirtschaftlichen
Errichtung ressourcenpositiver Gebäude**

August 2019, Berlin

Blue-Tech-Tower, Holzhybridhochhäuser

WOODSCRAPER

Abschlussbericht des Forschungsprojektes
AZ: 34252/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
Antragsteller: *Partner und Partner Architekten*

Entwicklung einer Strategie zur wirtschaftlichen Errichtung ressourcenpositiver Gebäude

Autoren

**Antragsteller, Projektleitung, Architektur,
Lebenszykluskosten:**
Partner und Partner Architekten
Jeroen Meissner, Jörg Finkbeiner, Klaus Günter
Beratung: Holger König

Technische Gebäudeausstattung:
IFB Ingenieure
Friedemann Stahl, Thomas Schreiber,
Katrin Bergold, Eva Brunner

Ökobilanzierung:
Hochschule Ostwestfalen-Lippe (HS-OWL)
Lehrgebiet Baustoffe und Baukonstruktion
Manfred Lux, Maximilian Ernst
in Zusammenarbeit mit Jeroen Meissner

Tragwerksplanung:
Merz Kley Partner
Konrad Merz, Josef Amler

Brandschutz:
Dehne, Kruse Brandschutzingenieure
Dirk Kruse, Benjamin Becker

Kontakt Daten

Antragsteller, Architektur:
Partner und Partner Architekten
Günter und Finkbeiner Gesellschaft von Architekten mbH
Geschäftsführer: Klaus Günter und Jörg Finkbeiner, Dipl.-
Ing. Architekten
Berlin Reichenbergerstr. 124, Geb. D, 3.OG
10999 Berlin
Tel: 030 544943 77
Fax: 03212 104429 4
Mail: mail@partnerundpartner.com
www.partnerundpartner.com

Technische Gebäudeausstattung:
IFB Ingenieure GmbH
Wielandstraße 2
75385 Bad Teinach-Zavelstein
Tel: 07053 926690
Fax: 07053 9266920
Mail: post@ifb.info
www.ifb.info

Ökobilanzierung:
Hochschule Ostwestfalen-Lippe (HS-OWL)
Detmolder Schule für Architektur und Innenarchitektur
Lehrgebiet Baustoffe und Baukonstruktion
Prof. Dipl.-Ing. Manfred Lux, Raum 4.116
Emilienstraße 45
32756 Detmold
Mail: manfred.lux(at)th-owl.de

Tragwerksplanung:
merz kley partner ZT GmbH
Sägerstraße 4
A-6850 Dornbirn
Tel: +43 5572 36031 0
Fax: +43 5572 36031 40
Mail: info@mkp-ing.com
www.mkp-ing.com

Brandschutz:
Dehne, Kruse Brandschutzingenieure
GmbH & Co. KG
Major-Hirst-Straße 5-11
38442 Wolfsburg
Tel: 05371 6875028
Fax: 05371 6875029
Mail: kruse@kd-brandschutz.de
www.kd-brandschutz.de



Abb. 1: Woodscrapper

WOODSCRAPER

Kurzbeschreibung des Forschungsgegenstandes

Ziel des Projekts WOODSCRAPER ist die Errichtung ressourcenpositiver Gebäude ohne Mehrkosten. „Ressourcenpositiv“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass über die Lebenszeit der Gebäude mehr Ressourcen vorhanden sind, als sie für ihre Errichtung und ihren Betrieb benötigen. Es bedeutet auch, dass die eingesetzten Ressourcen sich sortenrein wieder zurückgewinnen lassen und in dieser Zeit der Nutzung wieder komplett nachgewachsen sind, wodurch unter dem Strich ein Zuwachs an zugänglichen, reinen Ressourcen gegeben ist. Eingesetzte nachwachsende Rohstoffe fungieren zudem in der Zeit ihrer funktionalen Nutzung im Gebäude als Speicher von Klimagasen.

Neben reduzierter Gebäudetechnik, energieoptimiertem Bauen und dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen im Gebäudetypus Hochhaus steht das Thema „einfaches und zirkuläres Bauen“ im Zentrum des Projektes. Die WOODSCRAPER mit vorelementierten Massivholzelementen und einer schlanken sowie wartungsarmen Gebäudetechnik werden die ersten Häuser dieser Art in Deutschland sein.

Die WOODSCRAPER dienen als Beispiel dafür, wie sich schon heute die drängenden Fragen zu Ressourcenverknappung, Klimawandel und Bevölkerungswachstum praktisch beantworten lassen.

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az.	34252/01	Referat		Fördersumme	120.157,00 €
Antragstitel		Blue-Tech-Tower, Holzhybridhochhäuser WOODSCRAPER			
Stichworte		Holzbau, zirkuläres Bauen, Hochhaus,			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
22 Monate	Oktober 2017	August 2019	3		
Zwischenberichte	1				
Bewilligungsempfänger	Partner und Partner Architekten - Jörg Finkbeiner Reichenbergerstr. 124, Geb. D, 3.OG 10999 Berlin			Tel	030 - 54494377
				Fax	03212 - 1044294
				Projektleitung Jeroen Meissner	
Bearbeiter Jeroen Meissner, Jörg Finkbeiner, Friedemann Stahl, Thomas Schreiber, Katrin Bergold, Eva Brunner, Konrad Merz, Josef Amler, Dirk Kruse, Benjamin Becker, Maximilian Ernst					
Kooperationspartner	TGA	IFB Ingenieure GmbH			
	Tragwerk	merz kley partner ZT GmbH			
	Brandschutz	Dehne, Kruse Brandschutzingenieure			
	Ökobilanz	Hochschule Ostwestfalen-Lippe (HS-OWL)			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Ziel ist die Entwicklung einer Strategie zur wirtschaftlichen Errichtung ressourcenpositiver Gebäude. Beispielhaft wird dies anhand zweier geplanter Hochhäuser aus Holz in Wolfsburg untersucht. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit von Architekten und Ingenieuren sowie einer Forschungseinrichtung wird dabei ausgeschöpft, um eine Strategie wirtschaftlichen Bauens für die Herausforderungen der Zukunft zu entwickeln.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Zunächst wird die Umsetzbarkeit von Holzbau und ökologischen Bauweisen interdisziplinär überprüft. Hierzu wird eingehend der Stand der Technik in Augenschein genommen sowie Vor- und Nachteile abgewogen. Der Entwurf der WOODSCRAPER wird mit den hier erlangten Kenntnissen in einem integralen Planungsprozess auf Tragwerk, Brandschutz, Schallschutz sowie Haustechnik hin grundlegend überarbeitet. Umweltwirkung, Kosten und Umsetzbarkeit stehen bei der Überarbeitung des Entwurfs immer im Zentrum der Betrachtung. Eine realisierbare Lösung wird „eingefroren“ und drei vergleichbare Varianten mit unterschiedlichen ökologischen Ausführungsstandards geplant. Bis auf Bauteilebene wird mit Hilfe der Bilanzierungs-Software LEGEP eine vergleichende Ökobilanz mit Lebenszykluskosten erstellt. Durch diese Herangehensweise lässt sich das modulare Gebäudeprinzip WOODSCRAPER bis in die kleinsten Bestandteile zerlegen und seine Varianten vergleichend untersuchen.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Das Gebäudeprinzip WOODSCRAPER diskutiert mit einem ganzheitlichen Ansatz das Potential und die Einschränkungen von ressourcenpositivem Bauen und kommt zu dem Schluss, dass Holzbau beim Typus Hochhaus sich unter den gegebenen Vorschriften und Normen durchaus umsetzen lässt. In der vorliegenden Forschungsarbeit konnte dargelegt werden, dass ressourcenpositives Bauen durch größtmöglichen Einsatz nachwachsender Baustoffe schon heute realisierbar ist. Ein kostenneutrales Ergebnis dieser Bauweise gegenüber konventioneller Bauweise lässt sich dabei jedoch nur unter Einbeziehung gesellschaftlicher Folgekosten der hohen CO₂-Emissionen konventioneller Bauweise darstellen. Es haben sich dabei Erkenntnisse dazu ergeben, welche Rahmenbedingungen angepasst werden müssen, um ökologische Bauweisen zu stärken:

- CO₂-Bilanz statt EnEV, um Klimaziele tatsächlich zu erreichen
- Schnittstelle zwischen Ökobaudat und BIM-Software Angeboten schaffen
- Maximalen Anteil nachwachsender Baustoffe in einem Gebäude vorsehen (dafür ggf. vereinfachte Rechenverfahren entwickeln)
- Nachweispflicht für alle Inhaltsstoffe in Bauprodukten
- Verbot aller nachweislich schädlichen Inhaltsstoffe in Bauprodukten
- Kompletter Verzicht auf Material- und Ressourcenverbund zugunsten echter Kreislaufwirtschaft
- Folgekosten mit Investitionskosten verknüpfen
- Ermittlung der Kosten zur Weiterverwendung, sowie der in den Baustoffen enthaltenen Werte
- Vom Ende her denken ist der Beginn des Bauens der Zukunft

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Für die WOODSCRAPER wurde eine eigene Projektwebseite eingerichtet: <https://www.woodscrapper.de/>
Das Gebäudeprinzip WOODSCRAPER wurde bereits bundesweit mit diversen Vorträgen vorgestellt:

24.10.2017 TU Berlin - Natural Building Lab, Berlin

16.03.2018 HTWG Konstanz - Zukunft findet Stadt, Konstanz

24.11.2018 DAB Jahreskongress, Berlin

27.02.2019 BAMB2020, Brüssel

27.03.2019 Berlin International Twin Talks, Berlin

04.04.2019 ProHolz BW, Cradle to Cradle und Holzbau, Stuttgart

03.06.2019 Regio Holz, Innovation Holzbau, Nagold

25.06.2019 DGNB Challenge - Stuttgart

28.06.2019 Forum Holzbau - Meran

05.09.2019 Effiziente Gebäude 2019, Hamburg

23.10.2019 Forum Holzbau - Europäischer Holzbaukongress, Köln

Veröffentlicht wurde das Gebäudeprinzip bereits auf: Baunetz, Lust auf Gut, Holzmagazin,

Schwarzwälder Bote, Aktiv Plus e.V., Research Gate, Immobilien-Zeitung, Houtwereld (Niederlande)

Fazit

Es hat sich gezeigt, dass mittels angewandter, integraler Planung sowie bauteilbezogener Nachverfolgung der Umweltwirkung und Kosten eine Strategie für ein modular umnutzbares, zirkuläres und ressourcenpositives Gebäudeprinzip WOODSCRAPER für schadstofffreies Bauen aus nachwachsenden Rohstoffen mit schlanker Gebäudetechnik entwickelt werden konnte. Selbst beim Gebäudetypus Hochhaus speichert dieses Prinzip schon zum Zeitpunkt der Errichtung mehr Klimagase in der Konstruktion ein als für die Herstellung benötigt wird. Die regenerativen Baustoffanteile wachsen über den gesamten Lebenszyklus mindestens einmal nach und lassen sich durch die geplante Demontierbarkeit am Ende aus dem Gebäude zurückgewinnen. Im Ergebnis stehen am Ende des Lebenszyklus damit der Gesellschaft mehr Ressourcen zur Verfügung als vorher, ohne einen Mangel oder Schaden hinterlassen zu haben. Unter ganzheitlicher Betrachtung ist eine Umsetzung dieses Prinzips sogar kostenneutral möglich.

Inhaltsverzeichnis

1	VERZEICHNIS VON BILDERN UND TABELLEN	10
2	VERZEICHNIS VON BEGRIFFEN UND DEFINITIONEN	13
3	VERZEICHNIS VON ABKÜRZUNGEN	16
4	ZUSAMMENFASSUNG	17
5	EINLEITUNG	18
5.1	Zielsetzung	21
5.2	Aufgabenstellung, Methodik	21
5.3	Ausgangssituation, Stand der Technik	24
5.3.1	Tragwerksplanung	27
5.3.2	Gebäudetechnik	43
5.3.2.1	Heizung	43
5.3.2.2	IR-Deckenheizung (Stromheizung)	43
5.3.2.3	Wärmepumpe	44
5.3.2.4	Fernwärme	45
5.3.2.5	BHKW	46
5.3.3	Lüftungsanlage	49
5.3.3.1	Vergleich zentraler und dezentraler Lüftungssysteme	49
5.3.3.2	Nutzen im Wohngebäude	50
5.3.3.3	Wärmerückgewinnung	50
5.3.3.4	Lüftungsanlage als Heizung	51
5.3.4	Warmwasserbereitung	53
5.3.4.1	Wohnungszentrale Warmwasseraufbereitung	53
5.3.4.2	Durchlauferhitzer	53
5.3.4.3	Wärmepumpe	54
5.3.4.4	Zentrale über Heizung	55
5.3.4.5	Solare Unterstützung	56
5.3.4.6	Wärmerückgewinnung des Abwassers	57
5.3.5	Brandschutz	58
5.3.6	Ökobilanzierung oder Lebenszyklusanalyse (LCA)	58
5.3.7	Lebenszykluskostenberechnung (LCC)	60
6	PROJEKTBSCHREIBUNG WOODSCRAPER	62
6.1	Allgemein	62
6.1.1	Lage und Beteiligte	62
6.1.2	Grundlagen und Städtebau	62
6.1.3	Leitlinie	63
6.1.4	Erschließung	63
6.1.5	Projektablauf	63
6.1.6	Gebäudekenndaten	63
6.1.7	Nutzung	63
6.1.8	Grundrissstruktur der Gebäude	64

6.1.9	Brandschutz	64
6.1.10	Planerische Grundlagen	64
6.2	Gebäudestruktur	64
6.2.1	Allgemein	64
6.2.2	Flexibilität	65
6.2.3	Wohnungsgrößen und Wohnungsmix	66
6.3	Tragwerksplanung	69
6.3.1	Allgemein	69
6.3.1.1	Lastannahmen	69
6.3.1.2	Brandschutz	69
6.3.1.3	Objektplanung	69
6.3.2	Hybridbau vs. Holzbau	70
6.3.2.1	Schnittstelle Holz/Beton/Trockenbau	71
6.3.2.2	Stahlbeton hat Vorteile	71
6.3.2.3	Holzbau hat Vorteile	71
6.3.2.4	Trockenbau hat Vorteile	71
6.3.3	Bauteile	71
6.3.3.1	Untergeschoss / Tiefgarage	71
6.3.3.2	Erdgeschoss	71
6.3.3.3	Kern	72
6.3.3.4	Geschossdecken	72
6.3.3.5	Fassadenstützen	75
6.3.3.6	Tragende Innenwand	75
6.3.3.7	Nichttragende Innenwand	75
6.3.3.8	Balkone	75
6.3.3.9	Detailausbildung	76
6.4	Versorgungstechnik	78
6.4.1	Grundlagen der EnEV-Berechnung nach DIN V 18599	78
6.4.1.1	Energiebilanzierung des Gebäudes	78
6.4.1.2	Bewertung des Gebäudes nach EnEV	79
6.4.1.3	Transmissionswärmeverluste	80
6.4.1.4	Wärmebrücken	81
6.4.1.5	Primärenergiebedarf	82
6.4.1.6	Sommerlicher Wärmeschutz	83
6.4.1.7	Energetische Berechnung mit dynamischem U-Wert	84
6.5	Bewertung der Varianten	84
6.5.1	Variante 1	84
6.5.2	Variante 2	86
6.5.3	Variante 3	87
6.5.4	Variante 4	88
6.5.5	Variante 5	88
6.5.6	Variante 6	89
6.5.7	Variante 7	89
6.5.8	Variante 8	89
6.5.9	Auswertung der gebäudetechnischen Varianten	90
6.6	Bauphysik	92
6.6.1	Bauakustische Anforderung an Gebäude	92
6.6.2	Baurechtlich geschuldeter Schallschutz	92
6.6.3	Schutz gegen Außenlärm	93

6.6.4	Zivilrechtlich geforderter Schallschutz	93
6.7	Ausführung der Bauteile	96
6.7.1	Geschossdecken zwischen Wohnungen	96
6.7.1.1	Konkrete Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung	97
6.7.2	Auskragende Balkone	98
6.7.2.1	Allgemeines	98
6.7.2.2	Weichgelagerte Betonfertigteile	98
6.7.2.3	Konventioneller Balkonaufbau	99
6.7.3	Treppenläufe und -podeste	99
6.7.4	Wohnungstrenn- und Treppenhauswände in Massivbauweise	99
6.7.5	Wohnungstrennwände in Leichtbauweise	100
6.7.5.1	Trockenbauwände mit Einfachständerwerk	100
6.7.5.2	Trennwände mit Doppelständerwerk	100
6.7.6	Außenwände	101
6.8	Schallbrücken	101
6.8.1	Schwimmender Estrich	101
6.8.2	Wandhängende WCs	101
6.8.3	Bodengleiche Duschen	101
6.8.4	Dämmung der Heizungsrohre	102
6.8.5	Rohrschellen	102
6.8.6	Lüftungskanäle	102
6.8.7	Schallschutz haustechnischer Anlagen	102
6.8.8	Aufzugsanlage/Schachtwand	103
6.8.9	Schutz gegen Außenlärm	103
6.9	Brandschutz	103
7	ÖKOBILANZIERUNG	109
7.1	Methode	110
7.2	Auswertung	111
7.3	Fazit	127
8	INVESTITIONSKOSTEN	128
9	LEBENSZYKLUSKOSTEN	133
10	FAZIT	134
11	QUELLENANGABEN	137
12	ANLAGEN	139

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bildverzeichnis

Abb. 1: Woodscraper	4
Abb. 2: Lineares Modell	19
Abb. 3: Kreislaufmodell	20
Abb. 4: Zahlen und Fakten	26
Abb. 5: Brock Commons, Vancouver	27
Abb. 6: Konstruktionsdarstellung Brock Commons, Vancouver	28
Abb. 7: HoHo, Wien	29
Abb. 8: Konstruktionsdarstellung HoHo, Wien	30
Abb. 9: LCT One, Dornbirn	31
Abb. 10: Konstruktionsdarstellung, Life Cycle Tower One, Dornbirn	32
Abb. 11: Suurstoffi 22, Risch Rotkreuz	33
Abb. 12: Konstruktionsdarstellung, Suurstoffi 22, Risch Rotkreuz	34
Abb. 13: Murray Grove, London	35
Abb. 14: Konstruktionsdarstellung, Murray Grove, London	36
Abb. 15: Via Cenni, Mailand	37
Abb. 16: Konstruktionsdarstellung, Via Cenni, Mailand	38
Abb. 17: Holz 8, Bad Aibling	39
Abb. 18: Konstruktionsdarstellung, Holz 8, Bad Aibling	40
Abb. 19: Treet, Bergen	41
Abb. 20: Konstruktionsdarstellung, Treet, Bergen	42
Abb. 21: Funktionsprinzip einer Elektro-Kompressions-Wärmepumpe	45
Abb. 22: Ökobilanz mit Bilanzierungsgruppen, Quelle: ina Planungsgesellschaft mbH	59
Abb. 23: Produktkategorieregeln für die Ökobilanz, Quelle: DIN EN 15804	60
Abb. 24: Stadt Wolfsburg, Hellwinkel	62
Abb. 25: Deckenraster (links oben), Temperaturspeicher (rechts oben), Flexibilität (links unten), Sanitär (rechts unten)	65
Abb. 26: Wohnungstypen (1)	66
Abb. 27: Wohnungstypen (2)	67
Abb. 28: Regelgrundriss mit Wohnungsmix	68
Abb. 29: Gebäudestruktur	68
Abb. 30: ursprüngliche Planung (li.); abgeänderte Planung (re.)	70
Abb. 31: ursprünglicher Grundriss (li.); abgeänderter Grundriss (re.)	70
Abb. 32: Erschließungskern	72
Abb. 33: Verschiedene Deckensysteme, Teil 1	73
Abb. 34: Verschiedene Deckensysteme, Teil 2	74
Abb. 35: Detail zur Verhinderung von Tauwasserbildung	75
Abb. 36: Geschossübergang tragende Fassadenstütze	76
Abb. 37: Geschossübergang tragende Wand	76
Abb. 38: Anschluss Geschossdecke-Kern	77
Abb. 39: Energiebilanzierung nach DIN V 18599, Quelle: DIN V 18599	78
Abb. 40: Energiefluss zum Gebäude, Quelle: IFB Ingenieure	79
Abb. 41: Schnittansicht durch die geplanten Gebäude	104
Abb. 42: Einstufung in die Gebäudeklassen nach NBauO	105

Abb. 43: Einfluss auf Ökologie und Baukosten im Planungsverlauf	109
Abb. 44: Volumenanteile Variante 01	112
Abb. 45: Volumenanteile Variante 02	112
Abb. 46: Volumenanteile Variante 03	113
Abb. 47: Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) energetisch in kWh KG 300-400	114
Abb. 48: Primärenergie (PENRT) und (PERT) bauteilbezogen in kWh KG 300-400	116
Abb. 50: Primärenergie (PENRT) und (PERT) auf 50 Jahre bauteilbezogen in kWh KG 300-400	117
Abb. 51: KG 300-400 Treibhauspotenzial in [kg CO ₂ -Äq.]	118
Abb. 52: KG 300 Treibhauspotenzial in [kg CO ₂ -Äq.]	119
Abb. 53: Treibhauspotenzial in [kg CO ₂ -Äq.] Errichtung und Instandsetzung auf 50 Jahre KG 300-400	120
Abb. 54: Treibhauspotenzial in [kg CO ₂ -Äq.] Errichtung und Instandsetzung auf 50 Jahre KG 300	120
Abb. 55: Treibhauspotenzial in [kg CO ₂ -Äq.]bauteilbezogen KG 300-400	121
Abb. 56: Treibhauspotenzial in [kg CO ₂ -Äq.] Instandsetzung auf 50 Jahre, bauteilbezogen KG 300-400	122
Abb. 57: KG 300-400 Abiotischer Ressourcenverbrauch in kg Sb-Äq	123
Abb. 58: Abiotischer Ressourcenverbrauch in kg Sb-Äq bauteilbezogen KG 300-400	124
Abb. 59: Abiotischer Ressourcenverbrauch in kg Sb-Äq bauteilbezogen Instandsetzung auf 50 Jahre KG 300-400	125
Abb. 60: Investitionskosten bauteilbezogen in Euro KG 300-400	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vor- und Nachteile von Heizsystemen	47
Tabelle 2	Raumluftqualitäten	49
Tabelle 3	Vor- und Nachteile von Lüftungssystemen	52
Tabelle 4	Vor- und Nachteile von Warmwassererzeugung	55
Tabelle 5	KfW-Werte	80
Tabelle 6	Energieträger mit Primärenergiefaktor	83
Tabelle 7	Beschreibung der Varianten zum Energiekonzept	84
Tabelle 8	Übersicht der Varianten im Vergleich	89
Tabelle 9	Akustische Anforderungen an Bauteile	92
Tabelle 10	Akustische Anforderungen an Außenbauteile	93
Tabelle 11	Anforderungen Luftschall nach DEGA-Empfehlung 103 (2018)	94
Tabelle 12	Anforderungen Trittschall nach DEGA-Empfehlung 103 (2018)	94
Tabelle 13	Subjektive Wahrnehmbarkeit von üblichen Geräuschen aus benachbarten WEH	95
Tabelle 14	Vor- und Nachteile von Bodenaufbauten	97
Tabelle 15	Akustische Berechnungen von Bodenaufbauten	97
Tabelle 16	Vor- und Nachteile von Wandaufbauten	100
Tabelle 17	Brandschutzanforderungen an Bauteile	106
Tabelle 18	Massen- und Volumenaufwand	111
Tabelle 19	Primärenergieanteil (Energie) PERT und PENRT addiert	115
Tabelle 20	Primärenergieanteil (stofflich) PERT und PENRT addiert	115
Tabelle 21	Primärenergieanteil (total) PERT und PENRT addiert (Energie + stofflich)	115
Tabelle 22	Ozonabbaupotential (ODP) in kg CFC11-Äq	126
Tabelle 23	Ozonbildungspotential (POCP) in kg Ethen-Äq	126
Tabelle 24	Versauerungspotential (AP) in kg SO ₂ -Äq.	126
Tabelle 25	Eutrophierungspotential (AP) in kg P-Äq.	126
Tabelle 26	Baukosten KG 300-400 netto für Haus J	128

Tabelle 27	Aufschlüsselung der Standards ab 1. OG in KG 300-400 netto für Haus J	128
Tabelle 28	Klimafolgekosten vom Umweltbundesamt	129
Tabelle 29	Lebenszykluskosten und Herstellungskosten im Vergleich KG 300-400	130
Tabelle 30	Kostenvorteile bei ganzheitlicher Betrachtung Variante 1	130
Tabelle 31	Baukostenkennwerte nach BGF, NGF und WF brutto KG 300-400	131
Tabelle 32	Hochhausrelevante Ausstattung	131
Tabelle 33	Baukostenkennwerte ohne hochhausrelevante Ausstattung nach BGF brutto	131
Tabelle 34	Lebenszykluskosten (LCC) statisch über 50 Jahre in KG 300-400 netto	133

2 Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Baustoff

Für das Bauen bestimmter Stoff, dessen Abmessungen für das daraus herzustellende Bauhalbzeug, Bauteil, Bauwerksteil oder Bauwerk nicht maßgebend sind. Baustoffe sind Zement, Sand, Kies, Wasser, nicht zugeschnittenes Holz und dgl.

Bauhalbzeug

Aus der Verarbeitung von Baustoffen entstandenes Erzeugnis, dessen Abmessungen in seiner weiteren Verwendung in einer oder zwei Richtungen unverändert bleiben.

Bauhalbzeuge sind Profile, nicht abgelängter Baustahl, Kabel, Bretter und dgl.

Bauprodukt

Ein Baustoff oder Bauhalbzeug, dessen Gebrauchseigenschaften durch Normung oder Bauzulassung genau bestimmt ist. Ein Hersteller übernimmt die Garantie für die definierten Gebrauchseigenschaften. Die europäische Bauprodukten-Richtlinie fasst den Begriff unter dem juristischen Aspekt weiter und versteht unter dem Bauprodukt Erzeugnisse vom Stoff über das Bauteil bis hin zum Fertighaus, d. h. alles, was als Bauprodukt in den Handel kommen kann.

Bauteil

Ein Bauteil ist ein Bauprodukt, das als bestimmte Einheit ausgebildet ist und in allen diesen Dimensionen festgelegte Größen hat. Bauteile sind Fenster, Türen, Geräte und dgl.

Bauelement

Bauelemente sind Bauteile eines Bauwerks mit einer bestimmten Funktion. Bauelemente sind Dächer, Decken, Außenwände, Innenwände, Heizungsanlagen und dgl. Je nach Komplexität der Zusammensetzung wird unterschieden zwischen: **Makroelementen**, **Grobelementen**, **Feinelementen**. Bauelemente werden im eingebauten Zustand betrachtet und repräsentieren neben der stofflich-konstruktiven bzw. systemtechnischen Lösung auch die Herstellungs- und Einbautechnologie.

Emissionen [PE2005]

Abgabe von industriellen Anlagen, Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, Haushaltsheizungen oder bei sonstigen technischen Vorgängen in die Umwelt abgegebene feste, flüssige und gasförmige Stoffe oder Verbindungen sowie Geräusche, Strahlen, Wärme, Erschütterungen und ähnliche Erscheinungen.

Eutrophierungs-, Überdüngungspotenzial, NP, Nutriphication Potential [PE2005]

Die Bezugsgröße für das Eutrophierungspotenzial ist Phosphat (PO_4^{3-}) mit einem EP von 1,0 in kg PO_4 -Äquivalent. Andere eutrophierende Emissionen werden auf die wirkungsäquivalente Phosphatmenge bezogen.

EPD

Eine „Environmental Product Declaration“ (EPD) ist eine Typ-III-Umweltdeklaration. Diese stellt quantifizierte umweltbezogene Informationen aus dem Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung zur Verfügung, um damit Vergleiche zwischen Produkten oder Dienstleistungen gleicher Funktion zu ermöglichen. Eine EPD beruht auf unabhängig überprüften Daten aus Ökobilanzen, aus Sachbilanzen oder Informationsmodulen, welche mit der Normenreihe DIN ISO 14040 konform sind und enthält ggf. weitere Angaben.

GWP, Global Warming Potential, CO_2 -Äquivalent

Ökologische Bewertungsmethode, welche alle treibhausrelevanten Emissionen ihrer Wirkung gemäß summiert. Andere Gase als CO_2 (z. B. CH_4 und N_2O sowie SF_6 , PFC und HFC) werden auf CO_2 umgerechnet (Äquivalenzfaktoren).

Hybrid

Unter Hybrid wird hier ein System verstanden, bei welchem zwei Technologien bzw. Systeme miteinander kombiniert werden.

Konstruktionsprodukt

Ein Konstruktionsprodukt ist die Bezeichnung für einen Baustoff, ein Bauhalbzeug oder ein Bauteil, das in einer konkreten Konstruktion eingesetzt wird, z. B. eine Betonplatte als Fertigteil in einem bestimmten Gebäude.

LCA, Life Cycle Assessment [PE2005]

Life Cycle Assessment; im deutschen Sprachraum Lebenszyklusanalyse oder allgemein: Ökobilanz. Erlaubt, die Lebenszyklen von Produkten und Dienstleistungen auf ihre ökologischen Auswirkungen hin zu untersuchen und transparent darzustellen. LCA ist die Zusammenstellung der Stoff- und Energieflüsse, die für ein Produkt entlang seines gesamten Lebensweges verursacht werden (Sachbilanz, Life Cycle Inventory Analysis (LCI)); die Zusammenführung der Belastungen nach Wirkungen (Wirkungsanalyse, Life Cycle Impact Assessment (LCIA)) und die Bewertung mit unterschiedlicher Aggregation. Standardisierte Vorgehensweise nach DIN ISO 14040 ff.

LCC, Life-Cycle-Costing [PE2005]

Life-Cycle-Costing oder auch Lebenszykluskostenrechnung ist eine Kostenmanagement-Methode, die die Entwicklung eines Produktes von der Produktidee bis zur Rücknahme vom Markt betrachtet. Dabei sind nur die negativen Zahlungsströme (Ausgaben) von Interesse, die Erlöse (Einnahmen) werden dabei vernachlässigt. Es ist eine Betrachtung der finanziellen Aufwendungen „von der Wiege bis zur Bahre“.

Lebenszyklus

Lebenszyklus eines Produktes bezeichnet ein Konzept bei LCA und Stoffstromanalyse, das für Produkte oder Dienstleistungen alle Umwelteffekte von der „Wiege“ (Rohstoff- oder Primärenergiegewinnung) bis zur „Bahre“ (Entsorgung oder Recycling) ermittelt, inkl. der aus der Herstellung notwendiger Materialien, Transporten und der Nutzungsphase stammenden Umwelteffekten. Die Verknüpfungen aller Module/Prozesse, die einen Lebensweg bilden, werden als Prozessketten bezeichnet.

Ozonabbaupotenzial, ODP, Ozone Depletion Potential [PE2005]

Gemessen in kg R11-Äquivalent, stratosphärischer Ozonabbau, Beitrag der Emissionen zum Ozonabbau. Ozon bildet in der Stratosphäre eine Schicht (Ozonschicht), die Pflanzen und Tiere vor einem Großteil der schädlichen UV-Strahlung der Sonne schützt. Die Ozonmenge ist, bedingt durch CFCs und halogenierte Kohlenwasserstoffe, die in die Atmosphäre abgegeben wurden, zurückgegangen. Ein Abbau der Ozonschicht wird die UV-Strahlung auf der Erdoberfläche erhöhen.

Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial, POCP [PE2005]

Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial in kg C₂H₄-Äquivalent, auch Sommersmog, Ozonbildungspotenzial, bodennahe Ozonbildung (engl. Photochemical Ozone Creation Potential). Ozonbildungspotenzial ist das massebezogene Äquivalent der Bildung von bodennahem (troposphärischen) Ozon durch Vorläufersubstanzen, die für die bodennahe O₃-Bildung verantwortlich sind und so zum Sommersmog beitragen.

Primärenergie, PE [PE2005]

Der Energieinhalt der Energieträger in ihrer Ursprungsform. Die durch die Gewinnung, Umwandlung und Bereitstellung der Nutzenergie notwendigen Aufwände werden in Ökobilanzen auf die dafür notwendige Menge an Primärenergieträgern zurückgerechnet. Beispiele sind Erdöl, Erdgas, Kohle, Wasserkraft, Windkraft und Uran. Unterschieden wird in erneuerbare PE (Wind, Wasser, nachwachsende Rohstoffe) und nicht erneuerbare PE.

Ressourcenpositiv

Ressourcenpositiv wird in dieser Abhandlung verwendet, um einen entstandenen Ressourcenüberschuss zu bezeichnen, welcher durch entsprechendes Handeln und Planen zu erwirken ist.

Standard

Als Standard werden hier Bauweisen bezeichnet, die weithin anerkannte und verbreitete Materialien und Baupraktiken einsetzen. Es werden die Bauweisen so bezeichnet, die sich gegenüber anderen Bauweisen durchgesetzt haben.

Treibhauseffekt [PE2005]

Die von der Sonne auf die Erdoberfläche abgestrahlte Energie wird zum Teil reflektiert, zum Teil absorbiert. Der absorbierte Anteil führt zur Erwärmung von Boden, Wasser und Luft. Relativ kurzwellige UV/VIS-Strahlung trifft auf den Boden und wird mit größerer Wellenlänge als Wärmestrahlung (Infrarot-Wellenlängenbereich) in die Atmosphäre abgestrahlt. Bestimmte Spurengase der Erdatmosphäre tragen dazu bei, die Troposphäre aufzuheizen, indem sie die einfallende Sonnenstrahlung nahezu ungehindert durchlassen, aber einen großen Teil der von der Erde wieder ausgesandte Infrarotstrahlung absorbieren, wodurch die Wärme nicht wieder in den Weltraum abgestrahlt werden kann (wie Gewächshaus [Treibhaus]). Damit findet eine zusätzliche Wärmespeicherung in der Atmosphäre statt. Beispiele für solche klimarelevanten Spurengase sind Wasserdampf (H₂O) und Kohlendioxid (CO₂). Zurzeit beträgt die Durchschnittstemperatur auf der Erde ca. +15 °C. Ohne den bereits von FOURIER¹ und ARRHENIUS² beschriebenen „natürlichen Treibhauseffekt“ läge diese durchschnittliche Temperatur der Erdoberfläche um 33 K niedriger; bei ca. -18 °C. Kein Lebewesen wäre dann überlebensfähig. Der Wasserdampf in der Troposphäre hat den größten Anteil am natürlichen Treibhauseffekt. Von den genannten 33 °C Temperaturdifferenz rechnet man dem Wasserdampf etwa 21 °C und dem Kohlendioxid etwa 7 °C zu. Die verbleibenden 5 °C werden den übrigen Klimagasen zugerechnet. Durch die von den Menschen freigesetzten sogenannten anthropogenen Treibhausgase wie Kohlendioxid, Methan, FCKWs usw. findet eine Konzentrationszunahme der treibhausrelevanten Spuremissionen statt. Diese verursachen einen zusätzlichen und zurzeit rasch zunehmenden Treibhauseffekt.

Versauerungspotenzial, Schwefeldioxid-Äquivalent, SO₂, AP, Acidification Potential

Das quantitative Versauerungspotenzial wird in SO₂-Äquivalenten angegeben. Orientierungsstoff für die Bildung des Versauerungspotenzials ist SO₂ (Schwefeldioxid) mit AP = 1,0. Neben SO₂ werden auch die Luftschadstoffe NO_x, HCl, HF, NH₃ und H₂S mit ihrer auf SO₂ bezogenen Wirkung berücksichtigt. Für die Beurteilung des Versauerungspotenzials (AP) wird das flächen- und jahresbezogene SO₂-Äquivalent über den Lebenszyklus für Konstruktion und Betrieb des Gebäudes herangezogen. Je niedriger der AP-Wert, umso geringer die Gefahr von saurem Regen und den damit verbundenen Umweltschädigungen.

Ökobilanzmethodik

Eine Ökobilanz analysiert den Lebensweg eines Produkts, das eine oder mehrere Funktionen hat. Dazu betrachtet man die Lebensstadien:

- Rohstoffgewinnung,
- Herstellung,
- Verarbeitung und
- Transport sowie ggf.
- Gebrauch,
- Nachnutzung und
- Entsorgung.

¹ J. Fourier, "Remarques g'en'erales sur les temp'eratures du globe terrestre et des espaces plan'etaires", (1824)

² S. Arrhenius, "Die vermutliche Ursache der Klimaschwankungen" [The possible cause for climate variability], (1906)

3 Verzeichnis von Abkürzungen

ADP:	Abiotic Depletion Potential (Abiotischer Ressourcenverbrauch) Reduktion des globalen Bestandes an nicht erneuerbaren
AP:	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
BHKW:	Blockheizkraftwerk
BGF:	Brutto-Grundfläche
BMA:	Brandmeldeanlage
BSH:	Brettschichtholz
BSP:	Brettsperrholz
C2C:	Cradle to Cradle
COP:	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
DEGA:	Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.
EEWärmeG:	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV:	Energieeinsparverordnung
EPD:	Environmental Product Declaration (Produkt-Umweltdeklaration)
FSC:	Forest Stewardship Council (Zertifizierung für nachhaltige Waldbewirtschaftung)
GaStpIVO:	Garagen- und Stellplatzverordnung
GFZ:	Grundflächenzahl
GU:	Generalunternehmer
GWP:	Global Warming Potential, CO ₂ -Äquivalent (Treibhauspotential)
HBV:	Holz-Beton-Verbund
IR:	Infrarot
IRH:	Infrarot-Heizung
KG:	Kostengruppe
KfW:	Kreditanstalt für Wiederaufbau (Förderbank)
KWK:	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG:	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
LCA:	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse/Ökobilanz)
LCC:	Life-Cycle-Costing (Lebenszykluskosten)
LCI:	Life Cycle Inventory Analysis (Sachbilanz)
LCIA:	Life Cycle Impact Assessment (Wirkungsanalyse)
MBO:	Musterbauordnung
MHHR:	Muster-Hochhausrichtlinie
M-HFHHolzR:	Muster-Richtlinie zu brandschutztechnischen Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise
NAWARO:	Nachwachsende Rohstoffe
NBauO:	Niedersächsische Bauordnung
NGF:	Netto-Grundfläche
NP:	Nutrication Potential (Überdüngungspotenzial)
ODP:	Ozone Depletion Potential (Ozonabbau-potenzial)
POCP:	Photochemical Ozone Creation Potential (Ozonbildungspotenzial)
PE:	Primärenergie
PEFC:	Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (Zertifizierung für nachhaltige Waldbewirtschaftung)
PENRT:	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar
PERT:	Primärenergiebedarf erneuerbar
PV:	Photovoltaik
TWW:	Trinkwarmwasser
VDI:	VDI-Richtlinien werden vom Verein Deutscher Ingenieure aufgestellt
WDVS:	Wärmedämmverbundsystem
WEH:	Wohneinheit
WRG:	Wärmerückgewinnung
WF:	Wohnfläche

4 Zusammenfassung

Ressourcenverknappung, Klimawandel und Bevölkerungswachstum mit einhergehender Urbanisierung stellen die Bauindustrie vor immense Herausforderungen. Mit der Frage nach zukunftsfähigen Bauweisen rücken innovative Konzepte, die sowohl der zunehmenden **Rohstoffverknappung**, der notwendigen **Energieeffizienz** als auch dem **Flächenverbrauch** gerecht werden, immer mehr in den Fokus gesellschaftlichen Interesses. Am Beispiel der WOODSCRAPER in Wolfsburg wurde eine Strategie erarbeitet, um bereits in der frühen Planungsphase Gebäude sowohl ökologisch als auch kostenoptimiert zu planen. Durch einen ganzheitlichen, integralen Planungsansatz, eine umfassende Planung zur Demontierbarkeit einzelner Bauteile und Bauprodukte zur sortenreinen Rückgewinnung der eingesetzten Ressourcen für zirkuläres Bauen und den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen wird die Ressourcenfrage bearbeitet. Damit sind diese Gebäude ein Beispiel dafür, was gegenwärtig technisch sowie unter Einhaltung regulatorischer Vorschriften in Deutschland im Gebäudetypus Hochhaus zum Thema „zirkuläres Bauen“ möglich ist. Innovative Konzepte zur Verschlankung und Vereinfachung der Haustechnik dienen der Energieeffizienz, um den negativen Einfluss von Gebäuden auf den Klimawandel zu verringern. Der hohe Anteil nachwachsender Baustoffe dient zudem der Bindung erheblicher Mengen an Klimagasen. Der Flächenverbrauch wird durch den Gebäudetypus Hochhaus, durch seine kompakte Bauweise, erheblich reduziert.

Die technische Machbarkeit von Hochhäusern aus Holz konnte in Europa anhand einzelner Pilotprojekte und Forschungsprojekte bereits nachgewiesen werden. Ebenso ist der Einsatz von ökologischen wie auch nachwachsenden Baustoffen mit wirtschaftlichen Vorteilen heute schon zu realisieren. Der Einsatz in größeren Projekten und im Gebäudetypus Hochhaus ist dabei jedoch wenig verbreitet. Insbesondere der Ansatz zirkulärer Bauweisen ist bisher wenig entwickelt.

Der Typus Hochhaus muss berechtigterweise hohe Anforderungen an Brandschutz und Statik erfüllen. Hinzu kommen Herausforderungen im Schallschutz, in der Wartung, im Betrieb sowie erhöhte Witterungseinflüsse. Ökologische Baupraktiken sind daher im Bereich dieses Typus noch nicht besonders weit verbreitet. Fragen der Wirtschaftlichkeit sowie Vorbehalte in der Baubranche behindern in der Praxis die Umsetzung solcher Gebäude. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, am Beispiel der WOODSCRAPER eine Strategie zu entwickeln, die die wirtschaftliche Umsetzung von komplexen, ressourcenpositiven Gebäuden schon in der frühen Planungsphase sicherstellt.

Die Planung als Vorwegnahme zukünftigen Handelns führt zur Strategien, die es erfordern, Investitionskosten, Lebenszykluskosten und Ökobilanz eines ökologisch optimierten Gebäudes einem konventionell geplanten Gebäude gegenüberzustellen. Mit Hilfe der Software LEGEP werden diese beiden Varianten mit allen bauartspezifischen Bauteilen und Elementen gegenübergestellt und ausgewertet. Aus den Ergebnissen der Auswertung können bei gleichzeitiger Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Bauteile und Elemente so kombiniert werden, dass sich eine Balance aus ökologischem Optimum und Wirtschaftlichkeit als planerisches Ergebnis ergibt. Interessanterweise hat sich gezeigt, dass die ökologisch optimierte Variante 1 (Ressource Plus), bei ganzheitlicher Betrachtung und über den Lebenszyklus, das planerische Optimum darstellt.

Voraussetzung für diese Strategie ist ein integraler Planungsprozess mit allen Beteiligten inklusive aller Fachplaner, um zu Beginn des Entwurfsprozesses neue Materialien, Möglichkeiten und Materialkombinationen auf Umsetzbarkeit zu überprüfen, damit negative Pfadabhängigkeiten im Verlauf des Projektes minimiert werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Kosten vor allem durch gesetzliche Vorgaben an den Gebäudetypus Hochhaus, als auch über den Standard des Gebäudes bestimmt werden. Daraus lässt sich Schlussfolgern, dass das hier untersuchte Gebäude mit mehr Geschossen sehr wahrscheinlich noch wirtschaftlicher ist. Ökologische Mehrkosten zum Zeitpunkt der Errichtung werden bei ganzheitlicher Betrachtung über den Lebenszyklus mehr als ausgeglichen – bei höherem Standard.

5 Einleitung

Wir wissen längst, dass „business as usual“, also lineares Wirtschaften, in Anbetracht der aktuellen Klimaveränderungen und Ressourcenverknappung und in Zeiten immer kritischer werdender geopolitischer Abhängigkeiten in Zukunft nicht mehr möglich sein wird. Der Traum von ewigem Wachstum ist vorbei. Er basiert auf der Verwendung endlicher Ressourcen und führt dazu, dass durch zunehmenden Konsum und Bevölkerungswachstum die Ressourcen immer knapper werden, die Umweltprobleme sich stetig verschärfen und die globale Ungerechtigkeit drastisch zunimmt. Insbesondere der Bausektor muss einen drastischen Kurswechsel vollziehen, da hier der Ressourcenverbrauch immens ist. Das Abfallaufkommen aus dem Bausektor lag 2016 bei 54 % des gesamten Müllaufkommens in Deutschland.³ Gerade die abnehmende Verfügbarkeit und der immer aufwändiger werdende Abbau von Ressourcen bringen einen Anstieg der Rohstoffkosten und ein zunehmendes Verteilungsungleichgewicht mit sich. Gleichzeitig tragen Rohstoffe, die nach ihrer Nutzung auf Deponien entsorgt oder verbrannt werden, zu massiven Umweltproblemen bei.

Ressourcenverbrauch

Wäre der Ressourcenverbrauch überall auf der Welt so hoch wie in Deutschland, wären zur Erfüllung der Bedürfnisse aller Menschen drei Erden notwendig. Orientiert man sich am durchschnittlichen globalen Ressourcenbedarf, so wären immer noch 1,7 Erden zur Deckung des Bedarfs notwendig.⁴

Im linearen Modell (siehe Abb. 2) werden endliche Ressourcen unter erheblichem Aufwand abgebaut und zu Waren weiterverarbeitet, die häufig einen einmaligen, verhältnismäßig kurzen Nutzungszeitraum vorsehen, und die ursprünglichen Eigenschaften der eingesetzten Ressourcen häufig vernichtet oder unzugänglich gemacht und enden damit als Müll. Zu den Gründen hierfür gehören u. a.:

- Aufwändiger Ressourcenverbund im Designprozess von Produkten und Materialien, der eine Rückgewinnung der Rohstoffe erschwert oder unmöglich macht. Durch etablierte industrialisierte Herstellungsverfahren sind diese Verbundprodukte häufig günstiger am Markt erhältlich, da Folgekosten (Schädigung von Mensch und Umwelt) nicht mit eingepreist sind.
- die Verlagerung von Werten wie etwa der Langlebigkeit hin zur ständigen Verfügbarkeit und Nachfrage neuerer Modelle (Konsum und Wachstum)
- regulatorische Vorschriften, die eine Weitergabe oder eine Weiterverwendung erschweren,
- Personal- und Lagerungskosten, welche die Entsorgungskosten und die der Weiterverwendung häufig übersteigen.

Das globale CO₂-Budget läuft aus, um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen

Das Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) hat in seinem Sonderbericht von Oktober 2018 veröffentlicht, dass das globale CO₂-Budget bei gleichbleibenden Emissionen bereits in neun Jahren komplett ausgeschöpft sein wird. Derzeit werden weltweit ca. 42 GT CO₂ jährlich ausgestoßen. Zur Einhaltung des 1,5-Grad-Zieles dürfen insgesamt nur noch ca. 420 GT CO₂ ausgestoßen werden.⁵

³ Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018): Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) 2016, S. 33. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallbilanz.html>

⁴ Germanwatch e.V. (2018): FAQ zum deutschen und globalen Erdüberlastungstag, Stand: Juli 2018. <https://germanwatch.org/de/15394>

⁵ MCC Sonderbericht Oktober (2018): So schnell tickt die CO₂-Uhr: <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html>

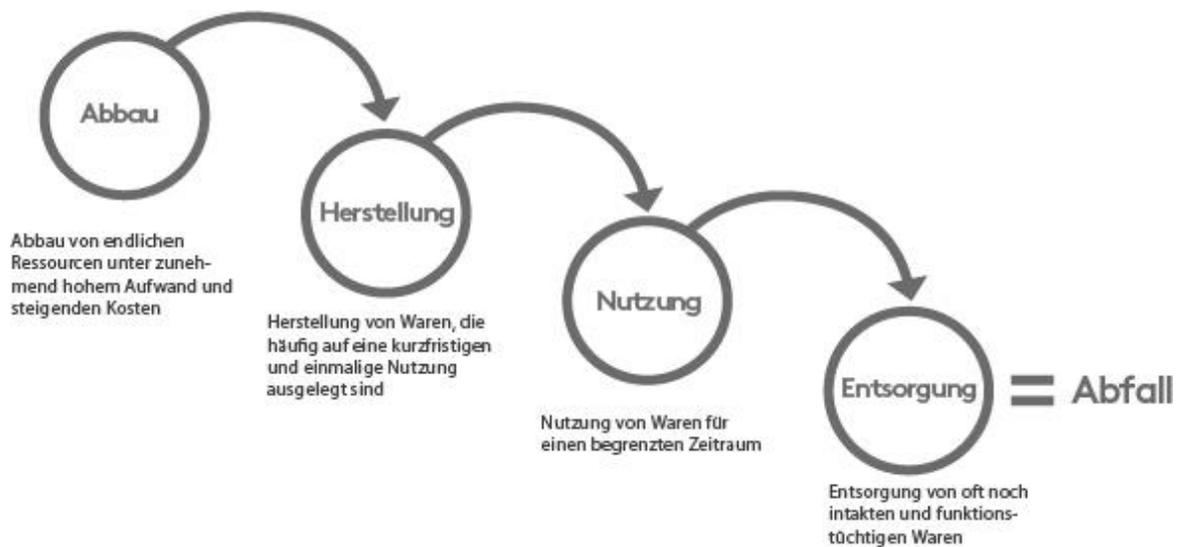


Abb. 2: Lineares Modell

Dieses Bauen und Wirtschaften ist somit nicht auf nachhaltiges Wachstum ausgelegt und kann dementsprechend auch nicht langfristig funktionieren. Aus diesem Grund stößt es nun zunehmend an seine Grenzen. Natürliche Ressourcen sind nicht endlos verfügbar, und es ist bewiesen, dass ihr Abbau, die Weiterverarbeitung und Entsorgung verheerende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt hat. So werden hierdurch beispielsweise Flächen versiegelt und degradiert, wichtige Lebensräume zerstört und die Biodiversität drastisch reduziert sowie das Trinkwasser und die Böden verunreinigt. Die entstehenden Umweltwirkungen sind immens, gleichzeitig belegen aktuelle Studien, dass das global noch zur Verfügung stehende CO₂-Budget ununterbrochen abnimmt und im Grunde mit der bestehenden Infrastruktur schon ausgeschöpft ist.⁶ Daraus ergeben sich geopolitische Spannungen und Abhängigkeiten, die wiederum zu Konflikten und Kriegen führen können. Durch aktuelle Klimaereignisse wie Unwetter, Überschwemmungen und Dürreperioden werden die Konsequenzen unseres (Nicht-)Handelns darüber hinaus für jeden Einzelnen von uns immer stärker spürbar.

Die gesellschaftliche Debatte um Klimaschutzmaßnahmen und Nachhaltigkeit bezieht derzeit die externen oder nachgelagerten Effekte und Umweltfolgekosten noch nicht konsequent mit ein. Anders ist nicht zu erklären, warum etwa die Verschwendung von Ressourcen nicht weiter begrenzt oder der Ausstoß von klimaschädlichen Treibhausgasen noch immer nicht angemessen eingepreist wird. Betrachtet man die aktuellen Preise für recycelte Materialien sowie die aktuellen Deponiekosten, bilden diese die Umweltfolgekosten noch nicht ab. Im Ergebnis sind deshalb Sekundärrohstoffe derzeit unter Umständen sogar teurer als Primärrohstoffe. Es ist davon auszugehen, dass dies nicht so bleiben wird, sondern dass sich langfristig eine ganzheitliche und realistische Betrachtung der Problematik durch den Einbezug von externen Effekten durchsetzen wird. Jedoch findet dieses Wissen bei der heutigen Gebäudeplanung und Produktentwicklung in der Regel keine Berücksichtigung, und Alternativen entwickeln sich im Verhältnis zu den eintretenden Schäden viel zu langsam.

Ein grundsätzlicher Wandel kann in einer so diversen Branche wie dem Bauwesen nur mit einem gemeinsamen Verständnis und gleichen Zielsetzungen erfolgen – integrale Planungsprozesse sind anzustreben. **„Vom Ende her zu denken“ muss die Prämisse für den Beginn des Bauens der Zukunft werden.**

⁶ IPCC-Sonderbericht über 1,5°C globale Erwärmung (2019): https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_IPCC_SR15.pdf

Stoffkreisläufe zu schließen ist damit die logische Folgerung, um einen grundlegenden Strategiewechsel herbeizuführen. Große Schritte in diese Richtung hat bereits die Denkschule Cradle-to-Cradle⁷ („von der Wiege zur Wiege“) unternommen, welche zum Ziel hat, nicht nur den eigenen negativen ökologischen Fußabdruck zu minimieren, sondern vielmehr einen positiven Beitrag zu leisten. Indem Rohstoffe in Kreisläufen geführt werden und als Basis für neue Materialien oder Produkte dienen, wird die Entstehung von Müll vermieden. Bei der Beschreibung von Kreisläufen kann grundsätzlich zwischen einer biologischen Sphäre, in der gesundheitsverträgliche und kompostierbare Ressourcen sich fortlaufend erneuern, und einer technischen Sphäre, in der Ressourcen durch menschlichen Einfluss verbessert und wiederhergestellt werden, unterschieden werden. Alle Prozesse werden dabei mit 100 % erneuerbarer Energie angetrieben und dienen der Schaffung von Vielfalt und der Stärkung von Biodiversität.

Das Holzhochhausprojekt WOODSCRAPER hat zum Ziel, alle heute erhältlichen, kreislauffähigen und nachwachsenden Produkte in einem Hochhaus, einem Gebäudetypus mit hohen technischen Anforderungen, zu vereinen. Neben regulatorischen Vorschriften spielen Kosten für die Umsetzbarkeit dieser Bauweise eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund ergab sich die Notwendigkeit, schon in der frühen Planungsphase eine Strategie zu erarbeiten, anhand welcher mittels Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Ökobilanzierung die Umweltauswirkungen menschlichen Handelns so positiv wie möglich gestaltet werden können.

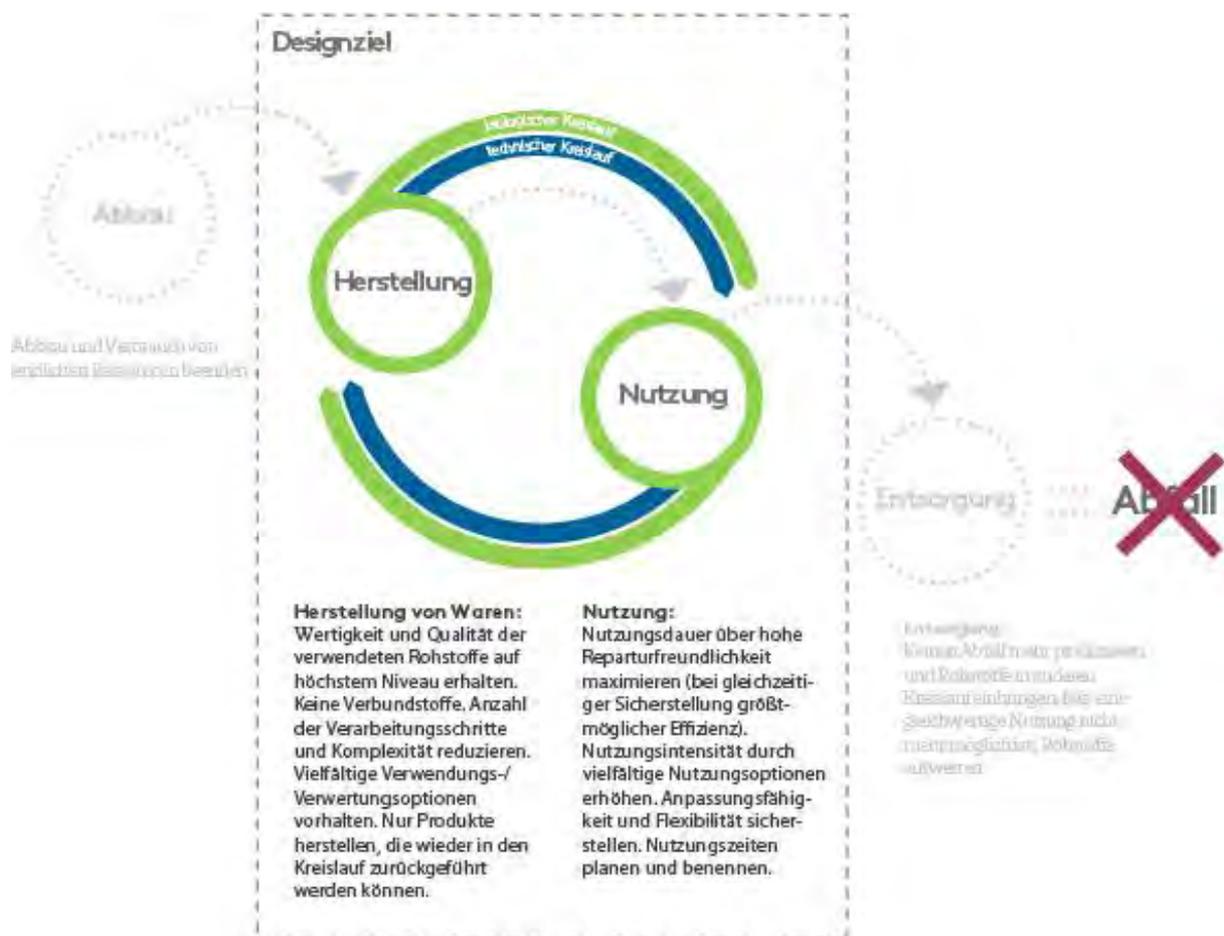


Abb. 3: Kreislaufmodell

⁷ McDonough, W.; Braungart, M. (2002): Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things. North Point Press, New York und (2013): The Upcycle: Beyond Sustainability — Designing for Abundance. North Point Press, New York.

5.1 Zielsetzung

Ziel ist, mit dem Projekt WOODSCRAPER ein Pilotprojekt für zukünftiges Bauen zu entwickeln, der Antworten auf die geschilderten Herausforderungen des Bauens liefert. Die Praxis hat gezeigt, dass eine ganzheitliche Darstellung von Kosten-Nutzen-Verhältnis des zirkulären Bauens und ressourcenpositiver Gebäuden Bedingung dafür ist, Partner davon zu überzeugen, neue Wege zu beschreiten.

Als Werkzeug hierfür wird beispielhaft eine Strategie zur wirtschaftlichen Errichtung von ressourcenpositiven Gebäuden als hochverdichtetem Wohnraum erarbeitet. Die Einflussmöglichkeiten auf die ökologischen Fragen sind zu Beginn eines jeden Projektes am größten. Die Strategie soll daher unter ganzheitlicher Betrachtung umfassend Potentiale und Möglichkeiten zirkulären Bauens und ressourcenpositiver Gebäude während des Entwurfsprozesses sichtbar machen, und diese fundiert mit Kosten-Nutzen-Verhältnis belegen. Auch ökologische Bauweisen, die nicht weit verbreitet aber technisch sinnvoll sind, sollen in der Strategie Berücksichtigung finden.

Diese Untersuchungen sollen modellhaft belegen, dass umweltgerechtes Bauen selbst in großem Maßstab schon heute möglich und finanzierbar ist. Es sollen die ersten Holzhochhäuser in Deutschland werden, bei denen alle heute realistisch einsetzbaren ökologischen Innovationen wirtschaftlich und sinnvoll zum Einsatz kommen. Damit sollen die Häuser als Vorbild für ein neues, zirkuläres Planen und Bauen stehen, durch welches sich der Ressourcenverbrauch massiv reduzieren lässt und gesunder Lebensraum mit positiven Auswirkungen für Mensch und Natur entsteht.

5.2 Aufgabenstellung, Methodik

Zur Erarbeitung dieser Strategie wird zu Beginn des Planungsprozesses der WOODSCRAPER ein interdisziplinäres Planungsteam inklusive ausführender Firmen zusammengestellt. Das Ziel des zirkulären Bauens und ressourcenpositiver Gebäude wird definiert und in gemeinsamen Planungstreffen werden Parameter und das Vorgehen festgelegt. Der primäre Baustoff Holz wird festgelegt und notwendige Schritte besprochen, um die technische Machbarkeit sowie Genehmigungsfähigkeit von Holzbau bezogen auf Brandschutz und Tragwerk sowie die kostenoptimierte Umsetzung des Sondertypus Hochhaus zu klären. Optionen einer reduzierten und schlanken Haustechnik werden ausgelotet und definiert, um auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse einen Entwurf mit vorelementierten, reversiblen Bauteilen zu entwickeln. Ein Vorgehen auf spätere Leistungsphasen ist dabei unausweichlich, weshalb ein integraler Planungsprozess unter Einbindung aller Projektbeteiligter zwingende Voraussetzung ist. Als Strategie ist dabei folgende Arbeitsweise entstanden:

- 1. Grundlagenermittlung (interdisziplinär)**
 - Definition der Zielsetzungen
 - Definition projektbezogener Parameter
 - Zusammentragen ökologisch innovativer Lösungen
 - Prüfung auf Machbarkeit (technische Eignung, Einhaltung von Vorschriften, Herstellungsverfahren, Bezugsquellen, etc.)
- 2. Konzeptentwicklung (fachspezifische Vertiefung)**
 - Entwurfserstellung unter Berücksichtigung der Nachnutzung eingesetzter Rohstoffe
 - Energiekonzept
 - Brandschutzkonzept
 - Vorstatik
 - Prüfen von Produktionsverfahren
- 3. Analyse Kosten-Nutzen-Verhältnis (mittels LEGEP)**

- Investitionskosten
- Ökobilanz
- Lebenszykluskostenanalyse
- Untersuchung der Umweltauswirkungen einzelner Bauteile

4. Optimierte Entwurfsplanung (interdisziplinär)

- Verbesserung von Aufbauten und Bauteilen hinsichtlich Performance, Kosten und Ökologie
- Unter Berücksichtigung komplexer Erkenntnisse erfolgt in interdisziplinärer Zusammenarbeit die Ausarbeitung des Entwurfes, um ein finanziell realisierbares Optimum mit allen bekannten Parametern umsetzen zu können.

Um das entstandene Ergebnis der Phase der Konzeptentwicklung auf sein Kosten- Nutzen-Verhältnis hin zu bewerten, werden Investitionskosten, Lebenszykluskosten und Ökobilanzierung von drei Gebäudevarianten gegenübergestellt und ausgewertet:

1. **Variante 01** wird als ressourcenpositive Variante definiert und unter Einhaltung der Hochhauskriterien ökologisch für geschlossene Kreisläufe optimiert.
2. **Variante 02** wird als Standard-Variante definiert, um den heute üblicherweise eingesetzten Stand der Technik abzubilden.
3. **Variante 03** wird als Hybridvariante entwickelt, um ein wirtschaftliches Optimum im Zusammenspiel von Kosten und Ökologie zu erzeugen.

Diese in den Entwurfsprozess integrierte Darstellung der Umwelt- und Kostenauswirkungen hat zum Ziel, negative Auswirkungen der Planung auf einen angenommenen Betriebszeit von 50 Jahren, die Instandhaltung und anschließende Demontage der Gebäudekonstruktion der WOODSCRAPER so gering wie möglich zu halten, um auf Basis dieser Kenntnisse den Entwurf bestmöglich zu optimieren. Im Entwicklungsprozess stellte sich heraus, dass auf Grund mangelnder Informationen und Datensätze die Weiterverwendung von Bauteilen und Materialien in dieser Strategie nicht zahlenmäßig untersucht werden kann, sondern sich nur konzeptionell im Projekt verankern lässt. Produkte und Aufwendungen, die sich nur auf den Baustellenbetrieb beziehen, werden nicht mit berücksichtigt. Transporte werden vernachlässigt.

Für die Berechnung der Umweltwirkungen des Gebäudebetriebs (auf 50 Jahre bezogen) werden die Energieverbräuche für Strom und Wärme aus der EnEV-Berechnung entnommen. Der Wasserverbrauch im Gebäudebetrieb wird nicht mit abgebildet und der Haushaltsstromverbrauch wird mit Standardkennwerten mit einbilanziert.

Das Projekt WOODSCRAPER besteht aus zwei konstruktiv baugleichen Gebäuden auf einer gemeinsamen Tiefgarage. Die Tiefgarage ist laut B-Plan obligatorisch. Für die Errichtung der Tiefgarage wurde keine Alternative zu heute üblichen Konstruktionsarten untersucht, weshalb diese aus der Untersuchung herausgenommen wurde, da der angestrebte Vergleich dadurch nicht beeinflusst wird. Für eine aussagekräftige Untersuchung beschränkt sich diese Arbeit auf ein Gebäude mit drei Varianten ab Oberkante Erdgeschoss. Als Grundlage für diese Untersuchungen werden folgende Unterlagen herangezogen:

- aktueller Planstand
- BIM-Modell mit geplanten Schichtaufbauten und Materialien
- EnEV-Berechnungen mit acht Varianten
- Energiekonzept für drei zu vergleichende Varianten
- Brandschutzkonzept ausgelegt für Variante 01 und Variante 03
- Vorstatik aller drei Varianten

Als Werkzeug für die Erstellung des Variantenvergleiches der Ökobilanzierung (LCA) und Lebenszykluskostenanalyse (LCC) wird die Software LEGEP eingesetzt, welche bauteil- und baustoffbezogenen Datensätze aus den Datenbanken Ökobaudat und sirAdos verarbeitet.

Untersucht wird der gesamte Lebenszyklus der im Rahmen des Neubaus der WOODSCRAPER verwendeten Baumaterialien von ihrer Herstellung bis zur Instandsetzung. Verwendet wird dafür das sogenannte „Vereinfachte Rechenverfahren“ das die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) für die Ökobilanzierung von Gebäuden im Rahmen der Zertifizierung eingeführt hat. Nach ISO 14040/14044 sind mindestens folgende Datenkategorien in einer Ökobilanz zu erfassen: Energieinputs, Rohstoffinputs, Betriebsstoffinputs sowie sonstige physikalische Inputs, außerdem andere Produkte sowie Emissionen in Luft, Wasser und Boden und andere Umweltgesichtspunkte. Die Nutzungsdauer des Gebäudes wird gemäß den Vorgaben der DGNB mit 50 Jahren angenommen. Alle Bauteile, deren Lebensdauer weniger als 50 Jahre beträgt, werden innerhalb des Gebäudelebenszyklus entsprechend ausgetauscht. Das bedeutet, dass die Umweltwirkungen für Herstellung und Entsorgung des Bauteils ggf. nochmals anfallen.

Die Aufnahme von In- und Outputs orientiert sich an den Vorgaben der DGNB. Entsprechend der Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 werden für folgende Bauteile und Bauteilgruppen die In- und Outputs berücksichtigt:

- Außenwände inklusive Fenster und Bekleidungen
- Geschossdecken inkl. Fußbodenaufbau und -belägen / -beschichtungen
- Bodenplatte inkl. Fußbodenaufbau und -belägen
- Balkondecken inkl. Fußbodenaufbau und -belägen
- Innenwände inklusive Beschichtungen sowie Stützen
- Türen
- Dach
- Wärmeerzeugungsanlagen
- sanitäre Ausstattung

Zur übersichtlichen Bearbeitung wurde das Gebäude in folgende Elemente gegliedert:

1. Baukonstruktion

Erdgeschoss

- Fenster / Türen
- tragende Außenwände
- tragende Innenwände
- nicht tragende Innenwände
- Sanitär
- Decke

bis 10. OG

- Fenster / Türen
- tragende Innenwände
- nicht tragende Innenwände
- tragende Außenwände
- nicht tragende Außenwände
- Decke
- Bad / WC / Küche
- Balkone

Dachgeschoss

- Fenster / Türen
- tragende Innenwände
- nicht tragende Innenwände
- tragende Außenwände
- nicht tragende Außenwände
- Decke
- Bad / WC / (Küche in 1.-10. OG enthalten)
- Balkone

Dach

- Dachaufbau
- Photovoltaikanlage

Erschließungskern

- Wände
- Decke
- Türen
- sonstige Baumaßnahmen

2. Technische Ausstattung

- Heizung
- Raumheizung mit Fußbodenheizung
- Trinkwarmwasser (TWW)
- Heizung des EG und des Erschließungskerns
- Lüftung
- Elektro
- Förderanlagen
- brandschutzrelevante Einrichtungen

Detaillierte Tabelle siehe Anlage 5

Diese element- und bauteilbezogene Darstellung dient dazu, transparent zu machen, in welchen Bauteilen und Elementen der größte Anteil an Kosten und Umweltauswirkungen steckt. Sie bildet damit die Grundlage, um in der Auswertung eine qualifizierte Bewertung zur Auswirkung einzelner Elemente im Gebäude vornehmen zu können. Eine Optimierung der Umweltauswirkungen und der Kosten von Einzelbauteilen und Elementen erfolgt im interdisziplinären Team auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse, um negativen Auswirkungen zu vermeiden. Die Phase der optimierten Entwurfsplanung erfolgt unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit, der Einhaltung von Vorschriften und von Qualitätsstandards.

5.3 Ausgangssituation, Stand der Technik

Viele Ansätze zukunftsfähiger Bauweisen richten ihren Fokus zurzeit vor allem auf die rein zahlenmäßige Reduzierung des Energieverbrauchs im Gebäudebetrieb, was beispielsweise bei der Passivhausbauweise eine erhebliche Addition von kostentreibender Gebäudetechnik nach sich zieht und dabei zusätzlich notwendigen Flächenverbrauch, graue Energieanteile in Baustoffen sowie Innenraumluftqualität unberücksichtigt lässt. Die EnEV zielt mit einem ähnlichen Fokus durch das kontinuierliche Anheben der Dämmstandards ausschließlich auf eine Reduzierung des Energieverbrauchs im Gebäudebetrieb. Es lässt sich somit feststellen, dass die bereits unternommenen Anstrengungen noch nicht ausreichen, um die Herausforderungen der Bauindustrie wirtschaftlich attraktiv zu beantworten. Das eigentliche Ziel der Reduzierung von negativen Umweltauswirkungen wird meist verfehlt.

Der Holzbau hat in den letzten Jahren eine Renaissance erfahren und sich unter anderem durch Forschung und neue Fertigungstechniken zu einer hoch innovativen Branche entwickelt. Mehrgeschossige Gebäude, selbst Hochhäuser aus Holz stellen mittlerweile kein technisches Problem mehr dar. Dies belegen die Beispiele vom Wood Cube⁸ in Hamburg bis hin zu dem im Bau befindlichen 24-geschossigen Holz-Hybrid-Hochhaus⁹ in Wien und dem 18-stöckigen Studentenwohnheim¹⁰ in Vancouver. Trotz dieser Beispiele sieht sich der Holzbau in Deutschland

⁸ DeepGreen (2018): <https://www.deepgreen-development.com/woodcube-hamburg>

⁹ HoHo Wien (2018): <http://www.hoho-wien.at/>

¹⁰ Studentenwohnheim der University of British Columbia (UBC), Vancouver (2018): <https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>

immer noch mit tief verwurzelten Vorurteilen wegen Brandschutz und befürchteten Mehrkosten konfrontiert.

Fragen des Brandschutzes wurden bereits eingehender untersucht, was sich in der Novellierung der Bauordnungen in Baden-Württemberg, Hamburg, Berlin und Nordrhein-Westfalen widerspiegelt.

Ebenso gibt es bereits weitreichende Untersuchungen, wie Holz durch Photosynthese in der Wachstumsphase große Mengen an CO₂ einspeichern kann. In seinem Buch „Trees: Their Natural History“ beschreibt Peter Thomas zum Beispiel, wie Bäume zwei Tonnen CO₂ absorbieren, um eine Tonne trockene Holzmasse zu produzieren¹¹. Wie viel Energie im Holz enthalten ist sowie für die Herstellung des Baustoffes eingesetzt werden muss, ist ebenfalls bereits umfangreich untersucht worden. Die Ergebnisse sind unter anderem in die Ökobaudat¹² eingeflossen. Ebenso liegen aus der Bauphysik detaillierte Untersuchungen zu dynamischen U-Werten¹³, der Verbesserung der Raumluftqualität, raumluftfeuchteregulierenden Eigenschaften und vielem mehr vor.

Dank verantwortlicher Forstwirtschaft hat der Baumbestand laut Bundeswaldinventur in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Derzeit beträgt das Holzwachstum 121,6 Mio. m³ pro Jahr. Davon werden durchschnittlich ca. 76 Mio. m³ Rohholz pro Jahr gerodet.¹⁴ Demnach gibt es in Deutschland zurzeit ein Holzzuwachs von 45 Mio. m³ pro Jahr. Aktuell werden laut „Waldbericht der Bundesregierung 2017“¹⁵ mindestens 67 % der deutschen Wälder nach PEFC-Standards nachhaltig bewirtschaftet. Diese Untersuchungen sowie die Weiterentwicklung der Verarbeitungstechniken belegen, dass Holz sich als Hightech-Baustoff der Zukunft bereits heute für verdichtetes Bebauen besonders eignet.

Bei der wirtschaftlichen Gesamtbetrachtung der Baukosten gibt es jedoch noch Untersuchungsbedarf, da der Quadratmeter Holzwand tatsächlich zurzeit noch teurer ist als der einer konventionell errichteten Wand. Die qualitativen Mehrwerte für Raumklima, Schadstofffreiheit und ökologische Performance einer Holzwand werden in der Praxis in der Regel nur im Falle des Eigenbedarfs von Bauherren gerne in Kauf genommen. Gleichzeitig lassen sich Holzbauten wesentlich schneller errichten, was zu einer nicht unerheblichen Einsparung bei Baustelleneinrichtung, Kosten für Projektsteuerung, Finanzierungskosten, schnellerem Verkauf oder Vermietung führt und tatsächlich in eine realistische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit einfließen müsste.

¹¹ Thomas, P. (2000), Trees: Their Natural History, Cambridge University Press, S. 43-45.

¹² ÖKOBAUDAT (2016) <https://www.oekobaudat.de/>

¹³ ETH Zürich, Forschungsprojekt Nr. 2-71114-07, Vergleichende Untersuchung zum optimierten Wärmeschutz in unterschiedlichen Holzbausystemen, Abschlussbericht (2008).

¹⁴ Bundeswaldinventur (2016): <https://www.bundeswaldinventur.de/dritte-bundeswaldinventur-2012/rohstoffquelle-wald-holzvorrat-auf-rekordniveau/holzzuwachs-auf-hohem-niveau/>

¹⁵ Waldbericht der Bundesregierung (2017): https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldbericht2017Langfassung.pdf?__blob=publicationFile, S. 18.

Fakten

1t CO₂

ist in 1m³ Holz gebunden⁽¹⁾

1.600t CO₂

sind in einem WOODSCRAPER gebunden

2,5t CO₂

pro Kopf und Jahr gelten als klimaverträglich

54% Müll

Das Abfallaufkommen aus dem Bausektor lag 2016 bei 54 % des gesamten Müllaufkommens in Deutschland⁽³⁾

Nationale Pro-Kopf-Emissionen im Jahr 2011⁽⁴⁾

7,5 t CO₂/Person im EU-Durchschnitt
6,7 t CO₂/Person in Italien
5,7 t CO₂/Person in Frankreich
2,3 t CO₂/Person in Brasilien
1,6 t CO₂/Person in Indien

3,2t CO₂

setzt ein Mittelklasse-Pkw auf 15.000 km frei⁽⁵⁾

Pro-Kopf-Emissionen verschiedener Verkehrsmittel auf 15.000 km
2,15 t CO₂/Person mit einem Pkw bei 30 % Auslastung
1,12 t CO₂/Person mit einem Linienbus bei 21 % Auslastung
0,67 t CO₂/Person mit der Bahn bei 44 % Auslastung
0,45 t CO₂/Person mit einem Reisebus bei 60 % Auslastung

9,9t CO₂

setzte jeder Deutsche im Jahr 2011 durchschnittlich frei⁽⁴⁾

35% CO₂

werden durch Gebäude verursacht⁽⁶⁾

1,5°C Ziel

Bei gleichbleibenden Emissionen können noch 420 Gigatonnen (Gt) CO₂ in die Atmosphäre abgegeben werden, um das 1,5-Grad-Ziel nicht zu verfehlen. Ab August 2019 stehen uns dafür ca. 8,4 Jahre zur Verfügung, um ab dann alle CO₂-Emissionen auf NULL zu bringen⁽⁷⁾

40-80t CO₂

sind in einem Einfamilienhaus aus Holz gebunden⁽¹⁾

Quellen:

- (1) <https://www.clustert-forstholzbayern.de/images/stories/downloads/broschuere/broschuere-bauen-mit-holz-klimatechnik.pdf>
- (2) https://www.holztagentail.de/fileadmin/user_upload/Leporello_CO2_Footprint_Area_Einsatzdaten.pdf
- (3) <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Umwelt/statistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallbilanz.html>, S.33
- (4) https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/PBL_2012_Trends_in_global_CO2_emissions_50014002.pdf
- (5) <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf>
- (6) https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2016-05-24_dimate-change_12-2016_nt_2016.pdf
- (7) <https://www.mco-berlin.net/forschung/co2-budget.html>

Abb. 4: Zahlen und Fakten

5.3.1 Tragwerksplanung

Vor Inangriffnahme der Tragwerksplanung wurden mittels einer Literaturrecherche fertiggestellte oder geplante mehrgeschossige Holzbauten mit acht und mehr Geschossen identifiziert und vergleichend dargestellt, mit dem Ziel, erfolgversprechende Strategien für die Planung des Holztragwerkes der WOODSCRAPER abzuleiten.

Brock Commons Tallwood House, Vancouver ¹⁶

<i>Bauherr:</i>	<i>University of British Columbia Vancouver, CA</i>
<i>Architekt:</i>	<i>Acton Ostry Architects Inc., Vancouver, CA</i>
<i>Beratend:</i>	<i>Hermann Kaufmann, Schwarzach, AT</i>
<i>Tragwerksplanung:</i>	<i>Fast + EPP, Vancouver, CA</i>



Abb. 5: Brock Commons, Vancouver

Das Brock Commons Tallwood House ist ein 2017 fertiggestelltes Studentenwohnheim der University of British Columbia in Vancouver. Neben Wohnungen für Studenten bietet das Gebäude Platz für Studier- und Gemeinschaftsräume. Es weist eine Grundrissfläche von ca. 15 x 56 m auf und erreicht mit insgesamt 18 Stockwerken eine Höhe von 53 m. Einzig das Erdgeschoss sowie zwei aussteifende Treppenkerne sind in Massivbauweise erstellt. Die darüber liegenden 17 Stockwerke werden von einer gleichmäßig angeordneten Holzkonstruktion getragen. Stahlrahmen bilden die Tragkonstruktion des Dachs. Mit Sprinklern und Kapselung aller Holzbauteile wird der geforderte Brandwiderstand von bis zu zwei Stunden erreicht.

Vertikale Lastabtragung

Fünflagige Brettspertholzplatten mit einer Stärke von 169 mm bilden die Deckenscheiben und werden in einem Raster von 2,85 x 4,00 m auf Brettschichtholz-Stützen punktgelagert. Dank der Tragwirkung der Brettspertholzplatten in beide Richtungen kann auf zusätzliche Träger wie zum Beispiel Unterzüge zwischen den Stützen verzichtet werden.

Die direkte Lastdurchleitung der Stützen verschiedener Geschosse erfolgt über in die Deckenebene integrierte Stahleinlagen. Gleichzeitig verfügen die Stützen über genügend Auflagerfläche für die Brettspertholzdecken.

Horizontale Lastabtragung

Die Brettspertholzplatten werden durch Stoßlaschen zu Scheiben ausgebildet und geben die horizontalen Lasten je Etage an die zwei massiven Treppenhauskerne ab.

¹⁶ Brock Commons Tallwood House, Studentenwohnheim der University of British Columbia (UBC), Vancouver, Canada (2017): <https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>

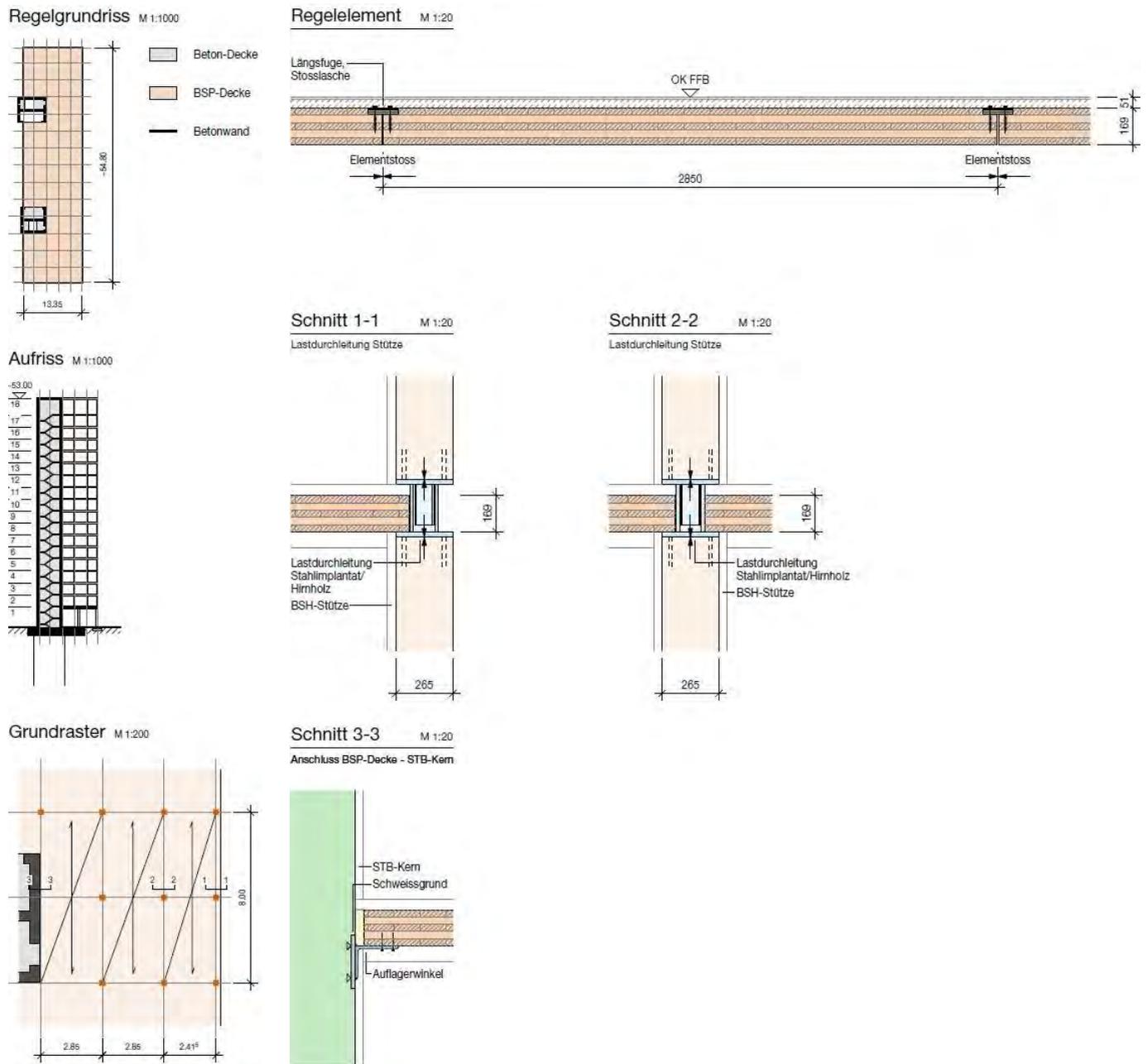


Abb. 6: Konstruktionsdarstellung Brock Commons, Vancouver

HoHo, Wien¹⁷**Bauherr:***Kerbler Holding GmbH, Wien, AT
cetus Baudevelopment GmbH, Wien, AT***Architekt:***Rüdiger Lainer + Partner Architekten ZT
GmbH, Wien, AT***Tragwerksplanung:***Woschitz Group GmbH, Wien, AT*

Das HoHo Wien wird 2019 fertiggestellt und ist das bislang weltweit höchste Holzhochhaus. „Alles unter einem Dach“ lautet das Prinzip des Hoho, welches Gewerbeflächen für Restaurants, Health, Beauty, Wellness, Business, Hotel und Appartements beinhaltet. Auf einer Grundstücksfläche von 3.920 m² entstehen drei Gebäudekomplexe mit bis zu 24 Etagen, was eine Höhe von 84 m bedeutet. Lediglich das Erdgeschoss sowie der Erschließungskern bestehen aus Stahlbeton. Dank innovativer Holztechnik beträgt der Holzanteil ab dem Erdgeschoss rund 75 %. Laut diverser Brandversuche weist das HoHo eine Brandwiderstandsdauer von 115 Minuten auf und liegt somit deutlich über den geforderten 90 Minuten. Das Brandschutzkonzept besteht aus einer nicht brennbaren Fassade, flächendeckenden Sprinkleranlagen sowie kleinen Brandabschnitten und kurzen Fluchtwegen.



Abb. 7: HoHo, Wien

Vertikale Lastabtragung

Die Lasten werden von Holzbetonverbunddecken über Unterzüge aus Stahlbeton, welche als Durchlaufträger ausgebildet sind, auf Stützen aus Brettschichtholz (BSH) verteilt und zum Boden geleitet. Die Anordnung der Stützen erfolgt in einem Raster von 5 x 6 m. Durch die Lagerung der Unterzüge auf beziehungsweise zwischen den Stützen wird einem möglichen Querdruckproblem vorgebeugt, da die Lasten direkt in das Hirnholz gelangen. Ein Dorn zwischen Stütze und Unterzug gewährleistet die Lagesicherung der Bauteile. Die Deckenelemente bestehen aus 16 bis 18 cm starkem Brettsperrholz mit 12 cm Überbeton. Schubkerven stellen den Verbund zwischen Holz und Beton sicher.

Horizontale Lastabtragung

Das Dach sowie die Decken sind als Scheibe ausgebildet und an den Stahlbetonkern angeschlossen, welcher die horizontalen Lasten aufnimmt und abträgt. Die Koppelung der Deckenelemente erfolgt über einen Stufenfalz und bauseitigem Verguss der Längsfugen.

¹⁷ HoHo ,Wien, Österreich, Mischnutzung (2018): <http://www.hoho-wien.at/>

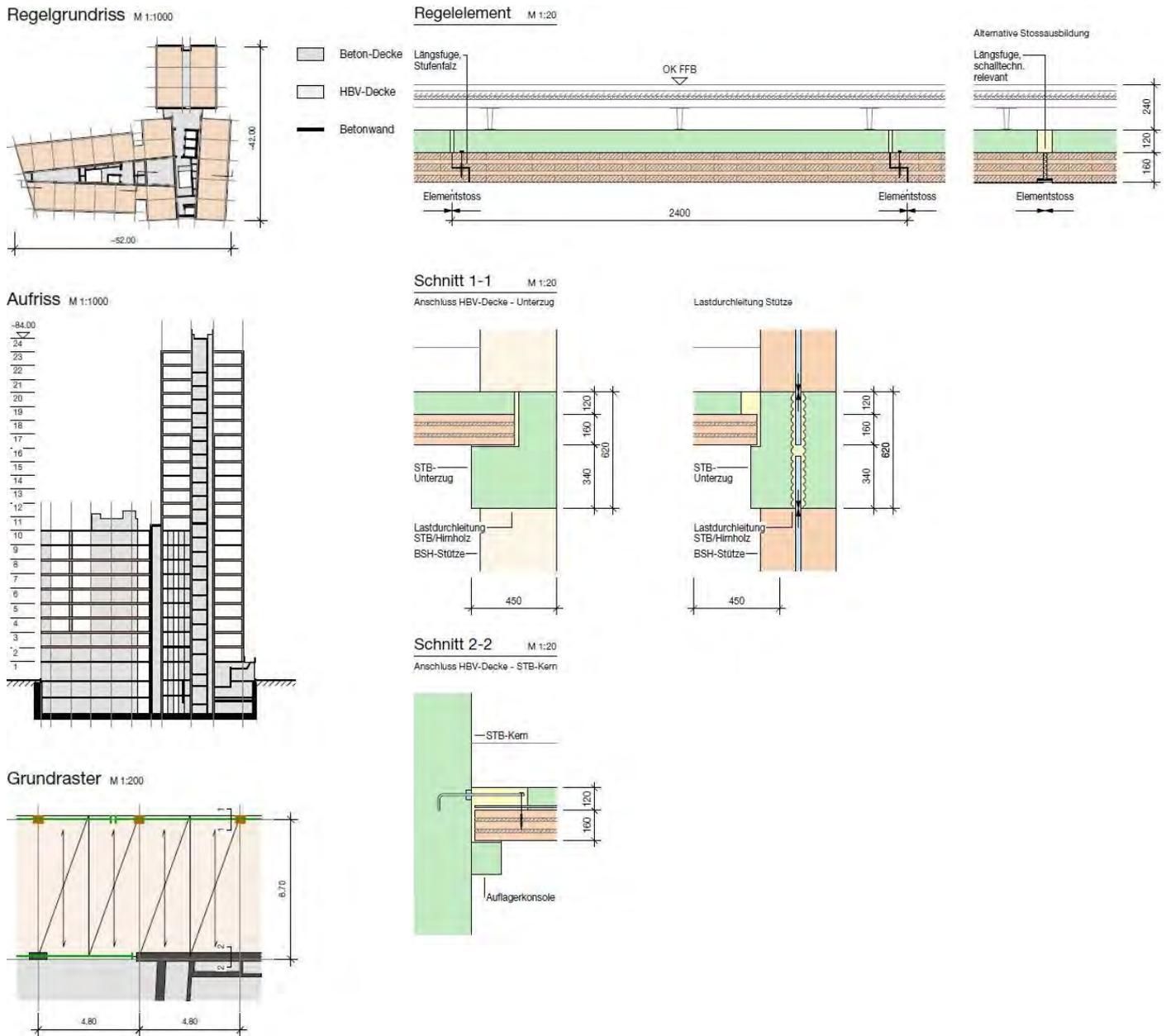


Abb. 8: Konstruktionsdarstellung HoHo, Wien

Life Cycle Tower One, Dornbirn¹⁸

Bauherr: Cree GmbH, Dornbirn, AT
Architekt: Hermann Kaufmann, Schwarzach, AT
Tragwerksplanung: merz kley partner ZT GmbH, Dornbirn, AT

Der Life Cycle Tower One in Dornbirn, Österreich war mit seinen ungefähr 26 m Höhe das erste achtstöckige Holzgebäude in Österreich. Zudem verkörpert er den Prototypen einer Forschungsarbeit mit dem Ziel, ein wettbewerbsfähiges Holz-Beton-Verbundsystem für die internationale Vermarktung zu entwickeln.

Das 2012 fertiggestellte Gebäude mit den Grundrissabmessungen von 13 x 24 m besteht neben einem massiven Erdgeschoss und Treppenhaukern aus sieben Holzstockwerken ungefähr gleicher Tragstruktur. Genutzt wird das Gebäude, mit Ausnahme einer Ausstellung im ersten Obergeschoss, als Büro.

Die Vorfertigung der 2,70 x 8,10 m großen Elemente im Werk erlaubte die schnelle Montage von einem Geschoss je Tag.



Abb. 9: LCT One, Dornbirn

Vertikale Lastabtragung

Jedes Holz-Beton-Verbundelement besteht aus 8 cm starken Überbeton und darunterliegenden 28 cm hohen Holzrippen. Jeweils eine Rippe bildet den Abschluss der Elementlängsseite. Mit der Randrippe des Nachbarelementes entsteht von unten sichtbar eine Doppelrippe. Zusätzlich wird in der Mitte der Elementbreite eine solche Doppelrippe angeordnet. Der Verbund zwischen Holz und Beton wird über Schubkerven sichergestellt.

Auf der Schmalseite werden die Elemente von Betonunterzügen eingefasst, welche die Holzrippen abfangen und so die Punktlagerung der Elemente in ihren vier Eckpunkten ermöglichen. Die Verbindung der Stützen mit den Elementen wird über bauseits vergossene Dorne erreicht. Aufgrund der optimalen Lastdurchleitung über Hirnholz und Stahlbeton ist kaum mit vertikalen Verformungen der Auflagerpunkte zu rechnen.

Horizontale Lastabtragung

Die horizontalen Aussteifungslasten werden vom Überbeton der Elemente zum massiven Treppenhaukern geleitet. Der Treppenhaukern ist bezogen auf den vorhandenen Grundriss überproportional groß. Dies ist dadurch zu erklären, dass das Gebäude als erster Bauabschnitt zu verstehen ist und eine Erweiterung auf einen viermal so großen Grundriss möglich ist.

Die Kopplung benachbarter Elemente erfolgt über den bauseitigen Verguss der Längsfugen sowie die Zugkopplung mit Stahlteilen an den Elementenden.

¹⁸ Life Cycle Tower One, Dornbirn, Österreich, Bürogebäude (2012): <https://www.creebyrhomburg.com/de/projekte/>

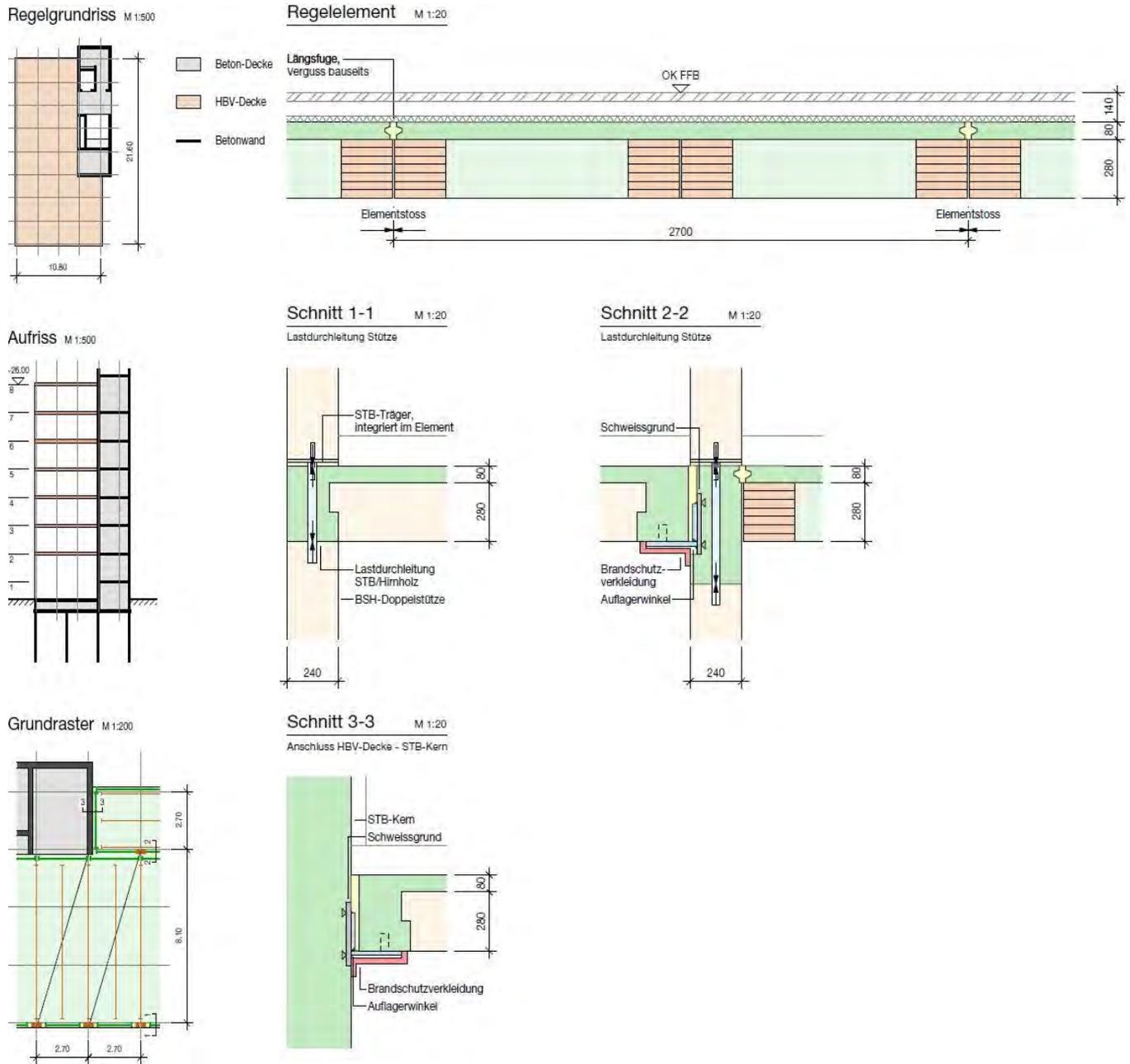


Abb. 10: Konstruktionsdarstellung, Life Cycle Tower One, Dornbirn

Suurstoffi 22, Risch Rotkreuz¹⁹

<i>Bauherr:</i>	<i>Zug Estates AG, Zug, CH</i>
<i>Architekt:</i>	<i>Burkard Meyer Architekten BSA AG, Baden, CH</i>
<i>Tragwerksplanung:</i>	<i>Erne AG Holzbau, Laufenburg, CH</i>

Mit zehn Geschossen und einer Gesamthöhe von 36 m entsteht in Risch Rotkreuz das erste Bürohochhaus in Holzbauweise in der Schweiz. Zwei sich überschneidende Körper mit unterschiedlicher Höhe bilden die Figur des Suurstoffi. Organisiert sind diese jeweils um ein zentrales Element, der höhere Körper um den Erschließungskern und der niedrigere um einen Innenhof, welcher sich nach oben ausweitet. Das Erdgeschoss sowie die beiden aussteifenden Kerne des Bürogebäudes bestehen aus Stahlbeton. Die restlichen neun Geschosse sind eine Holz-Beton-Verbundkonstruktion. Die reliefierte Fassade besteht aus Metall und bildet einen markanten Abschluss des Neubaus. Genutzt werden die Geschossflächen vorwiegend für Büroeinheiten, jedoch gibt es Optionen für weitere Nutzungen wie Showrooms oder Gastronomie. Der Brandschutz wird über das Standardkonzept des VKF gelöst. Neben einer Sprinkleranlage beinhaltet das Brandschutzkonzept einen Feuerwiderstand für Decken REI 60, Tragwerk R 60, Außenwände mit Kapselung RF 1 sowie Fluchtwege REI 90-RF1.



Abb. 11: Suurstoffi 22, Risch Rotkreuz

Vertikale Lastabtragung

Die Spannweite der Holz-Beton-Verbunddeckenelemente liegt zwischen 6,00 und 8,30 m. Die Deckenelemente bestehen aus 30 cm hohen Doppelrippen aus Holz mit 12 cm Überbeton und wurden im Werk gefertigt. Der Verbund von Holz und Beton erfolgt durch eingeklebte Schubleche. Im Fassadenbereich krägt der Beton über die Holzrippen aus. Eingeklebte Bewehrungsstäbe bringen die Lasten der Rippen über den Überbeton in Träger mit gleicher Höhe wie die Rippen. In der Raummitte liegen die Deckenelemente auf Unterzügen aus Baubuche auf. Diese verteilen die Lasten auf die Stützen. Die Stützen im Bereich der Fassade bestehen aus Brettschichtholz. In Raummitte sind sie aus Baubuche gefertigt. Die Lastdurchleitung am Geschossübergang erfolgt jeweils über Hirnholzkontakt der Stützen. Die Lagerung der Decken im Kern erfolgt einerseits über Auflagertaschen in den Stahlbetonwänden und andererseits über angeschweißte Stahlwinkel.

Horizontale Lastabtragung

Die horizontalen Lasten werden über die Dach- beziehungsweise Deckenscheiben in die Stahlbetonkerne eingeleitet und abgetragen. Die Kopplung der Deckenelemente wird durch bauseitigen Verguss der Längsfuge erreicht.

¹⁹ Suurstoffi 22, Risch Rotkreuz, Schweiz, Bürogebäude (2018): Burkard Meyer Architekten BSA AG, <https://burkardmeyer.ch/projekte/suurstoffi-22-risch-rotkreuz/>

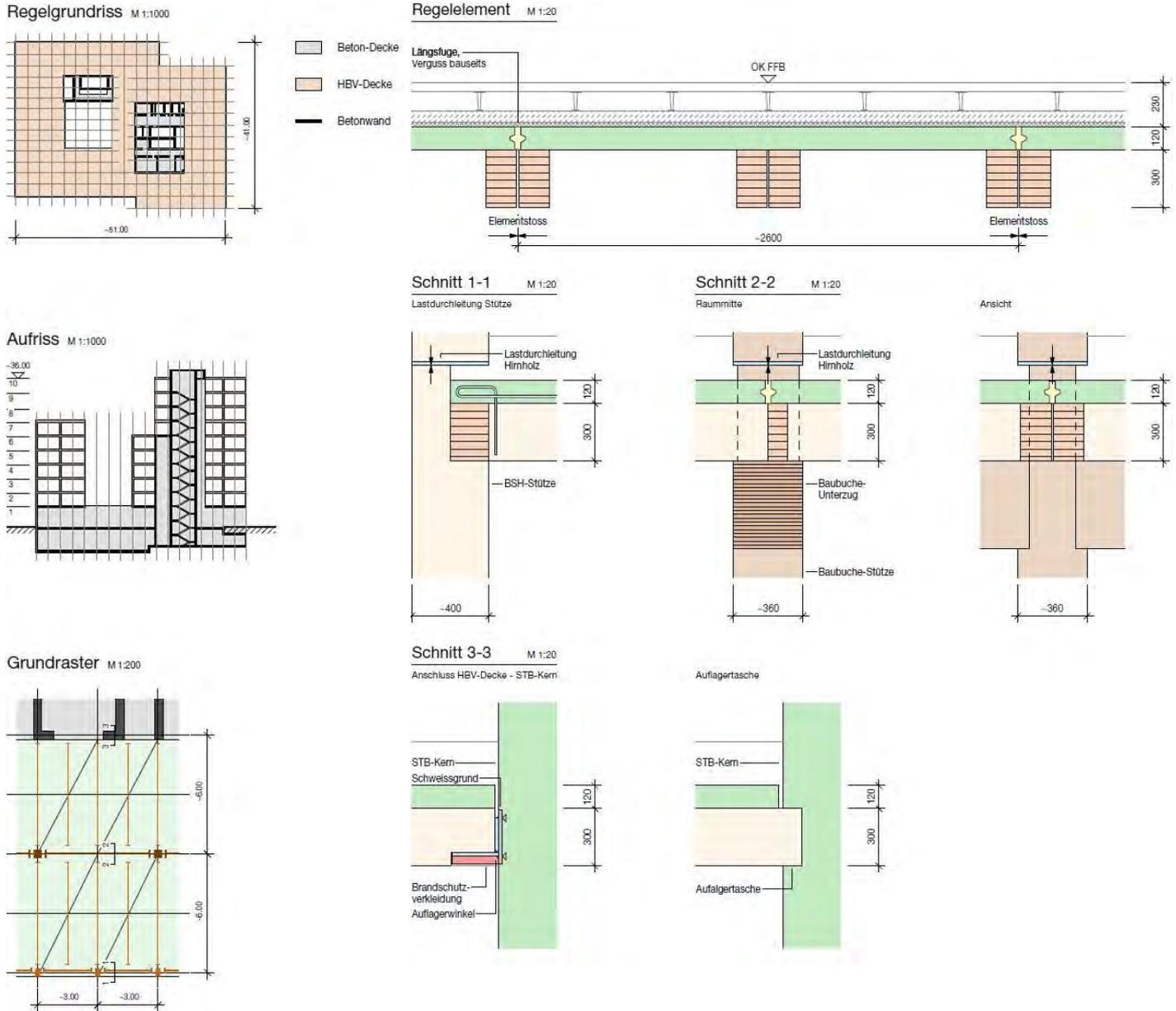


Abb. 12: Konstruktionsdarstellung, Suurstoffi 22, Risch Rotkreuz

Murray Grove, London²⁰

<i>Bauherr:</i>	<i>Telford Homes Pic, London, GB</i>
<i>Architekt:</i>	<i>Waugh Thistleton Architects, London, GB</i>
<i>Tragwerksplanung:</i>	<i>Techniker Ltd., London GB</i>

Das Murray Grove in London wurde in Oktober 2008 fertiggestellt und erreicht auf einer Grundfläche von 17,5 x 17,5 m mit acht Geschossen in Massivbauweise sowie einem Sockelgeschoss aus Stahlbeton eine Höhe von 29,75 m. Die Höhe wurde bewusst unter 30 m gehalten, da sich ab dieser Höhe gewisse Vorgaben ändern. Das Tragwerk des Murray Grove besteht aus Brettsperrholzwänden und -decken. Inbegriffen sind auch Liftschacht sowie Treppenhäuser. Sämtliche Brettsperrholzplatten (950 m³) wurden in Katsch an der Mur (Österreich) vorfabriziert und mittels LKW nach London transportiert. Die gesamte Montage wurde innerhalb neun Wochen vollzogen und ersparte der Bauherrschaft fast ein halbes Jahr Bauzeit im Vergleich zu herkömmlichen Bauvorhaben dieser Größenordnung. Da die Treppenhäuser die einzigen Fluchtwege sind, müssen sie einen Feuerwiderstand von 120 Minuten ausweisen. Lastabtragende Elemente müssen in F90 und alle anderen Bereiche in F60 ausgeführt sein.



Abb. 13: Murray Grove, London

Vertikale Lastabtragung

Die im Grundriss gleichmäßig angeordneten Brettsperrholzwände tragen die Brettsperrholzgeschossdecken, was eine regelmäßige Lastabtragung bedeutet, jedoch die flexible Grundrissnutzung etwas einschränkt. Lediglich bei großen Öffnungen sind Unterzüge aus Brettsperrholz in Verwendung. Von den Decken- beziehungsweise Dachelementen gelangen die Lasten über die Brettsperrholzwände in die Fundamente. Aufgrund der Bauweise aus Brettsperrholz und der linienförmigen Lagerung sind beim Murray Grove keine speziellen Lastdurchleitungen nötig.

Horizontale Lastabtragung

Die wabenartige Anordnung der Decken und Wände in Längs- und Querrichtung steifen das Gebäude Geschossweise aus. Die Deckenelemente sind über Stufenfalze miteinander gestoßen und bilden durch eine Diagonalverschraubung eine Scheibe.

²⁰ Murray Grove, London, Wohnungsbau, (2008): Waugh Thistleton Architects, <http://waughthistleton.com/murray-grove/>

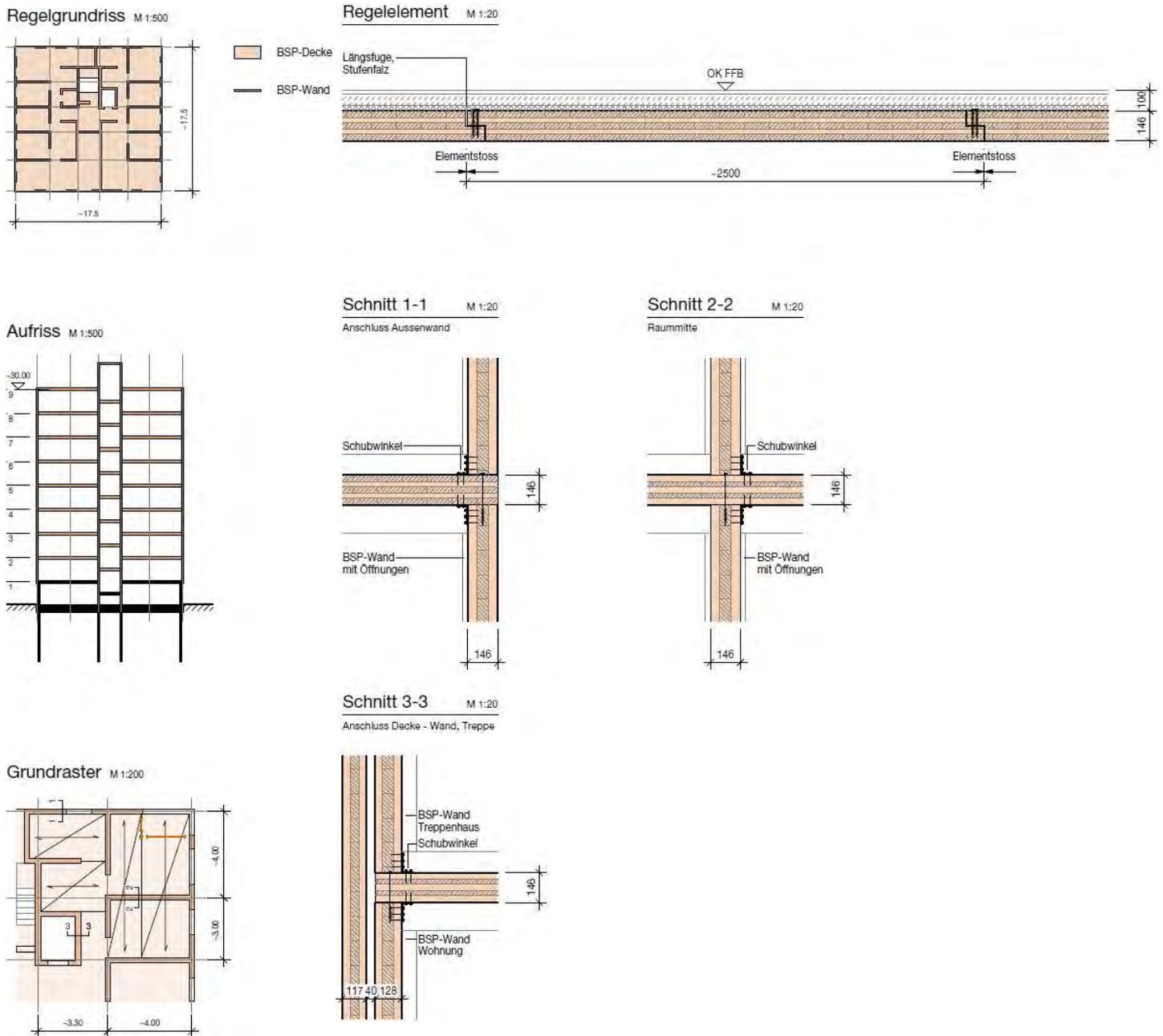


Abb. 14: Konstruktionsdarstellung, Murray Grove, London

Via Cenni, Mailand²¹**Bauherr:***Fondo Abitare Sociale, Mailand, IT
Polaris Investment Italia Sgr Spa,
Mailand, IT***Architekt:***Rossiprodi Associati srl, Florenz, IT***Tragwerksplanung:***Lignaconsult, Schrentewein & Partner
GmbH, Bozen, IT*

Das Projekt Via Cenni beinhaltet vier ungefähr gleiche, 27 m hohe Holzhochhäuser mit einer Grundrissfläche von je 13,5 x 19,0 m. Die Wohnsiedlung mit Ladenflächen im Erdgeschoss wurde 2013 bezogen. Über einem Untergeschoss aus Stahlbeton folgen neun oberirdische Geschosse in massiver Holzbauweise, vorwiegend Brettsper Holzplatten.



Abb. 15: Via Cenni, Mailand

Vertikale Lastabtragung

Im Grundriss gleichmäßig angeordnete Brettsper Holzwände tragen die Brettsper Holzgeschossdecken. Die regelmäßige Anordnung der Wände führt zwar zu einer Einschränkung in der flexiblen Grundrissnutzung, aber auch zu einer gleichmäßigen Lastableitung. Die Dicke der Wände wird entsprechend ihrer statischen Belastung mit steigender Geschoszahl verringert. Der Einsatz von Brettschichholzträgern bei großen Öffnungen und Brettschichholzstützen als lokaler Verstärkung bildet dabei die Ausnahme.

Horizontale Lastabtragung

Die zu Scheiben ausgebildeten Geschossdecken leiten die Aussteifungslasten in die über den Grundriss verteilten Wandscheiben. Die Deckenelemente sind stumpf gestoßen und bilden durch eine Diagonalverschraubung eine Scheibe. Am Einspannhorizont werden die Lasten von den Brettsper Holzwänden in die Stahlbetonkonstruktion abgegeben.

²¹ Via Cenni, Mailand, Italien, Sozialer Wohnungsbau, (2013): Rossiprodi Associati, <http://www.rossiprodi.it/?project=social-housing-via-cenni-2>

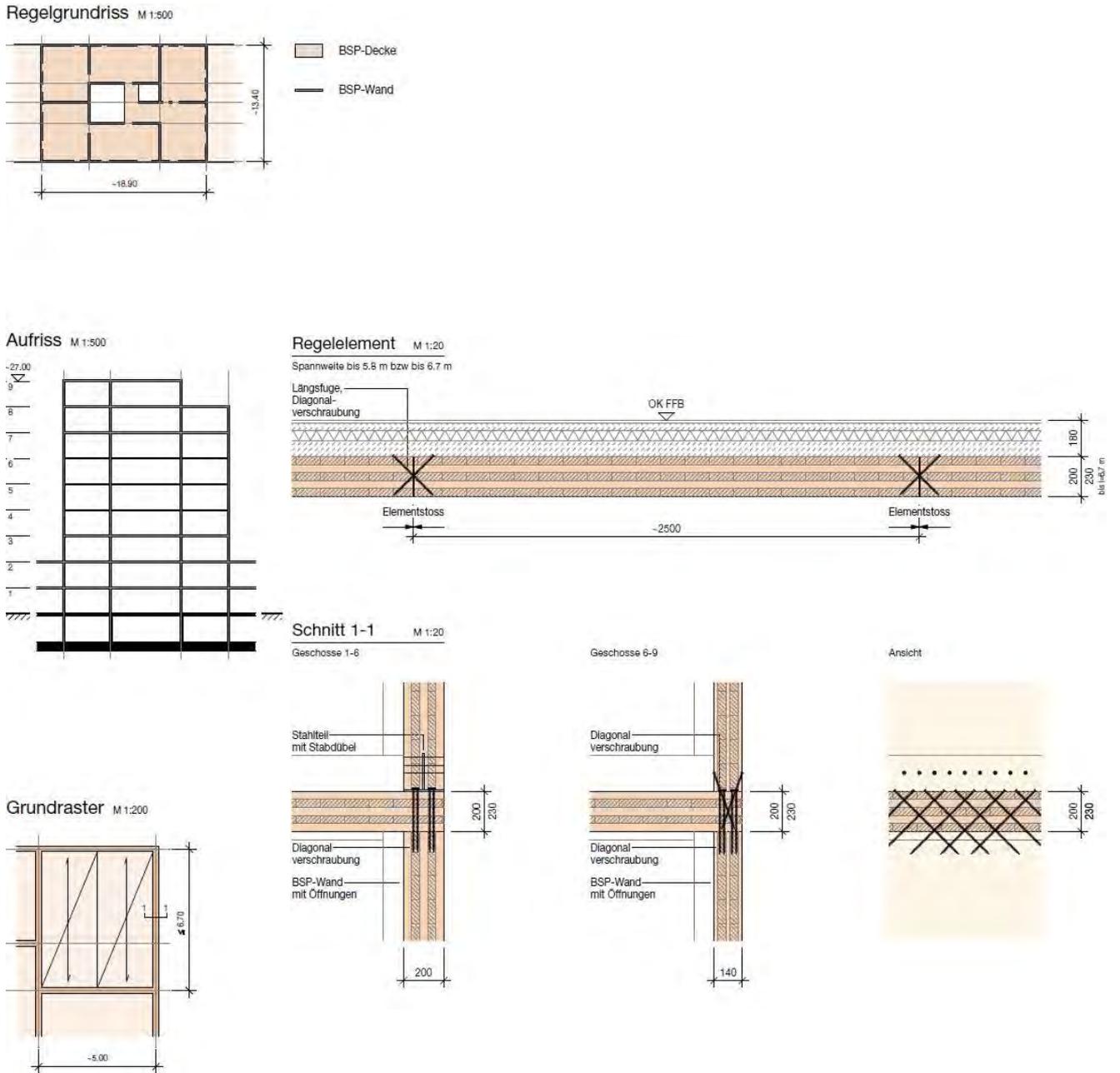


Abb. 16: Konstruktionsdarstellung, Via Cenni, Mailand

Holz 8, Bad Aibling²²

Bauherr:

B&O Gruppe, Bad Aibling, DE

Architekt:

SCHANKULA Architekten, München, DE

Tragwerksplanung:

*bauart Konstruktions GmbH & Co. KG,
München, DE*

2006 erwarb die B&O Gruppe das ehemalige Militärareal, um ein Pilotprojekt mit dem Titel „Auf dem Weg zur Nullenergiestadt“ zu starten. 2007 erfolgte der Baustart der ersten Objekte des neuen Stadtteils. In Jahr 2011 wurde das Gebäude Holz 8 eröffnet. Das Bauwerk liegt mit acht Geschossen und einer Höhe von 25 m knapp unter der Hochhausgrenze. Der Treppenhauskern aus Stahlbeton, die Brettsperrholzdecken sowie eigens entwickelter Blockständerwände (lose, dicht nebeneinander gelegte Kanthölzer, durch eine Beplankung fixiert) wurden im Werk vorfabriziert und in Fertigteilen, Decken- sowie Wandelementen auf der Baustelle zusammengesetzt. Gemäß der Bayrischen Bauordnung müssen Bauwerke der Gebäudeklasse 5 mindestens einen Feuerwiderstand von 90 Minuten aufweisen, und zusätzlich ist die Verwendung nicht brennbarer Baustoffe in tragenden Bauteilen vorausgesetzt. Durch kompensatorische Maßnahmen war es jedoch nach Abstimmung mit den Prüfsachverständigen für Brandschutz sowie der zuständigen Feuerwehrdienststelle möglich, das Gebäude in der geplanten Holzkonstruktion zu errichten.



Abb. 17: Holz 8, Bad Aibling

Vertikale Lastabtragung

Die Brettsperrholzdecken verteilen die Lasten auf die oben genannten Blockständerwände und werden durch diese in den Grund geleitet. Durch die Verwendung dieser Wände (ausgenommen im obersten Geschoss, das aus aus Brettsperrholzwänden besteht) können große Lasten abgetragen werden. Dies ermöglicht den Nutzern eine flexible Grundrissnutzung.

Horizontale Lastabtragung

Die horizontalen Lasten gelangen über die Deckenscheiben, welche in Brettsperrholz ausgeführt sind, in den Treppenhauskern aus Stahlbeton und werden in weiterer Folge von diesem aufgenommen.

²² Holz 8, Bad Aibling, Wohnungsbau, (2011): Schankula Architekten, <http://schankula.com/projekte.html>

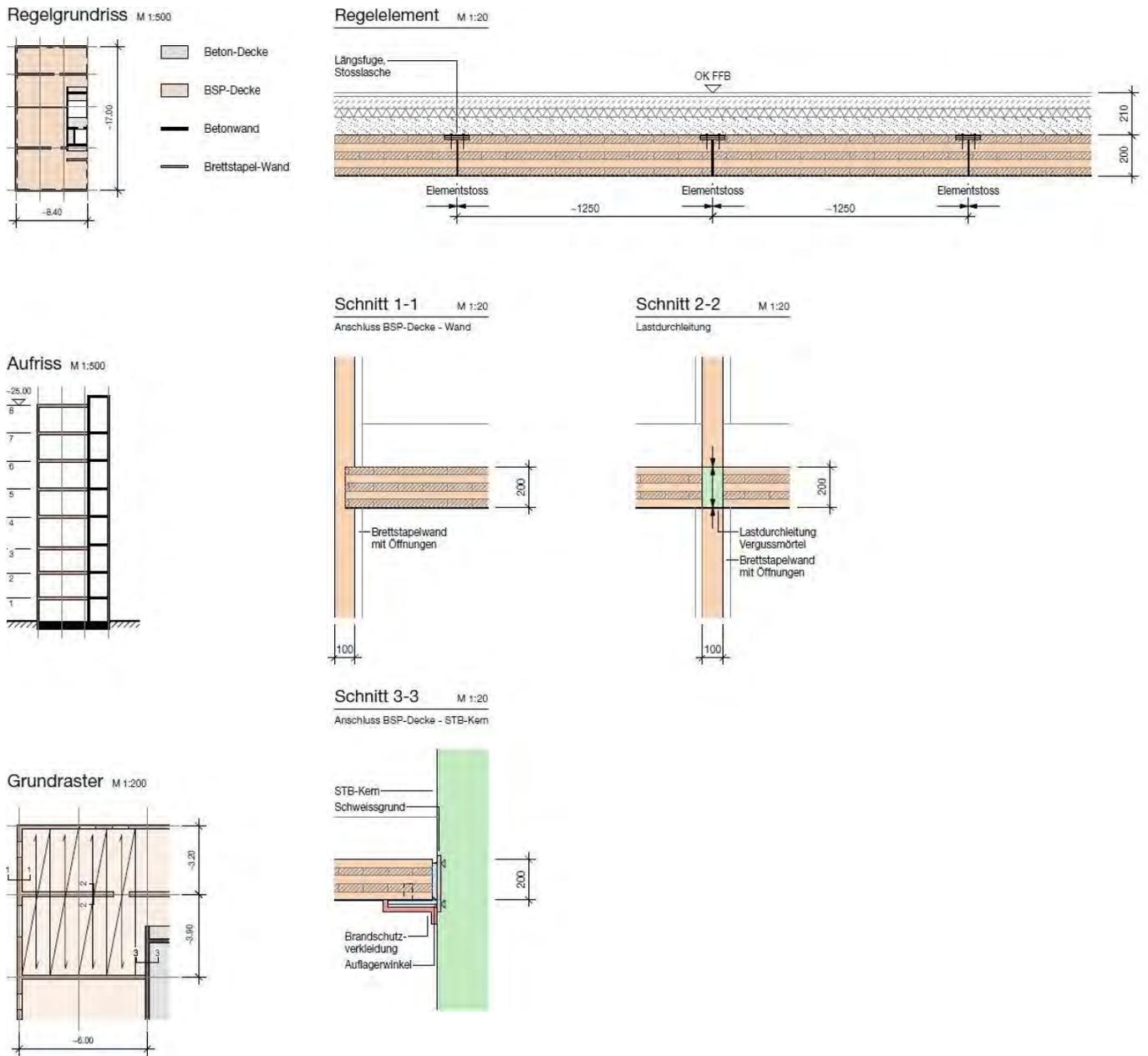


Abb. 18: Konstruktionsdarstellung, Holz 8, Bad Aibling

Treet, Bergen²³**Bauherr:***Bergen og Omegn Boligbyggelag,
Bergen, NO***Architekt:***Artec Arkitekter AS, Laksevåg, NO***Tragwerksplanung:***Sweco Norge AS, NO*

In Bergen wurde im Jahr 2015 das 49 m hohe Treet Apartment Building fertiggestellt. Auf einer Grundrissfläche von 22 x 23 m und insgesamt 14 Stockwerken befinden sich 62 Wohnungen und ein Fitnessraum. Das Gebäude besteht aus neben- und aufeinandergestapelten Holzständermodulen mit den Grundrissflächen von jeweils 4,00 x 8,70 m bzw. 5,30 x 8,70 m. Das Untergeschoss, welches die Garage beherbergt, das Dach sowie die Geschossdecken vom fünften und zehnten Obergeschoss, welche auch als Supergeschosse bezeichnet werden, sind Stahlbetonkonstruktionen. Treppenhauswände und Liftschächte wurden mit Brettspertholzplatten erstellt. In der Fassadenebene liegende Brettschichtholzfachwerke prägen die äußere Erscheinung des Gebäudes. Zum einen spannt in jeder der vier Fassadenflächen über die gesamte Höhe ein solcher Träger, zum anderen werden die Supergeschosse umlaufend von raumhohen Fachwerken umschlossen.



Abb. 19: Treet, Bergen

Vertikale Lastabtragung

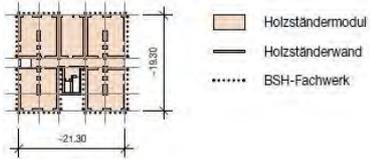
Jeweils vier Geschosse mit Raummodulen stehen zurückversetzt vom äußeren Tragwerk übereinander. Die vorgefertigten Stahlbetondecken fangen diese ab und leiten die Lasten in die außenliegenden Fachwerke.

Horizontale Lastabtragung

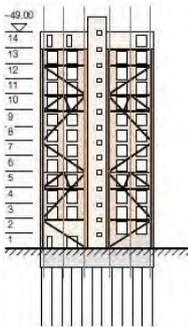
Die horizontale Lastabtragung erfolgt über die externen Fachwerktragwerke. Die Lastenleitung von jeweils vier Raummodulgeschossen geschieht über die Decken der Supergeschosse.

²³ Treet, Bergen, Norwegen, Wohnungsbau, (2015): Artec Arkitekter, <https://artec.no/prosjekter/treet/#>

Regelgrundriss M 1:1000



Fassadenansicht M 1:1000



Grundraster M 1:200

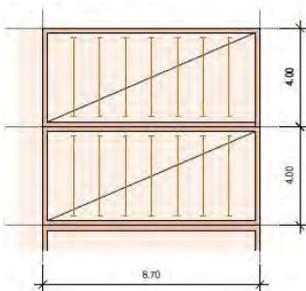


Abb. 20: Konstruktionsdarstellung, Treet, Bergen

5.3.2 Gebäudetechnik

Vor Inangriffnahme der Planung zur Gebäudetechnik wurden Haustechnikvarianten untersucht und mit dem Ziel bewertet, den technischen Aufwand in der Ausstattung der WOODSCRAPER so gering wie möglich zu halten. Dabei wird auf die Aspekte Heizung, Lüftung und Warmwasserbereitung eingegangen, deren Funktionsweise im Einzelnen beschrieben und Vor- und Nachteile abgewogen. Der Einsatz von Infrarotdeckenheizung wurde hierbei im Besonderen auf Umsetzbarkeit geprüft, da bei diesem Heizsystem ein besonderes Innovationspotential und hohe Einsparung von Ressourcen zu erwarten ist.

5.3.2.1 Heizung

Bezüglich der Gebäudeheizung werden vier unterschiedliche Wärmeerzeugungstechniken betrachtet, welche bei den einzelnen Varianten zum Teil miteinander kombiniert werden. Zunächst wird eine elektrische Heizung über **Infrarotheizdecken** betrachtet. Die zweite Heizungsvariante stellt die **Wärmepumpe** dar. Sie setzt ebenfalls auf Strom als Antriebsenergie, nutzt aber zusätzlich Umweltwärme in Form von Luft oder Wasser. Eine dritte Option ist der Anschluss an ein **Fernwärmenetz**. Als letzter Punkt wird die Nutzung von **Kraft-Wärme-Kopplung** in Form eines BHKW betrachtet.

5.3.2.2 IR-Deckenheizung (Stromheizung)

Die Wärmeerzeugung mit Infrarot-Deckenheizungen (IR-Decken) basiert auf Strom, welcher fast verlustfrei in Strahlungswärme umgewandelt wird.²⁴ Vergleichbar mit der Sonne liegt die Strahlung des Heizelements im IR-Bereich und trifft im Raum auf feste Körper wie Wände, Böden und Einrichtungsgegenstände. Dabei wird ein Großteil der Energie von den angestrahlten Körpern selbst absorbiert. Das hat zur Folge, dass sich vor allem die Oberflächentemperatur der Gegenstände selbst und daraus folgend indirekt die umgebende Raumlufttemperatur erhöht. Luftverwirbelungen werden dadurch minimiert, was zugleich zu einer reduzierten Feinstaubbelastung der Luft führt. Die Wellenlänge der Heizelemente liegt im langwelligen IR-Spektrum C zwischen 3 und 50 µm. Diese Art der Wärmeerzeugung hat mehrere Vorteile. Durch die direkte Erwärmung der Körper im Raum wird verhindert, dass überschüssige Feuchtigkeit zu Schimmelbildung im Wohnraum führen kann. Des Weiteren verschiebt sich der Taupunkt bei Wänden mit zunehmender Erwärmung nach außen, was die Dämmeigenschaft der Wände verbessert und im Umkehrschluss den Heizenergiebedarf senkt. Aus diesem Grund eignet sich diese Heiztechnik insbesondere für den Holzbau. Ein weiterer Vorteil ist, dass IR-Heizungen in der Regel eine lange Lebensdauer haben und leicht zu installieren sind. Das Gewerk Heizungsbau kann damit im Grunde entfallen, und teure Bauschäden, ausgelöst durch Heizungsrohrbrüche oder Versagen von Fußbodenheizungen, minimiert werden. Die Einfachheit des Systems führt zudem zu enormer Ressourceneinsparung.

Vorteile im Überblick:

- Lange Lebensdauer
- Keine Brandgefahr bei 24V, Niedervoltbetrieb
- Vermeidung von Schimmelbildung
- Kein Wartungsaufwand (erübrigt Heizkostenumlage und Heizkostenabrechnung durch den Vermieter bzw. Verwalter sowie Aufwendungen für laufende Wartung und Betrieb)
- Keine Wärmezähler mit 10-jährigem Austausch
- Keine Schäden durch Wasser da kein wasserbasiertes Heizsystem
- Niedrige Anschaffungskosten
- keine Instandsetzungskosten sind zu erwarten
- Kein Schornstein
- Einsparung Gewerk Heizungsbau
- Sortenreiner Rückbau möglich

²⁴ TU Kaiserslautern, Dr.-Ing. Peter Kosack, Forschungsprojekt „Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich“, (2009): <http://www-user.rhrk.uni-kl.de/~kosack/forschung/?INFRAROT-STRAHLUNGSHEIZUNG>

- Niedriger Energieaufwand aufgrund direkter Einstrahlung
- Keine Luftverwirbelungen mit Schmutz, Feinstaub oder Dreck
- Leicht zu installieren
- keine Nachheizzeit, sehr reaktionsschnelles System
- Kann mit “grünem” Strom aus einer Photovoltaikanlage betrieben werden
- Verknüpfung mit Smart-Building-Lösungen, lokaler Energieerzeugung und E-Speicher

Im Hinblick auf die Heizungsdimensionierung ist es möglich, den Leistungsbedarf nach einer Faustformel abzuschätzen. Bei einer Raumhöhe von 2,5 m ergibt sich überschlägig eine Auslegungslast von 60 W/m². Der Leistungsbereich liegt zwischen 100 und 2.000 W. Der Wirkungsgrad liegt bei nahezu 100 %, das bedeutet, dass der elektrische Energieinput fast verlustfrei in Wärme umgewandelt wird. Die Aufwärmzeit hängt von der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien ab. Mauersteine beispielsweise besitzen eine hohe Wärmekapazität. Es ergibt sich demnach eine hohe Aufheizdauer, aber im Umkehrschluss erfolgt auch die Abkühlung beim Abschalten ebenfalls entsprechend langsam.

Da die IR-Decke zwar keinen chemischen Brennstoff, aber elektrische Hilfsenergie benötigt, stehen die Heizkosten in unmittelbarem Zusammenhang mit den Stromkosten. Bei steigenden Strompreisen erhöhen sich auch die Heizkosten proportional. Ebenso verhält es sich mit der CO₂-Bilanz des Heizsystems. Je nach eingesetztem Strommix sind die Emissionen gering (regenerativer Ökostrom aus Wind, Wasser, Photovoltaik, etc.) bis hoch (z. B. Kohlestrom). Deshalb wird im Mittel der konventionelle deutsche Strommix mit 522 g/kWh CO₂ veranschlagt, um die derzeit tatsächlichen CO₂-Emissionen im Stromnetz abzubilden. Durch den notwendigen Ausbau regenerativer Stromerzeugung kann davon ausgegangen werden, dass sich die CO₂-Emissionen im Strommix weiter verbessern. Der aktuelle Bericht der Bundesregierung verdeutlicht eine Senkung des CO₂-Anteils im deutschen Strommix auf 489 g/kWh für das Jahr 2017.²⁵ Es stellt sich also die Frage, ob es nicht sinnvoll wäre, hier einen dynamischen Faktor anzusetzen, der einen Ausbau für eine in Zukunft notwendige Infrastruktur zulässt.

Bei der IR-Heizung ist nachteilig, dass sich diese nicht zur Trinkwassererwärmung eignet. Ein zusätzliches Heizsystem zur Erzeugung von Trinkwarmwasser ist deshalb erforderlich. Die Kombination wird im Anschluss an das Thema Warmwassererzeugung (Abschnitt 4.3.4) untersucht.

5.3.2.3 Wärmepumpe

Naturgemäß kann ein Körper nur dann Wärme an seine Umgebung übertragen, wenn er selbst ein höheres Temperaturniveau als sein Umfeld aufweist. Anderenfalls nimmt er Umgebungswärme auf. Wird Umweltwärme wie oberflächennahe Geothermie oder Umgebungsluft zum Heizen genutzt, so liegt das Temperaturniveau unterhalb der gewünschten Innenraumtemperatur. Aus diesem Grund benötigt man eine Wärmepumpe, die den natürlichen Fluss umkehrt, also aus einem kalten Medium ein wärmeres erzeugt. Für diese Temperaturanhebung benötigt sie einen Energieinput in Form von elektrischem Strom als Antrieb. Überwiegend kommen Elektro-Kompressions-Wärmepumpen zum Einsatz.

Im Kreislauf befindet sich ein spezielles Kältemittel mit der Eigenschaft, dass es schon bei niedrigen Temperaturen verdampft. Wird die Umgebungswärme der Luft bzw. des geothermal genutzten Untergrunds im ersten Wärmetauscher (Verdampfer) auf das Kältemittel übertragen, so verdampft dieses und wird gasförmig. Im nachfolgenden Verdichter, der seine mechanische Antriebsenergie von einem Elektromotor bezieht, kommt es zu einer Kompression des Gases, womit ein Druck- und Temperaturanstieg einhergeht. Im zweiten Wärmetauscher (Verflüssiger) wechselt das erhitzte, komprimierte Kältemittel erneut seinen Aggregatzustand von gasförmig zu flüssig. Dadurch wird

²⁵ Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2017, Petra Icha, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Mai 2018: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_climate-change_11-2018_strommix-2018_0.pdf, S. 15 ff.

Kondensationswärme frei, die dem im Heizkreis zirkulierenden Wasser zugeführt wird. Als letzter Schritt versetzt das Expansionsventil das Kältemittel durch Druckabsenkung zurück in seinen Ausgangszustand, und der Kreislauf beginnt von neuem. Das Prinzip wird in der nachfolgenden Abbildung verdeutlicht.²⁶

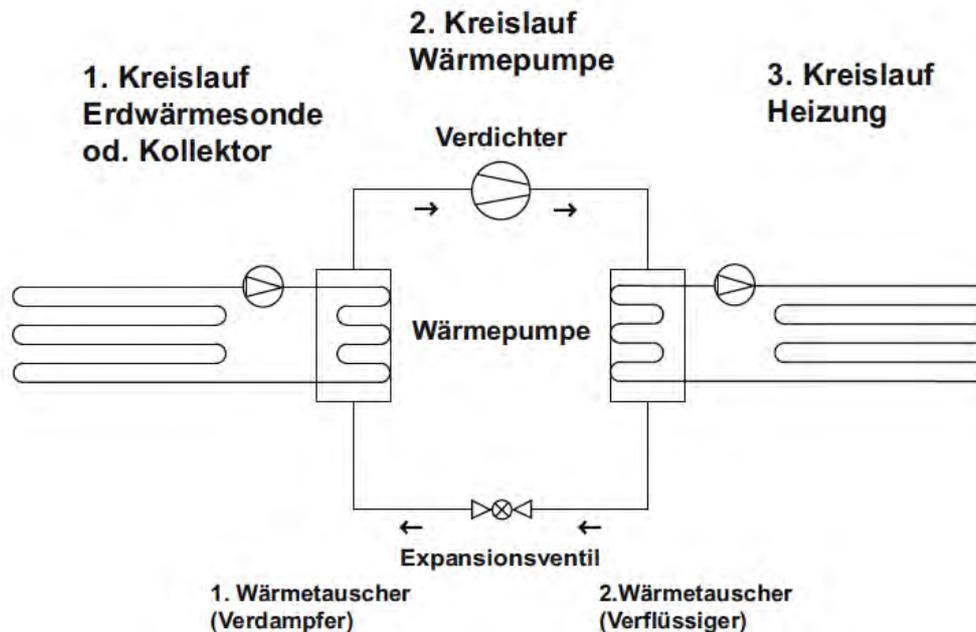


Abb. 21: Funktionsprinzip einer Elektro-Kompressions-Wärmepumpe

Um eine Aussage über die Effizienz einer Wärmepumpe treffen zu können, ist die Leistungszahl ε – auch Coefficient of Performance (COP) genannt – entscheidend. Sie beschreibt, wie viel Nutzenergie in Form von Wärme aus der Antriebsenergie des Kompressors gewonnen werden kann. Die Leistungszahl, und damit die Effizienz der Wärmepumpe, kann erhöht werden, indem die Quelltemperatur und die Vorlauftemperatur des Heizkreises einander angenähert werden. Bei der Jahresarbeitszahl fließen zusätzlich die Wärmeverluste und der Hilfsenergieaufwand für Regeleinrichtungen und Pumpen in die Bilanzierung mit ein. Sie gibt also Auskunft über die gesamte jährlich erzeugte Nutzwärme in Bezug auf den dafür erforderlichen Gesamtenergieaufwand.

Um eine Wärmepumpe effizient zu betreiben, werden niedrige Heizungsvorlauftemperaturen angestrebt. Dies ist in Verbindung mit Flächenheizungen im Fußboden, der Decke oder in Wänden möglich. Bei den technischen Ausführungen werden Monoblockanlagen außen, innen oder als Split-Anlagen unterschieden.

5.3.2.4 Fernwärme

Fernwärme wird seit dem Ende des 19. Jahrhunderts in größerem Umfang kommerziell genutzt. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist die Möglichkeit, den Wirkungsgrad von thermischen Kraftwerken zu erhöhen, indem man mittels sogenannter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) Wärmeleistung herausnimmt. Anders ausgedrückt wird sog. „Abfallwärme“, ungenutzte Wärme aus der Stromerzeugung oder anderen industriellen Prozessen, weiter genutzt. Fernwärme wird heute im Wesentlichen noch mit dem Medium Wasser betrieben, bei einigen Altanlagen in Deutschland ist jedoch noch Dampf in Verwendung. Die Erzeugung von Fernwärme erfolgt üblicherweise in

²⁶ Stober, I.; Bucher, K. (2014): Geothermie. Berlin, Springer Spektrum, 2., überarb. u. aktualisierte Aufl. 2014.

größeren und großen Kraftwerken mit KWK, kleineren Blockheizkraftwerken oder in Müllverbrennungsanlagen. Es erfolgt die Verwendung verschiedener Brennstoffe.

Teilweise versorgt die Fernwärme nur die Heizung innerhalb eines Hauses, die Warmwasserbereitung wird gesondert ausgeführt. Zunehmend wird auch die Fernwärme für die sogenannte solare Kühlung verwendet, was nicht überall zulässig ist. Bei Fernwärme müssen heute der Primärenergiefaktor²⁷ und der Erfüllungsgrad für den Netzmix ausgewiesen werden.

Die Vorlauftemperatur im Fernwärmenetz liegt bei der Verwendung von Heißwasser als Wärmeträgermedium bei etwa 80 bis 130 ° C und einem Druck zwischen 16 bis 25 bar, bei kurzen Netzen auch niedriger. Die Übertragung der Fernwärme ins Gebäude erfolgt über eine Übergabestation. Es werden drei Varianten unterschieden: Eine Option ist, das Wasser direkt an der Übergabestation im Durchflusprinzip zu erhitzen, um die erforderliche Warmwasser- oder Heizungsvorlauftemperatur zu erreichen. Als Alternative ist ein Speichersystem möglich, welches die übertragene Wärmemenge bis zum tatsächlichen Verbrauch zwischenspeichert. Hierfür ist ein kleinerer Fernwärmeanschluss nötig als beim Durchlauferhitzungssystem. Jedoch steigt das Legionellenrisiko. Das Speichervolumen begrenzt dabei die verfügbare Wärmemenge, was bei zu kleiner Dimensionierung zu Komforteinbußen führen kann. Eine Kombination aus beiden Varianten ist das Speicher-Lade-System.

5.3.2.5 BHKW

Im Mikro-KWK-Bereich von wenigen kW eignen sich besonders BHKW mit Otto- oder Dieselmotoren. Stirlingmotoren, Brennstoffzellen, ORC-Anlagen und Mikro-Gasturbinen sind für den Maßstab der WOODSCRAPER noch nicht serienreif entwickelt. Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme hat den Vorteil, dass bis zu 40 % Primärenergie (Brennstoff) im Vergleich zu einer getrennten Stromerzeugung im Kohlekraftwerk zusammen mit der Wärmeerzeugung mit einem konventionellen Heizkessel eingespart werden. Wie der Name sagt, handelt es sich um kompakte, in Blockweise gefertigte Heizkraftwerke im kleinen Leistungsbereich.

Aus der chemisch gebundenen Energie des Brennstoffs wird im Kernstück des BHKW, dem Verbrennungsmotor, thermische und mechanische Energie erzeugt. Da sich der Otto- und Dieselmotor seit über 100 Jahren in der Automobilbranche bewährt haben, wird diese Technologie bevorzugt eingesetzt.

Um die abgegebene Wärme nutzbar zu machen, wird sie auf einen Heizwasserkreislauf übertragen. Die Verbrennungsabgase des Motors werden zunächst dem Abgaswärmetauscher zugeführt. Als letzten Schritt durchströmen sie den Kondensator und werden schließlich über ein Abluftsystem nach außen geleitet. Mit der bei der Kondensation entstehenden Wärme wird das zugeführte Frischwasser vortemperiert. Anschließend wird es im Generator und Motor als Kühlmittel verwendet und nimmt dabei weitere thermische Energie auf. Der Großteil stammt jedoch aus dem Abgaswärmetauscher, da an diesem Bauteil die höchsten Temperaturen vorliegen. Meist liegt das Temperaturniveau der nutzbaren thermischen Energie jedoch unter 85 ° C. BHKW mit Otto-Motoren erreichen elektrische Wirkungsgrade von 30 bis über 40 %. Durch die Abwärmenutzung liegen die thermischen Wirkungsgrade sogar bei 50 bis 60 %. Ein Maß für das Verhältnis von elektrischer zu thermischer Erzeugung stellt die Stromkennzahl „ σ “ dar.

Grundsätzlich werden drei Betriebsweisen von KWK-Anlagen unterscheiden: der wärmegeführte, der stromgeführte und der netzgeführte Modus. Bei ersterem richtet das BHKW seine Erzeugungszeiten nach dem thermischen Energiebedarf des Gebäudes aus. Diese Steuerungseinstellung ist Standard für die meisten Anlagen in Wohngebäuden, da der Wärmebedarf geringeren tageszeitlichen Schwankungen unterliegt als die Stromnachfrage. In der

²⁷ Der Primärenergiefaktor wird regional unterschiedlich gehandhabt. In Deutschland wird dieser seit der Energieeinsparverordnung EnEV 2007 geregelt. Der Primärenergiefaktor, genauer: der Primärenergieumwandlungsfaktor, soll den Aufwand zwischen Herstellung und Nutzung von konventionellen (fossilen) Energieträgern angeben.

Regel werden die Anlagen mit einem Pufferspeicher ausgestattet, um unnötige Taktungen zu vermeiden und längere Laufzeiten zu erreichen. Unterschreitet der Pufferspeichereinhalt eine festgelegte Minimaltemperatur, so sendet die Steuerung ein Einschaltsignal an das Gerät. Dieses läuft so lange, bis der Speichereinhalt die maximal zulässige Temperatur erreicht. Der Speicher wird anschließend wieder bis zur unteren Limitierung entladen, und der Ladezyklus beginnt von neuem. Der generierte Strom kann im Falle, dass Erzeugung und Eigenbedarf zeitgleich auftreten, direkt vor Ort genutzt werden. Der Rest wird in der Regel ins öffentliche Netz eingespeist und nach Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) gefördert. Wird das BHKW als alleiniger Wärmeerzeuger eingesetzt, wird von einem monovalenten Betrieb gesprochen. Es ist jedoch sinnvoll, dieses lediglich auf den Grundlastbetrieb auszulegen und einen Spitzenlastkessel als Zusatzproduzent zu installieren. Das hat wirtschaftliche Gründe, da die Investitionskosten in kleinen Leistungsklassen deutlich günstiger sind und längere Laufzeiten bei einer konstanten Pufferspeicherkapazität erzielt werden. Dies wird als bivalente Betriebsweise bezeichnet.

Statt der Auslegung am thermischen Gebäudeenergiebedarf ist auch ein Einsatz entsprechend der Stromnachfrage möglich. In diesem Fall ist ein ausreichend großer Pufferspeicher unerlässlich, der die erzeugte Wärme zwischenspeichert. Dabei ist die Speicherkapazität so zu dimensionieren, dass eine Überhitzung auszuschließen ist. Außerdem kann es hier im monovalenten Betrieb zu Zeiten schwacher Stromnachfrage zu Versorgungsengpässen in Hinblick auf die thermische Energie kommen. Die Installation eines Spitzenlastkessels ist nötig, um Komforteinbußen auszuschließen. Dieser Betriebsmodus wird beispielsweise bei Inselsystemen ohne Netzanschluss angewendet. In Wohngebäuden wird diese Variante aufgrund der geringen Anlagenausnutzung seltener gewählt.

Tabelle 1 Vor- und Nachteile von Heizsystemen

Variante	Vorteile	Nachteile
IR-Decke (Strom-heizung)	<ul style="list-style-type: none"> - Lange Lebensdauer, einfach zu installieren, geringe Investitionskosten, sowie - Kein Schornstein. - Wartungs- und Instandsetzungskosten: quasi keine. - Keine Wärmezähler mit 10-jährigem Austausch - Mit der direkten Erwärmung der Wände und der Einrichtungsgegenstände wird die enthaltene Feuchtigkeit entzogen, was Schimmel im Wohnraum verhindert. - Der Taupunkt bei Wänden verschiebt sich mit zunehmender Trockenheit nach außen, was deren Dämmeigenschaft verbessert und den Heizenergiebedarf reduziert. - Vermeidung von teuren Bauschäden. - Gut für Innenraumlufthygiene. - Geringer Ressourcenverbrauch und sortenreiner Rückbau möglich. - Keine Brandgefahr bei Niedervoltbetrieb. - Sehr gut für ausreichend regenerativ erzeugten Strom. - Keine Nachheizzeit. - Gut für Holzoberflächen geeignet, da im Zusammenspiel eine beschleunigte Reaktionszeit besteht. 	<ul style="list-style-type: none"> - Heizkosten stehen im direkten Zusammenhang mit Stromkosten, d. h. bei steigendem Strompreis erhöhen sich proportional die Heizkosten. - Die CO₂-Bilanz des Heizsystems verhält sich proportional zu der CO₂-Bilanz des Strommixes (Mittel des deutschen Strommix 522 g/kWh) und ist deshalb zurzeit in diesem Maßstab nicht ohne Sonderregelung EnEV-Konform. - Es ist ein zusätzliches Heizsystem für Warmwasseraufbereitung notwendig.

Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> - Nutzt neben der elektrischen Antriebsenergie Umweltwärme zur Wassererhitzung → gesteigerte Effizienz und geringere Stromkosten. - Kein Schornstein 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Investitionskosten und hohe Ersatzinvestitionskosten (ca. 20 Jahre). - Effizient nur in Abhängigkeit von Leistungszahl (über 4). - Effizient nur bei geringen Heizungsvorlauftemperaturen → nur für Flächenheizungen gut geeignet. - Zu lange Nachheizzeit, Gefahr der Raumüberwärmung. - Zirkulationsverluste erhöhen Heizkosten. - Wohnungsverbrauchsablesung notwendig. - Wärmehähler notwendig. - Gefahr von Bauschäden im Fall von Wasserrohrbrüchen.
Fernwärme	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Investitions- und Wartungskosten, da keine Anlage gebaut werden muss. - Kein Schornstein. - Die Fernwärme entspricht häufig einer nicht genutzten Wärme eines Prozesses und hat deshalb einen guten Primärenergiefaktor. - Wegen hoher Vorlauftemperatur ist ein Einsatz von Radiatoren möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aufwand für die Installation von Steig- und Verteilleitungen. - Zirkulationsverluste erhöhen Heizkosten. - Zu lange Nachheizzeit, Gefahr der Raumüberwärmung. - Wohnungsverbrauchsablesung notwendig. - Wärmehähler notwendig. - Gefahr von Bauschäden im Fall von Wasserrohrbrüchen. - Zum Verwenden der Fernwärme ist es notwendig, dass ein Anbieter in der Region ist. - Häufig gibt es Auflagen, sich an das Fernwärmenetz anzuschließen. - Bei nicht regenerativer Wärmeerzeugung werden negative Pfadabhängigkeiten geschaffen.
BHKW	<ul style="list-style-type: none"> - Mit der gekoppelten Produktion von Wärme und Strom wird 40 % Primärenergie im Gegensatz zu einer getrennten Erzeugung eingespart. - Hohe Gesamtwirkungsgrade durch gekoppelte Erzeugung. - Der Einsatz von regenerativen Energieträgern ist möglich. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Investitions- und Wartungskosten. - Schornstein notwendig. - Luft- und Schallemissionen. - Der thermische Wirkungsgrad ist relativ gering mit 50 bis 60 %. - Ein monovalenter Betrieb erfordert eine groß dimensionierte Anlage → höhere Investitionskosten und geringere Leistungsausnutzung. - Ein bivalenter Betrieb erfordert einen zusätzlichen Spitzenlastwärmeerzeuger. - Aufwand für die Installation von Steig- und Verteilleitungen. - Zirkulationsverluste erhöhen Heizkosten. - zu lange Nachheizzeit, Gefahr der Raumüberwärmung. - Wohnungsverbrauchsablesung notwendig. - Wärmehähler notwendig. - Gefahr von Bauschäden im Fall von Wasserrohrbrüchen.

5.3.3 Lüftungsanlage

Lüftungstechnik wird für Räume eingesetzt, deren Luft stark belastet ist, beispielsweise durch hohe CO₂-Konzentrationen oder Gerüche. Auch dann, wenn der erforderliche Luftwechsel der Räume nicht manuell durch das Öffnen von Fenstern umgesetzt werden kann, ist eine kontrollierte Raumlüftungstechnik nötig. Die Anlagen setzen sich zusammen aus Zuluft- und Abluftsystem und sind mit Filtern für die Außenluft ausgerüstet. Kriterien für die Auslegung sind u. a. die angestrebte Luftqualität, die Anzahl der Personen im Raum und individuelle Vorgaben der Situation vor Ort. Nach der DIN EN 13779: 2007 werden folgende Qualitäten unterschieden.

Tabelle 2 Raumlüftungsqualitäten

Kategorie	Beschreibung	Außenluftvolumenstrom je Person in l/s			
		Nichtraucherbereich		Raucherbereich	
		Üblicher Bereich	Standardwert	Üblicher Bereich	Standardwert
IDA 1	Hohe Raumlüftungsqualität	> 15	20	> 30	40
IDA 2	Mittlere Raumlüftungsqualität	10 – 15	12,5	20 – 30	25
IDA 3	Mäßige Raumlüftungsqualität	6 – 10	8	12 – 20	16
IDA 4	Niedrige Raumlüftungsqualität	< 6	5	< 12	10

Der angegebene Wert für eine mittlere Raumlüftungsqualität bei IDA 2 mit 12,5 l/(s·Person), was 45 m³/(h·Person) entspricht, wird als Standardwert bezeichnet. Vom Bayerischen Landesamt für Umwelt wurde 2008 der Planungsleitfaden „Effiziente Energienutzung in Bürogebäuden“ herausgegeben. Daraus geht hervor, dass ein Volumenstrom von 15 m³/(h·Person) ausreichend ist. Dieser Wert kann gemäß der Studie noch deutlich unterschritten werden, wenn auf die Energieeffizienz eines Gebäudes besonderen Wert gelegt wird.

5.3.3.1 Vergleich zentraler und dezentraler Lüftungssysteme

Wird ein zentrales Lüftungssystem gewünscht, ist dieses idealerweise bereits bei der Planung eines Neubaus vorzusehen, da eine nachträgliche Installation des Kanalsystems mit hohem Aufwand und Kosten verbunden ist. Es ist auch möglich, die Luft in den einzelnen Räumen dezentral zu- bzw. abzuführen, beispielsweise durch fassadenintegrierte Lüftungssysteme. Dies ist insbesondere bei Räumen mit dauerhaft hoher Luftfeuchtigkeit sinnvoll. Vorteil der kanalgeführten, zentralen Lüftungssysteme ist, dass auch innenliegende Räume entlüftet werden können. Zum Schallschutz kann das zentrale Lüftungsgerät in Entfernung zu geräuschempfindlichen Zonen wie Schlaf- und Aufenthaltsräumen platziert werden. Der Nachteil ist, dass ein Teil des Raumvolumens durch die Kanalführung verloren geht, entweder in Form einer abgehängten Decke oder sichtinstallierter Kanäle. Außerdem wird ein separater Technikraum benötigt, in welchem das Lüftungsgerät platziert wird. Alternativ ist auch eine Außeninstallation auf Flachdachflächen möglich. Für die fassadenintegrierte Lüftung sprechen die einfache Installation und der geringe Platzbedarf. Ein Technikraum für die Aufstellung der Geräte wird nicht benötigt, da die Lüftungsgeräte direkt in der Außenwand platziert werden.

Alternativ gibt es dezentrale Lüftungsgeräte zur Innenraumaufstellung, entweder zur Decken- oder zur Wandinstallation in unterschiedlichen Größen und Ausführungen. Bei fassadenintegrierten Einzelraumlüftungsgeräten ist jedoch eine Be- und Entlüftung der innenliegenden Räume nicht realisierbar, wodurch zum Teil zusätzliche dezentrale Abluftsysteme über das Dach, beispielsweise für die innenliegenden Toilettenräume, benötigt werden. Eine Alternative hierzu stellen Wohnraumlüftungssysteme dar. Hier werden mehrere Räume einer Nutzungseinheit an eine wohnungszentrale Anlage angeschlossen. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit beider Varianten lässt sich keine pauschale Aussage treffen. Die Kosten hängen stark von der Größe des Objekts und der Anzahl der zu belüftenden Räume ab. Dezentrale Systeme sind zunächst in der Anschaffung vergleichsweise günstig. Jedoch wird pro Raum ein eigenes Lüftungssystem benötigt, wodurch die Kosten pro Nutzungseinheit linear ansteigen. Bei zentralen Lüftungsgeräten sind die

Anschaffungskosten der Lüftungszentrale hoch, jedoch steigen die Kosten für jede angeschlossene Nutzungseinheit nicht linear, sondern logarithmisch. Das heißt: Je größer das Gebäude und je mehr Räume belüftet werden, desto wirtschaftlicher ist das zentrale Lüftungssystem. Bei kleinen Objekten kann durchaus das dezentrale System die wirtschaftlichere Variante darstellen. Dieser Wirtschaftlichkeitsvergleich wurde in einer Bachelorarbeit mit dem Titel „*Vergleichende Betrachtung von zentralen und dezentralen Lüftungssystemen in Mehrfamilienhäusern*“²⁸ von Manuel Stahl aus dem Jahr 2017 untersucht.

Als Referenzgebäude wurde ein Mehrfamilienhaus mit 2.048 m² Wohnfläche betrachtet. Die Annuität der Investitionskosten liegt bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren für Lüftungsgeräte, Kanäle und Hilfsaggregate hier beim zentralen System bei rund 4.000,00 €/a, beim dezentralen System bei rund 7.000,00 €/a. Jedoch geht durch das dezentrale System weniger Raumvolumen verloren, was Auswirkungen auf die Mieteinnahmen hat. Diese Kosten werden in der Betrachtung ebenfalls mit einkalkuliert. Bei zentralen Systemen sind hier 1.400,00 €/a, beim dezentralen System nur 350,00 €/a zu veranschlagen. Der Aufwand für Betrieb, Reinvestitionen, Wartung und Instandhalten ist bei den dezentralen Systemen mit 10.000,00 €/a deutlich höher als bei zentralen Systemen mit 3.500,00 €/a. Die bedarfsgebundenen Kosten für Strom liegen beim dezentralen System bei 1.700,00 €/a, beim zentralen Gerät bei 2.800,00 €/a. Die Stromeinsparung beim dezentralen System hat wiederum auch positive Auswirkungen auf die CO₂-Bilanz. Insgesamt ist allerdings das zentrale System bei dieser Gebäudegröße um fast 40 % günstiger. Eine genaue Grenze, ab welcher Wohnungsanzahl/Gebäudegröße die zentralen Systeme wirtschaftlicher sind, lässt sich aufgrund der Komplexität und Vielzahl der Ausstattungsoptionen nur schwer bestimmen.

5.3.3.2 Nutzen im Wohngebäude

Durch eine luftdichte Ausführung der thermischen Hülle bei Neubauten werden zwar die Wärmeverluste durch Infiltration minimiert, aber auch ein Luftwechsel für die Lufthygiene unterbunden. Sofern dann der Nutzer nicht oder nicht ausreichend lüftet, führt dies wiederum zu hohen CO₂-Konzentrationen und einem Anstieg der Luftfeuchtigkeit in den Räumen.

Die Lüftung per Hand über Fenster hat den Nachteil, dass ein Großteil der Heizwärme verloren geht. Die Norm DIN 1946-6 empfiehlt ein kontrolliertes Wohnraumlüftungskonzept, wenn mehr als ein Drittel des Dachstuhls gedämmt oder ein Drittel der Fenster erneuert werden. Diese Systeme führen durch den Luftaustausch zu einer Verbesserung der Luftqualität. Zum einen wird die Luft entfeuchtet, was der Schimmelbildung entgegenwirkt. Außerdem wird die CO₂-Konzentration reguliert, ohne dass ständig manuell gelüftet werden muss. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei Orten mit hoher Lärmbelastung, beispielsweise an vielbefahrenen Straßen, keine erhöhte Schallemission durch geöffnete Fenster auftritt. Moderne Anlagen haben den zusätzlichen Vorteil, dass im Sommer ein Bypass zur passiven Kühlung realisiert werden kann. Jedoch hat die kontrollierte Wohnraumlüftung auch Nachteile. An erster Stelle stehen meist die hohen Kosten für die Investition und Installation der Anlage. Aber auch während des Betriebs ist das System regelmäßig zu warten und die Lärmentwicklung der Anlagen muss in der Planung Berücksichtigung finden, um eine Beeinträchtigung der Nutzer auszuschließen. Außerdem benötigt die Wohnraumlüftung elektrische Antriebsenergie für die Ventilatoren, was den Stromverbrauch erhöht. Nicht zuletzt geht durch die laufende Zirkulation von warmer Abluft und kalter Zuluft thermische Energie verloren. Dieser Effekt kann durch eine Wärmerückgewinnung aus der Abluft reduziert werden. Dabei führt die Erwärmung der meist kalten und sehr trockenen Außenluft im Winter zu einer sehr trockenen Frischluftzufuhr im Gebäude. Dies legt nahe, dass Systeme mit wenig Lüftungstechnik zu bevorzugen sind.

5.3.3.3 Wärmerückgewinnung

Durch den ständigen Austausch von bereits erwärmter Raumluft mit kalter Frischluft steigen die Wärmeverluste, und der Heizenergiebedarf wird erhöht. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die in der

²⁸ Manuel Stahl, Bachelorarbeit: Vergleichende Betrachtung von zentralen und dezentralen Lüftungssystemen in Mehrfamilienhäusern, Jahr 2017. Einsehbar bei IFB Ingenieuren

Abluft enthaltene thermische Energie über Wärmetauscher an die Zuluft zu übertragen. Es werden dabei zwischen 60 und 80 % der Wärme zurückgewonnen und damit die Lüftungswärmeverluste um 30 bis 50 % reduziert. Auch bei der EnEV wird die kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung positiv berücksichtigt und trägt zur Erfüllung der KfW-Anforderungen bei.

Statt einem klassischen Wärmetauscher (z. B. Kreuzwärmetauscher) können auch Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung eingesetzt werden. Dabei wird die thermische Abluftenergie an den Wärmepumpenkühlmittelkreislauf übertragen. Bei zentralen Lüftungssystemen kommen in der Regel Kompaktwärmepumpen zum Einsatz, während bei dezentralen Konzepten kleinere Geräte verwendet werden. Durch die bereits hohen Temperaturen am Primärkreislauf der Wärmepumpe wird eine hohe Effizienz erzielt. Das heißt, die Anlage braucht im Vergleich zum Betrieb mit kalter Außenluft weniger elektrische Antriebsenergie, um sekundärseitig die gewünschte Heizungsvorlauftemperatur zu erreichen. Jedoch ist der Abluftvolumenstrom begrenzt, weswegen lediglich eine Heizungsunterstützung realisiert werden kann. Wird jedoch eine monovalente Betriebsweise angestrebt, so kann die Abluft zur Vorwärmung der Primärenergiequelle am Wärmepumpeneingang (Untergrundwärme oder Außenluft) verwendet werden.

5.3.3.4 Lüftungsanlage als Heizung

Meist wird die Zuluft bei einer zentralen Lüftungsanlage mit der Wärmerückgewinnung oder durch spezielle Einbauten vorgeheizt, sodass keine Unbehaglichkeit durch Luftzug entsteht. Die benötigte Wärmeenergie wird in einem separaten Wärmeerzeuger zentral zur Verfügung gestellt. Hier ist als Wärmeerzeuger das Fernwärmenetz gewählt worden. Durch den Warmlufteintrag in den oberen Raumhöhen wird die Decke erwärmt und wirkt als Konvektor. Da kein zusätzliches großes Heizsystem notwendig ist, sind die Investitionskosten geringer als bei einer wasserführenden Heizung mit einer Lüftungsanlage. Des Weiteren wird durch die Lüftungsanlagen und damit verbunden Luftdichtheit der Gebäude der Primärenergiebedarf reduziert. Jedoch sind diese Anlagen nur bei einer Heizleistung von weniger als 10 W/m² im Jahr (Passivhaus) möglich, da sonst die Zulufttemperatur und der Zuluft-Volumenstrom für unerwünscht hohe Bereiche ausgelegt werden muss. Dies kann zur Folge haben, dass die Behaglichkeit in den Räumen, beispielweise durch einen Luftzug oder eine zu warme Decke, sinkt.

Die Luftheizung benötigt mehr Zeit, den Raum zu erwärmen, als eine wassergeführte Heizung, z. B. weil die Wärmeleitfähigkeit der Luft sehr gering ist. Daher sollten die beheizten Räume möglichst geringe Abweichungen im Temperaturniveau haben, sodass kaum räumlich nachgeheizt werden muss. Die Nachheizung ist mit wassergeführten Systemen oder mit Strom an den Lüftungseingängen der einzelnen Räume möglich. Die Grundtemperatur der Warmluft wird an die geringste Raumtemperatur im Gebäude angepasst. Die Trägheit des Systems hat auch zur Folge, dass die Regelung und Anpassung der Raumtemperatur eingeschränkt ist und das System selbst keine Leistungsreserve besitzt, um dies zu optimieren.

Zur Beheizung der Räume benötigt die Luftheizung einen kontinuierlichen Volumenstrom, sodass dieser nicht an die Belegung der Räume und somit an den CO₂-Abtransport angepasst werden kann. Dies kann die Raumluftqualität beeinflussen und somit den Komfort.

Tabelle 3 Vor- und Nachteile von Lüftungssystemen

Variante	Vorteile	Nachteile
Fensterlüftung	<ul style="list-style-type: none"> - Mit Fensterlüftung wird keine Lüftungsanlage notwendig, wodurch keine zusätzlichen Kosten entstehen. - keine Gefahr von zu trockener Innenraumluft. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durch eine unkontrollierte, manuelle Lüftung geht ein Großteil der Heizwärme verloren. - Bei der Lüftung gibt es in den Räumen Schallimmissionen von außen. - Mangelndes Nutzerverhalten kann es zu schlechter Lufthygiene bis hin zu Bauschäden führen.
Dezentrale Lüftungsanlage	<ul style="list-style-type: none"> - Geringer Platzbedarf und einfache Installation, Verzicht auf Kanäle. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Anschaffungskosten bei großen Wohn- und Gewerbeobjekten.
Zentrale Lüftungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Anschaffungskosten bei großen Wohn- und Gewerbeobjekten. 	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhter Platzbedarf und aufwendige Installation durch die Kanalführung (abgehängte Decken oder Sichtinstallation)
Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung	<ul style="list-style-type: none"> - Es können hohe CO₂-Konzentrationen regelmäßig ausgetauscht werden. - Mit einer Lüftungsanlage ist eine gute bis sehr gute Wärmerückgewinnung möglich. - Eine Lüftungsanlage verbessert dauerhaft die Raumluftqualität. - Da Fenster geschlossen bleiben können, verbessert sich der Schallschutz in den Räumen. - Erhebliche Vorteile gibt es bei der EnEV-Berechnung. - Die Heizkosten mit einer Lüftungsanlage werden um 30 bis 50 % reduziert. - Zurückgewonnene Energie kann im EEWärmeG angerechnet werden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durch den Einbau einer Lüftungsanlage entstehen zusätzliche Investitionskosten. - Die Lüftungsanlage muss regelmäßig gewartet werden, wodurch Kosten entstehen. - Der Stromverbrauch des Gebäudes wird durch die Ventilatorleistung erhöht. - Schallemissionen der Lüftungsanlage. - sehr trockene Frischluftzufuhr.
Lüftungsanlage als Heizung mit Wärmeerzeugung durch Fernwärme und elektr. Nachheizung	<ul style="list-style-type: none"> - Vorteile für Wärmeerzeuger siehe Fernwärme in Abschnitt 4.3.2.4 ff. - Geringere Investitionskosten, da keine zusätzliche Heizungsinstallation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nachteile für Wärmeerzeuger siehe Fernwärme in Abschnitt 5.3.2.4 ff. - Nachteile der reinen Lüftung siehe Lüftungsanlage mit WRG. - Eingeschränkte Anpassung der Luftmenge an Raumnutzung. - Begrenzte Heizleistung durch konstanten Luftvolumenstrom, hygienische Lufttemperatur. - Eingeschränkte Regelbarkeit durch zusätzliche Heizregister. - Der Stromverbrauch des Gebäudes erhöht sich durch elektrische Nachheizung in der Aufheizphase des Hauses weiter. - Sehr geringe Abweichung der spez. Heizlast in den einzelnen Räumen. - Schallemissionen der Lüftungsanlage. - sehr trockene Frischluftzufuhr.

5.3.4 Warmwasserbereitung

Die Hauptaufgabe einer Anlage zur Warmwasserversorgung ist sicherzustellen, dass erwärmtes Trinkwasser an allen Zapfstellen in der gewünschten Menge und Temperatur vorliegt. Zudem darf der Prozess der Erwärmung des kalten Trinkwassers dessen chemische und biologische Qualität nicht nachteilig beeinflussen. Für den Verbraucher selbst soll die Warmwassertemperatur regelbar sein, aber während der Zapfung keinen Temperaturschwankungen unterliegen.

Trinkwassererwärmungsanlagen können hinsichtlich ihrer Art der Versorgung in folgende Systeme eingeteilt werden:

Einzelversorgung

Hier wird nur eine Entnahmestelle mit erwärmtem Trinkwasser versorgt. Zum Einsatz kommen hier beispielsweise elektrisch betriebene Durchlauferhitzer oder Kleinspeicher als Untertischbatterien. Ein solches Versorgungssystem für Warmwasser wird im Allgemeinen bei starker räumlicher Trennung der Zapfstellen oder geringem Bedarf an erwärmtem Trinkwasser installiert, z. B. in Bürogebäuden oder Fertigungshallen. Für Wohnhäuser ist dieses System aufgrund des höheren Primärenergiebedarfes zur Erzeugung des Warmwassers eher ungeeignet. Vorteilhaft hierbei sind kurze bzw. keine Warmwasserleitungen und daraus folgend eine geringere Auskühlung des erwärmten Trinkwassers und der Verzicht auf ein Zirkulationssystem.

Gruppenversorgung

Bei Installation einer Gruppenversorgung werden mehrere räumlich nah beieinander liegende Zapfstellen mit Warmwasser versorgt. Auch hier sind die kurzen Leitungswege und der Verzicht auf eine Zirkulation von Vorteil.

5.3.4.1 Wohnungszentrale Warmwasseraufbereitung

Bei einer wohnungszentralen Warmwasseraufbereitung erfolgt die Erhitzung direkt am Ort des Verbrauchs. Dazu eignen sich Durchlauferhitzer oder Wärmepumpen, die unmittelbar an der Zapfstelle das Trinkwasser auf die erforderliche Temperatur anheben. Der Vorteil dieser Technologien ist, dass eine Warmwasserspeicherung und Transport über längere Rohrleitungen entfällt, wodurch die Wärmeverluste minimiert werden. Außerdem wird stets nur so viel Wasser erwärmt, wie auch tatsächlich nachgefragt wird. Auch eine Erhitzung auf 60 °C ist unnötig, da keine Speicherung erfolgt und somit keine Legionellengefahr besteht. Es reicht aus, das Wasser auf die gewünschte Warmwassertemperatur zu erhitzen, wie etwa 45 °C bei Spülen und 38 °C bei Duschen und Badewannen.

5.3.4.2 Durchlauferhitzer

Beim Durchlauferhitzer erfolgt die Trinkwasserbereitung direkt über einen Wärmetauscher. Wird an einer Zapfstelle ein Durchfluss detektiert (entweder elektronisch oder hydraulisch), wird das Wasser im Vorbeifließen von einem Rohrheizkörper erwärmt, bis die gewünschte Temperatur erreicht ist. Somit entfallen sowohl Speicherung als auch Transport von erwärmtem Trinkwasser. Hierin liegen auch die größten Vorteile des Systems. Es wird kein Wasser bevorratet, das aufgrund seiner Temperatur dem Keimwachstum Vorschub leistet. Demnach ist die Trinkwasserhygiene sichergestellt und die Pflicht zur regelmäßigen Trinkwasseruntersuchung entfällt. Außerdem werden die Wärmeverluste minimiert. Laut einer Studie der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH²⁹ treten bei einer zentralen Warmwasserbereitung in einem Einfamilienhaus rund 40 %, in einem 12-Familien-Haus bereits nahezu 50 % Energieverluste durch Zirkulation, Verteilung, Anlaufen und Speicherung auf. Je größer dabei das Gebäude, desto höher auch der Wärmeverlust. Bei der dezentralen Erzeugung mit Durchlauferhitzern können diese Verluste auf rund 3 % reduziert werden. Nachteilig ist, dass der Wärmetauscher sowie die primäre Wärmeversorgung auf den Spitzendurchfluss ausgelegt werden müssen. Aus diesem Grund fällt

²⁹ Darstellung der Energiemengen der zentralen Warmwasserbereitung mit intelligenter Zirkulation beispielhaft an Werktagen. Quelle: Endbericht der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH in Zusammenarbeit mit der TU München, FfE-Nr. ZVEI-01, Tabelle 7-2, 2011.

während des Betriebs ein hoher Stromverbrauch an, was wiederum mit hohen Kosten verbunden ist und den Primärenergiebedarf erhöht. Es ist sinnvoll, mehrere Verbraucher an einen gemeinsamen Durchlauferhitzer anzuschließen. Beispielsweise kann der Warmwasserbedarf eines gesamten Bades über einen Durchlauferhitzer gedeckt werden. Wichtig bei der Auslegung der Erzeugerleistung ist die Betrachtung von Gleichzeitigkeiten in der Nutzung. Als Beispiel dient ein Bad, ausgestattet mit einer Badewanne oder einer Dusche und einem Waschtisch als Warmwasserverbraucher. Die Anschlüsse mit dem höchsten Durchfluss und Wärmebedarf sind Dusche bzw. Badewanne. Hier kann mit einer Wassermenge von je 0,15 l/s ausgegangen werden. Die Waschbecken sind während des Duschens oder des Badens in der Regel ungenutzt. Folglich ist es ausreichend, den Durchlauferhitzer des Bades auf den Wärmebedarf der Dusche bzw. Badewanne zu orientieren (rund 20 kW).

Werden wider Erwarten mehrere Verbraucher gleichzeitig genutzt, so wird der Durchfluss, nicht aber die eingestellte Temperatur reduziert. Wird zusätzlich noch die Küchenspüle mitangebunden, so ist die Erhitzerleistung entsprechend zu erhöhen, da hier eine Gleichzeitigkeit nicht ausgeschlossen werden kann. Die Anschlussleistung des Durchlauferhitzers kann gesenkt werden, indem der Durchfluss oder die Austrittstemperatur reduziert werden. Die Dauer der Nutzung, d. h. ob fünf Minuten oder 15 Minuten geduscht wird bzw. ein Vollbad genommen wird, hat keinen Einfluss auf die Höhe der elektrischen Anschlussleistung. Im Hinblick auf die Anschaffungskosten sind Durchlauferhitzer ein sehr günstiges Trinkwasserbereitungssystem. Die Betriebskosten sind jedoch stark verbrauchsabhängig. Die Stromkosten für die Warmwasserbereitung und damit die Wirtschaftlichkeit stehen in direktem Zusammenhang mit der gezapften Warmwassermenge. Im folgenden Beispiel stellen wir zwei Verbrauchsszenarien eines Drei-Personen-Haushalts gegenüber.

In Variante 1 gehen wir von einem sehr geringen Warmwasserbedarf im Badezimmer aus. Alle drei Bewohner duschen täglich für je fünf Minuten bei einem Durchfluss von 0,15 l/s und einer Temperatur von 30 °C. Außerdem wird beim Zähneputzen und Händewaschen pro Person 15 Minuten am Tag 30 °C warmes Wasser gezapft. Der tägliche Warmwasserverbrauch liegt demnach bei insgesamt weniger als 7,5 kWh pro Tag. Durchlauferhitzer haben einen Wirkungsgrad von nahezu 100 %. Bei einem angenommenen Strompreis von 29,42 ct/kWh fallen pro Tag rund 2,20 € Kosten für die Warmwasserbereitung im Bad an.

Zum Vergleich wird in Variante 2 ein hoher Warmwasserbedarf betrachtet. Von den drei Bewohnern duschen zwei Personen täglich 20 Minuten bei 32 °C und eine Person nimmt ein 150 l-Wannenbad mit 38 °C. Außerdem zapft jede Person 20 Minuten am Tag 30 °C warmes Wasser am Handwaschbecken. Der tägliche Wärmebedarf beträgt 20 kWh und ist 170 % höher als in Variante 1. Demnach steigen auch die Erzeugungskosten um 170 % an, auf rund 5,88 €. Der CO₂-Ausstoß der Warmwasserbereitung ist wiederum abhängig vom eingesetzten Strommix.

5.3.4.3 Wärmepumpe

Das Trinkwasser kann auch elektrisch mithilfe einer Wärmepumpe temperiert werden. In Kapitel 4.3.2.3 wurde bereits detailliert auf die Funktionsweise der Wärmepumpe eingegangen. Kaltwasser hat am Wärmepumpeneintritt eine Temperatur von etwa 10 °C. Wie auch bei den Durchlauferhitzern liegt die erforderliche Warmwassertemperatur aufgrund der wegfallenden Speicherung statt bei 60 °C nur mehr bei etwa 40 °C, wodurch die Wärmepumpe effizient arbeiten kann. Im Gegensatz zum Durchlauferhitzer nutzt die Wärmepumpe neben der elektrischen Antriebsenergie zusätzlich Umweltwärme in Form von Luft oder Geothermie, um das Trinkwasser zu erhitzen. Dadurch arbeitet dieses System stromsparender und ist somit im Betrieb günstiger. Eine zusätzliche Effizienzsteigerung wird erzielt, indem das Wasser vor Eintritt in die Wärmepumpe vorgeheizt wird. Dies kann beispielsweise durch die Wärmerückgewinnung aus der Lüftungsanlage oder aus dem Abwassernetz erfolgen. Je geringer die nachgefragte Vorlauftemperatur, desto geringer ist der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie, der für den Temperaturhub nötig ist. Ein Nachteil der Wärmepumpe ist, dass die Investitionskosten im Vergleich zum Durchlauferhitzer hoch liegen.

Tabelle 4 Vor- und Nachteile von Warmwassererzeugung

Varianten	Vorteile	Nachteile
Durchlauferhitzer Wohnungszentrale	<ul style="list-style-type: none"> - Kein Trinkwasserspeicher nötig. - Niedrigere Trinkwasservorlauftemperaturen (ca. 40 °C) im Vergleich zu heizungszentraler Erzeugung erforderlich. - Sehr geringe Investitionskosten. - Geringe Wartung. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Stromverbrauch bei starkem Verbrauch.
Wärmepumpe Wohnungszentrale	<ul style="list-style-type: none"> - Kein Trinkwasserspeicher nötig. - Niedrigere Trinkwasservorlauftemperaturen (ca. 40 °C) im Vergleich zu heizungszentraler Erzeugung erforderlich. - Geringer Stromverbrauch. 	<ul style="list-style-type: none"> - Das Wasser sollte vor der Erwärmung durch die Wärmepumpe noch vorgewärmt werden, damit der elektrische Hilfsenergiebedarf weiter minimiert wird. - Hohe Investitionskosten.

5.3.4.4 Zentrale über Heizung

Im Gegensatz zur wohnungszentralen Warmwasserbereitung erfolgt in diesem Fall die Erzeugung in der Heizungszentrale. Aus diesem Grund sind lange Leitungsnetze zu den einzelnen Wohnungen erforderlich. In der Regel werden bei einer heizungszentralen Erzeugung Wärmespeicherungssysteme verbaut, um kleine Bedarfs- oder Erzeugungsschwankungen auszugleichen.

Speichersysteme bestehen aus einem geschlossenen Vorratsbehälter mit integriertem Wärmetauscher. Das Kaltwasser tritt im unteren Bereich des Speichers ein und wird bis zur Entnahme gespeichert. Entnommen wird das Wasser am oberen Teil des Speichers. Die Erwärmung des Wassers erfolgt über einen, ggf. auch mehrere, in den Speicher integrierte Wärmetauscher. Durch den Wärmetauscher strömt das Heizmedium eines zunächst beliebigen Wärmeerzeugers, z. B. von einer Solaranlage. Bei Bedarf, z. B. bei hohen Entnahmemengen oder unzureichender Erwärmung durch die Solaranlage, kann über einen weiteren Wärmetauscher, der beispielsweise von einem Gaskessel bedient wird, das Wasser im oberen Bereich des Speichers nachgeheizt werden, um eine ausreichend hohe Austrittstemperatur zu gewährleisten. Vorteile dieses Systems sind die leichte Handhabung und Regelbarkeit. Es ist möglich, die Wärmeerzeuger entsprechend der Pufferspeichertemperatur zu steuern. Bei Überdimensionierung kann es wegen langer Verweilzeiten des erwärmten Trinkwassers im Speicher zu hygienischen Problemen kommen. Wird der komplette Speicherinhalt gezapft, kann es je nach Beheizungsleistung zu längeren Wartezeiten kommen, bis wieder warmes Wasser zur Verfügung steht. Bei der vorgeschriebenen Legionellschaltung (1 x wöchentliche Aufheizung auf ca. 70 °C) werden große Energiemengen benötigt.

Bei **Speicherladesystemen** wird ebenfalls ein geschlossener Vorratsbehälter zur Bevorratung des Warmwassers verwendet, der Wärmetauscher befindet sich in diesem System jedoch außerhalb des Speichers. Das Kaltwasser tritt im unteren Bereich des Speichers ein, wird anschließend über eine Pumpe wieder aus dem Speicher entnommen und durch den Wärmetauscher geleitet. Nach Erwärmung wird das Trinkwasser von oben in den Speicher geladen. Vorteilhaft bei diesem System sind die schnelle Verfügbarkeit des erwärmten Trinkwassers sowie die Möglichkeit, hohe Wassermengen in kurzer Zeit zu zapfen (Spitzenleistung), da das Warmwasser direkt vom Wärmetauscher übernommen werden kann. Bei Überlastung des Wärmetauschers puffert der Speicher die Entnahmespitzen ab. Bei korrekter Dimensionierung kann der Wärmetauscher und die versorgende Wärmequelle reduziert ausgelegt werden (z. B. 70 % der Spitzenlast), und das Speichervolumen bleibt gleichzeitig geringer als beim reinen Speichersystem. Aus hygienischen Gründen hat das Speicherladesystem gegenüber der Frischwasserstation den Vorteil, dass das

Zirkulationswasser die Mindestverweildauer in Temperaturbereichen über 60 °C zuverlässig erreicht. Ein weiterer Vorteil ist die Entstehung niedriger Rücklaufemperaturen im heizungsseitigen Primärkreislauf, da das Heizmedium fast vollständig ausgekühlt werden kann. Dies ist vor allem für die Brennwert- und Solarnutzung notwendig. Nachteilig sind jedoch die höheren Investitionskosten sowie die erforderliche Einregulierung und Regelung, damit die gewünschten Temperaturen im Speicher erreicht werden. Außerdem treten bei der Speicherung im Gegensatz zur Frischwasserstation Wärmeverluste auf. Neben der Speicherung des Warmwassers sind bei einer heizungszentralen Versorgung auch die Verteilung der Wärme sowie die Wärmeverluste der Verteilung ein wesentlicher Faktor.

Verteilung

Hauptaufgabe der Verteilungseinrichtungen des erwärmten Trinkwassers ist der Schutz vor Legionellenwachstum. Legionellen sind bakterielle Krankheitserreger, die im Trinkwasser in geringen Konzentrationen immer vorhanden sind. Eine Aufnahme über die Nahrung ist ungefährlich. Hohe Konzentrationen und das Einatmen von belasteten Aerosolen (z. B. Duschnebel) können zu schweren Lungenentzündungen führen (Legionärskrankheit), besonders betroffen sind Kinder, ältere Menschen, Raucher und Personen mit geschwächtem Immunsystem. Besonders starke Vermehrung findet bei Temperaturen von 30 bis 45 °C statt, ab 60 °C und höher sterben Legionellen ab. Die üblichen Ursachen für starkes Legionellenwachstum sind Stagnation von Warmwasser in Trinkwasserleitungen, Abkühlung von Warmwasserleitungen auf kritische Temperaturen bzw. Erwärmung von Kaltwasserleitungen durch beschädigte und nicht vorhandene Wärmedämmung. Um die Temperatur im Warmwassernetz aufrechtzuerhalten, ist bei Anlagen mit mehr als drei Litern Inhalt eine Zirkulationsleitung oder eine Rohrbegleitheizung zu installieren. Großanlagen, d. h. Anlagen mit Trinkwassererwärmern über 400 Liter Inhalt oder einem Wasserinhalt in jeder Rohrleitung zwischen Trinkwassererwärmer und Entnahmestelle von mehr als 3 Litern, sind melde- und beprobungspflichtig. Im DVGW-Arbeitsblatt W 551 „Trinkwassererwärmungs- und leitungsanlagen“ wird eine Temperatur von mindestens 60 °C am Warmwasseraustritt des Trinkwasserspeichers gefordert. Höhere Temperaturen im Trinkwassererwärmer, z. B. 70 °C, sollen eine thermische Desinfektion bewirken, diese führen aber bei kalkhaltigem Wasser zu starkem Kalkausfall im Speicher, die Desinfektionswirkung im Lüftungsnetz ist umstritten.

Bei einer Zirkulationsleitung darf die Eintrittstemperatur in den Speicher maximal 5 °C kleiner sein als die Austrittstemperatur des erwärmten Wassers. Zirkulationspumpen oder Begleitheizungen dürfen für maximal acht Stunden am Tag abgeschaltet werden. Als Konsequenz müssen warmgehende Wasserleitungen gemäß den Anforderungen der EnEV gegen Wärmeverluste geschützt werden, direkt an Warmwasserleitungen liegende Kaltwasserleitungen müssen vor Erwärmung geschützt werden. Die Wärmeerzeugung kann beispielsweise über klassische Brennwertkessel oder BHKW erfolgen. Im folgenden Abschnitt werden zwei Arten der zusätzlichen Unterstützung dargestellt: Zum einen wird die Trinkwassererzeugung mit solarer Unterstützung und zum anderen die Nutzung der thermischen Energie des Abwassers betrachtet.

5.3.4.5 Solare Unterstützung

Bei dieser Technologie wird die Strahlungsenergie der Sonne von Kollektoren absorbiert, wodurch Wärme frei wird. Bei der Solarstrahlung handelt es sich um elektromagnetische Wellen der Länge 300 bis 3.000 nm. Dabei gilt: Je geringer die Wellenlänge, desto höher ist die Energie der Teilchen, welche die Strahlung transportiert.

Zunächst sind die Einzelkomponenten des Kollektors zu betrachten. Der Absorber ist sozusagen ein Energiewandler, der aus Strahlungsenergie thermische Energie erzeugt. Die resultierende Wärme leitet jener an ein Trägermedium weiter. Damit das Fluid möglichst stark erhitzt wird, erfolgt der Flächendurchfluss im „Low-Flow-Prinzip“ – etwa 10 bis 15 l/m²h. Um den Absorber zu schützen und die Wärmeabstrahlung zu mindern, ist meist eine Glasabdeckung angebracht. Diese sollte allerdings möglichst wenig Strahlung reflektieren (~8 %) bzw. absorbieren (~2 %). In der Regel transmittieren

rund 90 %, und damit fallen die Energieverluste an der Abdeckung relativ gering aus. Auch die Konvektion der im Absorber erzeugten Wärme wird durch das Glas auf ca. 13 % begrenzt. Die Dämmung sorgt dafür, dass möglichst wenig der erzeugten thermischen Energie an die Umgebung verloren geht. So verbleiben rund 60 % der Energie als Nutzwärme zur Wassererhitzung. Es gibt jedoch ein grundsätzliches Problem: Die globale Sonneneinstrahlung ist nicht über das ganze Jahr hinweg konstant. Die flächenspezifische Strahlung von $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ am oberen Rand der Atmosphäre, die von der Sonne emittiert wird, kommt nicht vollständig an der Erdoberfläche an. Es treten Strahlungsverluste auf, die zum einen auf die Reflexion und Absorption an der Atmosphäre und zum anderen auf Streuungseffekte zurückzuführen sind. Außerdem haben der Grad der Bewölkung und der Sonnenstand Einfluss auf die globale Bestrahlungsstärke.

Unterschiede zwischen den Jahreszeiten zeigen sich zusätzlich in der Einstrahlungsdauer. So ist die Zeitspanne zwischen Aufgang und Untergang der Sonne im Sommer etwa sechs Stunden länger als im Winter. Dieser Effekt basiert darauf, dass die Erdrotationsachse nicht senkrecht, sondern um $23,5^\circ$ geneigt auf der Ebene der elliptischen Bewegung um die Sonne steht. So ist ab dem 21. März die Einstrahlung auf der Nordhalbkugel länger und erfolgt unter steileren Winkeln als auf der Südhalbkugel. Am 23. September kehrt sich das Bestrahlungsverhältnis um. Die tageszeitlichen Schwankungen hingegen beruhen auf der Erdrotation um die eigene Achse. Nachts ist der Standort der Sonne abgewandt, und es trifft keine Strahlung am Boden auf. In den Morgen- und Abendstunden kann die Solarstrahlung zwar durchdringen, aber aufgrund der flachen Einfallswinkel ist der Strahlungsweg lang und die Bestrahlungsstärke schwach. In den Mittagsstunden sind die Einfallswinkel steiler und der Strahlungsweg verkürzt sich. Aufgrund dessen nimmt auch die Bestrahlungsstärke stetig zu, bis sie bei minimalem Abstand zwischen Sonne und Erde sowie einem senkrechten Einfallswinkel (Zenit) ihre Maximalwerte erreicht.

Da die thermische Energie, die durch eine Solarthermieanlage erzeugt werden kann, direkt mit der Bestrahlungsstärke zusammenhängt, ist auch die Wärmeerzeugung jahres- und tageszeitlichen Schwankungen unterworfen. Jedoch kann ein Hausbewohner seinen Wärmebedarf nicht an die solare Erzeugung anpassen. Besonders im Winter wird Wärme zur Gebäudeheizung benötigt, die Hauptwärmeerzeugung erfolgt allerdings in den Sommermonaten. Im Tagesverlauf herrschen ebenfalls häufig Diskrepanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch. So ist der Wärmebedarf in der Regel in den Morgen- und Abendstunden am höchsten. Die Solaranlage produziert aber in den Mittagsstunden ihre Maximalerträge, wenn die meisten Berufstätigen nicht im Haus sind. Aus diesem Grund ist die Speicherung der Wärme essenziell. Fast alle Solarthermieanlagen sind mit sensiblen Kurzzeitwärmespeichern versehen, die die erzeugte Wärme über mehrere Tage speichern können. In Deutschland sind Systeme mit Zwangsumlauf gebräuchlich. Der Speicher ist mit Druck beaufschlagt und mit kaltem Trink- oder Brauchwasser gefüllt, dessen Zulauf sich im unteren Bereich befindet. Durch ein separates Rohrsystem zirkuliert das Trägermedium des Erzeugerkreislaufs und gibt seine Wärme an das kalte Speicherwasser ab. Im Speicher liegt das Wasser nach Temperaturniveau geordnet vor. Eine Durchmischung der Schichten soll möglichst vermieden werden. Da mit der Temperaturzunahme des Wassers auch seine Dichte abnimmt, steigt die erhitzte Flüssigkeit nach oben. Dadurch befindet sich die Entnahmestelle für das Warmwasser im oberen Bereich. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Trinkwasserspeichern für Warmwasser, Pufferspeichern für Heizungswasser und Kombispeichern. Solarthermieanlagen werden häufig mit einem weiteren Heizungssystem kombiniert, welches in strahlungsschwachen Zeiten die Wärmeversorgung abdeckt. In diesem Fall wird von solarer Unterstützung gesprochen.

5.3.4.6 Wärmerückgewinnung des Abwassers

Gebäudeabwasser weist mit 20 bis 40 °C und mehr ein hohes Wärmepotential auf. Es gibt mehrere Varianten, diese Energie nutzbar zu machen. Mit Fallleitungs-Wärmetauschern wird die thermische Energie des Abwassers direkt am Fallrohrnetz an das zufließende Kaltwasser übertragen, welches nur eine Eingangstemperatur von etwa 10 °C aufweist. Dadurch wird das Kaltwasser um etwa 12 bis 14 °C erwärmt, was den Energiebedarf zur Warmwasserbereitung um etwa 35 % verringert. Dieses System wird häufig bei Duschen eingesetzt und ist mit geringen Kosten verbunden.

Bei Grauwasser-Wärmetauschern wird das Abwasser aus Dusche, Badewanne, Spülmaschine und Waschmaschine etc. in einem Tank mit integriertem Wärmetauscher gesammelt. Neben der passiven Wärmerückgewinnung mit Wärmetauschern werden auch Wärmepumpen eingesetzt, um das Temperaturniveau des Abwassers weiter anzuheben.

5.3.5 Brandschutz

Die in den 1990er Jahren eingeleitete Öffnung des Holzbaus für das mehrgeschossige, innerstädtische Bauen war verbunden mit einer Forderung der obersten Bauaufsichten und der Feuerwehren, einen Nachweis einer gleichwertigen Sicherheit zu tradierten Massivbauweisen zu führen. Aus dieser Forderung heraus entstand die Idee einer Brandschutzbekleidung, die eine Entzündung der Holzbauteile für die Dauer des Feuerwiderstandes verhindern sollte. Dieser Ansatz wurde in nahezu allen Bundesländern auf Grundlage der MBO 2002 und der M-HFHolzR für die Gebäudeklasse 4 in das jeweilige Landesrecht als Kapselklasse K260 für hochfeuerhemmende Bauteile eingeführt. Die Forderung der Kapselklasse K260 an die Brandschutzbekleidung hat allerdings großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Gesamtkonstruktion.

In der Baupraxis wird die K260-Bekleidung in der Gebäudeklasse 4 daher höchstens bei Wohnungstrennwänden umgesetzt. Da hier auch Schallschutzaspekte eine Rolle spielen, kann die Bauweise für diese Bauteile durchaus berechtigt sein, zumal der Trennwand vor dem Hintergrund des Nachbarschaftsschutzes eine besondere Funktion zukommt. Eine Reduzierung der Kapselklassen wird daher in Fachkreisen intensiv diskutiert. In den Landesbauordnungen Baden-Württemberg, Hamburg, Berlin und Nordrhein-Westfalen wurde dies bereits umgesetzt. Maßgebendes Kriterium ist hier ausschließlich der Feuerwiderstand, d. h. Holzbauteile dürfen in den Gebäudeklassen 4 und 5 auch ohne brandschutztechnisch wirksame Bekleidung ausgeführt werden. Allerdings muss der zweite wesentliche Aspekt einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung, nämlich die hinreichende Rauchdichtheit, durch konstruktive Maßnahmen ausreichend sichergestellt werden.

Die Möglichkeit, mit einer reduzierten Kapselklasse oder auch mit unbekleideten Holzbauteilen zu arbeiten, besteht auch in den übrigen Bundesländern. Dies gilt sowohl für die Gebäudeklasse 4 wie auch für die Gebäudeklasse 5. Hierzu müssen Erleichterungen/Abweichungen über ein ganzheitliches Brandschutzkonzept beurteilt und begründet werden.

Etablierte Techniken für den Gebäudetypus Hochhaus existieren nicht. Aus diesem Grund sind hier mit allen Beteiligten und den entsprechenden Behörden individuelle und ganzheitliche Brandschutzkonzepte zu erarbeiten.

5.3.6 Ökobilanzierung oder Lebenszyklusanalyse (LCA)

Eine Ökobilanzierung ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten und Materialien während des gesamten Lebensweges - „from cradle to grave“ oder „von der Wiege bis zur Bahre“. Die Ökobilanzierung ist auch bekannt als Lebenszyklusanalyse, Umweltbilanz oder auf Englisch Life Cycle Assessment (LCA). Zur Ökobilanzierung gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung des Produktes, sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z. B. Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe). Zu den Umweltwirkungen werden sämtliche umweltrelevanten Entnahmen aus der Natur (z. B. Erze, Rohöl, etc.) sowie die Emissionen in die Umwelt (z. B. Abfälle, Kohlendioxidemissionen) gezählt.

Die im Folgenden von der ina Planungsgesellschaft mbH erstellte Grafik veranschaulicht sehr plastisch, was gegenwärtig an Ressourcen- und Energieaufwendungen zur Errichtung von Gebäuden in die Ökobilanz eingerechnet wird, und zeigt den gegenwärtigen Wissensstand darüber, welche ökologischen Auswirkungen von Gebäuden derzeit zu quantifizieren sind.

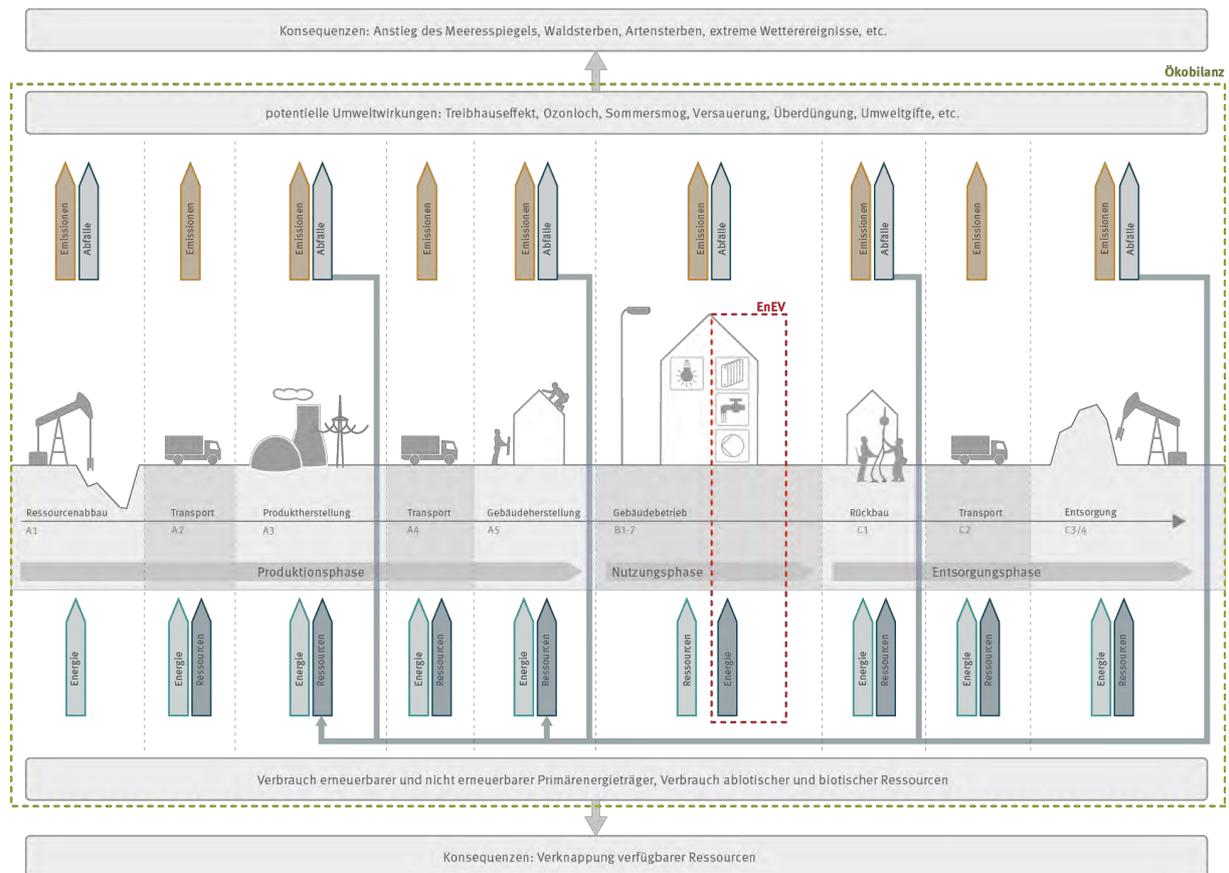


Abb. 22: Ökobilanz mit Bilanzierungsgruppen, Quelle: ina Planungsgesellschaft mbH

Die Ökobilanzierung lässt sich in drei wesentliche Phasen unterscheiden:

- A Herstellungs- und Errichtungsphase
- B Nutzungsphase
- C Entsorgungsphase

In der Grafik wird deutlich, dass sich derzeit die Bilanzierungsgrenze der EnEV im Verhältnis zum gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes, auf den Energieverbrauch in der Nutzungsphase beschränkt. Es ist auch festzustellen, dass die Weiternutzung der eingesetzten Ressourcen in aktuellen Methoden der Ökobilanzierung keine Berücksichtigung findet. Bisher sind keine geeigneten Werkzeuge zur Quantifizierung der ökologischen Auswirkungen einer Weiternutzung bekannt. Aus diesem Grund ist der Aspekt der Weiternutzung nicht quantitativ in die ökologische Bewertung der WOODSCRAPER mit eingeflossen, auch wenn gerade die Weiternutzung der eingesetzten Ressourcen in der Konzeption der WOODSCRAPER zentral veranlagt wurde.

Das Konzept des zirkulären Bauens zur Schließung von Stoffkreisläufen tritt sehr langsam in das Bewusstsein des Bausektors ein. Es ist zu beobachten, dass vermehrt die Design-Philosophie „Cradle to Cradle“ (C2C)³⁰ („von der Wiege zur Wiege“) und Circular Economy³¹ diskutiert werden. Es existiert ein Zertifizierungssystem³² für Produkte nach Cradle to Cradle³³ und die DGNB³⁴ hat dieses Thema mittlerweile auch auf ihre Agenda gesetzt.

³⁰ www.c2c-ev.de

³¹ www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept

³² www.c2ccertified.org

³³ www.epea-hamburg.com

³⁴ www.dgnb-system.de/de/system/version2018/kerntemen/der-mensch-im-mittelpunkt/

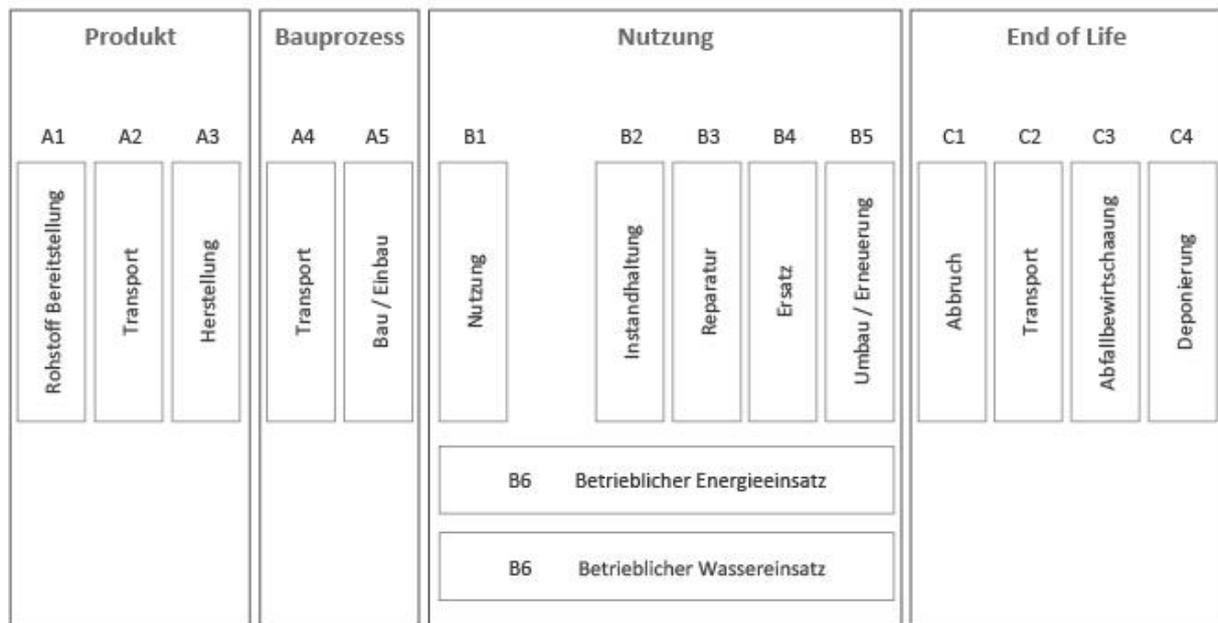


Abb. 23: Produktkategorieregeln für die Ökobilanz, Quelle: DIN EN 15804

Für das vorliegende Forschungsvorhaben war es notwendig, ein Werkzeug zu nutzen, mit welchem sich die komplexen Untersuchungen zur Ökobilanzierung und Lebenszykluskostenanalyse für alle Gebäudetypen handlich und bauteilbezogen in den Entwurfsprozess integriert untersuchen lassen. Die einzige auf dem deutschen Markt erhältliche Software, die in der Lage ist, diese Aspekte zusammen auszuwerten, und zudem Investitionskosten mit in die Betrachtungen einfließen lassen kann, war die Software-LEGEP³⁵, entwickelt von Holger König. Es ist eine Software zur Berechnung der Herstellungs- und Lebenszykluskosten, des Energiebedarfs und der Ökobilanz. Bauteilbezogene Varianten lassen sich mit LEGEP ebenso erstellen.

Für die Ökobilanzierung greift die Software auf Datensätze der Umweltauswirkungen einzelner Baustoffe aus der vom Bundesbauministerium für Umwelt (BMU) bereitgestellten Datenbank Ökobaumat zurück. Fehlende, belegte Umweltauswirkungen von Baustoffen lassen sich in der Software ergänzen. EPDs (Environmental Product Declaration) einzelner Bauprodukte stellen ergänzend eine fundierte Datengrundlage dar.

5.3.7 Lebenszykluskostenberechnung (LCC)

Eine Lebenszykluskostenrechnung bzw. Life-Cycle-Costing (LCC) ist eine Kostenmanagement-Methode, die die Entwicklung eines Gebäudes vom Anfang bis zum Ende betrachtet. Es ist der gleiche Betrachtungszeitraum, der für die Ökobilanzierung angesetzt wird, also „von der Wiege bis zur Bahre“. Bei der Betrachtung sind hierbei nur die negativen Zahlungsströme (Ausgaben) von Interesse, die Erlöse (Einnahmen) werden vernachlässigt.

Das Life-Cycle-Costing (LCC) wird dafür eingesetzt, qualifizierte Investitionsentscheidungen treffen zu können. Diese Methode ermöglicht es, im Entscheidungsprozess nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch die Kosten der Nutzung (z. B. Betriebskosten, Personalkosten, Instandhaltungskosten, Energie- und Verbrauchskosten, ...) und die Kosten der Entsorgung eines Produktes oder Gebäudes zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur Kapitalwertmethode werden die anfallenden Zahlungen nicht auf den Anschaffungszeitpunkt abgezinst (Barwert), sondern die tatsächlichen Zahlungen periodengerecht verglichen. Durch diese Methode ist eine ganzheitliche Betrachtung der Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus einer Investition möglich.

³⁵ www.legep.de

Es ist festzustellen, dass die Weiterverwendung von eingesetzten Bauteilen und Elementen in der aktuellen LCC sich ebenso wenig einbilanzieren lässt, wie enthaltene Werte in Form von reinen und schadstofffreien Rohstoffen in einem Gebäude. Aus diesem Grund werden diese Werte in der vorliegenden Betrachtung nicht mit einbezogen.

Die ermittelten Investitionskosten basieren auf Kennwerten der sirAdos-Datenbank 2018, auf die LEGEP unmittelbar zugreift. Alle Kosten- und Preisangaben sind als reale Kosten/Preise inklusive Mehrwertsteuer zur Preisbasis 2018 zu verstehen.

6 Projektbeschreibung WOODSCRAPER

Im Folgenden wird das Projekt in seinen Einzelheiten beschrieben, und das Vorgehen der jeweiligen Fachbereiche dargelegt, um ein ökologisch realisierbares Optimum wie im vorher dargestellten Planungsprozess zu erzielen.

6.1 Allgemein

Die Stadt Wolfsburg wird derzeit durch einen Leerstand von unter 2,6 %³⁶ mit einem enormen Druck auf den Wohnungsmarkt konfrontiert. Mit der Wohnungsbauoffensive von 2012 verfolgte die Stadt das erklärte Ziel, bis 2020 6.000 Wohnungen neu zu errichten. Das neue Quartier Hellwinkel leistet mit seinen anvisierten 720 Wohneinheiten seinen Beitrag zu der Offensive. Auf dem Areal zweier nebeneinander liegender Kleingartenvereinsgelände im Stadtteil Hellwinkel soll eine städtebaulich, sozial, ökologisch und immobilienwirtschaftlich sinnvolle Entwicklung stattfinden. Die Weiterentwicklung des Wettbewerbserfolgs des Architekturbüros SMAQ mündete in einen sozial und ökologisch ambitionierten Masterplan mit Modell Charakter, der unter den Leitthemen „Landschaft und Natur“, „Vielfalt und Mischung“, „Nachbarschaften“ sowie „Ökologie“ entstand.

6.1.1 Lage und Beteiligte

Auf den derzeit unbebauten Grundstücken „J“ und „N“ im neu entstehenden Quartier Hellwinkel in Wolfsburg werden die zwei Wohnhochhäuser aus Holz auf einer zusammenhängenden Tiefgarage geplant. Das Projekt befindet sich am südlichen Rand der Hellwinkel Terrassen am Nelkenweg. Das Grundstück „N“ ist Teil des geplanten ersten Bauabschnittes und „J“ Teil des zweiten. Durch die geplante zusammenhängende Tiefgarage werden beide Grundstücke zeitgleich entwickelt.

6.1.2 Grundlagen und Städtebau

Der Masterplan ging aus einem vom Architekturbüro SMAQ gewonnenen städtebaulichen Wettbewerb hervor. Der Bebauungsplan für das gesamte Quartier Hellwinkel zusammen mit



Abb. 24: Stadt Wolfsburg, Hellwinkel

³⁶ „Bündnis für Wohnen und Leben in Wolfsburg“, Dokumentation der 4. Sitzung am 25. Juni 2013: https://www.wolfsburg.de/~media/wolfsburg/statistik_daten_fakten/statistik_daten_und_fakten/buendnisfuerwohndokumentation4_20150128.pdf?la=de-DE

detaillierten und umfangreichen Gestaltungshandbüchern dienen der Qualitätssicherung der zukünftigen Entwicklung. Die beiden WOODSCRAPER verfügen über die gleiche tragende Grundstruktur und technische Ausstattung. Die Erscheinung und der Wohnungsmix sind unterschiedlich. Die Gebäude haben jeweils städtebaulich lesbare, unterschiedlich hohe Volumina und sind über eine zentrale Erschließung verbunden. Auf dem niedrigeren Bereich befindet sich jeweils eine Dachterrasse. Eine Nutzung als Gemeinschaftsdachterrasse ist angedacht.

6.1.3 Leitlinie

Es werden zwei Holzhochhäuser geplant, die laut Masterplan mit einem Heizwärmebedarf von 25 kWh/m²/a ausgeführt werden. Besonderes Augenmerk wird auf die Wiederverwertbarkeit des gesamten Gebäudes gelegt, d. h. das Prinzip „Cradle to Cradle“ wird auf möglichst viele Bereiche ausgeweitet. Es werden naturnahe und umweltverträgliche Baustoffe verwendet. Insbesondere in den Innenräumen werden emissions- und schadstoffarme Baustoffe zur Anwendung kommen. Zusätzlich wird angestrebt, mit möglichst wenig Haustechnik auszukommen.

6.1.4 Erschließung

Die Erschließung der Grundstücke erfolgt durch die Stadt bis zur Grundstücksgrenze. Die Leitungen liegen ca. 1 m von der Grundstücksgrenze/Baulinie entfernt. Der Zugang und die Zufahrt erfolgt von Norden über den Nelkenweg. Neben und zwischen den Gebäuden verlaufen Fußwege. Südlich der Grundstücke verläuft ein öffentlicher Radweg, der den Hellwinkel von einem Waldgebiet abgrenzt.

6.1.5 Projektablauf

Nach der Grundstücksanhandgabe zum Beginn des 3. Quartals 2019 an einen zum Projekt passenden Investor folgt spätestens sechs Monate später die Einreichung des Bauantrages und damit der Grundstückskauf. Die Fertigstellung und Übergabe der Gesamtbaumaßnahme ist für 2021 geplant.

6.1.6 Gebäudekenndaten

- Grundstück „J“: 1.630 m², Grundstück „N“: 1.814 m², zusammen 3.444 m²
- 2 Holz-Hochhäuser mit je 11 Obergeschossen, einem Staffelgeschoss und einer gemeinsamen Tiefgarage
- BGF: rd. 15.920 m² inkl. Tiefgarage
- BGF Tiefgarage: ca. 2.760 m²
- Mietfläche: ca. 8.950 m²
- ca. 90 Wohnungen (Haus J und N)
- ca. 83 Stellplätze

6.1.7 Nutzung

Im Untergeschoss befinden sich in Abhängigkeit vom Wohnungsmix ca. 83 Stellplätze. Die überdachte und geschlossene Zufahrt der Tiefgarage soll hinter Haus J verlaufen. In der Tiefgarage befinden sich außerdem Technik- und Abstellräume. Im Erdgeschoss von Haus J ist neben dem Eingangsbereich mit den Briefkästen ein Café mit Küche, Lager und WCs geplant, außerdem ein Gemeinschaftsraum, Technikraum, Müllraum und Fahrradraum mit Doppelparksystem für ca. 64 Räder, in Abhängigkeit vom Wohnungsmix.

Im Haus N ist anstelle des Cafés ein Optionsraum mit Küche und WCs geplant, anstelle des Gemeinschaftsraumes ein Büro mit WCs. In Abhängigkeit vom Bauträger kann das Erdgeschoß entsprechend umgestaltet werden. In den Obergeschossen 2 bis 12 befinden sich Wohnungen in der Größe von 40 bis 175m² (Netto-) Wohnfläche.

6.1.8 Grundrissstruktur der Gebäude

Die beiden Teile jedes Hauses werden durch den Erschließungskern verbunden. Hier sind das außenliegende Sicherheitstreppenhaus mit vorgeschalteter Schleuse und zwei Aufzüge, ebenfalls mit Schleuse, angeordnet. Das Treppenhaus verläuft durchgängig vom Erdgeschoß bis zum 12. Obergeschoß. Der Zugang zur Tiefgarage erfolgt getrennt. Die Aufzüge erschließen barrierefrei alle Geschosse sowie die Tiefgarage. Einer der beiden Aufzüge wird als Feuerwehraufzug ausgeführt. Durch die Erschließung und statische Struktur sind Wohnungsgrößen von 40 m², 60 m², 70 m², 80 m², 90 m², 100 m², 110 m² oder 175 m² möglich. Ab einer Größe von 60 m² Wohnungsgrundmodul sind Maisonette-Wohnungen möglich. Die brandschutztechnisch maximale Wohnungsgröße beträgt 200 m². Pro Etage können maximal 6 (2x3) Wohnungen über den Erschließungskern erschlossen werden, die mit insgesamt vier Schächten pro Etage mit Medien versorgt werden. Die Geschosshöhe beträgt in den Wohngeschossen 3,05 m, im Erdgeschoss 3,30 m und in der Tiefgarage 3,15 m. Jede Wohnung erhält Abstellflächen von min. 6m² gem. der geltenden DVO-NBauO.

6.1.9 Brandschutz

Der Brandschutz wird gemäß des Brandschutzgutachtens der Brandschutzingenieure Dehne, Kruse berücksichtigt. Dieses wurde bereits mit der Stadt und der Feuerwehr abgestimmt. Folgende brandschutzrelevante Einrichtungen sind nach diesem Konzept in Anlehnung an die Muster-Hochhausrichtlinie (MHHR) erforderlich:

- Feuerwehraufzug
- Brandmeldeanlage mit Aufschaltung zur Feuerwehr in allen öffentlichen Bereichen inkl. Erschließung etc.
- Sprühnebelanlage in den Wohnungen
- Druckbelüftung in der Schleuse zu Fluchttreppenhaus und Aufzugsvorraum
- Notstrom

6.1.10 Planerische Grundlagen

Die Ausführung des Objektes erfolgt gem. den gültigen DIN-Vorschriften inkl. der VOB/C. Darin eingeschlossen und Grundlage der Bauausführung sind die allgemeinen anerkannten Regeln der Technik und die Handwerksregeln. Die Ausführung erfolgt verbindlich auf Grundlage der genehmigten Bauantragspläne sowie der vom Architekten in Zusammenarbeit mit den Fachingenieuren zu erarbeitenden Werk- und Detailpläne. Schallschutzmaßnahmen werden gemäß DEGA-Empfehlung 103 (Stand 2018) nach Schallschutzklasse C (erhöhter Schallschutz) ausgeführt. Der Wärmeschutz richtet sich nach den Bestimmungen der EnEV 2016. Für die Ausführung sind die bauaufsichtlichen Auflagen und die statische Berechnung maßgeblich.

6.2 Gebäudestruktur

Die Gebäudestruktur wurde zur Kostenoptimierung in der Herstellung und Rückbaubarkeit mit allen Projektbeteiligten in einem integralen Planungsprozess zweckrationalisiert entwickelt und optimiert.

6.2.1 Allgemein

Zur Erfüllung der brandschutzrechtlichen Vorgaben befindet sich im Zentrum des Gebäudes ein aussteifender Erschließungskern aus Stahlbeton. Das Erdgeschoss ist wegen seiner Funktionsräume und besonderen Brandschutzanforderungen ebenso aus Stahlbeton ausgebildet. Ab dem ersten Obergeschoß beginnt der Holzbau, der sich mit seinen Massivholzdecken vom Stahlbetonkern über eine tragende Massivholzzinnenwand auf eine in Stützen aufgelöste Außenwand spannt und als Balkone stützenfrei auskragt. Das Deckenraster wurde so ausgelegt, dass zum einen die Spannweiten vom Kern zu den Außenwänden auf Massivholzdecken optimiert und damit effizient ausgelegt sind und zum anderen die Elementbreite für den Herstellungsprozess und den Transport ideal sind. Bei Spannweiten von 5 m sind Massivholzdecken optimal ausgelegt. Aus Gründen der

Maximierung der überbaubaren Fläche (GFZ) ergab sich neben dem Erschließungskern eine Gebäudetiefe von 10 m. Somit konnte eine für Massivholzdecken optimierte Spannweite erzielt werden. Die Elementbreite von 2,30 m orientiert sich an den üblicherweise in der Produktion von Brettsperreholzelementen herstellbaren Breiten von 4,80 m Breite mit beliebiger Länge. Ohne viel Verschnitt lassen sich so zwei Deckenelemente effizient aus einer Brettsperreholzplatte fertigen. Die Deckenelemente mit den Abmaßen von 2,30 m x 10 m lassen sich damit noch problemlos auf die Baustelle transportieren. Die Außenwände sind so entwickelt worden, dass sie fertig vormontiert inklusive Fenster, Dämmung und Fassade auf die Baustelle geliefert und mittels Kran und ohne Fassadengerüst montiert werden können. Die vorelementierten Innen- und Außenwandscheiben werden zusammen mit den Deckenelementen und den vorelementierten Nasszellen wie ein Baukastensystem geschoßweise montiert und notwendiges Montagematerial für die nächsten Ausbaustufen gleich mit in die jeweiligen Geschosse gestellt, bevor die nächste Decke montiert ist.

6.2.2 Flexibilität

Der Erschließungskern besteht aus einem Feuerwehraufzug, einem Personenaufzug mit notwendigem gemeinsamem Vorraum und einem außenliegenden Fluchttreppenhaus inkl. Schleuse, welche über einen notwendigen Flur zur Erschließung der Wohneinheiten verbunden sind. Der Flur ermöglicht die Erschließung von maximal sechs Wohneinheiten pro Geschoss.

Sogenannte „Sollbruchstellen“ in den Flurwänden des Erschließungskernes ermöglichen eine relativ einfache Umnutzung des Gebäudes im Bereich der mittleren drei Achsen. Entkoppelte Stützen und Deckenfelder erlauben die Montage von Wohnungstrennwänden, um dabei gleich den erforderlichen Schallschutz sicherstellen zu können.

Die Schächte wurden aus Gründen der Effizienz auf ein Mindestmaß von vier pro Geschoss reduziert. So lassen sich die maximal möglichen sechs Wohnungen pro Geschoss effizient ver- und entsorgen.

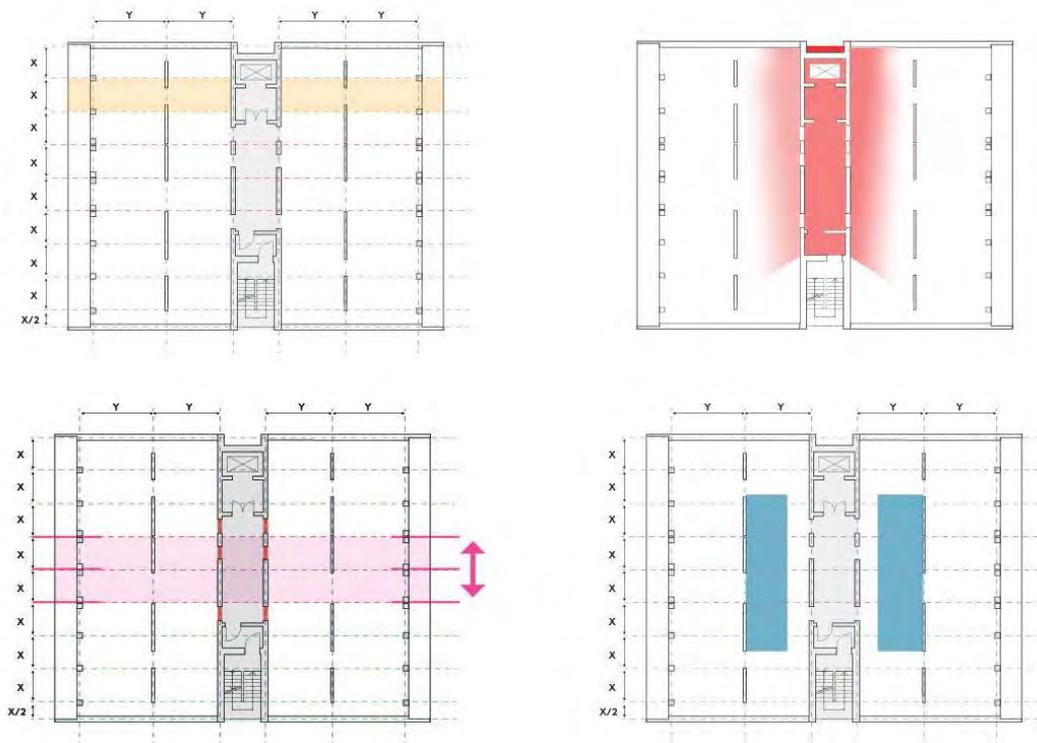


Abb. 25: Deckenraster (links oben), Temperaturspeicher (rechts oben), Flexibilität (links unten), Sanitär (rechts unten)

6.2.3 Wohnungsgrößen und Wohnungsmix

Die flexible Gebäudestruktur ermöglicht wird es exemplarisch nachfolgende Wohnungstypen mit 40m², 60m², 70m², 80m², 90m², 100m², 110m², 175m² aufzunehmen. Ab einer Größe von 60m² sind auch Maisonette-Lösungen zu realisieren.



Wohnung 40 1:100



Wohnung 80 1:100



Wohnung 60 1:100



Wohnung 70 1:100



Wohnung 90 1:100

Abb. 26: Wohnungstypen (1)



Abb. 27: Wohnungstypen (2)



Abb. 28: Regelgrundriss mit Wohnungsmix

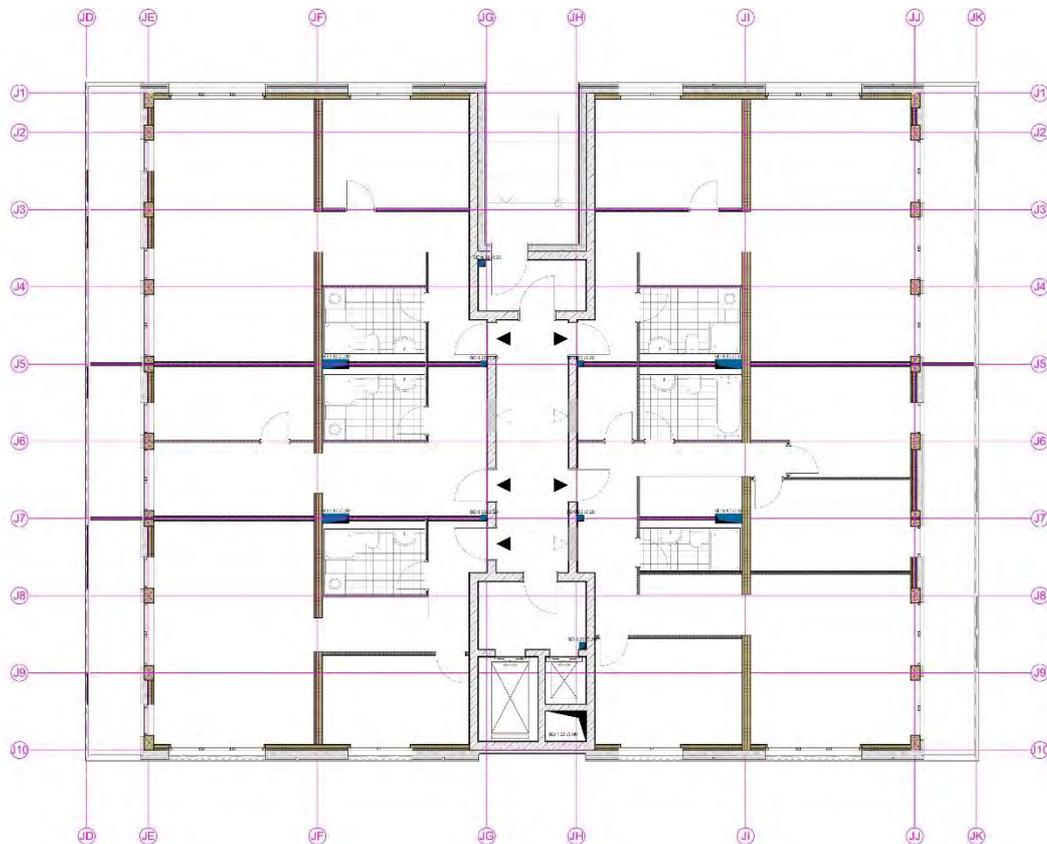


Abb. 29: Gebäudestruktur

6.3 Tragwerksplanung

6.3.1 Allgemein

Auf Grundlage des aktuellen Stands der Technik wurde ein für den Holzbau optimiertes reines Holztragwerk für den Typus Hochhaus entwickelt. Durch den Verzicht auf Holzbetonverbunddecken wurde die spätere Demontierbarkeit und die Weiterverwendbarkeit der Bauteile in gleicher Qualität sichergestellt. Dies ist das Ergebnis eines intensiven Austausches zwischen Tragwerksplanung, Architektur, Brandschutz und ausführenden Firmen. Im Folgenden werden Parameter und Abwägungen zur Entwicklung dieser Lösung besprochen und vorgestellt.

6.3.1.1 Lastannahmen

Die Eigenlasten wurden mit den tatsächlich vorhandenen Bauteilaufbauten ermittelt. Für alle Nutzlasten wurden die Empfehlungen der aktuell gültigen DIN EN 1991-1/NA übernommen. Die Annahme der äußeren Einwirkungen wie Wind und Erdbeben erfolgte mit den ortsspezifischen Angaben der aktuellen Fassung von DIN EN 1991-3/NA bzw. DIN EN 1991-4/NA.

6.3.1.2 Brandschutz

Für die Dimensionierung des Tragwerks sind zwei Parameter entscheidend, nämlich:

- Anforderung an die Brandwiderstanddauer der Bauteile
- Anforderung an die Brennbarkeit der Bauteile

Da es sich beim WOODSCRAPER um ein Hochhaus handelt, ist eine Umsetzung in Holzbauweise gemäß Niedersächsischer Bauordnung (NBauO) nicht selbstverständlich erlaubt. Für Hochhäuser ist die Verwendung von brennbaren Baustoffen im Tragwerk nicht vorgesehen. Die Genehmigungsfähigkeit wurde darum mit einem objektspezifischen Brandschutzgutachten nachgewiesen. Durch den Einsatz einer Sprühnebelanlage kann die Konstruktion ungekapselt, mit bodentiefen Fenstern und damit monolithisch erfolgen, was die Kreislauffähigkeit der Baustoffe deutlich vereinfacht. In dem von den Brandschutzingenieuren Dehne und Kruse, erstellten Gutachten werden folgende Vorgaben für die Bemessung der Bauteile gemacht:

- Unterirdische Bauteile F 90 A
- Treppenhauskern F 90 A
- Übrige oberirdische Bauteile F 90 B

6.3.1.3 Objektplanung

Die ursprüngliche Vorplanung (siehe DBU-Projektskizze) war aus der Sicht der Tragwerksplanung grundsätzlich umsetzbar. Aufgrund der Notwendigkeit nach einer möglichst kostengünstigen Umsetzung wurde die Planung mit dem Ziel der Kostenoptimierung nochmals hinterfragt. Aufgrund langjähriger Erfahrung mit Holzbauten haben die Tragwerksplaner Änderungen in folgenden Bereichen angeregt:

- *Komplettes „Durchstecken“ des Kerns über die ganze Gebäudetiefe.* Dadurch entsteht eine klare lineare Schnittstelle zwischen Holz- und Stahlbetonbau. Das reduziert die Anzahl der konstruktiven und bauphysikalischen Details. Siehe dazu Abb. 31.
- *Verzicht auf Loggien.* Einspringende Ecken sind, insbesondere wenn sie nicht über die ganze Gebäudehöhe verlaufen, sowohl in konstruktiver Hinsicht wie auch aus bauphysikalischen Gründen ein enormer Kostentreiber. Siehe dazu Abb. 31.
- *Lineare Balkone.* Einsatz linearer Balkone anstelle der Loggien über Eck. Siehe dazu Abb. 31
- *Ersatz der inneren Stützenachse durch eine tragende Wand.* Die Wand kann im Vergleich zu Stützen in ihrer Stärke minimiert werden. Stützen würden durch nötigen Abbrand mehr

Platz beanspruchen und damit die Integration in die nichttragenden Trockenbauwände erschweren. (Siehe Abb. 29 Gebäudestruktur)

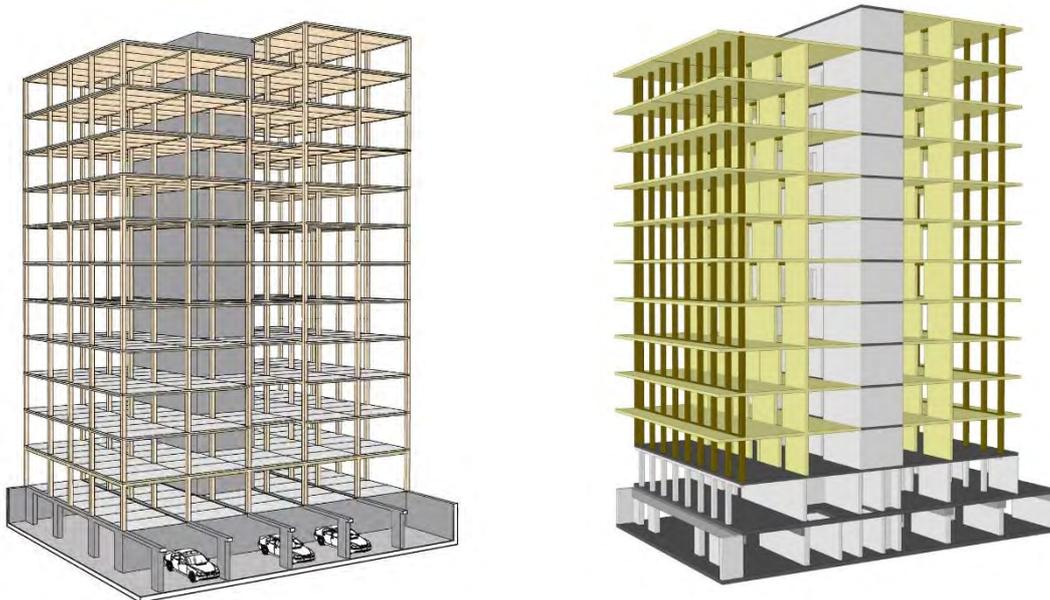


Abb. 30: ursprüngliche Planung (li.); abgeänderte Planung (re.)

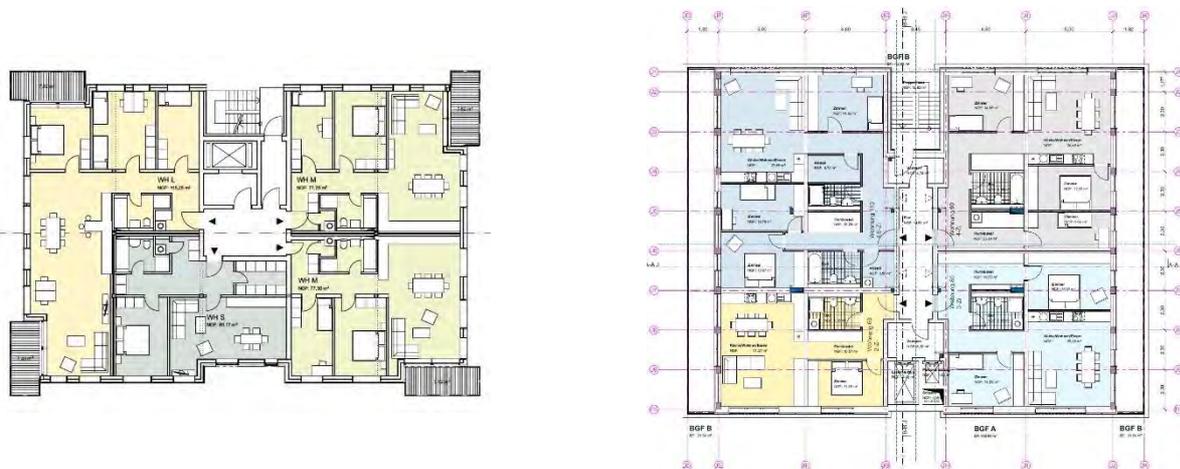


Abb. 31: ursprünglicher Grundriss (li.); abgeänderter Grundriss (re.)

6.3.2 Hybridbau vs. Holzbau

Zu Beginn der Planung wurde davon ausgegangen, dass das Ergebnis ein Holz-Hybrid-Gebäude sein würde. Durch den fachübergreifenden Dialog und durch die Zielsetzung, ein ökologisch optimiertes Hochhaus zu entwickeln, hat sich die realisierbare Option eröffnet, das Gebäude als reinen Holzbau auszulegen. Nur das Erdgeschoss und der Erschließungskern blieben Stahlbeton. Der Erschließungskern muss in Deutschland aufgrund seiner Funktion als Fluchttreppenhaus unter den heutigen Vorschriften zum Brandschutz im Sondertypus Hochhaus aus einem F90-A-Material errichtet sein.

6.3.2.1 Schnittstelle Holz/Beton/Trockenbau

Die Auswertung des Stands der Technik hat gezeigt, dass im deutschsprachigen Raum, wo ähnliche normative Rahmenbedingungen herrschen, mehrgeschossige Holzbauten oft als Hybridkonstruktionen ausgeführt werden. Zuerst wird darum hinterfragt, wo die Stärken der unterschiedlichen Baustoffe und Bauweisen liegen, und wie durch eine geschickte Kombination das Optimum für das Projekt gefunden werden kann.

6.3.2.2 Stahlbeton hat Vorteile

- bei erdberührten Bauteilen
- wenn Nichtbrennbarkeit ein Kriterium ist
- wenn Masse gefordert ist
- bei Lastumlagerungen (Abfangdecken)
- bei den Errichtungskosten

6.3.2.3 Holzbau hat Vorteile

- bei der ökologischen Bewertung
- bei optischen und haptischen Qualitäten
- bezüglich der Bauzeit
- bezüglich des Gewichts
- bei Bauteilen mit Anforderungen an den Wärmeschutz

6.3.2.4 Trockenbau hat Vorteile

- bei den Kosten
- bei nichttragenden Bauteilen

Je nach Standpunkt des Betrachters werden die einzelnen Punkte natürlich unterschiedlich gewichtet. Beim vorliegenden Projekt werden das Unter-, das Erdgeschoss und der Kern mit der Vertikalerschließung aus Ort beton konstruiert, die restliche Tragstruktur aus Brettschichtholzstützen, Brettsperrholzwänden und Brettsperrholzdecken. Die Außenwände sind als nichttragende Brettsperrholzwände konzipiert. Alle nichttragenden Innenwände sind in der ökologisch optimierten Variante in Strohtrockenbauweise und sonst in konventioneller Trockenbauweise vorgesehen. Die primäre Tragstruktur ist somit maximal für den Einsatz nachwachsender Baustoffe ausgelegt.

6.3.3 Bauteile

Zu den Bauteilen muss an dieser Stelle nochmal betont werden, dass die WOODSCRAPER für ein konkretes Bauvorhaben auf einem Grundstück mit realen Anforderungen geplant wurden. Aus diesem Grund war eine Tiefgarage mit zu planen, welche jedoch in den vorliegenden Untersuchungen keine weitere Erwähnung finden wird.

6.3.3.1 Untergeschoss / Tiefgarage

Stahlbeton ist derzeit die einzige Option, statisch belastete und erdberührte Bauteile mit bauaufsichtlicher Zulassung herzustellen. Stahlbeton genügt auch der Anforderung der Nichtbrennbarkeit. Die Lastumlagerung der Stützen in den Obergeschossen über der Durchfahrt kann auf einfache Weise und mit minimaler Bauhöhe gewährleistet werden.

6.3.3.2 Erdgeschoss

Die Materialisierung des Erdgeschosses in Stahlbeton erfolgt aus Gründen des Brandschutzes (Eingangsbereich, Fahrradraum, Müllraum), des Schallschutzes (Café) und der Robustheit (Fahrradraum, Müllraum).

6.3.3.3 Kern

Neben der Vorgabe des Brandschutzes, den Erschließungskern in F90-A-Materialien herzustellen, den Kriterien Schallschutz und Robustheit, sind es beim Kern auch wirtschaftliche Überlegungen, welche eine Umsetzung in Stahlbeton als vorteilhaft erscheinen lassen. Ein Kern aus Holz wäre nur in vergleichsweise aufwändiger mehrschaliger, gekapselter Bauweise technisch möglich. Ein Stahlbetonkern lässt sich zudem ohne großen Mehraufwand in das UG einspannen und sorgt damit für die Aussteifung der Tragstruktur.

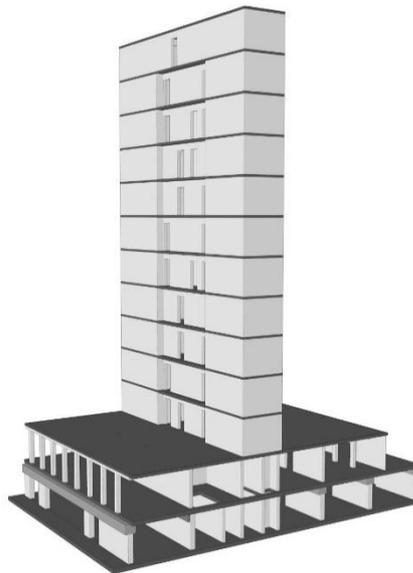


Abb. 32: Erschließungskern

6.3.3.4 Geschossdecken

Es wurden viele ausgeführte Geschossdecken gegenübergestellt und bewertet. Siehe dazu Abb. 32 und 33. Bis zu einer Spannweite von ca. 5 m sind reine Holzdecken mit einer Beschwerung als Schallschutzmaßnahme gegenüber einer Holz-Beton-Verbund-(HBV)-Lösung konkurrenzfähig. Erst bei größeren Spannweiten ist die Entscheidung zugunsten von HBV eindeutig, da die besonderen Eigenheiten der Baustoffe im Verbund effizient ausgereizt werden können.

HBV-Decken stellen in der Regel, bis auf die vorelementierten und geschraubten Lösungen, einen Materialverbund dar und sind aus diesem Grund nicht besonders gut für eine sortenreine Weiterverwendung der Rohstoffe geeignet. Wegen des Betonanteils der HBV-Decken verbessert sich die Ökobilanz in Abhängigkeit von der Dimensionierung der Decke. Überschlägig lässt sich jedoch sagen, dass eine HBV-Decke die Ökobilanz gegenüber konventionellen Stahlbetondecken etwa um ein Drittel verbessert. Bei reinen Holzdecken sind es etwa 90 %.

Um die für die Errichtung benötigte graue Energie zu minimieren und eine Ausreizung der Grundflächenzahl (GFZ) möglich zu machen, hat die reine Holzlösung für dieses Projekt den Vorzug erhalten. Beträge die Spannweite ca. 7 bis 8 m ohne Zwischenunterstützung, dann wäre aus Kostengründen eindeutig die HBV-Decke zu bevorzugen.

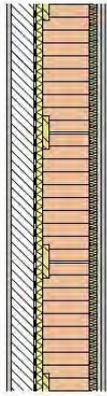
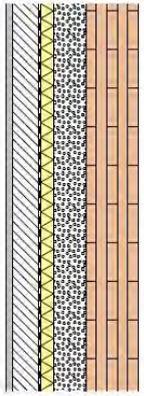
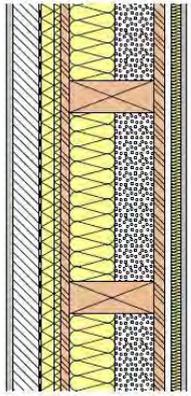
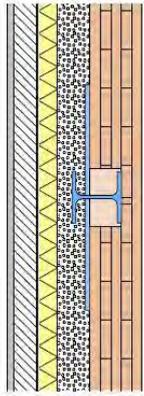
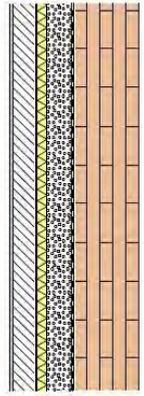
Projekt	Architekt	Deckensystem	Brand	Deckenaufbau
01 Speicher Alterszentrum 2005	Affolter und Kempfer CH-St. Gallen	Brettschichtholzdecke mit Verkleidung	REI60	 <p>15 mm Bodenbelag 70 mm Estrich PE-Folie 22 mm Trittschalldämmung 140 mm Brettschichtboiselenen, b = 400 mm 25 mm Dämmung 25 mm Gipskartonplatten abgehängt mit Federbügel 207 mm Gesamtdicke Δ 290 kg/m²</p>
02/03 St. Gallen Roelli 2012	Dietrich Untertrifaller Stäheli Architekten CH-St. Gallen	Brettspertholzdecke mit Schüttung	REI30	 <p>20 mm Bodenbelag 80 mm Estrich mit FBH PE-Folie 40 mm Trittschalldämmung 100 mm Schüttung 160 mm Brettspertholz 80 mm Holztaum 30 mm Mineralwolle 15 mm Gipskartonplatte 325 mm Gesamtdicke Δ 440 kg/m²</p>
04 Suurstoffi Rotkreuz 2014	Müller Sigrist Architekten AG CH - Zürich	Hohlkastendecke mit Schüttung	REI30	 <p>20 mm Bodenbelag 80 mm Estrich mit FBH PE-Folie 40 mm Trittschalldämmung 27 mm Dreischichtplatte Steinwolle 140 mm Rippe C24 100/260 Schüttung 120 mm 33 mm Furnierschichtholz 20 mm Holztaum 15 mm Mineralwolle 15 mm Gipskartonplatte 325 mm Gesamtdicke Δ 420 kg/m²</p>
05 Jenbach Neue Heimat Tirol 2011	Müller Sigrist Architekten AG CH - Zürich	Brettspertholzdecke mit Schüttung	REI60	 <p>20 mm Bodenbelag 70 mm Estrich PE-Folie 60 mm Trittschalldämmung 100 mm Schüttung 160 mm Brettspertholz 410 mm Gesamtdicke Δ 405 kg/m²</p>
05 Jenbach Neue Heimat Tirol 2011	Hermann Kaufmann ZT GmbH A-Schwarzach	Brettspertholzdecke mit Schüttung	REI60	 <p>10 mm Bodenbelag 70 mm Estrich PE-Folie 30 mm Trittschalldämmung 80 mm Schüttung 80 mm Pflasterziegel 200 mm Brettspertholz 390 mm Gesamtdicke Δ 385 kg/m²</p>

Abb. 33: Verschiedene Deckensysteme, Teil 1

Projekt	Architekt	Deckensystem	Brand	Deckenaufbau
06 München-Sendling GWG 2012	Kaufmann.Lichtblau.Architekten D-München	Brettsperholzdecke mit Schüttung	REI60	<p>10 mm Bodenbelag 50 mm Estrich 40 mm Trittschalldämmung 50 mm Schutzschicht 200 mm Brettsperholz Gesamtdicke $\hat{=}$ 350 mm Gesamtdicke $\hat{=}$ 295 kg/m²</p>
07/08 Wien Paulasgasse 2015	Riepl Kaufmann Bammer Architektur A-Wien	Brettsperholzdecke mit Schüttung	REI60	<p>10 mm Bodenbelag 60 mm Estrich 30 mm PE-Folie 30 mm Trittschalldämmung 50 mm Schutzschicht 200 mm Brettsperholz Gesamtdicke $\hat{=}$ 370 mm Gesamtdicke $\hat{=}$ 320 kg/m²</p>
09 Altusried Postresidenz 2017	F64 Architekten D-Kempten	HBV-Decke	REI60	<p>10 mm Bodenbelag 60 mm Estrich 30 mm PE-Folie 30 mm Trittschalldämmung 50 mm Schutzschicht 80 mm Stahlbeton 140 mm Brettsperholz Gesamtdicke $\hat{=}$ 370 mm Gesamtdicke $\hat{=}$ 485 kg/m²</p>
10 München Spengelhof 2017	Hirner & Riehl Architekten D-München	HBV-Decke	REI60	<p>20 mm Bodenbelag 70 mm Estrich mit FBH 3 mm Lochplatte 30 mm Trittschalldämmung 120 mm Abdichtung 180 mm Stahlbeton 180 mm Brettsperdecke Gesamtdicke $\hat{=}$ 408 mm Gesamtdicke $\hat{=}$ 660 kg/m²</p>
		HBV-Decke	REI60	<p>10 mm Bodenbelag 60 mm Estrich 30 mm Trittschalldämmung 30 mm Ausgleichsschüttung 100 mm PE-Folie 180 mm Stahlbeton 180 mm Brettsperholz Gesamtdicke $\hat{=}$ 410 mm Gesamtdicke $\hat{=}$ 540 kg/m²</p>

Abb. 34: Verschiedene Deckensysteme, Teil 2

6.3.3.5 Fassadenstützen

An der Außenfassade sind einerseits eine hohe Transparenz und andererseits eine möglichst große Flexibilität in Bezug auf die Anordnung der Fenster gewünscht. Die Auflösung der Wand in Stützen zur vertikalen Lastabtragung und in nichttragende Holzrahmenelemente als Gebäudehülle ist darum naheliegend. Holzstützen sind bezüglich Tragfähigkeit und Kosten vorteilhaft und sind zudem ein wichtiges identitätsstiftendes Element für den Entwurf.

6.3.3.6 Tragende Innenwand

Die Tiefe des Baukörpers von der Fassade zum Kern mit rund 10 m erfordert eine Zwischenunterstützung. Im Gegensatz zur Fassade, wo eine große Transparenz und Flexibilität in Bezug auf Öffnungen gefordert ist, entspricht die Mittelachse in weiten Teilen der Raumabgrenzung. Eine tragende Holzwand ist deshalb naheliegend, denn sie kann auch bei hohen Brandanforderungen relativ schmal ausgeführt werden. Stützen, wie an der Fassade, wurden aus folgenden Gründen verworfen: Sie wären dicker, führen bei flächenbündiger Ausfachung zu einem hohen Verlust an Wohnfläche und erschweren die Möblierung sowie das Einbauen von Trennwänden.

6.3.3.7 Nichttragende Innenwand

Als nichttragende Innenwände werden Trockenbauwände vorgeschlagen. Die Praxis zeigt, dass Wände aus Metallständern und Gipsplatten ein unschlagbares Preis-Leistungs-Verhältnis aufweisen. Im Fall der ökologisch optimierten Variante wird die konventionelle Trockenbauweise durch Strohtrockenbauweise ersetzt. Sie wirkt sich bei gleicher Stabilität und besserem Schallschutz sehr positiv auf das Raumklima und die Ökobilanz des Gebäudes aus. Eine sortenreine Demontierbarkeit und anschließende Kompostierung ist einfach zu gewährleisten.

6.3.3.8 Balkone

Zur Ausbildung der Balkone kragen die Deckenelemente über die lastabtragende Außenwand aus. Um die Konstruktion vor Feuchtigkeit von außen zu schützen, muss sie von oben gegen eindringendes Wasser komplett abgedichtet werden. Zudem muss an den Elementfugen spezielles Augenmerk auf die Luftdichtigkeit gelegt werden, um mögliche Feuchtschäden aus Konvektion zu vermeiden (siehe Detail zur Verhinderung von Tauwasserbildung). Eine einfache Alternative wäre das Vorstellen einer selbsttragenden Stahlkonstruktion, die mittels punktuellen Halterungen über den Hauptbaukörper ausgesteift werden könnte. Aus Sicht des Brandschutzes wird eine solche Stahlkonstruktion jedoch ausgeschlossen. Eine Stahlbetonkonstruktion wird hier aus gestalterischen sowie ökologischen Gründen ausgeschlossen.

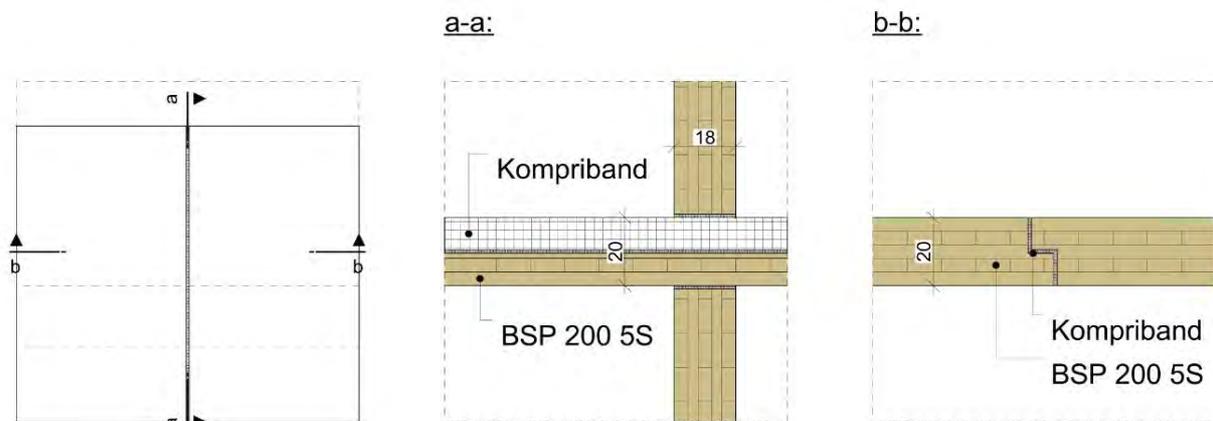


Abb. 35: Detail zur Verhinderung von Tauwasserbildung

6.3.3.9 Detailausbildung

Aus statisch-konstruktiver Sicht sind vor allem die Durchleitung der Vertikallasten der Stützen und Wände an der Geschossdecke und der Anschluss der Decke an den Kern kritisch und relevant für die Baukosten. Es wurde danach getrachtet, Querpressungen im Holz zu vermeiden und den Einsatz von Stahlteilen zu minimieren. Die entsprechenden Details sind schematisch den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen.

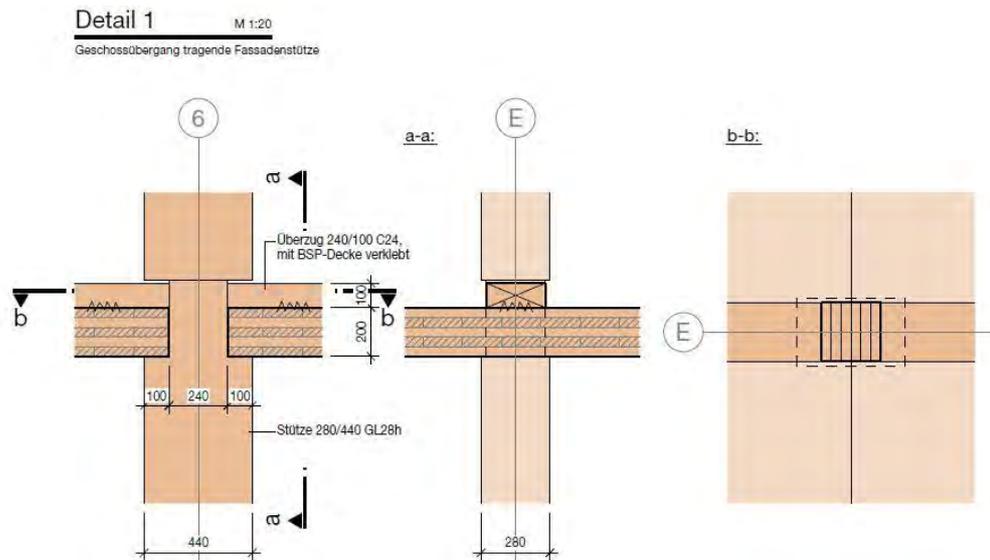


Abb. 36: Geschossübergang tragende Fassadenstütze

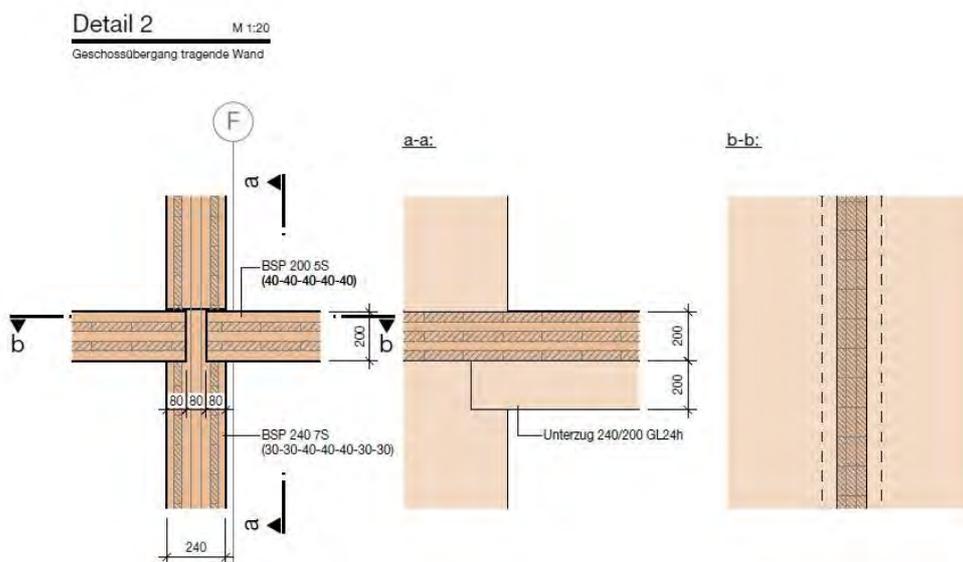


Abb. 37: Geschossübergang tragende Wand

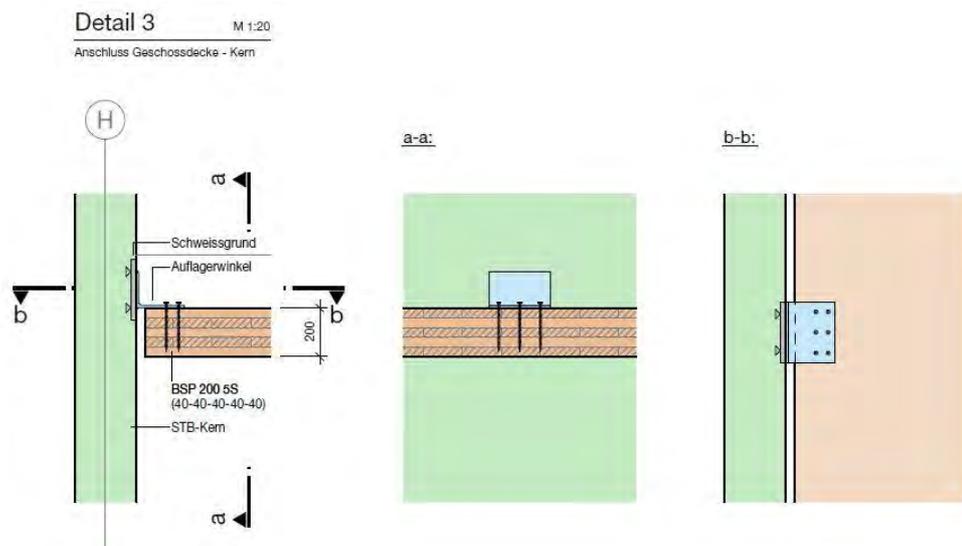


Abb. 38: Anschluss Geschossdecke-Kern

6.4 Versorgungstechnik

Die gesamte Gebäudetechnik wurde im Hinblick auf Einsparung von Investitions- und Betriebskosten entwickelt. Durch Anhebung der Standards im Bereich von Komfort, Schallschutz und Energieeinsparung im Betrieb hat sich in den letzten Jahrzehnten ein Trend zu immer mehr und komplexerer Gebäudetechnik entwickelt. Insbesondere im Bereich des Typus Hochhaus ist zudem durch die Vorschriften ein sehr hohes Maß an technischer Ausstattung erforderlich. Aus diesem Grund war es Teil der hier dargelegten Untersuchung, zu prüfen, welche Bereiche der Gebäudetechnik optimiert oder eingespart werden können. Dies erfolgte jeweils unter Berücksichtigung von Funktionalität, Investitionskosten, Betriebskosten, enthaltener grauer Energie sowie Energieverbrauch. Folgende technische Bestandteile waren hierbei Schwerpunkt der Untersuchungen:

- Heizung
- Sanitär
- Lüftung
- Elektro

6.4.1 Grundlagen der EnEV-Berechnung nach DIN V 18599

6.4.1.1 Energiebilanzierung des Gebäudes

Mithilfe der Energiebilanzierung nach DIN V 18599 kann der Energiebedarf eines Gebäudes berechnet werden, wobei dieser nichts über den tatsächlichen Energieverbrauch des Gebäudes aussagen kann, da dieser stark nutzerabhängig ist. In der DIN V 18599 wird der Energiebedarf nach Normbedingungen berechnet, um verschiedene Gebäude miteinander vergleichen zu können.

Wie unten dargestellt, beinhaltet eine Energiebilanz des Gebäudes die solaren und internen Gewinne wie Abwärme von Gerätschaften oder Personen.

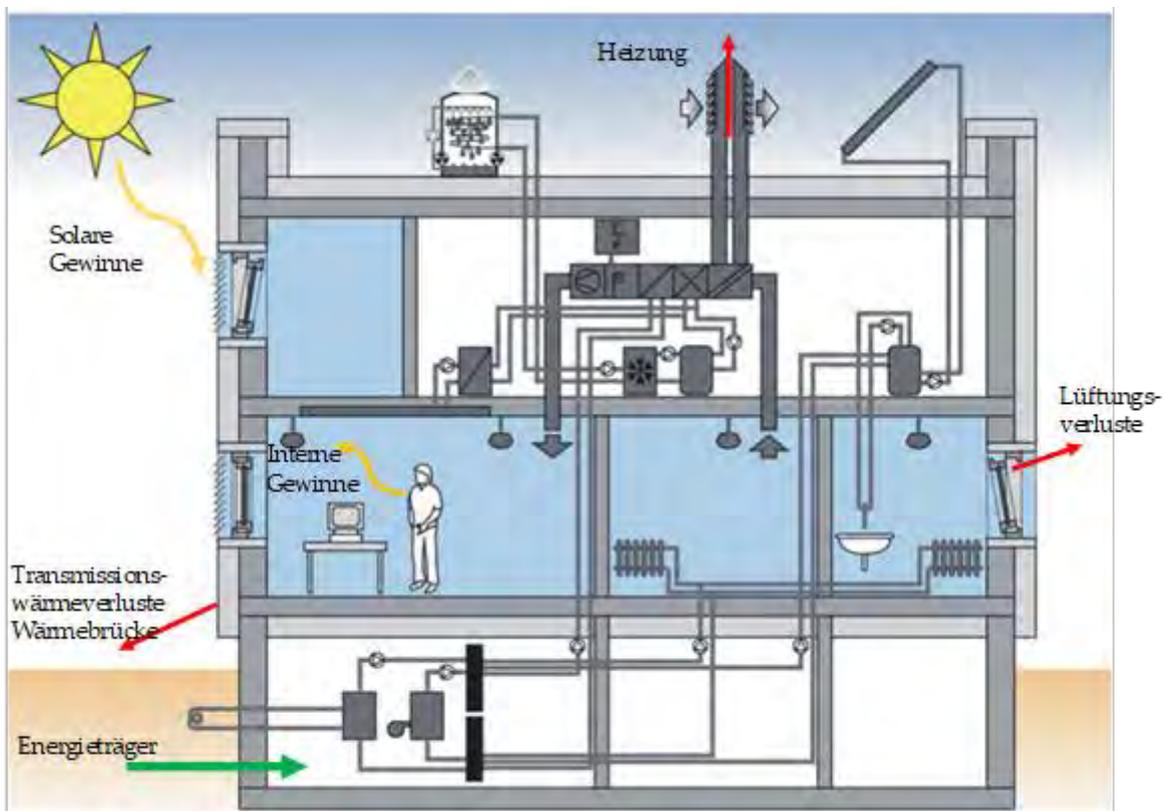


Abb. 39: Energiebilanzierung nach DIN V 18599, Quelle: DIN V 18599

Des Weiteren werden Verluste, welche zum Beispiel durch Undichtigkeiten oder Lüftung verursacht werden, beachtet. Die Bilanz aus den Gewinnen und Verlusten ergibt den normierten Bedarf an Energie.

Der Energiebedarf des Gebäudes kann in Nutz-, End- und Primärenergie unterschieden werden. Diese sind mit ihrer Transformation voneinander abhängig. Das heißt, dass die Primärenergie in Endenergie oder Nutzenergie umgesetzt werden kann. Die Endenergie wiederum kann in Nutzenergie überführt werden. Diese Relation ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, in den weiteren Abschnitten werden die einzelnen Energieformen definiert.

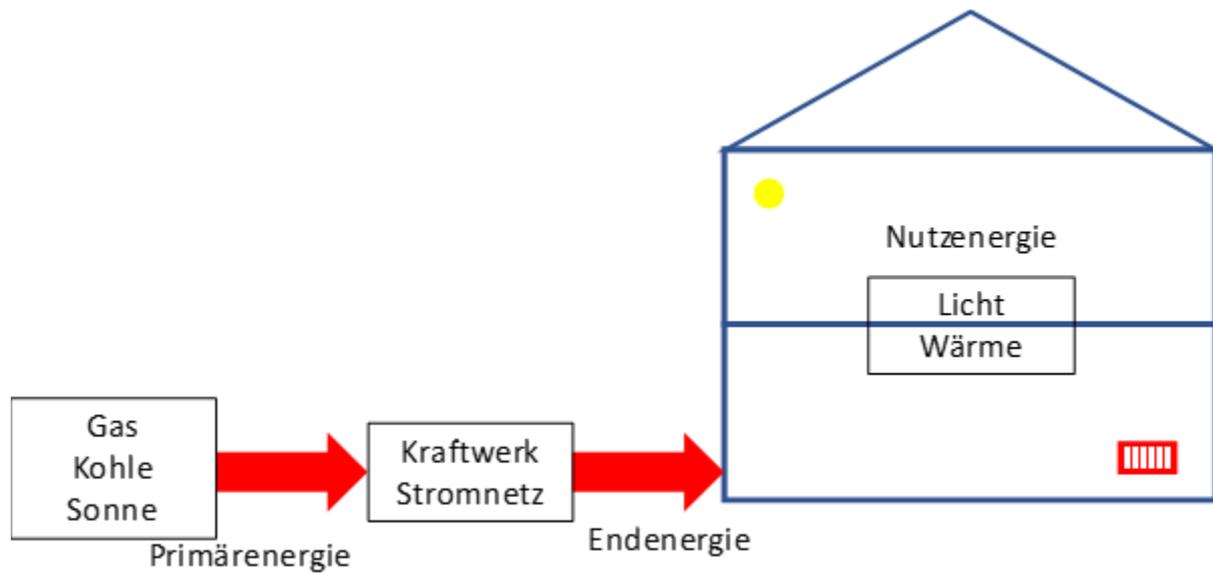


Abb. 40: Energiefluss zum Gebäude, Quelle: IFB Ingenieure

Die **Primärenergie** ist die ursprüngliche Energieform der Rohstoffe vor allen Weiterverarbeitungsprozessen. Zu den Primärenergieträgern zählen zum einen fossile Rohstoffe wie Rohbraunkohle, Erdöl und Erdgas. Auch regenerative Energieformen wie Wind, Wasser und Sonne werden als Primärenergie bezeichnet. Die Primärenergie ist nicht direkt nutzbar und muss zunächst aufbereitet werden, beispielsweise durch Umwandlung in Strom, Wärme oder Kraftstoff. Jeder Umwandlungsprozess ist mit Verlusten behaftet, welche durch den Anlagenwirkungsgrad beschrieben werden.

Unter **Endenergie** wird die umgewandelte Energie in Form von Strom, Wärme oder Kraftstoff verstanden. Hier werden die Umwandlungsverluste und der Hilfsenergiebedarf aller Aggregate in Kraftwerken mitberücksichtigt. Diese Energieform wird dem Verbraucher zur Verfügung gestellt, beispielsweise über einen Fernwärmeanschluss, einen Stromanschluss, in Form von Benzin an der Tankstelle oder als Heizöl. Von der Endenergie kann jedoch wiederum nur ein Anteil genutzt werden, die sogenannte **Nutzenergie**. Ein Beispiel hierfür ist eine Lampe. Die gewünschte Nutzenergieform ist das Licht. Die Lampe wird mit Strom betrieben, weist jedoch einen Wirkungsgrad auf. Es treten unweigerlich Leitungs- und Wärmeverluste bei der Umwandlung von Strom in Licht auf, welche im Wirkungsgrad des jeweiligen Geräts beschrieben werden. Die Nutzenergie berechnet sich folglich aus der Endenergie abzüglich der Verluste beim Verbraucher.

6.4.1.2 Bewertung des Gebäudes nach EnEV

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) bewertet Gebäude nach den spezifischen Transmissionswärmeverlusten und nach dem spezifischen Primärenergiebedarf. Die Transmissionswärmeverluste beschreiben die Wärmeverluste der thermischen Hülle, die die beheizten/warmen Räume beinhaltet. Der Primärenergiebedarf beschreibt die benötigte Menge an fossilen Primärenergieträgern zur Belüftung und Heizung bei Gebäudenutzung und die

Warmwassermenge der Nutzer. Die Rechenregeln der EnEV beinhalten die Anwendung von Durchschnittswerten, die eventuell den einzelnen eingesetzten Aggregaten nicht gerecht werden.

Im Fall der WOODSCRAPER wurde als Ziel vereinbart, dass zur Planung die EnEV in jedem Fall eingehalten werden soll. Des Weiteren soll der Energiestandard eines KfW-40-Hauses möglichst erreicht werden. Ein KfW-40-Wohngebäude ist ein Gebäude, welches die Anforderungen der EnEV um 60 % unterschreitet. Mit folgenden Grenzwerten der EnEV können, wie in der Tabelle beschrieben, die folgenden Stufen erreicht werden.

Tabelle 5 KfW-Werte

	EnEV- Neubau	KfW 70	KfW 50	KfW 40
Spez. Transmissionswärmeverluste H'_T [W/(m ² K)]	0,500	0,425	0,350	0,250
Spez. Primärenergiebedarf q_p [kWh/(m ² a)]	45,14	38,37	31,60	22,57

Neben der EnEV muss bei einem Neubau das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) eingehalten werden. In diesem Gesetz wird der notwendige Anteil an erneuerbaren Energien in der Wärmeversorgung festgelegt. Zur Vereinfachung der vorliegenden Untersuchungen wurde in der weiteren energetischen Berechnung nur das Gebäude J betrachtet.

6.4.1.3 Transmissionswärmeverluste

Der spezifischen Transmissionswärmeverluste (H'_T) werden mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) wie folgt berechnet:

$$H'_T = \frac{H_T}{A} = \frac{\sum(F_{x,i} \cdot U_i \cdot A_i) + \Delta U_{WB} \cdot A}{A}$$

Wobei

H_T	Transmissionswärmeverlust
A	wärmeübertragende Umfassungsfläche
F_x	Temperatur-Korrekturfaktor
U	Wärmedurchgangskoeffizienten
A_i	Bauteilfläche
ΔU_{WB}	Wärmebrückenzuschlag

ist.

Der mittlere Transmissionswärmeverlust sollte für ein KfW-40-Gebäude maximal 55 % des Referenzgebäudes sein. Dieser wird mit folgenden Dämmstärken und Bedingungen erfüllt, wobei die Wärmeleitgruppe der Dämmung 0,035 W/(mK) beträgt:

Fenster:	$U_w \leq 0,7$ W/(m ² K)
Türen:	$U_D \leq 1,1$ W/(m ² K)
Außenwände:	220 mm Dämmung (an Holzstützen 120 mm Dämmung)
Dach:	200 mm Dämmung
Kellerwand zu Erdreich:	160 mm Dämmung
Innenwand zu unbeheizt:	160 mm Dämmung
Kellerdecke:	180 mm Dämmung

Eine weitere Verringerung der Transmission ist nicht sinnvoll, da die Lüftungswärmeverluste (Fensterlüftung) unverändert hoch bleiben. Um diese Verluste zu minimieren, wird eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung nötig. Des Weiteren haben wir den Wärmebrückenzuschlag nach Erfahrungswerten von energieeffizienten Bauen auf $0,032 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ reduziert (Nachweis jeder einzelnen Wärmebrücke).

6.4.1.4 Wärmebrücken

Bei dem heutigen, durch die aktuelle Energieeinsparverordnung (Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden) bedingten, hohen Dämmstandard von Neubauten bzw. Anbauten oder Erweiterungen, wirken sich Wärmebrücken prozentual stark auf den Gesamt-Transmissionswärmeverlust der Gebäudehülle aus und werden deshalb auch im Nachweis gesondert berücksichtigt.

Aus diesen Gründen sind Wärmebrücken stets derart zu dämmen, dass die Transmissionswärmeverluste so gering wie möglich gehalten werden. Prinzipiell werden Wärmebrücken gemäß Beiblatt 2 zu DIN 4108 gedämmt. Folgende Bauteile/Wärmebrücken sollten besonders betrachtet werden:

Attika des Flachdachs

Die Wärmedämmung des Flachdachs soll inklusive Dampfsperre und Abdichtung an der Innenseite der Attika hochgeführt und auch auf der Oberseite der Attika angebracht werden.

Fundamente

Alle Fundamente müssen außenseitig gedämmt werden, bis mindestens 2 m unter oberkannte Gelände nach unten und mit demselben Dämmstoff, den auch die Außenwände gegen Erdreich erhalten.

Unbeheizte Räume im UG

Die Außenwände der unbeheizten Räume im UG (Keller und Tiefgarage) neben und unter beheizten Räumen müssen außenseitig bis $\geq 800 \text{ mm}$ über die Dämmebene hinaus gedämmt werden.

Auskragende Wandscheiben

Die auskragenden Wandscheiben in Massivbauweise sollten in Fassadenebene durch einen „Iso-Korb“ thermisch entkoppelt werden oder sind auf einer Länge von $\geq 800 \text{ mm}$ über die Dämmebene hinaus mitzudämmen.

Aufgehende Wände

Die massive Wandscheibe auf dem Flachdach, DG und Parkebenen über darunterliegenden, ungedämmten Stützen/Wänden sollten am Fußpunkt mit wärmedämmenden Elementen thermisch entkoppelt werden (je nach statischer Belastung z. B. Fabrikat Foamglas Perinsul oder Fabrikat Schöck Isomur/Novomur).

Balkone und Attiken

Auskragende, massive Deckenplatten sollten vom EG bis DG in Fassadenebene durch einen „Iso-Korb“, z. B. Firma Schöck, thermisch getrennt werden. Sofern an den Terrassen im DG massive Attiken vorhanden sind, so sind diese ebenfalls mit Iso-Körben thermisch zu trennen. Alternativ ist die Dämmung der Außenwand bis zur Oberkante zu führen und die Attika innenseitig zu dämmen. Die massiven Holzdecken können auskragen und benötigen keine aufwändigen Iso-Körbe. Zur Gewährleistung der Luftdichtigkeit sollte das Detail aus Abb. 34 „Detail zur Verhinderung von Tauwasserbildung“ an den Stößen berücksichtigt werden.

Wände und Stahlbetonstützen in der Tiefgarage

In der Tiefgarage sind sämtliche Unterzüge, Innen- und Außenwände unterhalb des beheizten Bereichs zu dämmen.

Auskragende Trenndecke UG/EG

In Bereichen, in denen das UG über die Dämmebene des EGs hinausragt (z. B. Bereich Nordwest, Eingangsbereich Süd etc.), ist oberseitig eine druckfeste Wärmedämmung an der Außenwand entlang und unterseitig mit der Länge der Tiefgarage eine Dämmung vorzusehen.

Fensteranschluss

Sofern die Fenster außen bündig mit der Außenwanddämmung eingebaut werden, muss der Blendrahmen ≥ 60 mm mit der Wärmedämmung der Außenwand überdämmt werden. Bei weiter innen liegenden Fenstern ist die Wärmedämmung der Außenwand in die Laibungen hineinzuziehen. Die Dicke kann hier auf $d = 30$ mm reduziert werden.

Stahlkonstruktionen

An der Fassade befestigte Stahlkonstruktionen wie z. B. Balkone, Sonnenschutzvorrichtungen etc. müssen thermisch getrennt angebracht werden.

Rollladenkästen

Bei Einbau- und Aufsatzrollladenkästen sind Produkte zu verwenden, die den Anforderungen des Beiblattes 2 zu DIN 4108 genügen (Wärmebrückenverlustkoeffizient $\leq 0,29$ W/mK). Auch ist auf eine luftdichte Ausführung im Bereich von Deckeln (umlaufende Dichtungen) und Durchführungen (Bürstendichtung o. ä.) sowie auf wärmegeämmte Seiten- und Auflagerteile Wert zu legen.

Vordächer / Werbetafeln

Beim Anbringen von Anbauten an die Fassade sind diese thermisch entkoppelt zu befestigen, z. B. mit wärmedämmenden, druckfesten Unterlegscheiben (z. B. THERMOSTOP der Firma HG Schlaugat) oder mit wärmegeämmten Konsolankern, z. B. Fabrikat Isofach.

6.4.1.5 Primärenergiebedarf

Der spezifische Primärenergiebedarf (q_p) wird mittels Multiplikation der einzelnen Primärenergiefaktoren und der Endenergie je Energieträger berechnet. Der Primärenergiebedarf berechnet sich wie folgt:

$$q_p = \frac{Q_p}{A_N} = \frac{\sum \left(Q_{f,j} \cdot \frac{f_{p,j}}{f_{HS/HL,j}} \right)}{A_N}$$

mit

Q_p	heizwertbezogener Primärenergiebedarf
A_N	beheizte Nutzfläche
Q_f	brennwertbezogene Endenergie je Energieträger
f_p	Primärenergiefaktor
$f_{HS/HL}$	Umrechnungsfaktor der Endenergie

Die dazugehörigen, aktuellen Primärenergiefaktoren nach DIN V 18599 und EnEV 2014 sind wie folgt:

Tabelle 6 Energieträger mit Primärenergiefaktor

Energieträger		Primärenergiefaktor f_p	
		insgesamt	Nicht erneuerb. Anteil
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas E	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Strom	Allgemeiner Strommix	2,8	1,8
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8
Nah-/Fernwärme aus KWK	Fossiler Brennstoff	0,7	0,7
	Erneuerbarer Brennstoff	0,7	0,0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	Fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	Erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1
Umweltenergie	Solarenergie	1,0	0,0
	Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
	Umgebungswärme	1,0	0,0
	Umgebungskälte	1,0	0,0
Abwärme innerhalb des Gebäudes	Aus Prozessen	1,0	0,0

Die Primärenergiefaktoren verweisen auf den Primärenergiebedarf, also auf die Menge der fossilen Ressourcennutzung der jeweiligen Energie. Je geringer dieser ist, desto weniger Energie bzw. fossile Energie wird benötigt.

6.4.1.6 Sommerlicher Wärmeschutz

Um eine Überhitzung der Räume im Sommer zu vermeiden, muss ein Nachweis für den sommerlichen Wärmeschutz in den kritischen Räumen geführt werden. Bei diesem Nachweis werden die Klimaregion, die interne Wärmespeicherkapazität der Bauteile, die Fenstergröße, die Raumgröße und weitere Parameter beachtet. Mit diesen Parametern werden die Sonneneintragswerte in den Raum berechnet und dem zulässigen Sonneneintragswert nach Tabelle 8 in der DIN 4108-2:2013-02 gegenübergestellt. Neben diesem vereinfachten Verfahren gibt es auch die Möglichkeit, eine Simulation durchzuführen. Diese kann bei Verschattungen durch andere bzw. eigene Gebäude genauere Ergebnisse erzielen und kann zusätzliche Maßnahmen der Verschattung erübrigen. Beim WOODSCRAPER wird der sommerliche Wärmeschutz mit dem vereinfachten Verfahren in allen Räumen mit folgenden Fenstern erreicht, wie es im Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz in der Anlage ersichtlich ist:

- Gesamtdurchlassgrad $g = 0,5$
- ohne Sonnenschutz

Die Ausnahme sind die Eckräume an der Süd-West und Süd-Ost Fassade. Hier wird der sommerliche Wärmeschutz mit einem außenliegenden Sonnenschutz, z. B. Jalousien, erreicht. Die auskragenden Balkone reichen nicht aus, um den sommerlichen Wärmeschutz in den Eckräumen zu erfüllen, da sich die Balkone nur auf der West- bzw. Ostseite befinden. In beiden Eckräumen ist der direkte Sonneneinfall zu hoch, um den sommerlichen Wärmeschutz zu erreichen. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die gesetzlichen Vorgaben zum sommerlichen Wärmeschutz seit 2013 deutlich verschärft haben. Eine thermische Simulation kann jedoch helfen, dynamische Effekte besser zu berücksichtigen (z. B. Verschattung durch Nachbargebäude, automatisierter Sonnenschutz etc.). Entwurfliche Lösungen sind hier im weiteren Projektverlauf zu entwickeln.

6.4.1.7 Energetische Berechnung mit dynamischem U-Wert

Der dynamische U-Wert lässt sich nicht in die EnEV-Berechnung für den winterlichen Wärmeschutz übertragen, da hier nur stationär gerechnet wird. Allerdings kann der sommerliche Wärmeschutz mithilfe einer thermodynamischen Simulation nachgewiesen werden (Vorteile gegenüber einfachen Tabellenverfahren).

6.5 Bewertung der Varianten

In diesem Kapitel werden acht verschiedene EnEV-Berechnungsvarianten betrachtet, genauer beschrieben und anschließend bewertet werden. Die entwickelten Varianten beziehen sich auf beide Gebäude, um tatsächlich gegebenen Synergieeffekte zu nutzen, und sind als Anlage diesem Bericht zu entnehmen.

Tabelle 7 Beschreibung der Varianten zum Energiekonzept

Varianten	Heizwärme	Warmwasser	Be- und Entlüftung	Weitere Anlagentechnik
Variante 1	IR-Decke (Strom)	Durchlauferhitzer	–	PV
Variante 2	IR-Decke (Strom)	Wärmepumpe dezentral (WRG Luft)	Abluft Bad/Küche WRG	PV, Solarthermie
Variante 3	IR-Decke (Strom)	Wärmepumpe zentral (WRG Luft) BHKW	Abluft Bad/Küche WRG	PV
Variante 4	BHKW Radiator	Wärmepumpe zentral (WRG Luft) BHKW	Abluft Bad/Küche WRG	–
Variante 5	Fußbodenheizung Solarthermie Wärmepumpe zentral (WRG Luft und Abwasser)	Wärmepumpe zentral (WRG Luft und Abwasser)	WRG Bad/Küche/Er-schließungs-kern	PV
Variante 6	Fußbodenheizung	Fernwärme	–	–
Variante 7	IR-Decke (Strom)	Durchlauferhitzer	Zentrale Lüftung WRG	PV
Variante 8	über Lüftung (zentral) mit Fernwärme elektrische Nachheizung	Fernwärme	Zentrale Lüftung WRG	PV

6.5.1 Variante 1

Bei Variante 1 wird ausschließlich auf elektrische Heiztechnik gesetzt, da durch die vorgegebenen hohen Dämmstandards der EnEV der Heizenergiebedarf für Gebäude drastisch reduziert wurde. Gebäude lassen sich durch diese Vorgabe mit wesentlich weniger Energie komfortabel nutzen.

Die im Kapitel IR-Deckenheizung beschriebenen Vorteile versprechen hier eine enorme Vereinfachung der Technik, Einsparung an Investitionskosten und leichte Demontierbarkeit mit nahezu wartungsfreiem Betrieb im Gebäude. In dieser Variante wird deshalb zum ersten Mal der Einsatz dieser strombasierten Heiztechnik in einem Wohnhochhaus untersucht.

Die einzelnen Räume werden dezentral mit einer Infrarot-Deckenheizung beheizt. Die Warmwasserversorgung erfolgt über dezentrale Durchlauferhitzer. Einen Teil des Antriebsstroms für beide Heizelemente liefert eine 400 m²-PV-Dachanlage ohne Stromspeicher. Eine lokale Stromspeichertechnologie im erforderlichen Maßstab ist derzeit am Markt nicht verfügbar. Der restliche Strombedarf wird über das öffentliche Netz gedeckt. Beide Gebäude sind zusätzlich aus Brandschutzgründen mit einem Diesel-Notstromaggregat ausgestattet.

Die Berechnung hat ergeben, dass mit der elektrischen Heizwärme- und Warmwassererzeugung der geforderte Jahresprimärenergiebedarf der EnEV nicht erreicht werden kann, da der Primärenergiefaktor im deutschen Strommix mit 1,8 sehr hoch ist. Die Ursache dafür ist, dass ein zu hoher Anteil des Stroms im öffentlichen Netz immer noch aus nicht regenerativen Quellen stammt. Den Strom lokal über eine Photovoltaikanlage zu produzieren liegt nahe und macht grundsätzlich Sinn. Jedoch reicht aufgrund der Dichte der Bebauung die produzierte Menge elektrischer Energie nicht für die benötigte Wärmeenergie aus, um den Primärenergiebedarf der EnEV zu erreichen. Das liegt zum einen am hohen Strombedarf der Warmwassererzeugung durch reine Durchlauferhitzer und zum anderen daran, dass die Stromerzeugung und der Stromverbrauch sich jahreszeiten- und tageszeitenbedingt diametral gegenüberstehen. Da die Höchstströme der PV-Anlage in den Sommermonaten auftreten und der Strom in diesen Mengen nicht lokal gespeichert werden kann, kommt es zu einer zeitlichen Diskrepanz zwischen Stromerzeugung und Heizwärmebedarf. Die IR-Heizung wird aufgrund mangelnder Speichertechnologie unzureichend durch die PV-Anlage gespeist, was den Strombezug aus dem öffentlichen Netz in den Wintermonaten erhöht. Im Hinblick auf die CO₂-Bilanz und die Kosten für den Betrieb der Heizung ist die zugekaufte Strommenge maßgeblich.

Zur Überprüfung der beiden Aussagen wurde in der EnEV-Berechnung die PV-Anlage in mehreren Stufen vergrößert. Dies verbessert die Energiebilanz. Die Verbesserung ist jedoch „gedeckt“, da der Ertrag in der Heizperiode nicht hoch genug ist. Zudem kann die elektrische Energie der PV-Anlage nicht direkt in das EEWärmeG einbezogen werden. Grund hierfür ist, dass im Gesetz nur thermische Energie angerechnet werden kann. Das EEWärmeG kann jedoch durch die Ersatzmaßnahme „Energieeinsparung“ erfüllt werden. Dabei müssen der Transmissionswärmeverlust und der Primärenergiebedarf mindestens 15 % unter den Forderungen der aktuellen EnEV liegen. Indirekt ist PV-Strom damit anrechenbar, soweit dieser zur Erfüllung der genannten Forderung führt. Unter diesen Umständen hat diese Variante einen jährlichen Primärenergiebedarf von **66 kWh/m²**, womit die EnEV nicht erfüllt wird. Ebenfalls wird das EEWärmeG nicht erfüllt.

Trotz dieses schlechten Ergebnisses sprechen die vielen Vorteile dieser angestrebten Lösung für sich. Deshalb wurde für die WOODSCRAPER weiter nach einer ökologisch zukunftsweisenden und umsetzbaren Lösung gesucht, um den vielversprechenden Ansatz realisierbar zu machen.

Zwei Ansätze wurden dafür schwerpunktmäßig weiter untersucht:

1. Einbilanzierung verbrauchsmindernder Eigenschaften von Strahlungswärme in Kombination mit Holzoberflächen (dynamischer U-Wert)
2. Contracting zur Belieferung des Gebäudes mit Strom aus erneuerbaren Quellen

Einbilanzierung

Es hat sich herausgestellt, dass die Behaglichkeitstemperatur, welche bei Strahlungsheizungen wesentlich geringere Lufttemperatur erfordert und damit zwangsläufig zu niedrigerem Wärmebedarf führt, über die EnEV nicht nachgewiesen werden kann. Weiterhin gibt es keine Nachheizeffekte, da keine Speichermasse der Heizung vorhanden ist. Die IR-Deckenheizung ist damit das agilste Heizsystem überhaupt, mit den besten Reaktionszeiten und der geringsten Überwärmung.

Eine Überwärmung führt zum Öffnen der Fenster und Ablüften überschüssiger Wärmemengen, was den Energiebedarf steigert. Die verbrauchsmindernden Eigenschaften von Strahlungswärme aus Infrarotheizungen in Kombination mit Holzoberflächen sind unter Berücksichtigung des Dynamischen U-Wertes bei ausreichender Behaglichkeitstemperatur noch weiter quantifizierbar zu untersuchen. Ein Forschungsprojekt zu diesem Thema läuft derzeit an der Hochschule in Konstanz am Fachgebiet für Energieeffizientes Bauen von Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark.³⁷ Ein weiteres Projekt wird derzeit unter der Leitung von Michael Schaub am Hermann-Rietschel-Institut der TU-Berlin

³⁷ HTWG-Konstanz, Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark: <https://www.htwg-konstanz.de/forschung-und-transfer/institute-und-labore/energie/forschung/ir-bau/>

durchgeführt.³⁸ Erste Ergebnisse der Untersuchungen legen vorsichtig betrachtet einen verbrauchsmindernden Faktor von 0,7 bis 0,8 nahe, d. h., dass etwa 20 % bis 30 % weniger Energie benötigt wird, um die gleiche Behaglichkeitstemperatur zu erzielen. Falls sich in weitergehenden Untersuchungen bestätigen sollte, dass sich dieser Lösungsansatz durch Berücksichtigung dieser Faktoren ökologisch und wirtschaftlich als sinnvoll erweist, so besteht von Seiten des Gesetzgebers Handlungsbedarf, eine Anpassung der EnEV-Regularien vorzunehmen.

Contracting

Angeregt durch Regularien und Vertriebsmodelle, die heute bei Fernwärme üblich sind, wurde untersucht, ob es möglich ist, über Stromcontracting-Modelle eine intelligente Stromversorgung aus 100 % erneuerbarer Energie über den Lebenszyklus eines Gebäudes sicherzustellen. Hierzu wurden diverse Gespräche mit regenerativen Stromerzeugern geführt. Trotz des sehr großen Interesses an dieser Lösung stellte sich bald heraus, dass Regelungen der EnEV zufolge auch bei einem solchen Modell der Primärenergiefaktor aus dem deutschen Strommix mit 1,8 für der EnEV-Bilanzierung angesetzt werden muss, da der Strom über das öffentliche Netz verteilt wird und sich mit Strom aus nicht erneuerbaren Quellen vermischt. Um hierzu eine regelungstechnische Lösung zu finden, besteht nach Auskunft des BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) nur die Möglichkeit eine Ausnahme von der EnEV (Länderhoheit) zu beantragen. Dafür ist mit einer direkten Stromleitung von einem regenerativen Stromerzeuger zum Gebäude und mittels eines Stundennachweises zu belegen, dass das Gebäude zu jedem Zeitpunkt über das Jahr hinweg ausreichend mit erneuerbarem Strom versorgt wird. Eine solche Lösung lässt sich, wenn überhaupt, nur standortspezifisch umsetzen, eine intelligente Verteilung und Einbilanzierung regenerativ erzeugten Stroms über das öffentliche Netz ist damit unter den bestehenden Regelungen ausgeschlossen.

Weitere Argumente, die in diesem Zusammenhang gegen das Stromcontracting angeführt wurden, waren die freie Wahl des Anbieters, die durch dieses Modell verhindert würde. Betrachtet man heute übliche Regelungen zur Fernwärmeversorgung, so werden diese Bedenken relativiert. Sofern Fernwärme in einem Quartier anliegt, ist es heute häufig üblich, dass eine Anschlusspflicht für Gebäude besteht, oder dass interessante Wärme-Contracting-Modelle die Wärmeversorgung mit einem sehr niedrigen Primärenergiefaktor begünstigen. Für die Bildung des Primärenergiefaktors von Fernwärme ist derzeit nicht der eingesetzte Energieträger entscheidend, sondern dass Wärme als „Abfall“-Wärme zur Verfügung steht. Damit ist der geringe Primärenergiefaktor in der EnEV-Bilanz als Anreiz nicht an regenerative Quellen gekoppelt und birgt so die Gefahr, dass die hierdurch entstehende Infrastruktur Pfadabhängigkeiten erzeugt und eine spätere Umstellung auf regenerative Energiequellen erschwert.

6.5.2 Variante 2

In Variante 2 kommen ebenfalls Infrarot-Deckenheizungen als Wärmeverteiler zum Einsatz. In diesem Fall erfolgt jedoch die Warmwasserbereitung mit technisch etwas aufwändigeren, dezentralen Wärmepumpen, um den Stromverbrauch durch Nutzung von Umweltwärme zu reduzieren. Der Strom hierfür stammt wiederum aus 400 m² Photovoltaikmodulfläche auf dem Dach. Der restliche Strombedarf wird über das öffentliche Netz gedeckt. Beide Gebäude sind zusätzlich aus brandschutzrelevanten Gründen mit einem Diesel-Notstromaggregat ausgestattet. Küche und Bad erhalten dezentrale Abluftsysteme mit Wärmerückgewinnung zur Warmwasserbereitung und der Aufzugschacht Süd einen Solarkollektor, um den Erschließungskern zu temperieren. Geplant ist eine Warmwasserbereitung über Strom mit Wärmepumpe je Wohnung mit zentraler Abluftführung und Frischluftnachströmung über dezentrale Außenwanddurchlässe. Dies beinhaltet vom Konzept her eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit passiver Zuluft und

³⁸ TU Berlin, Fachgebiet Gebäude-Energie-Systeme, Michael Schaub: https://www.hri.tu-berlin.de/menu/research/research_projects/optemp/

aktiver Abluft, was sich positiv auf die Energiebilanz auswirkt. Eine Wärmepumpe über die Wohnungslüftungsanlage für die Warmwasserzeugung ist mit einem Speicher möglich. Bei dieser Variante wird der jährliche Primärenergiebedarf auf **48 kWh/m²** reduziert, wobei die EnEV knapp nicht erreicht wird und das EEWärmeG auch nicht erfüllt wird. Dies ist ebenso wie in Variante 1 bedingt durch den Primärenergiefaktor aus dem deutschen Stromnetz.

Die thermischen Kollektoren am Aufzugschacht für das Heizen des Erschließungskernes über die Be- und Entlüftungsanlage erweist sich hier als nicht sinnvoll, da in den Sommermonaten ein Wärmeüberschuss entsteht, der nicht für das Heizen der Lüftungsanlage verwendet werden kann. Des Weiteren ist in den Wintermonaten nicht genügend Sonnenenergie zum Heizen verfügbar.

In einer zusätzlichen Untersuchung wird in dieser Variante hypothetisch mit dem Primärenergiefaktor für Strom aus Photovoltaik gerechnet ($f_p = 0,7$). Diese Berechnung wäre das Ergebnis, wenn wie oben beschrieben, ein Stromcontracting über das öffentliche Netz umsetzbar wäre oder der Anteil regenerativ erzeugten Stroms im Netz deutlich höher wäre. Das EEWärmeG und die EnEV würden eingehalten werden und ein Effizienzhaus 40 entstehen. Der Jahres-Primärenergiebedarf für das Hochhaus würde demnach bei **20 kWh/m²** liegen. Der Nachweis einer dauerhaften Stromlieferung aus regenerativen Quellen mit einem Primärenergiefaktor von $f_p = 0,7$ müsste hier in die EnEV-Berechnung mit einfließen.

6.5.3 Variante 3

Die Variante 3 besteht aus Infrarot-Deckenheizungen in Verbindung mit einer zentralen Warmwasserbereitung mittels einer Wärmepumpe. Einen Teil des Stroms für die Heizung, die Beleuchtung und die Geräte stellt in diesem Szenario ein biogasbefeuertes BHKW bereit, wobei die Restwärme ebenfalls zur Warmwassererwärmung und zur Beheizung der Nachbargebäude eingesetzt wird. Eine zentrale Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung ist im Erschließungskern und den Bädern und Küchen installiert.

Die Nutzung eines BHKW zur Stromerzeugung für eine Heizung mit IR-Heizelementen bzw. Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe macht aus konzeptioneller Sicht wenig Sinn. Wird im Gebäude thermische Energie nachgefragt, benötigen beide Wärmeerzeuger elektrische Antriebsenergie. Wird diese nicht durch die PV-Anlage bzw. einen Stromspeicher geliefert (im Winter voraussichtlich häufig der Fall), reagiert das BHKW. Jedoch ist dessen Stromerzeugung stets mit der Auskopplung von thermischer Energie verbunden. Läuft also das BHKW, liegt ein Wärmeüberschuss vor. Der Wärmetransport über ein Nahwärmenetz an die Nachbargebäude ist mit thermischen Verlusten verbunden. Außerdem bedeutet jeder An- und Abfahrvorgang des BHKW einen Betrieb außerhalb des Auslegungsoptimums (Nennlast), was mit einem erhöhten Verschleiß und einer verkürzten Anlagenlebensdauer verbunden ist. Aus diesem Grund soll eine Maximierung der Anlagenlaufzeiten in Verbindung mit möglichst wenigen Taktungen angestrebt werden. Dies ist bei einer stromgeführten Betriebsweise nicht gegeben. Der Strom aus dem BHKW für die Heizung und die Geräte kann ohne Heizwärmenutzung in dem Gebäude nicht bei der EnEV-Berechnung angerechnet werden. Des Weiteren kann die Wärme eines BHKW in einem Gebäude nicht nur für die Warmwassererzeugung genutzt werden. Daher wurde die Vereinfachung angewendet, dass das Warmwasser neben der Wärmepumpe auch mit einem Nahwärmenetz erzeugt wird.

Wenn die Wärme über ein Rohrleitungsnetz zu den Frischwasserstationen oder den Warmwasser-Zapfstellen der Wohnung geleitet werden soll, dann kann dieses Rohrnetz auch gleich die Heizwärme (z. B. für eine Fußbodenheizung) verteilen. Mit einem BHKW, welches Heiz- und Warmwasserbedarf deckt und auch noch anteilig mit Biogas betrieben wird, kann ein Einhalten des EEWärmeGs und ein Effizienzhaus 40 realisiert werden.

Mit einer zentralen Warmwasserversorgung ergibt sich für diese Variante ein jährlicher Primärenergiebedarf von **51 kWh/m²**. Das EEWärmeG wird knapp nicht erfüllt. Je nach Leistung der Wärmepumpe oder des BHKW kann es aber erfüllt werden.

6.5.4 Variante 4

In Variante 4 ist das BHKW die Haupt-Wärmequelle. Primär speist es die Radiatoren der einzelnen Räume. Die Restwärme wird zur Trinkwasservorerwärmung und zur Beheizung der Nachbargebäude verwendet. Die erzeugte Strommenge wird für Beleuchtung und Geräte eingesetzt. Außerdem dient das BHKW als Notstromanlage. Auch hier verfügen der Erschließungskern, die Bäder und Küchen über eine Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung.

Die erzeugte Wärme eines BHKW besitzt ein hohes Temperaturniveau. Daher ist es nicht sinnvoll, das Warmwasser neben dem BHKW auch mit einer Wärmepumpe zu erzeugen, zumal diese mit zunehmender Temperaturspreizung einen reduzierten Wirkungsgrad aufweist. Das bedeutet, dass mehr elektrische Antriebsenergie benötigt wird, je größer der Temperaturunterschied im Sekundärkreislauf der Wärmepumpe (in diesem Fall der Trinkwasserkreislauf) ist. Hinzukommend verbessert eine erhöhte Wärmenachfrage die Effizienz des BHKW, da längere Laufzeiten erreicht werden. Die Kombination eines BHKW zur Heizenergiebereitstellung und einer Wärmepumpe unter Einsatz von BHKW-Strom zur Warmwassererhitzung ist daher nicht ratsam. Daher wurde in dieser Variante die Wärmepumpe zur Warmwasseraufbereitung weggelassen. Des Weiteren ist neben dem BHKW ein Spitzenlastkessel, z. B. ein Holzbrennwertkessel notwendig, um das BHKW im Auslegungsoptimum zu betreiben. Bei einem optimalen Betrieb läuft das BHKW möglichst kontinuierlich in Nennlast. Dementsprechend sollte das BHKW auch nur zur Grundlastversorgung eingesetzt werden und ist entsprechend zu dimensionieren, wobei sich der Spitzenlastkessel in Starklastzeiten zuschaltet.

Des Weiteren ist in der Kalkulation eines BHKW die Berücksichtigung von Biogas schwierig, da die EnEV bzw. das EEWärmeG vorschreibt, dass bei Biogas als Brennstoff in der Berechnung Erdgas angesetzt werden muss. Diese Variante erreicht mit nur einem BHKW und einen Spitzenlastkessel (Biomasse-Heizkessel) einen jährlichen Primärenergiebedarf von **14 kWh/m²**. Mit dem BHKW wird das EEWärmeG erfüllt und ein KfW-40-Haus erreicht.

6.5.5 Variante 5

Variante 5 setzt auf eine kombinierte Warm- und Brauchwassererzeugung für die Fußbodenheizung mit einer zentralen Wärmepumpe. Zur solaren Unterstützung wird ein Solarkollektor (Aufzugschacht Süd) vorgesehen, welcher die Heizung und das Warmwasser mit einem Kombispeicher unterstützt. Außerdem wird sowohl aus dem Abwasser als auch aus der Abluft (Erschließungskern, Bäder und Küche) Wärme rückgewonnen und dem Heizungs- und Warmwasserkreislauf zugeführt. Bezüglich der Stromversorgung sind je 400 m² Kollektorfläche auf dem Dach geplant. Zusätzlich gibt es ein Diesel-Notstromaggregat.

Da die Solarthermieanlage in den Wintermonaten geringere Erträge als im Sommer aufweist, herrscht wiederum eine zeitliche Diskrepanz zwischen solarer Wärmeerzeugung und Heizenergiebedarf. Die Wärmepumpe muss folglich sehr groß dimensioniert werden, um im Spitzenlastfall den vollen Gebäudewärmebedarf abzudecken. Mit zunehmender Größe steigt jedoch auch der Strombedarf der Wärmepumpe. Prinzipiell ist die Kombination aus Solarthermie und Wärmepumpe möglich, jedoch ist die Ergänzung des Systems um einen Spitzenlastkessel, beispielsweise auf Holzbasis, sinnvoll. Mit dieser Variante und einem Biomasse-Heizkessel als Spitzenlastkessel wird ein jährlicher Primärenergiebedarf von **20 kWh/m²** benötigt, womit die EnEV und das EEWärmeG erreicht werden. Das KfW-40-Wohngebäude wird mit dem Primärenergiebedarf erreicht.

6.5.6 Variante 6

Diese Variante bezieht die thermische Energie für Heizung und Trinkwasser aus dem Fernwärmenetz. Der Strom wird aus dem öffentlichen Netz bezogen und es wird eine Notstrom-Dieselanlage für beide Gebäude verbaut. In diesem Konzept wird auf eine kontrollierte Lüftung verzichtet. Mit dem Primärenergiefaktor des Wolfsburger Fernwärmenetz „LSW Netz“ von 0,485 wird ein jährlicher Primärenergiebedarf von **26 kWh/m²** erreicht. Dabei wird das KfW-40-Wohngebäude nur knapp nicht erreicht. Beispielsweise könnten durch eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung die Transmissionsverluste und damit der Primärenergiebedarf reduziert werden. Die Variante erfüllt die Bedingungen des EEWärmeG.

6.5.7 Variante 7

Bei Variante 7 wird der Wärmebedarf für die Heizung und das Trinkwarmwasser, wie in Variante 1 über die Infrarot-Decke bzw. Durchlauferhitzer bezogen. Der Unterschied in der Anlagentechnik zwischen den beiden Varianten ist, dass die Variante 7 eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung besitzt.

Aufgrund der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung können die Lüftungsverluste im Gebäude minimiert werden und der Standard eines KfW-70-Wohnhauses mit einem Primärenergiebedarf von **35,1 kWh/m²** erreicht werden. Jedoch ist zu beachten, dass ein KfW-70-Wohnhaus nicht mehr von der KfW-Bank gefördert wird, da dieses Effizienzhaus nur 5 % von den Anforderungen der aktuellen EnEV abweicht. Im Gegensatz zur Variante 1 erfüllt die Variante 7 die Bedingungen des EEWärmeG. Die Bedingungen werden mithilfe der Wärmerückgewinnung in der Lüftungsanlage sowie der 400 m²-PV-Anlage erfüllt.

6.5.8 Variante 8

In der letzten Variante werden die Räume über die Lüftungsanlage beheizt und belüftet. Die Lüftungsanlage bezieht ihren Wärmebedarf über das Fernwärmenetz in Wolfsburg mit dem Primärenergiefaktor von 0,485. Des Weiteren wird die Warmluft nutzungsbedingt elektrisch nachgeheizt, und durch die Wärmerückgewinnung in der Lüftungsanlage wird ein Teil der verwendeten Wärmeenergie wieder zurückgewonnen. Das Trinkwarmwasser wird zentral mit Fernwärme erhitzt und in die einzelnen Wohnungen geleitet. Des Weiteren ist für den Strombedarf des Gebäudes eine 400 m²-PV-Anlage installiert.

Das EEWärmeG und die EnEV werden mit der Wärmerückgewinnung, der Fernwärme und den Transmissionswärmeverlusten sehr gut erfüllt. Die EnEV wird als KfW-40-Wohnhaus mit einem Primärenergiebedarf von **19,4 kWh/m²** erreicht. Interessant ist hierbei, dass diese Variante, bezogen auf die Innenraumluftqualität, die gesundheitlich problematischste Variante ist.

Tabelle 8 Übersicht der Varianten im Vergleich

Varianten	Heizwärme	Warmwasser	Be- und Entlüftung	Weitere Anlagentechnik	EnEV PE-Wert	EE-WärmeG	KfW
Variante 1	IR-Decke (Strom)	Durchlauferhitzer	-	PV	66 kWh/m ²	nicht erfüllt	-
Variante 2	IR-Decke (Strom)	Wärmepumpe dezentral (WRG Luft)	Abluft Bad/Küche WRG	PV, Solarthermie	20 kWh/m ²	erfüllt	40
Variante 3	IR-Decke (Strom)	Wärmepumpe zentral (WRG Luft) BHKW	Abluft Bad/Küche WRG	PV	51 kWh/m ² nicht erfüllt	gerade nicht erfüllt	-

Variante 4	BHKW Radiator	BHKW	Abluft Bad/Küche WRG	-	14 kWh/m ²	erfüllt	40
Variante 5	Wärmepumpe zentral (WRG Luft und Abwasser) Spitzenlastkessel	Wärmepumpe zentral (WRG Luft und Abwasser)	WRG Bad/Kü- che/Erschließ- ungskern	PV	20 kWh/m ²	erfüllt	40
Variante 6	Fußbodenheizung	Fernwärme	-	-	26 kWh/m ²	erfüllt	50
Variante 7	IR-Decke (Strom)	Durchlauferhitzer	Zentrale Lüftung WRG	PV	35,1 kWh/m ²	erfüllt	70
Variante 8	über Lüftung (zentral) mit Fernwärme elektrische Nach- heizung	Fernwärme	Zentrale Lüftung WRG	PV	19,4 kWh/m ²	erfüllt	40

6.5.9 Auswertung der gebäudetechnischen Varianten

Nach den Vergleichen ist festzustellen, dass sich die großen Herausforderungen im Bausektor über den alleinigen Fokus auf Energieeffizienz im Betrieb eines Gebäudes nicht beantworten lassen. Neben einer sehr schnell erforderlichen Transformation der Energieerzeugung hin zu 100 % erneuerbarer Energie muss die graue Energie sowie die Art der eingesetzten Ressourcen während der Errichtung Berücksichtigung finden. Damit entspricht Variante 2, mit einer 100 %ig regenerativen Stromzufuhr, am besten den Zielen der WOODSCRAPER. Sie ist sehr günstig und ressourcensparend in der Anschaffung, wartungsfrei im Betrieb, verschlechtert nicht die Innenraumluftqualität und lässt sich ohne zusätzliche CO₂-Emissionen betreiben. Für die Warmwassererzeugung wird Wärme aus verschmutzter Abluft zurückgewonnen. Für eine realistische Umsetzung im Falle der WOODSCRAPER muss jedoch einer der folgenden Aspekte im Weiteren geklärt werden können und umsetzbar sein:

1. zusätzliche Möglichkeiten der lokalen Stromerzeugung in den Wintermonaten, bspw. durch Kite-Generator auf dem Dach, direkte Stromleitung von einem Windrad in Verbindung mit Stromspeicher etc.
2. Ausnahmeregelung der EnEV zugunsten einer dauerhaft regenerativen Stromlieferung über das öffentliche Stromnetz mittels Contracting durch Nachweis eines rechtsverbindlichen Vertrages.
3. Ausnahmeregelung der EnEV durch das Heranziehen eines dynamisierten Primärenergiefaktors, der die notwendigen Klimaziele und damit den in Zukunft wesentlich höheren regenerativen Stromanteil im Netz abbildet und so zukünftige, ressourcensparende Infrastruktur ermöglicht.
4. Ausnahmeregelung der EnEV zur Einbilanzierung der tatsächlichen, wissenschaftlich belegten, verbrauchsmindernden Eigenschaften der Infrarotheizung in Kombination mit Holzoberflächen.

Es ist festzustellen, dass Strom aus 100 % erneuerbarer Energie bei gut gedämmten Neubauten auch für das Heizen eine bedeutende Rolle zukommen wird. Einsparungen bei der Infrarotheizung durch die günstige Installation gegenüber konventionellen Techniken lassen sich bei weniger dichten Nutzungen sehr gut in lokale Stromerzeugung und Speichertechnologie investieren. Energieautarkie lässt sich so erreichen. Zur Energiewende sowie Ressourceneinsparung kommt dieser Technologie eine bedeutende Rolle zu. Eine intelligente Verteilung und die Einbilanzierung regenerativ erzeugten Stroms über das öffentliche Netz in die EnEV-Berechnung sowie die Weiterentwicklung von geeigneter Stromspeichertechnologie sind hierbei für den breiten Einsatz erforderlich.

Variante 1 kann wie Variante 2 bewertet werden. Allerdings wird die Warmwassererzeugung in Variante 2 wesentlich effizienter bewerkstelligt und ist deshalb, trotz gewisser Mehrkosten für die Installation, der ersten Variante vorzuziehen.

Mit Variante 3 sollte eine umsetzbare Option untersucht werden, um die Vorteile der Infrarotheizung unter bestehenden Regelungen umzusetzen. Das BHKW sollte neben der Stromerzeugung für die WOODSCRAPER überschüssige Wärme an Nachbargebäude abgeben. Wie in Variante 3 bereits beschrieben macht diese Variante konzeptionell wenig Sinn und ist weder aus ökologischen noch ökonomischen Gründen zu empfehlen.

Mit Variante 4, einem Biomasse-BHKW und einen Spitzenlastkessel, lässt sich der Primärenergiebedarf hervorragend erzielen. Allerdings sind die Investitions- und Wartungskosten für diese Anlage sehr hoch. Durch die Wahl der Radiatoren als Wärmeübergabe an den Raum ist ein einfacher Rückbau gewährleistet. Trotz des guten Primärenergiebedarfes kann diese Option wegen der hohen Kosten in Anschaffung und Wartung sowie des hohen Ressourcenverbrauches nicht uneingeschränkt empfohlen werden. Die Bereitstellung von Biogas und ausreichender Biomasse ist ebenso als problematisch einzustufen.

Variante 5 erzielt zusammen mit einem biomassebasierten Spitzenlastkessel, der zugleich als Notstromaggregat dient, sehr gute Ergebnisse zum Primärenergiebedarf. Allerdings geht mit dieser Variante, durch die Fußbodenheizung, die anvisierte Umbaubarkeit des Gebäudes sowie die Demontierbarkeit verloren. Auch ist die Anschaffung und Wartung recht kostenintensiv und deshalb nicht empfehlenswert.

Da an dem Grundstück Fernwärme anliegt, ist Variante 6 mit Wärmerückgewinnung die ökonomisch sinnvollere Variante, bei ähnlichem Primärenergiebedarf und weniger Wartungsaufwand. Radiatoren, zur einfachen Demontage, lassen sich wegen der hohen Vorlauftemperatur der Fernwärme auch problemlos umsetzen. Aus ökologischer Perspektive ist jedoch zu bedenken, dass hierdurch eine Pfadabhängigkeit zu einem Heizkraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung geschaffen wird, welches als primären Brennstoff Kohle einsetzt. Eine rasche Umstellung auf regenerativ erzeugte Wärme ist sehr fraglich. Die anliegende Fernwärme weist einen sehr guten Primärenergiefaktor der „Abfallwärme“ aus Stromerzeugung auf. Die notwendigen Klimaziele zur Reduktion von CO₂-Emissionen lassen sich hiermit nicht schnell voranbringen. Variante 6 ist somit die derzeit am einfachsten umsetzbare und kostengünstigste Option mit einem guten Primärenergiebedarf. Sie kann jedoch nicht dazu beitragen die CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Variante 7 zeigt auf, dass Variante 1 in Kombination mit einer Lüftungsanlage inklusive Wärmerückgewinnung, bei einem Primärenergiefaktor von 1,8 des deutschen Stromnetzes EnEV-konform umgesetzt werden kann, allerdings nicht den KfW-40-Standard erreicht. Die Lüftungsanlage erhöht den technischen Aufwand im Gebäude und verfehlt damit auch den Anspruch einfacher Gebäudetechnik.

Variante 8 weist einen hervorragenden Primärenergiebedarf auf und erreicht damit problemlos KfW-40-Standard. Die reine Luftheizung ist dabei die gesundheitlich problematischste Variante und wegen mangelnder Behaglichkeit nicht zu empfehlen. Das gute Abschneiden dieser Option ist auch wieder der Fernwärme geschuldet.

6.6 Bauphysik

Schallschutz ist gerade im Wohnungsbau ein sehr wichtiges Thema, der insbesondere beim Holzbau und neuen Bauweisen große Sorgfalt erfordert, um Ansprüchen anschließender Nutzung zu genügen. Der Schallschutz erfordert zusätzlichen Einsatz von Ressourcen und hat damit Auswirkungen sowohl auf die Ökobilanz als auch auf die Investitionskosten eines Gebäudes. Randbedingungen hierfür sind die baurechtlichen Berechnungs- und Nachweisgrundlagen für den Schallschutz und die DIN 4109. Darüber hinaus erlangt die Empfehlung 103 der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) an Bedeutung.

6.6.1 Bauakustische Anforderung an Gebäude

Zur ökologischen Optimierung der WOODSCRAPER werden unter anderem Lösungen entwickelt, die bisher noch keine breite Anwendung erfahren haben. Aus diesem Grund ist es notwendig, unter Berücksichtigung klar definierter Randbedingungen die Gebrauchstauglichkeit zu überprüfen. Die bauakustischen Anforderungen an Wohngebäude werden im Folgenden festgelegt, um Ausführungsvarianten von Boden-, Wand-, und Deckenaufbauten sowie Anschlüsse im Detail mit Auswirkung auf den Schallschutz zu untersuchen.

6.6.2 Baurechtlich geschuldeter Schallschutz

Die baurechtlichen Anforderungen ergeben sich aus den Anforderungen der DIN 4109:2017-09 aus dem Jahr, welche in den meisten Bundesländern als technische Baubestimmung eingeführt wurde. Diese (Mindest-) Anforderungen dienen gemäß dem Wortlaut der Norm allerdings lediglich dazu, „Menschen in Aufenthaltsräumen vor unzumutbaren Belästigungen durch Schallübertragung zu schützen. [...] Aufgrund der festgelegten Anforderungen kann nicht erwartet werden, dass Geräusche von außen oder aus benachbarten Räumen nicht mehr wahrgenommen werden.“

Nachfolgend ein Auszug aus DIN 4109:2016-07 für Geschosshäuser mit Wohnungen und Arbeitsräumen. Geschosshäuser – Erforderliche Luft- und Trittschalldämmung zum Schutz gegen Schallübertragung aus einem fremden Wohn- oder Arbeitsbereich (mit Auszügen aus DIN 4109:2016-07):

Tabelle 9 Akustische Anforderungen an Bauteile

Zeile		Bauteile	Anforderungen nach DIN 4109-1:2016-07	
			erf. R'_w	erf. $L'_{n,w}$
1	Decken	Decken unter allgemein nutzbaren Dachräumen, z. B. Trockenböden, Abstellräumen und ihren Zugängen	≥ 53	≤ 52
2		Wohnungstrenndecken (auch -treppen)	≥ 54	≤ 50
3		Trenndecken (auch Treppen) zwischen fremden Arbeitsräumen bzw. vergleichbaren Nutzungseinheiten	≥ 54	≤ 53
4		Decken über Kellern, Hausfluren, Treppenräumen unter Aufenthaltsräumen	≥ 52	≤ 50
5		Decken über Durchfahrten, Einfahrten von Sammelgaragen und ähnliches unter Aufenthaltsräumen	≥ 55	≤ 50
6		Decken unter/über Spiel- oder ähnlichen Gemeinschaftsräumen	≥ 55	≤ 46
7		Decken unter Terrassen und Loggien über Aufenthaltsräumen	–	≤ 50
8		Decken unter Laubengängen	–	≤ 53
9		Decken und Treppen innerhalb von Wohnungen, die sich über zwei Geschosse erstrecken	–	≤ 50
10		Decken unter Bad und WC ohne/mit Bodenentwässerung	≥ 54	≤ 53
11		Decken unter Hausfluren	–	≤ 50

12	Treppen	Treppenläufe und -podeste	-	≤ 53
13	Wände	Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen	≥ 53	-
14		Treppenraumwände und Wände neben Hausfluren	≥ 53	-
15 + 16		Wände neben Durchfahrten und Wände von Spiel- oder Gemeinschaftsräumen	≥ 55	-
17		Schachtwände von Aufzugsanlagen an Aufenthaltsräumen	≥ 57	-
18	Türen	Türen, die von Hausfluren oder Treppenräumen in Flure und Dielen von Wohnungen und Wohnheimen oder von Arbeitsräumen führen	≥ 27	-
19		Türen, die von Hausfluren oder Treppenräumen unmittelbar in Aufenthaltsräume – außer Flure und Dielen – von Wohnungen führen	≥ 37	-

6.6.3 Schutz gegen Außenlärm

Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen werden nach DIN 4109:2016-07 in Abhängigkeit von Lärmpegelbereichen (LPB) gestellt, welche nach den „maßgeblichen Außenlärmpegeln“ klassifiziert werden. In Tabelle 7 der DIN 4109 sind diese Anforderungen in Abhängigkeit von drei verschiedenen Raumnutzungen bzw. Raumarten aufgeführt.

Tabelle 7 in DIN 4109:2016-07 „Anforderungen an die Luftschalldämmung zwischen Außen und Räumen in Gebäuden“.

Tabelle 10 Akustische Anforderungen an Außenbauteile

Spalte	1	2	3	4	5
			Raumarten		
Zeile	Lärmpegelbereich	„Maßgeblicher Außenlärmpegel“	Bettenräume in Krankenanstalten und Sanatorien	Aufenthaltsräume in Wohnungen, Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten, Unterrichtsräume und ähnliches	Büroräume ¹ und ähnliches
			erf. $R'_{w,res}$ des Außenbauteils in dB		
1	I	bis 55	35	30	-
2	II	56 bis 60	35	30	30
3	III	61 bis 65	40	35	30
4	IV	66 bis 70	45	40	35
5	V	71 bis 75	50	45	40
6	VI	76 bis 80	²	50	45
7	VII	> 80	²	²	50
¹ An Außenbauteile von Räumen, bei denen der eindringende Außenlärm aufgrund der in den Räumen ausgeübten Tätigkeiten nur einen untergeordneten Beitrag zum Innenraumpegel leistet, werden keine Anforderungen gestellt. ² Die Anforderungen sind hier aufgrund der örtlichen Gegebenheiten festzulegen.					

In Wohnungen werden keine Anforderungen an die Außenbauteile von Küchen, Bädern und Hausarbeitsräumen gestellt.

6.6.4 Zivilrechtlich geforderter Schallschutz

Dass die DIN 4109 bei heutigem Baustandard in vielen Teilen nicht mehr den anerkannten Regeln der Technik entspricht, spiegelt sich in der aktuellen Rechtsprechung wider. Insbesondere dann, wenn den Mietern/Käufern per Baubeschreibung ein hoher Wohnkomfort versprochen wird, sind die Mindestanforderungen der DIN 4109 nicht ausreichend. Für die Planung neuer Gebäude

empfiehlt es sich deshalb **einen erhöhten Schallschutz** zu vereinbaren. Dieser muss spürbar/hörbar über den Mindestanforderungen liegen. Im akustischen Sinne bedeutet dies eine Verbesserung von 3 bis 5 dB. In Bauverträgen sollte entweder eine klare Schallschutzstufe, eine bestimmte Konstruktion oder ein Zahlenwert zum Schallschutz vereinbart werden.

Hinweise zum Schallschutzniveau von Gebäuden gibt die Richtlinie VDI 4100. Dort werden Wohngebäude in die Schallschutzstufen I bis III unterteilt. Außerdem können dem Beiblatt 2 zur DIN 4109 Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz entnommen werden. Immer größere Bedeutung und Bekanntheit gewinnt die Empfehlung 103 der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA). Hierin sind 7 verschiedene Schallschutzstufen definiert. Analog zum bekannten Energieausweis findet eine Klassifizierung statt, mit dem der Bauherr, Käufer oder Mieter eine klare Vorstellung vom erreichten Schallschutz bekommt.

Tabelle 11 Anforderungen Luftschall nach DEGA-Empfehlung 103 (2018)

	F	E	D	C	B	A	A*
Wände/Decken [R'_{w}] ¹⁾	< 50 dB	≥ 50 dB	≥ 54 ²⁾ dB	≥ 57 ²⁾ dB	≥ 62 dB	≥ 67 dB	≥ 72 dB
Wohnungseingangstüren in Fluren oder Dielen [R_w] ³⁾	< 22 dB	≥ 22 dB	≥ 27 dB	≥ 32 dB	≥ 37 dB	≥ 40 dB	
Wohnungseingangstüren direkt im Aufenthalts- räume [R_w] ³⁾	< 32 dB	≥ 32 dB	≥ 37 dB	≥ 42 dB	nicht zulässig		

Anmerkungen zu Tabelle 3:

1) Bei Trennflächen von weniger als 10 m² ist der Nachweis über D_{nw} zu führen.

2) Für Wände gilt ein um 1 dB reduzierter Anforderungswert.

3) Die Anforderung an die Türen gilt für die Schallübertragung über die betriebsfertig eingebaute Tür ohne Nebenwege.

Tabelle 12 Anforderungen Trittschall nach DEGA-Empfehlung 103 (2018)

	F	E	D	C	B	A	A*
Decken [L'_{nw}]	> 60 dB ¹⁾	≤ 60 dB ¹⁾	≤ 50 dB	≤ 45 dB ¹⁾	≤ 40 dB ¹⁾	≤ 35 dB	≤ 30 dB
Balkone, Loggien, Terrassen, [$L'_{n,w}$]	> 63 dB ¹⁾	≤ 63 dB ¹⁾	≤ 50 dB ²⁾	≤ 48 dB ¹⁾	≤ 43 dB ¹⁾	≤ 38 dB	≤ 33 dB
Treppen, Podeste, Hausflure, Laubgänge [$L'_{n,w}$]	> 63 dB ¹⁾	≤ 63 dB ¹⁾	≤ 53 dB ³⁾	≤ 48 dB ¹⁾	≤ 43 dB ¹⁾	≤ 38 dB	≤ 33 dB

Anmerkung zu Tabelle 4:

1) austauschbarer Bodenbelag anrechenbar (rechnerisch nur bei geprüftem ΔL_w)

2) bei Balkonen Anforderung $L'_{n,w} \leq 58$ dB

3) bei Hausfluren Anforderung $L'_{n,w} \leq 50$ dB

Tabelle 13 Subjektive Wahrnehmbarkeit von üblichen Geräuschen aus benachbarten WEH

	F	E	D	C	B	A	A*
laute Sprache	einwandfrei zu verstehen, sehr deutlich hörbar		einwandfrei zu verstehen, deutlich hörbar	teilweise zu verstehen, im Allgemeinen hörbar	im Allgemeinen nicht verstehbar, teilweise hörbar	nicht verstehbar, noch hörbar	nicht verstehbar, nicht hörbar
angehobene Sprache	einwandfrei zu verstehen, sehr deutlich hörbar	einwandfrei zu verstehen, deutlich hörbar	teilweise zu verstehen, im Allgemeinen hörbar	im Allgemeinen nicht verstehbar, teilweise hörbar	nicht verstehbar, noch hörbar	nicht verstehbar, nicht hörbar	
normale Sprache	einwandfrei zu verstehen, deutlich hörbar	teilweise zu verstehen, im Allgemeinen hörbar	im Allgemeinen nicht verstehbar, teilweise hörbar	nicht verstehbar, noch hörbar	nicht verstehbar, nicht hörbar		
sehr laute Musik	sehr deutlich hörbar					deutlich hörbar	hörbar
laute Musik	sehr deutlich hörbar				deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar
normale Musik	sehr deutlich hörbar			deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar	nicht hörbar
Wasserinstallationen, gebäude-techn. Anlagen,	sehr deutlich hörbar	deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar	nicht hörbar		
Betätigungsspitzen	sehr deutlich hörbar		deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar	nicht hörbar	
Nutzergeräusche bei normaler Handhabung	sehr deutlich hörbar		deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar	nicht hörbar	
Gehgeräusche	sehr deutlich hörbar		deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar	nicht hörbar	nicht hörbar
spielende Kinder	sehr deutlich hörbar			deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar	nicht hörbar
Haushaltsgeräte	sehr deutlich hörbar			deutlich hörbar	hörbar	noch hörbar	nicht hörbar

Bedingungen für die Gültigkeit der Beschreibungen:

Nachhallzeit im Empfangsraum $T = 0,5$ s (bzw. Absorptionsfläche $A = 10$ m²) und übliches Volumen des Empfangsraums von 30 bis 60 m³

Übertragungsfläche wie zwischen üblichen Wohn- bzw. Schlafräumen von 10 bis 15 m²

stetiger Frequenzverlauf der Schalldämmung/Trittschallpegel ohne auffällige Einbrüche

Grundgeräuschpegel von $L_{eq} = 20$ dB(A) sowie zeitliche und spektrale Verteilung entsprechend rosa Rauschen

Die Stufe D entspricht in etwa dem baulichen Mindestschallschutz nach DIN 4109 (siehe Abschnitt 2.1.1). Es empfiehlt sich in jedem Fall, eine Schallschutzstufe klar zu vereinbaren und für jede Wohneinheit einen Schallschutzausweis zu erstellen. Hinweise hierzu sind dem Internetportal der DEGA zu entnehmen (siehe DEGA-Empfehlung 103: 2018-01).

Wichtiger Hinweis:

Sofern in diesem Bericht von einem höheren Schallschutz bzw. erhöhtem Schallschutz die Rede ist, dann ist damit zunächst die Verbesserung der Mindestwerte um pauschal 5 dB gemeint. Dies entspricht in etwa der **Schallschutzklasse C** der DEGA-Empfehlung 103:2018-01.

6.7 Ausführung der Bauteile

Bei der Ausbildung der schadstofffreien Bauteile ging es schwerpunktmäßig darum, die Rückbaubarkeit der Bauteile und Weiternutzung der eingesetzten Materialien schon im Designprozess sicherzustellen. Aus diesem Grund werden reversible Aufbauten schwerpunktmäßig untersucht und konventionellen Bauweisen gegenübergestellt, um zusammen mit der Ökobilanzierung, den Investitionskosten und technischen Machbarkeit eine belastbare Entscheidung treffen zu können.

6.7.1 Geschossdecken zwischen Wohnungen

Um den baurechtlichen Mindestschallschutz und darüber hinaus einen erhöhten Schallschutz zu erreichen, sind nachfolgende Maßnahmen erforderlich: Das Grundbauteil für die Geschossdecken ist eine 200 mm dicke Brettsperrholz-Decke (BSP-Decke). Diese weisen ohne weitere Maßnahmen eine hohe Luft- und Trittschallübertragung auf. In Holzbauten sind insbesondere die tieffrequenten Schallübertragungen (Poltern, Dröhnen) problematisch. Aus diesem Grund ist oberhalb der BSP-Decke eine extrem biegeweiche, gefügelose Schicht anzuordnen, welche verhindert, dass die Decke in kritischen Frequenzbereichen zu Schwingungen angeregt wird. Außerdem sollte diese Schicht eine hohe flächenbezogene Masse aufweisen. Diese Anforderungen erfüllen Sandschichten oder Beschwerungslagen aus kleinformatischen Betonplatten (z. B. Gehwegplatten der Abmessungen 400 x 400 mm). Wegen der Verlegung von Installationen haben sich im Holzbau Sand- oder Kiesschichten etabliert. Im neuen Teil 33 zur DIN 4109:2016-07 sind Ausführungsvorschläge für BSP-Decken angegeben. Die Sand- oder Kiesschüttung muss dabei mindestens eine flächenbezogene Masse von 60 kg/m², besser jedoch 120 kg/m² aufweisen. Das Schüttgut ist gegen Verrutschen zu sichern z. B. mittels Pappwaben, Sandmatten oder Lattengittern.

Einige Firmen haben sich bereits in diesem Gebiet spezialisiert und bieten fertige Sandmatten an (z. B. Wolf-Bavaria).

Damit der Estrich schwimmend verlegt werden kann, ist über der Schüttung eine Trittschalldämmung erforderlich. Um eine möglichst tiefe Resonanzfrequenz des schwingungsfähigen Systems zu erhalten, sind Trittschalldämmungen mit einer dynamischen Steifigkeit von weniger als 10 MN/m³ empfehlenswert. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese aus Polystyrol (EPS), Mineralwolle oder Holzweichfaser eingebaut werden. Der Estrich darüber kann entweder als Trockenestrich oder als Nassestrich eingebaut werden. Hierbei ergeben sich bei jedem System Vor- und Nachteile. Dies sollen im Folgenden genauer erörtert werden.

Tabelle 14 Vor- und Nachteile von Bodenaufbauten

Varianten	Vorteile	Nachteile
Trockenestrich	<ul style="list-style-type: none"> - Es werden keine Feuchtigkeitsmengen in das Gebäude eingebracht. - Keine Trocknungszeiten. - Die Dicke des Estrichs ist in der Regel geringer als Nassestrich. - Eine Rückbaubarkeit kann einfach sichergestellt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> - Die flächenbezogene Masse des Estrichs ist niedriger als z. B. Zementestrich. - Es sind leichte Defizite gegenüber Zementestrich bei Luft- und Trittschall von 1 bis 3 dB vorhanden. - Aufgrund mangelnder Erfahrung ist eine erhöhte Planung zur Qualitätssicherung erforderlich. - Derzeit höhere Investitionskosten
Nassestrich	<ul style="list-style-type: none"> - Der Estrich besitzt eine hohe flächenbezogene Masse. - Bei einer Dicke von 60 -bis 80 mm ist es für den Luft- und Trittschallschutz egal, ob es ein Zement-, Magnesia- oder Calciumsulfat-Estrich ist. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es müssen größere Mengen an Feuchtigkeit abgeführt werden, welche beim Trocknen entstehen. - Sehr schlechte Rückbaubarkeit und keine Weiternutzung - In Kombination mit Fußbodenheizung ist keine Revision gegeben und kann zu sehr großen Bauschäden führen.

6.7.1.1 Konkrete Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung

Mit der nachfolgenden Tabelle soll der Nachweis der Luft- und Trittschalldämmung der Wohnungstrenndecke in 2 Varianten (konventionelle und innovative Bauweise) untersucht und nachgewiesen werden. In einem ersten Rechenlauf wurden die Kenngrößen für den Fall berechnet, dass die Wohnungstrenndecke die flankierenden Holzbauteile zwar unterbricht, hier jedoch eine starre Koppelung ohne elastische Zwischenschichten vorliegt.

In einem zweiten Rechenlauf wurde berücksichtigt, dass die flankierenden Bauteile mit elastischen Syldyn bzw. Sylomer-Zwischenschichten voneinander entkoppelt wurden und zusätzlich schalltechnisch optimierte Anker und Befestigungswinkel eingebaut werden. Gemäß den Untersuchungen der Firma Getzner ist hier eine Verbesserung der Luft- und Trittschalldämmung von maximal 7 dB erreichbar. Diese Verbesserungen von 7 dB wurden im zweiten Rechenlauf berücksichtigt. Alternativ können zum Schutz der Flankenübertragung auch die Lösungen der Firma Wolf zum Einsatz kommen.

Tabelle 15 Akustische Berechnungen von Bodenaufbauten

Konstruktionsaufbau (von oben nach unten)	
Konventionell	Innovativ
a) Belag, schallhart, d = 15 mm	a) Belag, schallhart, d = 15 mm
b) Zement- oder Anhydritestrich, d = 50 mm	b) PhoneStar Twin St, d = 9 mm
c) Trennlage (z. B. PE-Folie)	c) PhoneStar Twin St, d = 9 mm
d) Trittschalldämmung, d = 30 mm, Dynamische Steifigkeit $s' \leq 10 \text{ MN/m}^3$	d) Holzfaserdämmplatte, d = 20 mm, Dynamische Steifigkeit $s' \leq 20 \text{ MN/m}^3$
e) Gebundene Schüttung oder Sand in Pappwaben, d $\geq 80 \text{ mm}$, $m' \geq 120 \text{ kg/m}^2$	e) Gebundene Schüttung, d $\geq 100 \text{ mm}$, $m' \geq 152 \text{ kg/m}^2$
f) Rieselschutzbahn	f) Rieselschutzbahn
g) Brettsperrholzdecke, d = 200 mm	g) Brettsperrholzdecke, d = 200 mm
Konstruktionshöhe ab Rohdecke	

h = 175 mm	h = 153 mm
Bewertetes Schalldämm-Maß ohne Flankenübertragung	
$R_w = 70 \text{ dB}^{39}$	$R_w = 70 \text{ dB}^{40}$
Bewerteter Norm-Trittschallpegel ohne Flankenübertragung	
$L_{n,w} = 41 \text{ dB}^1$	$L_{n,w} = 37 \text{ dB}^2$
Schallübertragende Flankenbauteile	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Außenwand aus Brettspertholztafeln, $d = 100 \text{ mm}$, $m' = 70 \text{ kg/m}^2$, durch die BSP-Decke unterbrochen, $D_{n,f,w} = 67 \text{ dB}$. 2. Tragende Innenwände und Stützen aus Brettspertholztafeln, $d = 200 \text{ mm}$, $m' = 100 \text{ kg/m}^2$, durch die BSP-Decke unterbrochen, $D_{n,f,w} = 67 \text{ dB}$. 3. Nichttragende Innenwände als Ständerwände mit biegeweichen Platten, $D_{n,f,w} = 67 \text{ dB}$. 4. Massive Trennwände aus KS-Mauerwerk oder Stahlbeton, $d = 240 \text{ mm}$, $D_{n,f,w} = 76 \text{ dB}$. 	
Bewertetes Schalldämm-Maß mit Flankenübertragung, ohne Entkopplung der Flanken	
$R'_w = 54 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse D)	$R'_w = 54 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse D)
Bewerteter Norm-Trittschallpegel mit Flankenübertragung, ohne Entkopplung der Flanken	
$L'_{n,w} = 50 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse D)	$L'_{n,w} = 49 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse D)
Bewertetes Schalldämm-Maß mit Flankenübertragung, mit Entkopplung der Flanken	
$R'_w = 61 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse C)	$R'_w = 61 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse C)
Bewerteter Norm-Trittschallpegel mit Flankenübertragung, mit Entkopplung der Flanken	
$L'_{n,w} = 43 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse C)	$L'_{n,w} = 42 \text{ dB}$ (Schallschutzklasse C)

Fazit

Bei beiden Konstruktionen wird auch ohne entkoppelte Flanken der baurechtliche Mindestschallschutz nach DIN 4109 (Schallschutzstufe D) erreicht. Mit der Entkopplung der Flanken kann darüber hinaus die Schallschutzstufe C erreicht werden. Das Erreichen der Schallschutzstufe B ist nur dann möglich, wenn zusätzlich zu der o. g. Entkopplung biegeweiche Vorsatzschalen an Wänden und unterhalb der Geschossdecke eingebaut werden.

6.7.2 Auskragende Balkone

6.7.2.1 Allgemeines

Die BSP-Decken sollen im Bereich der Außenwände nach außen durchlaufen, sodass sich damit die Balkone im Freibereich ergeben. Um die Anforderungen an den Trittschall von den Balkonen in die angrenzenden Wohnungen einhalten zu können, sind entweder schwimmend gelagerte Balkonaufbauten (konventioneller Balkonaufbau) oder weichgelagerte Betonfertigteile einzubauen. Diese beiden Varianten sollen nachfolgend untersucht werden.

6.7.2.2 Weichgelagerte Betonfertigteile

Bei dieser Variante werden Betonfertigteile auf die auskragenden BSP-Decken aufgelegt. Die Betonoberfläche stellt dabei gleichzeitig die finale Oberfläche der Balkone dar. Eine Abdichtung

³⁹ Abgeleitet aus DIN 4109-33:2016-07.

⁴⁰ Gemäß Angabe Fa. Wolf-Bavaria.

muss daher direkt auf dem Massivholz erstellt werden. Um die Trittschallübertragung in die Wohnungen zu reduzieren, müssen die Betonfertigteile auf Elastomeren oder sonstigen weichfedernden Zwischenelementen aufgelagert werden. Hierzu sind spezielle Berechnungen erforderlich, damit die Resonanzfrequenz, die Pressung und die Einfügungsdämpfung bezogen auf den Trittschallschutz funktionieren. Die Fertigteile dürfen an keiner Stelle starr mit dem Baukörper verbunden sein. Dies bringt eventuell Schwierigkeiten mit sich. Entsprechende Details sind zu erarbeiten.

6.7.2.3 Konventioneller Balkonaufbau

Bei einem konventionellen Balkonaufbau werden weichfedernde Schichten eingebaut (z. B. Gummigranulatmatten) oder trittschallmindernde Drainagematten. Darüber werden Kiesschichten mit Gehwegplatten oder Estriche mit Fliesen aufgebaut.

Fazit

Gleich welcher Aufbau der Balkone angedacht ist, sind die Anforderungen an die Trittschalldämmung zu beachten. Bei beiden der o. g. Varianten sind trittschallmindernde Schichten einzubauen. Wegen derzeit unzureichender Berechnungsansätze für den Schallschutz in Holzbauten ist der Nachweis durch Schallmessungen zu erbringen.

6.7.3 Treppenläufe und -podeste

Treppenläufe:

- a. Die Treppenläufe aus Beton sind auf den Podesten oder geeigneten elastischen Lagern aufzulegen bzw. anzuhängen oder unter Verwendung eines körperschallgedämmten Fertigteilelementes (z. B. Schöck Tronsole T) als Betontreppe auszuführen.
- b. Zwischen Podest und Lauf ist unten und oben (im Belag) eine dauerelastische Fuge einzubauen. Diese Fuge ist unter Verwendung einer Rundschnur aus Schaumstoff herzustellen. Die Fugenflanken sind gegebenenfalls mit Primer vorzubehandeln.
- c. Die Treppenläufe sind entweder mit einem Abstand von ≥ 25 mm (auch im Belag) zu den Treppenhauswänden einzubauen, oder sie sind unter Zwischenschaltung einer ca. 25 mm dicken Mineralwolleplatte an die Treppenhaustrennwände anzulegen; anschließend kann diese Platte entlang der Treppenform abgeschnitten werden. An diese Mineralwolleplatte, die 10 mm dicker als der Putz sein muss, kann angeputzt werden.
- d. Bei der Verlegung der Treppenbeläge ist zwischen Treppenbelag und Putz ein Mineralwolle-Randdämmstreifen einzustellen, welcher nach der Verlegung abgeschnitten werden kann.
- e. Zwischen Sockelfliesen und Treppenbelag sind dauerelastische Fugen vorzusehen.

Treppenpodeste:

- f. Die Treppenpodeste aus Stahlbeton werden von den Treppenwänden über entsprechende schallentkoppelnde Lager getrennt. Auf den Treppenpodesten und in öffentlichen Fluren sind schwimmende Estriche einzubauen

6.7.4 Wohnungstrenn- und Treppenhauswände in Massivbauweise

Massive Trennwände zwischen Wohnungen und Flur sowie Treppenräumen können entweder in Mauerwerk aus Kalksandvollsteinen oder in Stahlbetonbauweise erstellt werden. Relevant für den Schallschutz ist primär die flächenbezogene Masse der Wand. Um den Mindestschallschutz zu erreichen, sind Flächenmassen von $450 - 500 \text{ kg/m}^2$ erforderlich. Um einen höheren Schallschutz zu erreichen, sind flächenbezogene Massen von $530 - 650 \text{ kg/m}^2$ erforderlich. Bei üblichen Dicken von 240 mm müssen Kalksandvollsteine mindestens der Rohdichteklasse 2.2 entsprechen und beidseitig verputzt werden.

Aufgrund der Biegesteifigkeit und des Gefüges weisen Wände aus Stahlbeton bei sonst gleicher Rohdichte im Vergleich zu Mauerwerk um 1 bis 3 dB bessere Werte auf. Zudem müssen Wände aus Stahlbeton nicht zwingend verputzt werden, da sie bereits ohne Putz schalldicht sind.

Mit den oben genannten flächenbezogenen Massen kann über den Mindestschallschutz hinaus auch die Schallschutzstufe C erreicht werden. Sofern Treppenhauswände nicht tragend sind, gilt der nachfolgende Abschnitt.

6.7.5 Wohnungstrennwände in Leichtbauweise

Sofern Wohnungstrennwände und Trennwände zu Fluren und Treppenräumen in Trockenbauweise erstellt werden, ergeben sich viele bauliche Möglichkeiten mit Vor- und Nachteilen. In diesem Fall sollen platzsparende und schlanke Trockenbauwände in Holz- oder Metallständerwerk verglichen werden. Außerdem werden die Vor- und Nachteile von Wänden mit Doppelständerwerk erörtert.

6.7.5.1 Trockenbauwände mit Einfachständerwerk

Die Schalldämmung von zweischaligen Wänden in Trockenbauweise beruht auf dem Prinzip des Feder-Masse-Systems. Die beidseitigen Beplankungen stellen die schwingenden Massen dar, und die Luftschicht zwischen den Ständern stellt die Feder dar. Die Schalldämmung nimmt mit zunehmendem Abstand der beiden Massen zueinander zu. Außerdem nimmt die Schalldämmung mit der Zunahme der schwingenden Massen zu. Der Ständer stellt eine Schwächung dieses Schwingungs-Fugensystems dar. Metallständer sind gegenüber Holzständern zu bevorzugen. Der Mindestschallschutz wird erst ab Ständerdicken von 100 mm erreicht. Geringere Wanddicken sind nur dann möglich, wenn die Beplankungen zusätzlich beschwert werden oder zusätzliche Federelemente eingebaut werden. Es gibt bereits Hersteller (z. B. Wolf-Bavaria), welche sandgefüllte Platten für Ständerwände herstellen. Ein erhöhter Schallschutz ist damit auch bei Ständerdicken von 75 mm möglich.

Ein Nachteil der Einfachständerkonstruktionen ist die erhöhte Übertragung von Körperschall. Grenzt beispielsweise eine Küche an einen Ruheraum, kann die Küchenarbeit mit Stößen an dies Wand zu störenden Körperschallübertragungen führen. Dieses Problem kann reduziert werden, wenn auf dem Ständerwerk nochmals Federschienen angebracht werden, an welchen die Beplankungen befestigt werden. Um dieses Problem noch weiter zu eliminieren, sind Doppelständerkonstruktionen erforderlich.

6.7.5.2 Trennwände mit Doppelständerwerk

Bei einem Doppelständerwerk findet eine nahezu vollständige Trennung der beiden Wandschalen voneinander statt, weshalb das Problem störender Körperschallübertragungen weitestgehend vermieden wird. Bei einem Doppelständerwerk aus 2 x 100 mm dicken Ständern (egal ob aus Holz oder Metall) sind bewertete Schalldämmmaße von $R'_{w,R} \geq 60$ dB möglich. Zudem liegt die Resonanzfrequenz des Systems in jenem Bereich, welcher bauakustisch nicht mehr relevant ist, sodass oberhalb dieser Frequenz ein starker Anstieg der Schalldämmung erreicht wird.

Tabelle 16 Vor- und Nachteile von Wandaufbauten

Varianten	Vorteile	Nachteile
Einfachständerwerk Trockenbauwand	Mit geringen Dicken des Einfachständerwerks spart man Platz für den Raum.	Das Einfachständerwerk überträgt vermehrt Körperschall.
Doppelständerwerk Trennwände	Bei einem Doppelständerwerk werden die zwei Wandschalen nahezu vollständig getrennt.	Durch das doppelte Ständerwerk wird die Wand dicker.

Fazit

Der Mindestschallschutz und ein erhöhter Schallschutz sind mit beiden der o. g. Varianten möglich. Bei der Wahl eines Einfachständerwerkes empfehlen wir mindestens eine Ständerdicke von 100 mm und zusätzlich auf einer Seite der Wand die federnde Befestigung der Beplankung mittels Federschienen. Eine Lage der beidseitigen Beplankung muss aus mit Sand gefüllten Platten hergestellt werden. Die o. g. Vergleiche gelten analog auch für Innenwände im wohnungsinternen

Bereich, wobei man hier üblicherweise ein Einfachständerwerk wählt. Eine Alternative zum konventionellen Trockenbau stellen Strohtrockenbauwände dar. Die genannten Wände können nach den derzeitig vorliegenden Berechnungsvorschriften nicht berechnet werden, sondern müssen am Bau geprüft werden. Es ist zu vermuten, dass ähnlich wie bei Wänden aus Gipswandbauplatten eine hohe Biegesteifigkeit vorliegt und die Wände deshalb umlaufend vom Baukörper über Entkopplungsstreifen entkoppelt werden müssen.

6.7.6 Außenwände

Die Außenwände sollen aus Brettsperrholzplatten mit außenseitiger Wärmedämmung hergestellt werden. Bei einer Rohdichte des Holzes von etwa 500 kg/m^3 sind für die Einhaltung des Mindestschallschutzes an den Direktschalldurchgang und die Flankenschalldämmung Dicken von mindestens 200 mm erforderlich. Die Bedingung für die Flankenschalldämmung gilt dann, wenn das Holzelement von einem Raum zum Nächsten durchlaufend ausgeführt wird. Sofern ein Kopplungspunkt über eine Stütze erfolgt, sind höhere Flankenschalldämmungen erreichbar, sodass die Wandtafeln deutlich dünner ausgebildet werden können. Nach der DIN 4109-33:2016-07 ist voraussichtlich folgendes Schalldämm-Maß $R_w = 45 \text{ dB}$ für die Außenwand anzunehmen. Ein höherer Schallschutz ist nur dann möglich, wenn die Außenwände auf der Innenseite eine biegeeweiche Vorsatzschale aus Gipsplatten erhalten. Hierbei unterscheidet man zwischen aufgesetzten Vorsatzschalen und freistehenden Konstruktionen, wobei Letztere eine höhere Verbesserung der Schalldämmung erzielen. Die Vorsatzschalen können gleichzeitig als Installationsraum genutzt werden, sofern diese nicht von einem Raum in den nächsten schützenswerten Raum durchlaufen. Es muss somit eine Unterbrechung der Vorsatzschalen an einbindenden Decken und Wänden erfolgen.

Fazit

Zum Erreichen eines hohen Schallschutzes sind die Außenwandelemente im Bereich von Wohnungstrennwänden zu unterbrechen. Andernfalls sind Vorsatzkonstruktionen erforderlich.

6.8 Schallbrücken

6.8.1 Schwimmender Estrich

Anschlüsse vom schwimmenden Estrich an aufgehende Wände sind so vorzunehmen, dass keinerlei Mörtel- oder Klebebrücken zwischen Estrich und Wand bestehen. Dazu ist es notwendig, einen Dämmstreifen, $d = 10 \text{ mm}$, zwischen Estrich und aufgehender Wand einzubauen. Um zu verhindern, dass Estrichmaterial an kritischen Stellen Verbindungsbrücken zwischen schwimmendem Estrich und Fußbodenunterwand bildet, ist die Abdeckung seitlich an den Stellstreifen hochzuführen. Sofern ein Fließestrich zur Ausführung kommt, ist besonderer Sorgfalt bei der dichten Ausführung der Abdecklage als „Wanne“ erforderlich. Schwimmende Estriche sind in Türbereichen vollständig abzutrennen. Im Belag muss eine entsprechende Fuge ausgebildet werden.

6.8.2 Wandhängende WCs

Für alle wandhängenden WCs ist eine Körperschalldämpfung in Form einer untergelegten Matte vorzusehen (z. B. Geberit Schallschutzset), sofern keine schalldämmenden Installationseinheiten verwendet werden.

6.8.3 Bodengleiche Duschen

Unterhalb der Dusche ist eine Trittschalldämmung (i. d. R. aus XPS-Mehrschichtplatten) anzuordnen. Der Estrich und der Duschbelag sind schalltechnisch von den aufgehenden Wänden zu entkoppeln. Dies gilt auch für den Abfluss. Nach Möglichkeit sind Formteile von Herstellern zu verwenden.

6.8.4 Dämmung der Heizungsrohre

Die Dämmung der Heizungsrohre erfolgt entsprechend den Anforderungen der EnEV. Durchdringungen durch massive Wände müssen mit Mineralwolle abgedichtet werden.

6.8.5 Rohrschellen

Die Befestigung von wasser- bzw. luftführenden Rohren und Kanälen an Bauteilen darf nur über körperschallisolierende Befestigungselemente erfolgen. Bei Installation von Fallleitungen an einer gemeinsamen Trennwand unterschiedlicher Räume hat die Befestigung einen Abstand > 300 mm aufzuweisen. Die Befestigung erfolgt punktuell.

6.8.6 Lüftungskanäle

Bei der Erschließung mit Lüftungskanälen ist darauf zu achten, dass die Räume einzeln über Schalldämpfer mit Kanälen angefahren werden. Die Innenraumpegel aus haustechnischen Anlagen sollten < 35 dB(A) betragen.

6.8.7 Schallschutz haustechnischer Anlagen

Die **Anforderungen** an den Schallschutz bei haustechnischen Einrichtungen ergeben sich aus DIN 4109:1989-01 i. V. mit der Änderung A1 vom Januar 2001. Grundlage aller Anforderungen und der sich daraus ergebenden Maßnahmen ist die Forderung, dass der zulässige Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen bestimmte Werte nicht überschreiten darf. Für Geräusche aus der Wasserinstallation und für Geräusche aus sonstigen haustechnischen Anlagen gilt in Arbeitsräumen (Büros) ein kennzeichnender Schalldruckpegel von ≤ 35 dB(A).

Zur Wasserinstallation zählen Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen. Zu den sonstigen haustechnischen Anlagen zählen z. B. Ver- und Entsorgungsanlagen (außer Wasserinstallation), fest eingebaute betriebstechnische Anlagen, Garagenanlagen, etc. Außer Betracht bleiben ortsveränderliche Maschinen und Geräte.

Für die **Ausführung** der haustechnischen Anlagen muss folgendes beachtet werden:

- Es müssen Armaturen der **Armaturengruppe I** nach DIN 4109 eingebaut werden. Wände, an denen solche Armaturen angebracht werden, müssen entweder eine flächenbezogene Masse von mindestens 220 kg/m^2 aufweisen oder sie müssen als Montagewände (Metallständerwände) ausgeführt werden.
- Als Abwasserrohre sind durchgehend **Gussrohre oder PE-Rohre schallgedämmt** mit Verbindungselementen vorzusehen, die die Schallübertragung zwischen den einzelnen Rohrstücken wirksam reduzieren.
- In Wandschlitz- und Vormauerungen verlaufende Rohrleitungen sind mit Faserdämmstoff oder Kunstschäumen (weich) so zu ummanteln, dass die Übertragung von Körperschall ausreichend reduziert wird. Es ist darauf zu achten, dass nur **reißfeste Dämmstoffe** für Rohrleitungen verwendet werden (z. B. Fabrikat Missel).
- Empfehlenswert ist die Verwendung von sogenannten **Sanitäreinheiten**, die bausteinartig nebeneinandergestellt werden können. Diese Sanitärblöcke sind so konstruiert, dass sie entstehenden Körperschall in ihrem Innern ausreichend reduzieren, ebenso auch Körperschall von angehängten Becken oder ähnlichem. Mehrere Firmen haben solche Sanitärblöcke im Programm.
- Es sind **Installationsschächte** (nur in Ausnahmefällen auch Wandschlitz) vorzusehen, die eine Vormauerung oder eine Abschottung durch zweilagige Gipskarton- bzw. Gipsfaserplatten erhalten müssen.
- Die Installationsschächte sind jeweils in Höhe der Geschossdecken durch einen Schallschutz zu unterteilen. Der Schallschutz kann durch Ausbetonieren der Hohlräume oder durch sattes Ausstopfen mit Mineralwolle-Dämmstoff hergestellt werden.

- Die **Befestigung von wasser- bzw. luftführenden Rohren** und Kanälen an Bauteilen darf nur über körperschallisolierende Befestigungselemente erfolgen. Empfehlenswert ist die Verwendung von Sammelschienen, die über Gummielemente befestigt werden. Um eine Luftschallübertragung über das Lüftungssystem zu unterdrücken, sind zwischen Abluftöffnungen in Räumen und der Sammelleitung ausreichend dimensionierte **Schalldämpfer** einzubauen.
- Sämtliche technischen Anlagen sind mit gerätespezifisch dimensionierten Elementen **körperschallgedämmt** und **schwingungs isoliert** zu lagern (z. B. raumlufttechnische Anlagen, Wärmepumpen, Aufzugsanlagen, Garagentorantriebe etc.).
- Die **Raumschallpegel** in Räumen des Untergeschosses mit haustechnischen Anlagen sind durch die Wahl geräuscharmer Geräte bzw. Kapselungen auf $L_{AF} \leq 80 \text{ dB(A)}$ zu begrenzen. Anderenfalls müssen Maßnahmen zur Raumbedämpfung vorgesehen werden.

6.8.8 Aufzugsanlage/Schachtwand

Die Schachtwände der Aufzüge werden im Treppenhaus integriert. Sie grenzen in keinem Geschoss direkt an schützenswerte Räume. Um einen ausreichenden Schallschutz entsprechend der VDI 2566 Blatt 2 sicherzustellen, ist im vorliegenden Fall (Aufzug ohne Triebwerksraum und Aufzugsschacht nicht direkt an schützenswerten Räumen) eine flächenbezogene Masse der Schachtwand von $\geq 490 \text{ kg/m}^2$ erforderlich. Dies ist bei Stahlbetonwänden ab einer Dicke von 210 mm erreichbar. Die Treppenraumwände benötigen zudem eine Flächenmasse von mindestens 380 kg/m^2 . Sämtliche Anlagenteile wie z. B. Rollengerüste, Ab- und Umlenkrollen, Schaltgeräte und Tragmittel müssen vom Baukörper schalltechnisch entkoppelt werden. Bei der Be- und Entlüftung des Aufzugsschachtes ist darauf zu achten, dass keine störenden Geräusche ins Freie und in schutzbedürftige Räume gelangen. Sofern vom Lieferanten/Hersteller der Aufzugsanlage die Einhaltung der Anforderungen an den Schallschutz produktspezifisch garantiert wird, kann von den o. g. Vorgaben abgewichen werden.

6.8.9 Schutz gegen Außenlärm

Eine überschlägige Ermittlung des Außenlärms am Standort hat ergeben, dass insbesondere der Verkehrslärm von weniger stark befahrenen Straßen (Nelkweg und Schreiberstraße) in der Nähe und stärker befahrenen Straßen in der Ferne (Reislinger Straße) einwirkt. Für die Reislinger Straße (K2) wurden die Verkehrszahlen der L322 nach der Kreuzung mit der L290 angenommen mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) von 3.700 Kfz/24h. Für die zwei weniger befahrenen Straßen wurden prozentuale Anteile von 40 % bzw. 5 % angenommen. Mit diesen Verkehrszahlen ergibt sich aus dem Bild 1 in der DIN 4109:1989 der Lärmpegelbereich II. Dieser entspricht einen Außenlärmpegel von 56 bis 60 dB(A).

Mit der derzeit geplanten Außenwand mit einem Schalldämm-Maß von 45 dB und dem geplanten Dach mit einem voraussichtlichen Schalldämm-Maß von $> 45 \text{ dB}$ sind die Anforderungen der DIN 4109 gut zu erreichen. Die Fenster benötigen voraussichtlich eine Schalldämmung der klassifizierten Schallschutzklassen 3 bis 4 gemäß VDI 2719. Dies bedeutet ein Schalldämm-Maß von mindestens 35 dB. Bei diesem sollte beachtet werden, dass auf das Fenster aufgesetzte Rollladenkästen oder Lüftungsöffnungen ebenfalls eine ausreichend hohe Schalldämmung besitzen müssen.

6.9 Brandschutz

Ziel der dargelegten Untersuchungen war es, den iterativen Planungsprozess zu begleiten und umsetzbare Lösungen für den Brandschutz des Pilotvorhabens zu entwickeln. Neben der Frage, ob ein Gebäude über der Hochhausgrenze mit einer Primärkonstruktion aus Holz an diesem Standort überhaupt unter den derzeit geltenden Regelungen realisierbar ist, war zu untersuchen, ob diese auch als reine Holzkonstruktion ungekapselt ausführbar ist.

Der planerische Ansatz sieht die Errichtung von zwei Wohnhochhäusern vor, die über eine gemeinsame Tiefgarage miteinander in Verbindung stehen sollen. Oberirdisch sind die Hochhäuser mit 11 Vollgeschossen und einem Dachgeschoss geplant. Die Höhe im Sinne der NBauO liegt bei rund 35 m im Mittel. Das Untergeschoß musste hier zur Konzeptentwicklung mit einbezogen werden und ist anders als bei der Ökobilanzierung Teil der Untersuchungen.

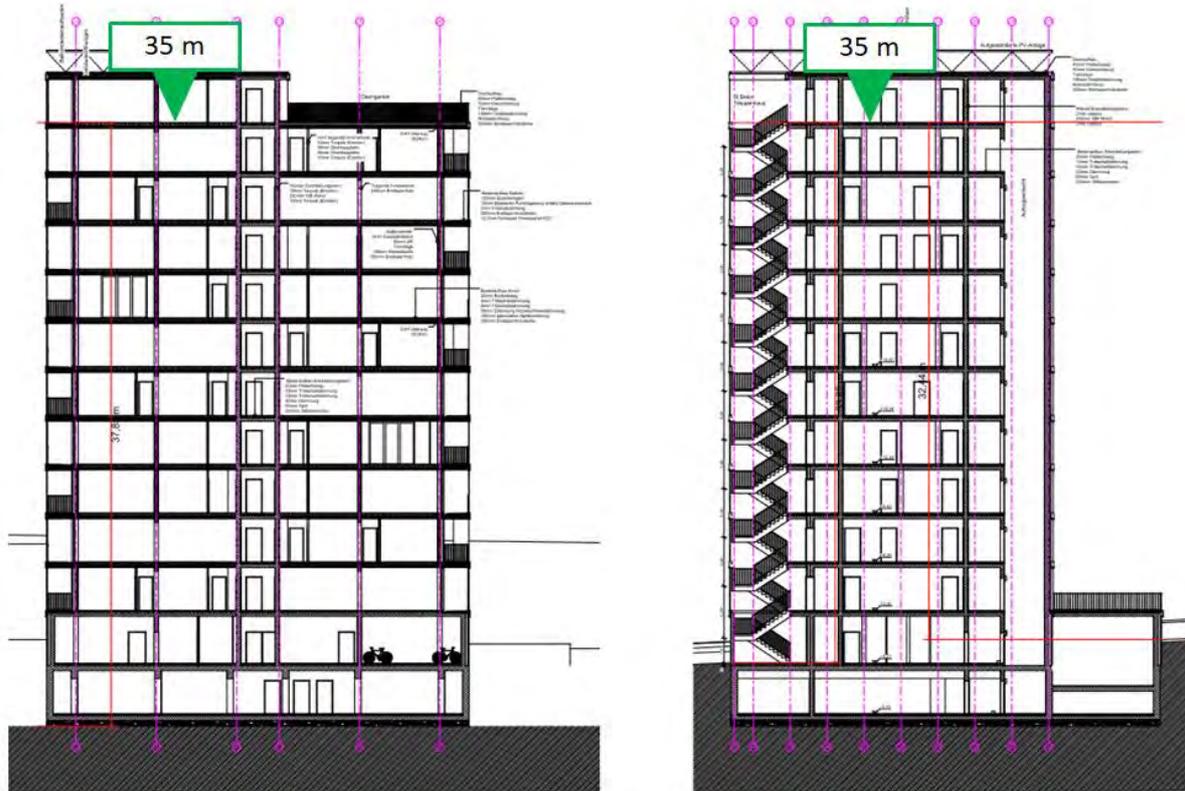


Abb. 41: Schnittansicht durch die geplanten Gebäude

Aufgrund der Gebäudehöhe handelt es sich gemäß § 2 Abs. (5) Satz 1 Nr. 1 der NBauO um bauliche Anlagen besonderer Art oder Nutzung (Sonderbau – Hochhaus). Für einen Sonderbau können gemäß § 51 Abs. (1) der NBauO Erleichterungen gestattet oder besondere Anforderungen gestellt werden. Es muss bei Abweichungen vom Baurecht nachgewiesen werden, dass die bauaufsichtlichen Schutzziele trotz der Abweichungen durch geeignete kompensatorische Maßnahmen erfüllt werden.

Die Muster-Hochhausrichtlinie (MHHR) ist in Niedersachsen bauaufsichtlich nicht eingeführt. Sie wird daher in Abstimmung mit der unteren Bauaufsicht und der Berufsfeuerwehr nur orientierend im Sinne einer anerkannten Regel der Technik herangezogen. Grundlage für die brandschutztechnische Beurteilung des Bauvorhabens ist daher im Wesentlichen die Niedersächsische Bauordnung (NBauO) mit der dazugehörigen allgemeinen Durchführungsverordnung zur NBauO (DVO-NBauO) in der jeweils aktuellen Fassung. Bei der Tiefgarage handelt es um eine unterirdische, geschlossene Großgarage nach § 1 Abs. (1), (4) und (5) der Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen und Stellplätzen (Garagen- und Stellplatzverordnung – GaStplVO). Die Anforderungen werden im Weiteren nicht diskutiert. Allerdings entsteht durch die Verbindung eine Abhängigkeit der beiden Gebäude. Dies gilt es zu beachten.

Aufgrund der Gebäudehöhe werden die Türme gemäß § 2 Abs. (3) der NBauO in die Gebäudeklasse 5 eingestuft.

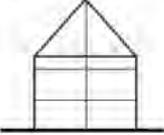
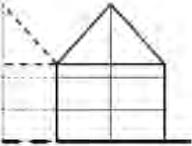
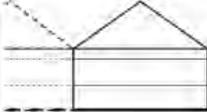
GK 1a	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
freistehende Gebäude OKF ≤ 7 m ≤ 2 Nutzungseinh. Σ NE ≤ 400 m ² 	nicht freistehende Gebäude OKF ≤ 7 m ≤ 2 Nutzungseinh. Σ NE ≤ 400 m ² 	sonstige Gebäude OKF ≤ 7 m 	OKF ≤ 13 m Nutzungseinh. mit jeweils ≤ 400 m ² 	sonstige Gebäude 
GK 1b freistehende Gebäude land- und forstwirtschaftlich genutzt 				
Feuerwehreinsatz mit Steckleiter möglich			Feuerwehreinsatz mit Drehleiter nötig	

Abb. 42: Einstufung in die Gebäudeklassen nach NBauO

Gemäß NBauO ist eine feuerbeständige Bauweise für diese Gebäudeklasse gefordert. Dies schließt die Verwendung brennbarer Baustoffe im Bereich der tragenden und aussteifenden Bauteile zunächst aus. Ausgehend von der Gebäudetypologie wurde daher untersucht, welche Mehrforderungen vor dem Hintergrund der brennbaren Bauweise aus brandschutztechnischer Sicht im Vergleich zu einer konventionellen Standardbauweise zu erwarten sind. Hierzu wurden folgende Vorabrandbedingungen festgelegt:

- Erschließungskern (Treppenhaus, Feuerwehraufzug etc.) wird feuerbeständig in Stahlbeton ausgeführt
- Die Abmessungen eines Turmes sollten ca. 26 m x 20 m nicht überschreiten.

Aus den Vorfestlegungen zu den Gebäudeabmessungen, die sich vorrangig an dem zur Verfügung stehenden Standort orientierten, ergab sich eine Beschränkung der Nutzungseinheitengröße von weniger als 200 m². Diese maximale Größe ist auch vor dem Hintergrund der Nutzung (Wohnen) zweckmäßig.

Auf Basis dieser Festlegungen werden die Anforderungen gemäß der orientierend herangezogenen an ein Hochhaus konventioneller Bauweise der geplanten Ausführung gegenübergestellt:

Tabelle 17 Brandschutzanforderungen an Bauteile

Bauteile	Anforderung MHRR	Geplante Ausführung
Tragende und aussteifende Bauteile	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen R 90-A	Hohlraumlose Holzmassivbauweise R 90 B, unbekleidet
Geschossdecken	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen REI 90-A	Hohlraumlose Holzmassivbauweise R 90 B, unterseitig unbekleidet
Wände von notwendigen Treppenträumen und deren Vorräumen,	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen EI 90-A	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen EI 90-A
Wände der Fahrschächte von Feuerwehraufzügen und deren Vorräumen.		
Wände von Installationsschächten,		
Wände von Fahrschächten und deren Vorräumen		
Wände und Brüstungen offener Gänge.		
Trennwände zwischen Nutzungseinheiten und zu anderen Räumen und Fluren	Feuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen EI 30-A	Hohlraumlose Holzmassivbauweise R 90 B, unbekleidet
Nichttragende Außenwände und Bekleidungen.	nichtbrennbare Baustoffe A1/A2 1 m Brüstungswand W 90	Feuerhemmend EI 30-B, Hohlraumlose Holzmassivbauweise, Außenseitig brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen in Qualität K60
Automatische Löschanlage	erforderlich	geplant
Brandmeldeanlage	erforderlich	in den Fluchtwegen geplant
Nasse Wandhydranten	erforderlich	geplant
Sicherheitstreppenraum (Überdruckbelüftung etc.)	erforderlich	geplant
Feuerwehraufzug	erforderlich	geplant
Sicherheitsbeleuchtung	erforderlich	geplant

Die MHRR erlaubt nach Ziffer 8 eine Erleichterung für Hochhäuser bis 60 m in Zellenbauweise. Unter bestimmten Voraussetzungen darf bei diesen Gebäuden auf eine automatische Löschanlage und eine automatische Brandmeldeanlage verzichtet werden. Diese sind:

- Nutzeinheiten maximal 200 m² groß
- Alle Trennwände zu anderen Nutzeinheiten und Räumen sowie zum Flur feuerbeständig
- Außenwand im Brüstungsbereich auf 1 m feuerbeständig oder 1 m feuerbeständige Auskragung zwischen den Geschossen

Der Vergleich der geplanten Ausführung zu den Grundsatzanforderungen der MHRR zeigt erhebliche Abweichungen, die auch bei einer schutzzielorientierten Betrachtung bestehen bleiben. Auch zeigt die Tabelle 16, dass es kaum Möglichkeiten der Kompensation gibt. Bis auf die Trennwände werden ohnehin die höchsten Anforderungen gestellt, und die Fluchtwege sind

baulich sicherzustellen (Sicherheitstuppenraum bzw. zwei notwendige Treppenräume). Auch ein verstärkter Einsatz von Anlagentechnik kann nicht als Kompensation herangezogen werden, da diese (Sprinkler, BMA, Sicherheitsbeleuchtung, Überdruckbelüftung etc.) ohnehin gefordert wird.

Eine Möglichkeit für Kompensationsmaßnahmen bieten sich bei einem Hochhaus nach Ziffer 8 über eine automatische Löschanlage. Ein weiterer Ansatz ist die Betrachtung des Brandszenarios im Hinblick auf Bauweise und Brandlast.

Der Feuerwiderstand von 90 Minuten wird bei allen Holzbauteilen durch eine Bemessung auf Abbrand vollumfänglich sichergestellt. Aufgrund der Bauweise in Holzmassivbau sind aber die von der Feuerwehr gefürchteten Hohlraumbrände ausgeschlossen. Die Brandentstehung innerhalb der Holztragkonstruktion durch Installationen kann praktisch ausgeschlossen werden, da in den Holzbauteilen keine Hohlräume vorhanden sind.

Durch die brennbare Holzkonstruktion liegt eine erhöhte Brandlast innerhalb der Nutzungseinheiten vor. Die Brandlast setzt sich generell aus den mobilen Brandlasten (Einrichtungsgegenstände, Teppiche, Akten und Bücher) sowie den immobilien Konstruktionsbrandlasten zusammen. Im vorliegenden Fall liegen aufgrund der Verwendung von ungeschütztem Holz signifikant höhere Brandlasten aus der Konstruktion vor. Hierbei handelt es sich um den sichtbaren Bestandteil der Brettsperrholzdecke, der Außenwände und der tragenden Innenwände. Diese zusätzliche Brandlast lässt sich berechnen. Da von der größten Nutzungseinheit das größte Risiko ausgeht, wird die Gesamtbrandlast in einer maximal 200 m² großen Wohnung als maßgebendes Szenario herangezogen. In diesem Brandabschnitt liegen die folgenden Holzbauteile vor:

- Brettsperrholzdecke (200 m²)
- Außenwände aus Brettsperrholz (100 m²)
- tragende Innenwände (27 m²)

Damit liegt eine sichtbare Holzfläche von insgesamt ca. 327 m² vor. Die Fensterflächen wurden hier nicht berücksichtigt. Es werden daher konservativ 10 m² Fensterfläche pauschal abgezogen.

Die Brettsperrholzbauteile werden in Fichte geplant. Die Decke hat eine Dicke von 200 mm. Die Außenwand besteht aus einem tragenden Stützenraster mit einem Stützenmaß von 400 x 240 mm. Die Gefache sind mit Massivholzplatten gefüllt, die eine Dicke von 180 mm aufweisen. Die mittlere Außenwanddicke wird mit 200 mm angesetzt. Die Trennwände sind 170 mm dick. Die mittlere Rohdichte von Fichte beträgt 430 kg/m³. Die Holzmenge, die sich aus den Brettsperrholzbauteilen bezogen auf eine Nutzungseinheit mit 200 m² ergibt, beläuft sich auf insgesamt 66,19 m³.

Damit ergibt sich eine Gesamtmasse an ungeschützt verbautem Holz von 28.461,70 kg in der größten Wohnung.

Über den Heizwert $H_u = 19,0 \text{ MJ/kg}$ für Fichte ergibt sich folgende immobile Brandlast q :
 $q = 19 \text{ MJ/kg} \cdot 28.461,70 \text{ kg}$
 $q = 540.772,30 \text{ MJ}$

Zu diesem Wert ist die mobile Brandlast (Einrichtung) noch hinzuzuaddieren. Die üblicherweise vorliegenden Brandlasten sind tabellarisch erfasst. Gemäß dem vfdB-Leitfaden Ziffer A4.2 Tabelle A4.1 wird für eine Wohnung eine maximale Brandlast von 1.085 MJ/m² angesetzt.

Der Anteil mobiler, veränderlicher Brandlasten liegt konservativ bei ca. 85 % bzw. 919,7 MJ/m².
Damit ergibt sich eine Gesamtbrandlast von:
 $540.772,30 \text{ MJ} + 919,7 \text{ MJ/m}^2 \cdot 200 \text{ m}^2 = 724.712,30 \text{ MJ}$

Es ist zu berücksichtigen, dass die Brandlast natürlich nicht in vollem Umfang sofort dem Brand zur Verfügung steht. Die Abbrandgeschwindigkeit von Holzbauteilen ist bekannt und wird z. B. über

den EC 5 im Rahmen einer statischen Auslegung von Holzbauteilen (heiße Bemessung) berücksichtigt.

Die Abbrandgeschwindigkeit von Brettsper Holz liegt bei 0,7 mm/min. Im vorliegenden Fall sind die Decke und die Außenwandanteile (jeweils einseitiger Brandangriff) als ungeschützte Holzbauteile vorhanden.

Innerhalb von 90 Minuten Brand (geforderter Feuerwiderstand in GK 5 und Hochhäusern < 60 m OKFF) werden also 63 mm Holz abbrennen. Weiterhin ist noch die Pyrolysezone mit 7 mm zu berücksichtigen. Konservativ wird daher eine thermische Umsetzung von 70 mm bzw. 0,07 m angesetzt.

Das bedeutet im vorliegenden Fall, dass von den 28.461,70 kg Holz nur rund 9.842,70 kg Holz thermisch umgesetzt werden.

Die thermisch umgesetzte Brandlast der Holztragkonstruktion und der mobilen Brandlast beträgt daher insgesamt 370.951,30 MJ. Die üblicherweise in Wohnnutzungen vorkommende Brandlast (5 % Fraktile nach vfdb-Leitfaden Ziffer A4.2 Tabelle A4.1) wird mit 1.085 MJ/m² angesetzt. Ausgehend von einer Grundfläche einer Nutzungseinheit von 400 m², die im Allgemeinen durch Berufsfeuerwehren beherrscht werden können, wären Brandlasten von 434.000 MJ zu erwarten (im Übrigen wären in Nutzeinheiten der Gebäudeklasse 5 Flächen von bis zu 1.600 m² baurechtlich akzeptiert zulässig).

Die in der größten Wohnung vorliegende Brandlast liegt damit deutlich unter diesem Wert. Das zu Erwartende Brandereignis ist daher auch bei den ungeschützten Massivholzbauteilen ungleich geringer.

Die Gefahr der Wiederentzündung sowie die Gefahr unentdeckter Glutnester werden bei der Decke und den Außenwänden durch die fehlenden Hohlräume (ausschließlich Holzmassivbau) eliminiert. Alle elektrischen Installationen innerhalb einer Nutzungseinheit werden außerhalb der Bauteile in eigenen Installationskanälen oder innerhalb einer geschlitzten Opferschicht aus Holz geführt. Eine Gefahr eines Hohlraumbrandes durch sich entzündende Leitungen wird damit ausgeschlossen. Leitungsführungen über die Geschosse und über raumabschließende Wände hinweg werden entsprechend geschottet. Die Rauchdichtigkeit der Deckenanschlüsse wird über Brandschutzchemie (Brandschutzsilikon) geregelt.

Aufgrund der Fassadengestaltung mit bodentiefen Fenstern ist für die beiden Türme unabhängig von der Bauweise eine automatische Löschanlage erforderlich. Dies wirkt sich wiederum risikominimierend aus. Ein potentieller Brand bleibt damit auch ohne Eingriff der Feuerwehr beherrschbar. Die Lösungen sind aus brandschutztechnischer Sicht mindestens gleichwertig. Der konstruktive Mehraufwand aus der Holzbauweise im Vergleich zur Standardkonstruktion beschränkt sich auf Qualität der Trennwände (REI 90 anstelle von R90 und EI30) sowie auf die außenseitige brandschutztechnische Bekleidung der geschlossenen Außenwandflächen in K₆₀ Qualität.

Die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit dieses Lösungsansatzes wurde in mehreren Gesprächen mit der unteren Bauaufsicht und der Berufsfeuerwehr bestätigt.

7 Ökobilanzierung

In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Einhaltung ökologischer Gebäudeenergiestandards kein Garant dafür ist, dass ein Gebäude im Ergebnis keine negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt verursacht. Dies belegt auch die Untersuchung „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus“.⁴¹ EnEV, KfW, Passivhaus, Nullenergie, Plusenergie sind keine Garantien für eine Einsparung von CO₂-Emissionen.

Vor diesem Hintergrund helfen ökobilanzielle Faktoren, um eine positive ökologische Langzeitwirkung eines Gebäudes zu planen. Der Nachweis eines „ökologischen Fußabdrucks“ mittels Ökobilanzierung wird zurzeit nur in speziellen Gebäudezertifizierungssystemen wie beispielsweise denen der DGNB, BNB oder LEED gefordert. Die geplanten Konstruktionen der WOODSCRAPER sollen deshalb schon in der Entwurfsphase mit Hilfe der Software LEGEP auf ihre ökologische Sinnhaftigkeit überprüft und ausgewertet werden.

Nicht nur bei der Errichtung von Gebäuden wird ein hoher Ressourcen- und Energieaufwand benötigt, über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes ist der Gesamtenergieaufwand z. B. für Wartung, Instandhaltung und Erneuerung ein notwendiges Kriterium, um eine ganzheitliche Bewertung der Umweltauswirkungen eines Gebäudes vornehmen zu können.

Die Lebenszyklusbetrachtung verdeutlicht dabei die Folgen von Produktprozessen, auch wenn diese generationenübergreifend sind, das heißt in eine Zukunft von z. B. 50 Jahren reichen. Die Gliederung in Baustoffe mit nicht erneuerbarem und erneuerbarem Kohlenstoff, der Zurichtungsgrad und die Lebenszyklusbetrachtung finden sich daher heute in der Ökobilanzierung wieder. Als ganzheitlicher Ansatz berücksichtigt sie den gesamten Lebenszyklus einschließlich des damit verbundenen Ressourcenverbrauchs und bewertet die damit verbundenen Umweltwirkungen. Entscheidungen in den ersten Leistungsphasen haben dabei den größten Einfluss auf die späteren Umweltauswirkungen und Kosten eines Projektes.

Einflussmöglichkeiten auf
Baukosten und Ökologie

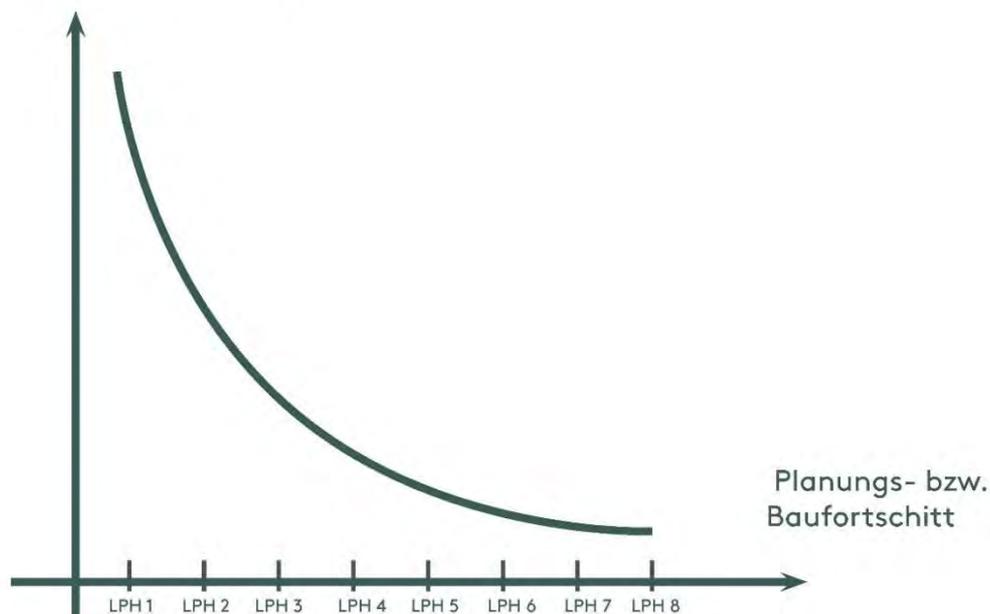


Abb. 43: Einfluss auf Ökologie und Baukosten im Planungsverlauf

⁴¹ Umweltbundesamt (2019): „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus“, FKZ 3715 41 111 0.

Eine Ökobilanz hilft dabei schon in der frühen Planungsphase, Transparenz über die Stoff- und Energieströme herzustellen. Die Ökobilanz bezieht sich dabei auf die potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und Umweltauswirkungen von Emissionen) im Verlauf des Lebensweges eines Gebäudes und seiner Bauteile über 50 Jahre mit den Phasen Herstellung, Instandsetzung und Entsorgung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“). Die Ökobilanz der Gebäude besteht dabei im Wesentlichen aus zwei Teilen:

1. Energie- und Stoffflussbilanz mit Ressourcennachweis (inklusive Materialliste), Primärenergienachweis:
 - Primärenergiebedarf nicht erneuerbar (PENRT), stofflich und Energie – Verbrauch nicht erneuerbarer Primärenergie (z. B. Erdgas, Erdöl, Kohle)
 - Primärenergiebedarf erneuerbar (PERT), stofflich und Energie – Verbrauch erneuerbarer Primärenergie (z. B. Sonne, Wind, Biomasse)
2. Wirkungsbilanz mit den sechs üblichen Kriterien:
 - Treibhauspotential (GWP) – Beitrag zum Klimawandel (Erderwärmung)
 - Ozonabbaupotential (ODP) – Beitrag zum Abbau der Ozonschicht (Ozonloch)
 - Ozonbildungspotential (POCP) – Beitrag zur Sommersmogbildung
 - Versauerungspotential (AP) – Beitrag zu saurem Regen / Waldsterben
 - Eutrophierungspotential (NP) – Beitrag zur Überdüngung (Umkippen von Gewässern etc.)
 - Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP) – Reduktion des globalen Bestandes an nicht erneuerbaren Rohstoffen (Metalle, Mineralien, Stein, Kies, Erde etc.)

7.1 Methode

Anhand des beispielhaften Gebäudeteils „Haus J“ der WOODSCRAPER wird dieses ökologische Potential mittels drei Varianten mit 46 Wohneinheiten in einer frühen Planungsphase vergleichend bilanziert und für zwei Bilanzzeiträume (Errichtung 1 Jahr und Gesamtnutzungsdauer 50 Jahre) evaluiert:

1. **Variante 01** wird als ressourcenpositive Variante definiert und so weit wie möglich ökologisch für geschlossene Kreisläufe optimiert. (Die Umsetzbarkeit von der Infrarotheizung in diesem Projekt konnte noch nicht abschließend geklärt werden. Deshalb wurde diese in der Ökobilanz nicht mitberücksichtigt.)
2. **Variante 02** wird als Standard-Variante definiert, um den heute üblicherweise eingesetzten Stand der Technik widerzuspiegeln.
3. **Variante 03** wird als Hybridvariante entwickelt, um ein wirtschaftliches Optimum im Zusammenspiel aus Kosten und Ökologie zu erzeugen.

In der vorliegenden Untersuchung wird der Fokus bei einer angenommenen Lebenszeit von 50 Jahren auf die Errichtung und Instandhaltung gelegt, da, wie eingangs beschrieben, die Quantifizierbarkeit der geplanten Nachnutzung erst weiter entwickelt werden muss. Die Versorgung mit Energie wird nicht berücksichtigt, da für die Gebäudevarianten dieselben Leistungskennzahlen beim Energiebedarf vorausgesetzt werden. Der Betrieb wird in nachfolgenden Untersuchungen im Verlauf der weiteren Planung Berücksichtigung finden. Es werden daher die Produktkategorien A1-A3 und B4 nach ISO 14040/ 14044 (siehe Abb. 22) untersucht.

Alle Stoffmengen für die Konstruktion des Gebäudes sowie deren Nutzungsdauer im Gebäude werden dafür zunächst erfasst und als vollumfängliche Modelle in die Bilanzierungssoftware LEGEP eingegeben. In den vergleichenden Bilanzierungen werden unveränderliche Bereiche des Gebäudes in den drei Varianten, wie das Tiefgaragengeschoss, die Außenanlagen und die Grundstückerschließung, nicht berücksichtigt – sie sind in allen Varianten identisch.

Die Stoff- und Energiemengen aus der Sachbilanz werden mit Ökobilanzdaten für die Herstellung und Instandhaltung der Baustoffe verknüpft. Dafür werden die Daten aus der Ökobaudat (2016) (Datenbank des „Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat“) verwendet. Durch die Verknüpfung der Stoff- und Energiemengen des Gebäudes mit den Ökobilanzdaten lassen sich die Umweltwirkungen eines Gebäudes in den verschiedenen Wirkungskategorien der vorab beschriebenen Wirkungsbilanz darstellen.

Da die unterschiedlichen Wirkungskategorien nicht direkt untereinander verglichen werden können, liegt der Fokus der Betrachtung in der Regel auf dem Treibhauspotential und dem Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Energie sowie dem abiotischen Ressourcenabbau. Diesem kommt, aufgrund der Verknappung der Ressourcen, eine immer größere Bedeutung zu. Die restlichen Kategorien sollten jedoch nicht unberücksichtigt bleiben, um sich nicht positive Effekte in einer Kategorie durch negative Effekte in einer anderen Kategorie zu erkaufen. Die einzelnen Baustoffe und Materialien sind den Anhängen dieses Berichtes zu entnehmen.

7.2 Auswertung

Bezogen auf die Sachbilanz wird hier zunächst auf den Massen- und Volumenaufwand eingegangen. Als nächstes werden der nicht erneuerbare Primärenergie- (PENRT) und erneuerbare Primärenergieanteil (PERT) besprochen und im Anschluss werden das Treibhauspotential (GWP) sowie der Abiotische Ressourcenverbrauch (ADP) untersucht. Die Auswertung bezieht sich zuerst auf die Gebäudevarianten als Ganzes, und im Folgenden werden sie bauteilbezogen untersucht. Das Treibhauspotential ist dabei die aussagekräftigste Größe, um die Klimaauswirkungen eines Gebäudes zu bewerten. Der abiotische Ressourcenabbau dient dazu, die Nutzung endlicher Ressourcen zu veranschaulichen.

Massen- und Volumenaufwand:

Sowohl der Massen- als auch der Volumenaufwand geben Aufschluss darüber, wie viel Baustoff (also Ressourcen) für die Errichtung des Gebäudes aufgewendet und bewegt werden muss. In den folgenden Tabellen und Diagrammen wird der Baustoffaufwand anteilig nach Gruppen ausgewiesen:

Tabelle 18 Massen- und Volumenaufwand

Variante 1			Variante 2			Variante 3		
Masse kg Neubau	Masse kg NAWARO	Prozent Masse	Masse kg Neubau	Masse kg NAWARO	Prozent Masse	Masse kg Neubau	Masse kg NAWARO	Prozent Masse
4.748.597	843.955	17,77 %	7.524.079	37.768	0,50%	4.677.414	732.694	15,66%
4.487.773	843.955	18,81 %	Ohne Betonfertigteile der Balkone und mit Balkonaufbau Variante 3					

Dabei ist der Baustoffmassenanteil der Variante 2 mit ca. 7,6 Mio. kg durch ihren hohen mineralischen Anteil deutlich höher als der Anteil der Varianten 1 und 3 mit ca. 4,7 Mio. kg und ca. 4,6 Mio. kg und jeweils mehr als 15 % nachwachsenden Rohstoffen. Der Unterschied von Variante 1 und Variante 3 liegt im Balkonaufbau begründet. Wird der Balkonaufbau wie in Variante 3 ausgeführt, so erhöht sich der prozentual nachwachsende Anteil in Variante 1 um ca. 1 %. Der prozentual verhältnismäßig geringe Anteil hängt mit der hohen Dichte der mineralischen Baustoffe zusammen. Daher ist das Verhältnis der Varianten zueinander im Vergleich der Baustoffvolumenanteile deutlich unterschiedlich zu den Massen in kg.

Eine Auswertung der Volumenanteile der verbauten Baustoffgruppen ist daher für die Bewertung der nachwachsenden Baustoffanteile wesentlich aussagekräftiger. Variante 1 beinhaltet dabei einen mineralischen Anteil von 32,5 % und 29,8 % nachwachsende Rohstoffe. In Variante 3 sind 28,6 % mineralische und 31,1 % nachwachsende Anteile verbaut. Der hohe Anteil mineralischer Baustoffe liegt in der Anwendung von Stahlbeton im Bereich des Erdgeschosses und des

Erschließungskerns, sowie in der Anwendung mineralischer Dämmung aus Gründen der Nichtbrennbarkeit. Der in Variante 3 erhöhte Anteil ist auf die Fußbodenaufbauten und den konventionellen Trockenbau zurückzuführen. Variante 2 in konventioneller Bauweise beinhaltet hingegen nur 0,5 % nachwachsende Anteile.

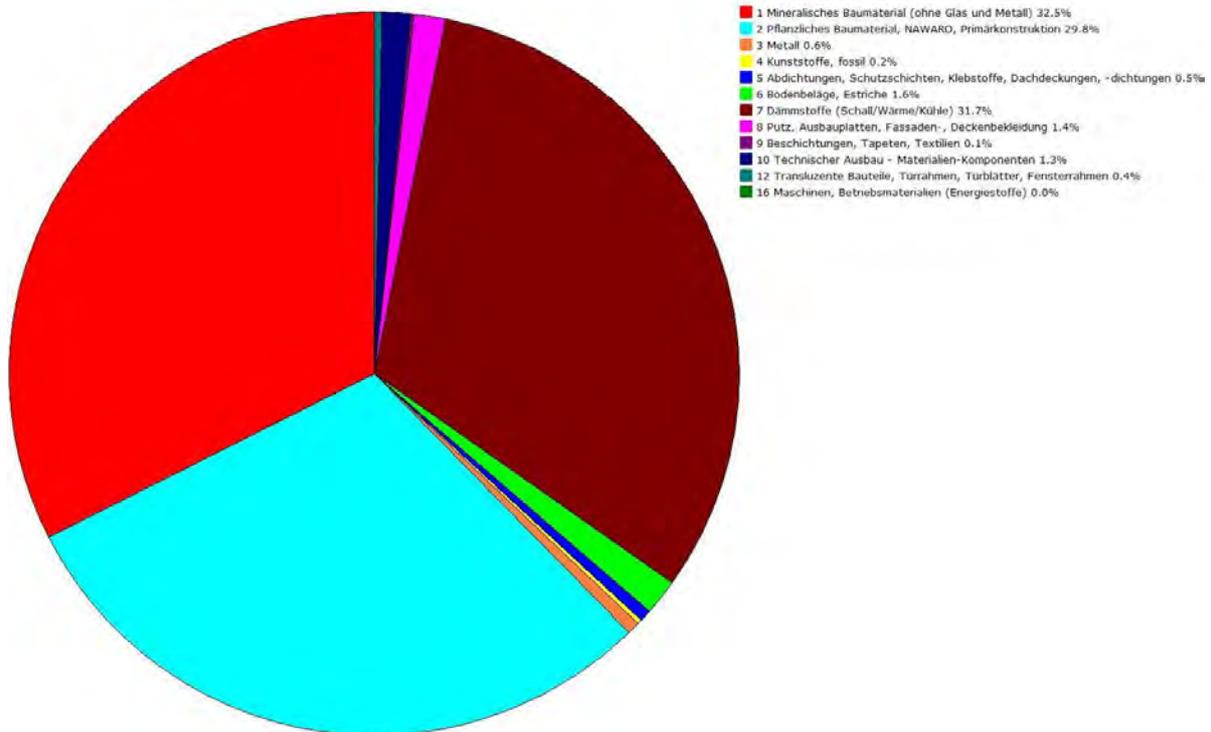


Abb. 44: Volumenanteile Variante 01

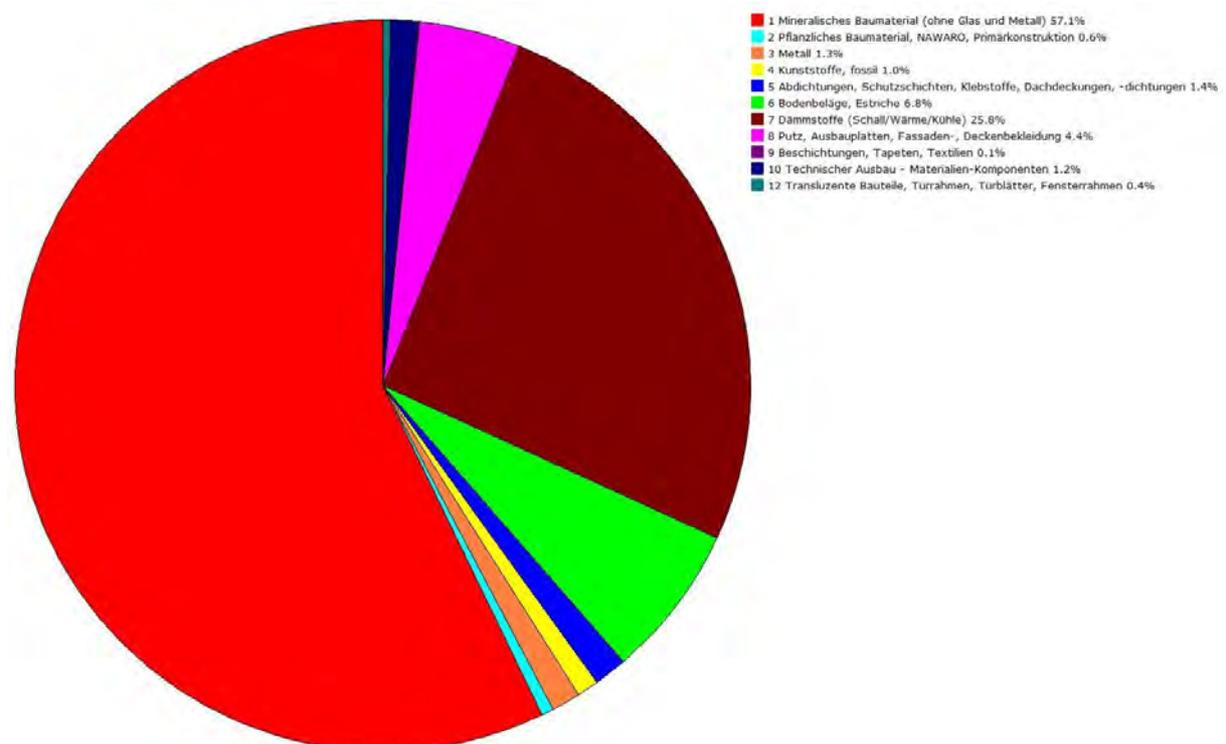


Abb. 45: Volumenanteile Variante 02

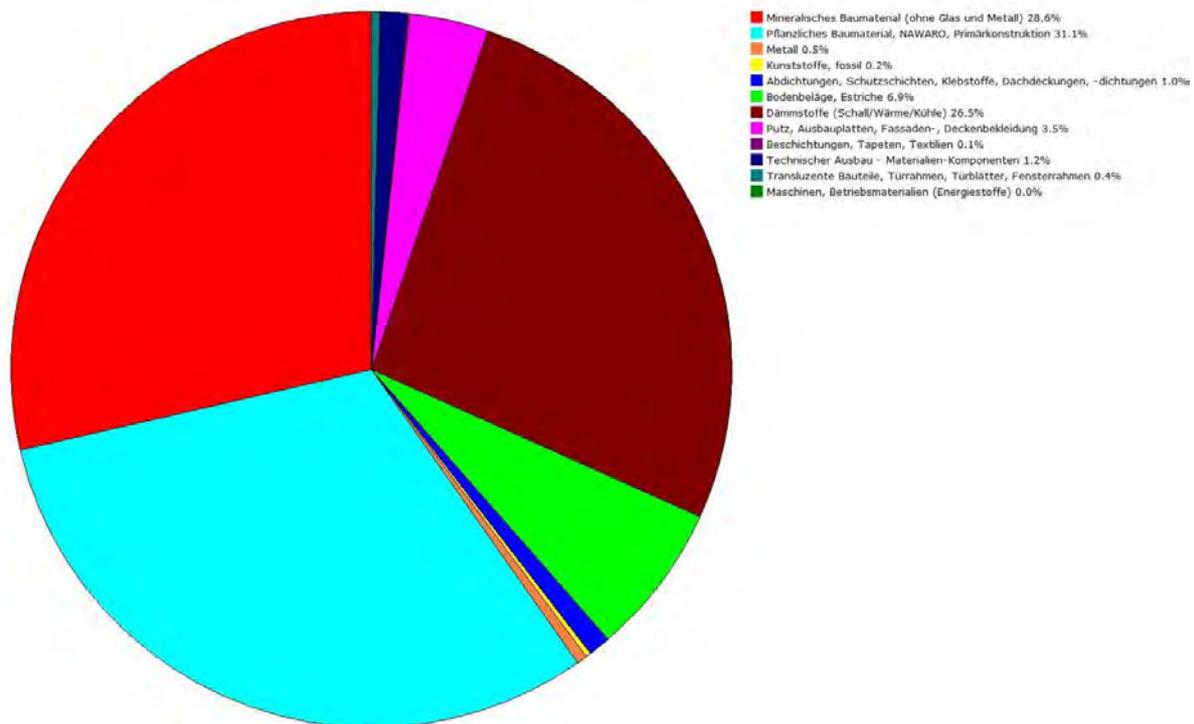


Abb. 46: Volumenanteile Variante 03

Ließe sich, sofern dies baukonstruktiv und brandschutztechnisch realisierbar ist, in den Varianten 1 und 3, jeglicher mineralische Dämmstoff konsequent durch nachwachsende Dämmstoffe ersetzen, so würde der nachwachsende Anteil (inkl. Dämmung) ein weitaus größeres Baustoffvolumen ausmachen. Über 60 % nachwachsende Baustoffe in einem Gebäude sind damit unterhalb der Hochausgrenze problemlos einzusetzen.

Primärenergie in Baustoffen:

Die aufgewendete Energie für die Herstellung der Gebäude, auch graue Energie genannt, wird in erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie aufgeschlüsselt. Grundsätzlich wird zudem bei Baustoffen zwischen stofflicher und energetischer Primärenergie unterschieden. Der stoffliche Anteil ist der Energieanteil, der bei thermischer Verwertung aus einem Stoff freigesetzt wird. Der energetische Anteil beschreibt die Energie, die für die jeweilige Herstellung aufgewendet werden muss. Da die Weiterverwendung in der vorliegenden Untersuchung unberücksichtigt bleibt, wird hier nur die energetische Primärenergie, die zur Herstellung aufgewendet werden muss, untersucht.

Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer Energie (PENRT):

Die konventionelle Variante 2 weist einen höheren Anteil an nicht erneuerbarer Primärenergie auf, was sich unter anderem auch in der schlechten CO₂-Bilanz widerspiegelt. Der Einsatz von erneuerbarer Energie in der Herstellung von konventionellen Baustoffen und Bauprodukten scheint hier sehr gering zu sein, oder es wird proportional mehr Energie für die Herstellung dieser Baustoffe benötigt.

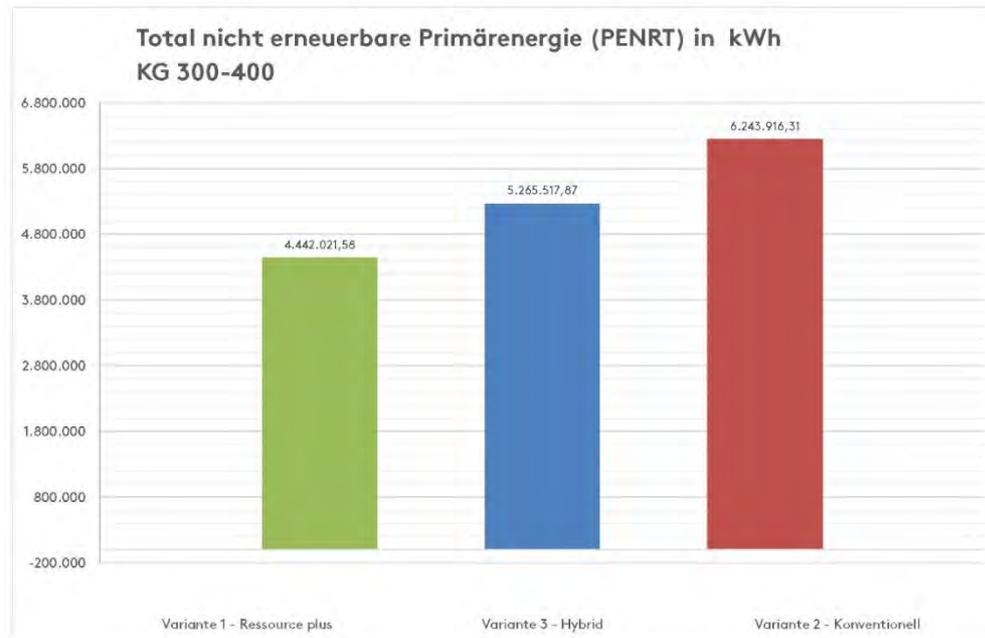


Abb. 47: Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) energetisch in kWh KG 300-400

Primärenergiebedarf erneuerbarer Energie (PERT):

Wie zu erwarten weist Variante 1 den höchsten Wert an energetischer, erneuerbarer Primärenergie auf. Es ist anzunehmen, dass die Herstellung dieser Baustoffe einen höheren Anteil erneuerbarer Energie benötigt. Addiert man den stofflichen und energetischen Primärenergieanteil, so weisen Gebäude mit hohem Anteil nachwachsender Baustoffe hohe Anteile an erneuerbarer Primärenergie auf, da in ihnen pflanzlicher Kohlenstoff gespeichert ist (siehe Tabelle 20 und 21). Pflanzlicher Kohlenstoff belastet die Atmosphäre nicht, wenn er verbrannt oder auf natürliche Weise abgebaut wird und zeitgleich von Bäumen und Pflanzen wiederaufgenommen wird. Es findet sozusagen ein Umschichten von natürlichen CO²-Speichern statt, sodass von CO²-Neutralität gesprochen werden kann.

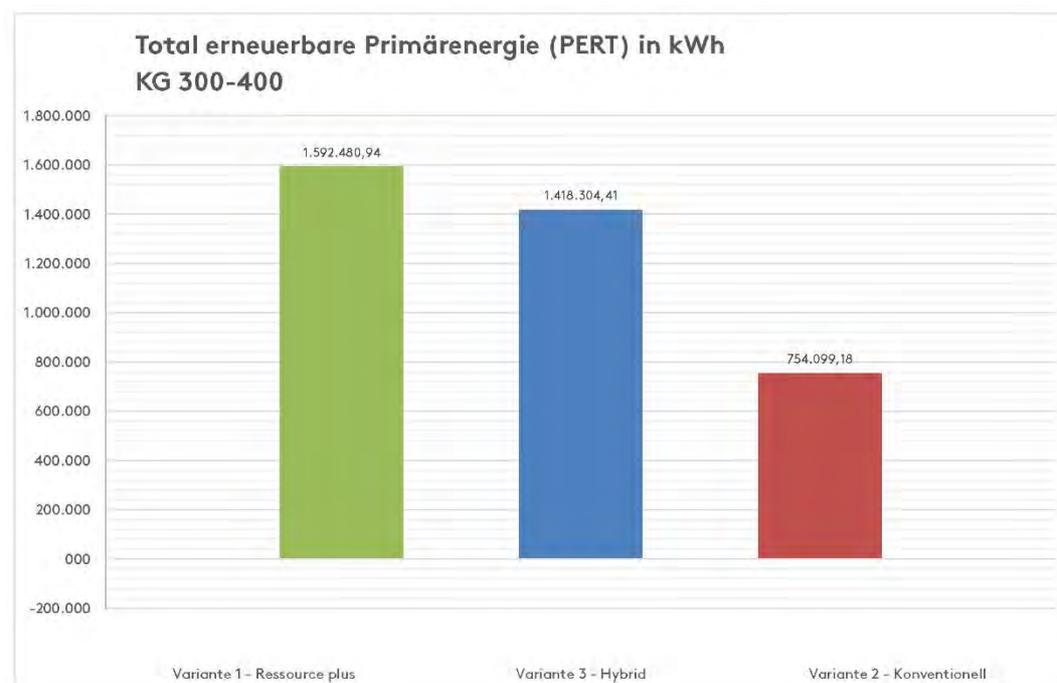


Abb. 48: Total erneuerbare Primärenergie (PERT) energetisch in kWh KG 300-400

Die folgenden Tabellen schlüsseln im Detail die unterschiedlichen Anteile der in den Varianten enthaltenen Primärenergie auf. Zuerst wird der Primärenergieanteil „energetisch“, dann „stofflich“ und zuletzt die Summe aller Primärenergieanteile aufgelistet.

Tabelle 19 Primärenergieanteil (Energie) PERT und PENRT addiert

Variante 1			Variante 2			Variante 3		
PERT in kWh Energie	PENRT in kWh Energie	PE in kWh Energie	PERT in kWh Energie	PENRT in kWh Energie	PE in kWh Energie	PERT in kWh Energie	PENRT in kWh Energie	PE in kWh Energie
1.592.480	4.442.021	6.034.502	754.099	6.243.916	6.998.015	1.418.304	5.265.517	6.683.822

Wenn man den Primärenergieanteil (Energie) erneuerbar und nicht erneuerbar zusammenaddiert, zeigt sich, dass Variante 1 den geringsten Anteil an Primärenergie für die Herstellung benötigt. Wird der Primärenergieanteil (stofflich) erneuerbar und nicht erneuerbar zusammenaddiert, so beinhaltet Variante 1 den höchsten Anteil an stofflicher Primärenergie. Dies resultiert vor allem aus der Energie, die in nachwachsenden Rohstoffen in Form von Kohlenstoff gespeichert ist.

Tabelle 20 Primärenergieanteil (stofflich) PERT und PENRT addiert

Variante 1			Variante 2			Variante 3		
PERT in kWh stofflich	PENRT in kWh stofflich	PE in kWh stofflich	PERT in kWh stofflich	PENRT in kWh stofflich	PE in kWh stofflich	PERT in kWh stofflich	PENRT in kWh stofflich	PE in kWh stofflich
4.483.973	432.856	4.916.830	205.335	1.325.348	1.530.684	3.952.191	815.166	4.767.357

Die nachfolgende Tabelle veranschaulicht den gesamten Primärenergieanteil pro Variante, wobei erneuerbar und nicht erneuerbar, sowie „Energie“ und „stofflich“ zusammengezählt werden. Interessanterweise beinhaltet bei dieser Untersuchung Variante 3 die höchste Primärenergie. Dies lässt sich daraus ableiten, dass durch die konventionellen Anteile im Gebäude recht viel nicht erneuerbare Primärenergie für die Herstellung mit den hohen erneuerbaren Primärenergieanteilen aus der Holzkonstruktion zusammenkommt. Das Gesamtergebnis von Variante 1 bleibt trotz des hohen Wertes immer noch am besten, da in der Zahl von 10.972.289 kWh PE die geringste nicht erneuerbare Primärenergie steckt.

Tabelle 21 Primärenergieanteil (total) PERT und PENRT addiert (Energie + stofflich)

Variante 1			Variante 2			Variante 3		
PERT in kWh Energie + stofflich	PENRT in kWh Energie + stofflich	PE in kWh TOTAL	PERT in kWh Energie + stofflich	PENRT in kWh Energie + stofflich	PE in kWh TOTAL	PERT in kWh Energie + stofflich	PENRT in kWh Energie + stofflich	PE in kWh TOTAL
6.097.388	4.874.901	10.972.289	958.756	7.569.254	8.528.010	5.363.264	6.078.478	11.441.742

Die nachfolgenden Darstellungen veranschaulichen, in welchen Bauteilen wie viel Primärenergieanteile (Energie) erneuerbar und nicht erneuerbar zur Herstellung enthalten ist. Erstaunlich ist dabei, dass die Fenster und Türen dabei annähernd ähnlich viele Primärenergieanteile benötigen wie die Decken. Balkone und Lüftungsanlage fallen dabei auch erheblich ins Gewicht. Es ist deutlich, dass der erneuerbare Energieanteil in der Herstellung, abgesehen von den Decken, insgesamt sehr gering ist.

Bei der Instandsetzung fallen die Lüftungsanlagen in allen Varianten und die Kunststoffenster in Variante 2 auf. Der hohe Anteil an Primärenergie in der Decke von Variante 2 resultiert aus dem hohen Austauschzyklus des Laminatbodens.

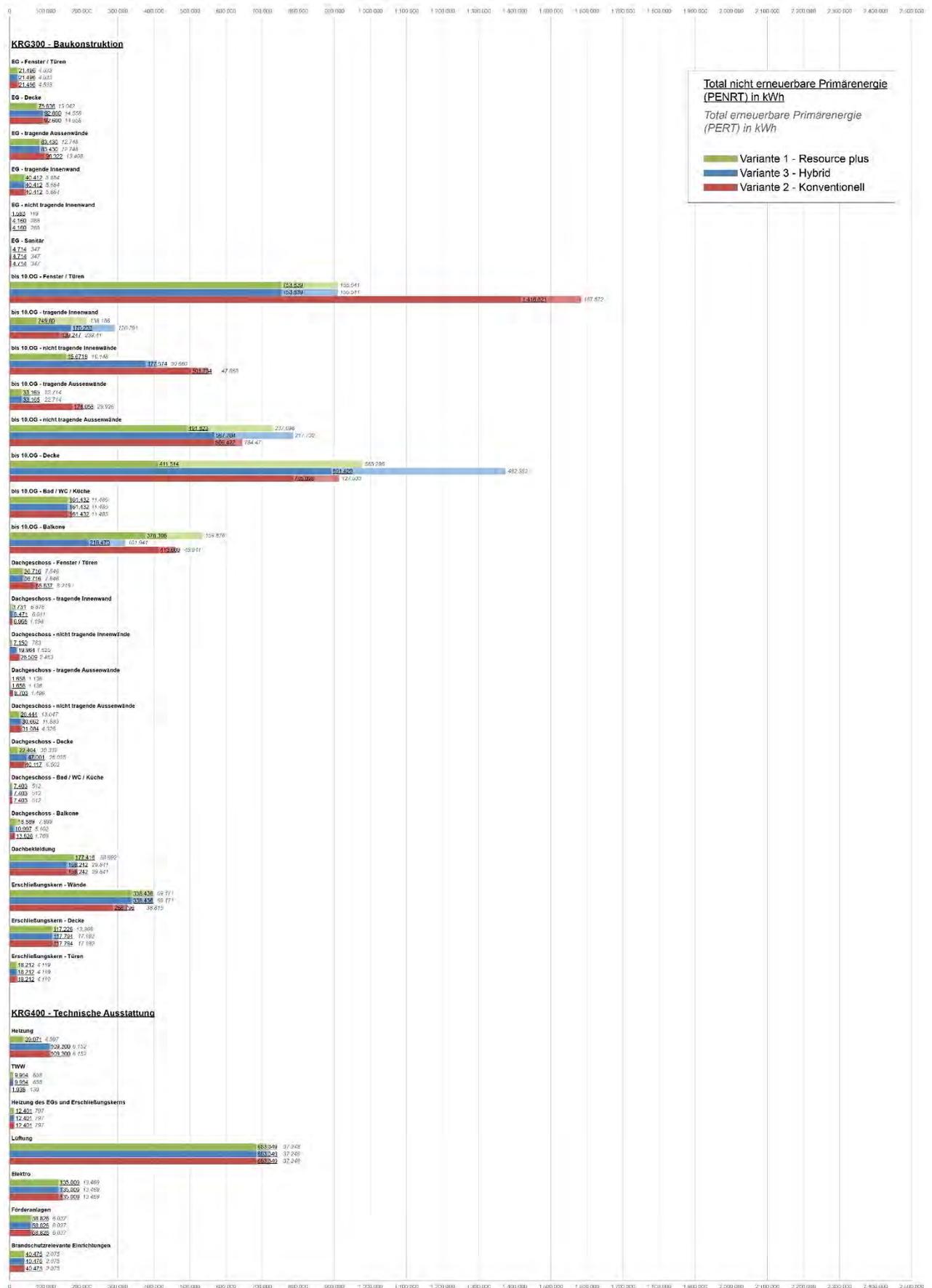


Abb. 49: Primärenergie (PENRT) und (PERT) bauteilbezogen in kWh KG 300-400

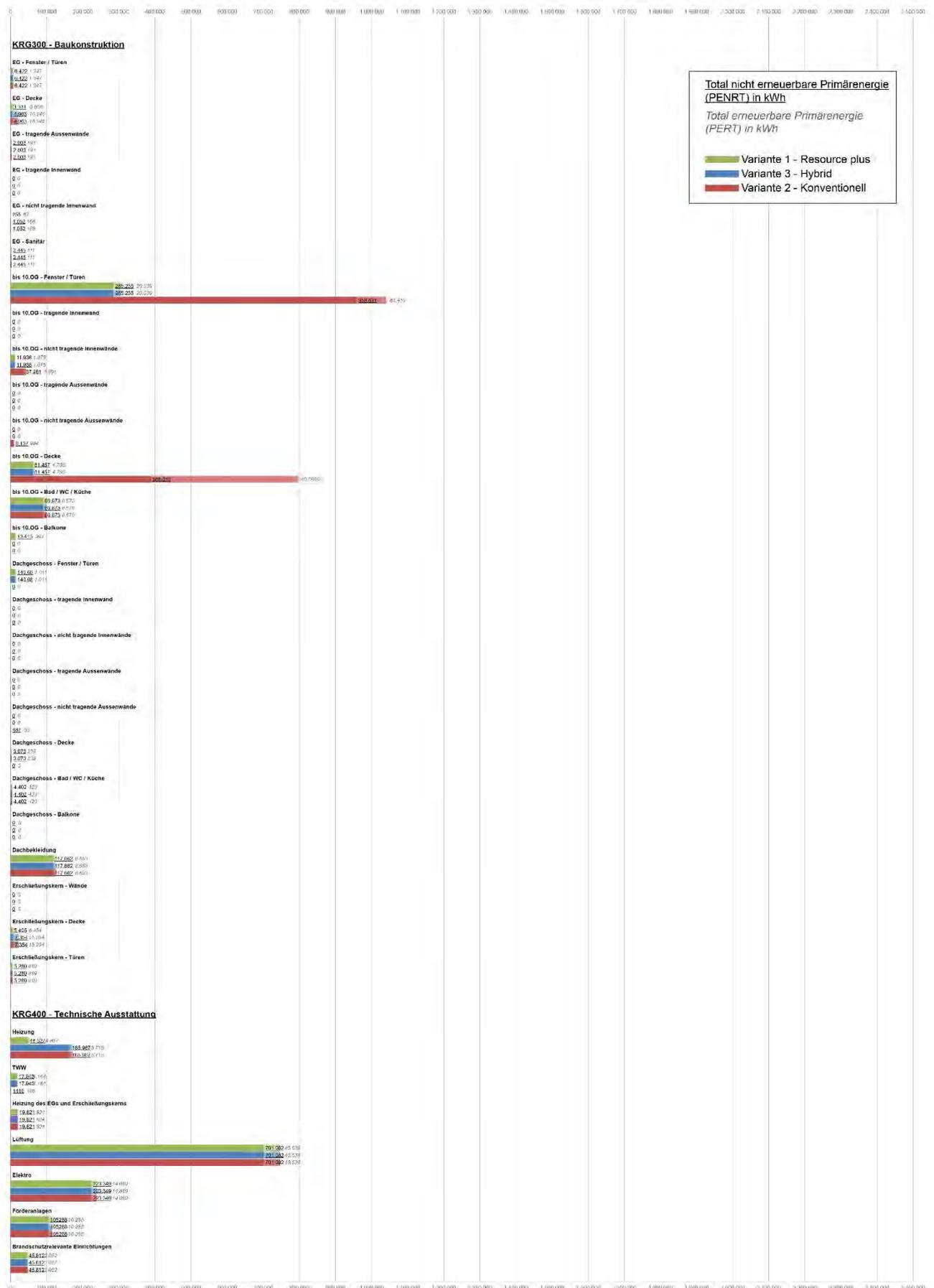


Abb. 50: Primärenergie (PENRT) und (PERT) auf 50 Jahre bauteilbezogen in kWh KG 300-400

Treibhauspotential (GWP):

Das Treibhauspotential wird als ein Äquivalent zu CO₂ in kg ausgewiesen. Hierbei wird CO₂ als eines der bekanntesten Treibhausgase herangezogen, wobei es nicht das wirkungsstärkste Treibhausgas ist. Ein Vergleich des Treibhauspotentials in kg CO₂-Äq. bedeutet nicht, dass ausschließlich CO₂ bei der Herstellung von Baustoffen und -Produkten emittiert wird, es können auch andere Treibhausgase entstehen, welche hier nur in einem CO₂-Äq. abgebildet sind.

Im Vergleich der Gebäudevarianten zeigt sich, wie stark konventionelle Bauweise (Variante 2) das Klima der Erde schon während der Errichtung belastet. Hier werden zu Beginn des Lebenszyklus mehr als 2 Mio. kg CO₂-Äq. an Treibhausgasen in die Atmosphäre emittiert. Eine CO₂-Kompensation dieser Größenordnung über den gesamten Nutzungszeitraum ist selbst durch effiziente Gebäudetechnik relativ ausgeschlossen, da diese für die Erstellung auch wieder Ressourcen verbraucht und CO₂ emittiert. Dies legt die Notwendigkeit nahe, beim Neubau den Fokus auf die CO₂-Emissionen zu richten, da hier die Einspareffekte sofort im Jahre der Errichtung eintreten und nicht erst potenziell am Ende der Nutzungsphase.

„Allein durch die Verwendung von Holz lässt sich etwa ein Viertel der gesamten klimarelevanten Emissionen eines Hauses einsparen. Diese Ersparnis findet komplett im Jahr null statt und nicht verteilt auf 50 Jahre wie bei verbesserter Dämmung. Der Hebel der Gebäudekonstruktion ist deshalb viel wirksamer.“⁴² Joost Hartwig

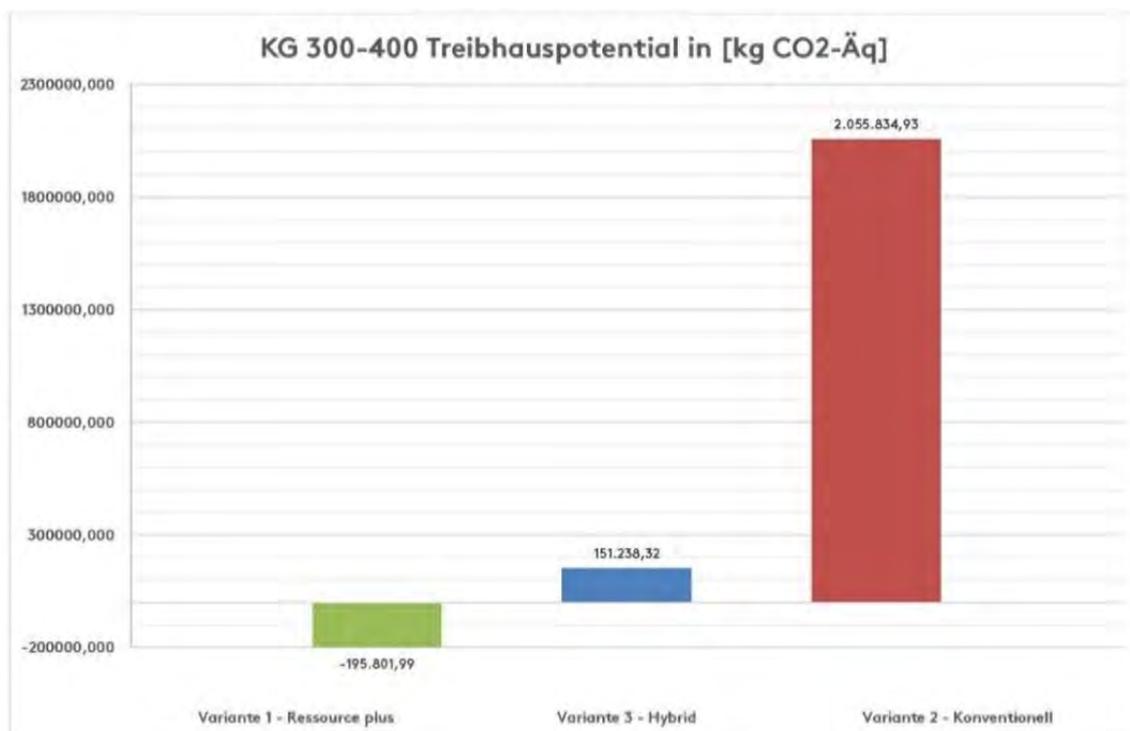


Abb. 51: KG 300-400 Treibhauspotential in [kg CO₂-Äq.]

Bei Variante 1 (Ressource plus) zeigt sich sehr deutlich welchen Einfluss der hohe Anteil an nachwachsenden Rohstoffen im Gebäude auf die Treibhausgasemissionen ausübt. In den nachwachsenden Baustoffen wird so viel Treibhausgas gebunden, dass sogar die restlichen Baustoffmassen (mineralische, metallische, usw.) in ihrem Treibhauspotential ausgeglichen werden und zusätzlich noch eine Speicherung von ca. 195 Tsd. kg CO₂-Äq. entsteht.

⁴² Joost Hartwig im Interview, 18. Februar 2019: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/massivholz-hausbau-klimabilanz-1.4335014-2>

Variante 3 (Hybrid) mit konventionellem Ausbau zeigt aufgrund des hohen Holzanteils sehr reduzierte Treibhausgasemissionen auf. Allerdings wird hier nicht mehr Treibhausgas eingespeichert als für die Errichtung emittiert wird.

Wird nur die Baukonstruktion (KG 300) betrachtet, so wird deutlich, dass die Baukonstruktion schon gut optimiert wurde und in der Gebäudetechnik relativ viel emittierte Treibhausgase für die Herstellung stecken. Gerade bei den baukonstruktiv optimierten Varianten 1 und 3 fällt dies nun verstärkt ins Gewicht. Allein für die Errichtung stecken rund ca. 231 Tsd. kg CO₂-Äq. in der Gebäudetechnik. Für die weitere Entwicklung der Gebäudetechnik ist es daher ratsam, eine Optimierung vorzunehmen bei zeitgleicher Betrachtung der Betriebsemissionen.

Ohne Gebäudetechnik ist selbst Variante 3 (Hybrid) bei dieser Betrachtung im negativen Bereich der CO₂-Emissionen. Dies zeigt den positiven Einfluss des auch in dieser Variante sehr hohen Holzanteils im Gebäude. Die Wahl der Baustoffe sowie die eingesetzte Gebäudetechnik zum Zeitpunkt der Errichtung haben damit einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Umweltwirkungen eines Gebäudes.

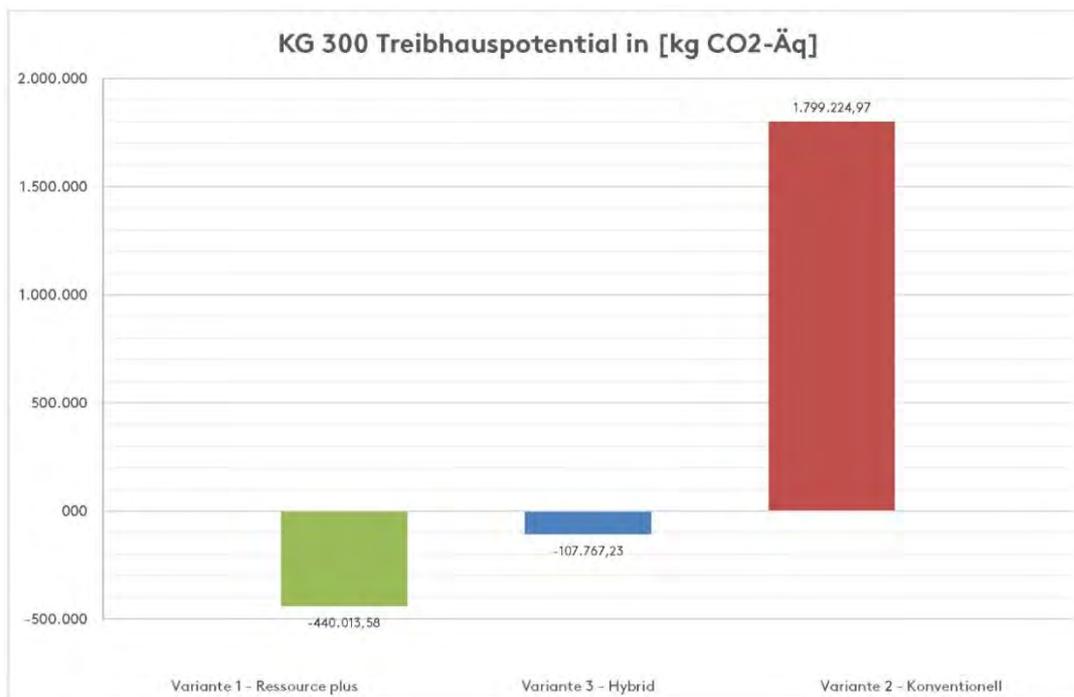
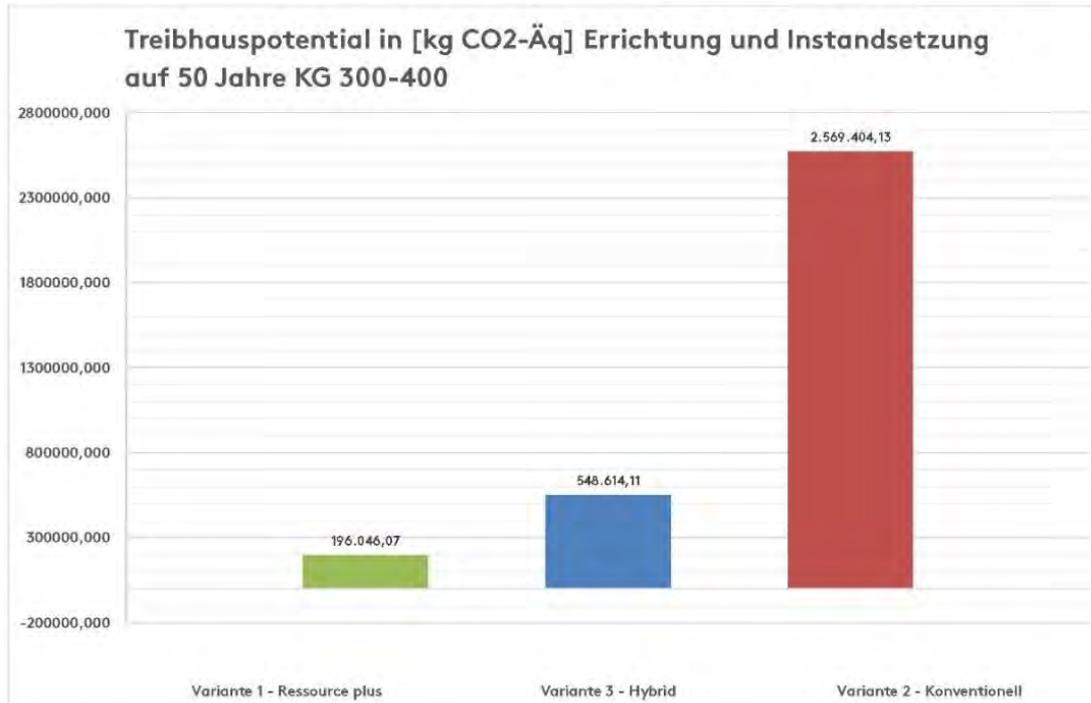
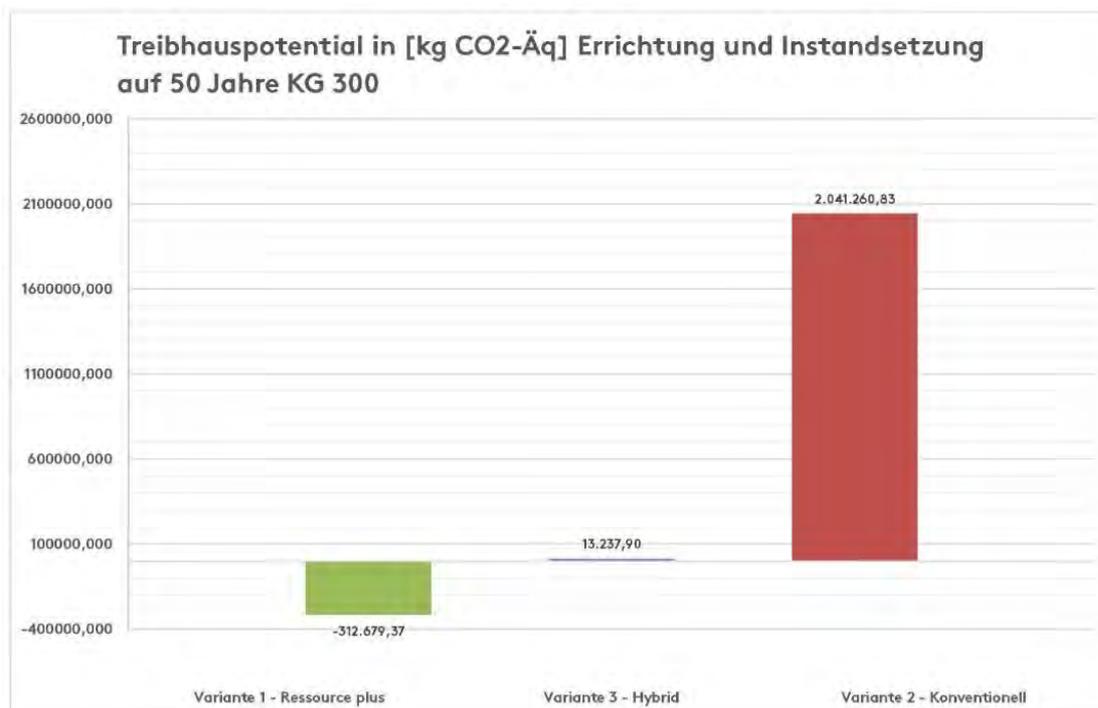


Abb. 52: KG 300 Treibhauspotential in [kg CO₂-Äq.]

Wird die Instandsetzung über 50 Jahre in der Ökobilanz mit einbezogen, so wird deutlich, dass selbst Variante 1 ohne Berücksichtigung der Betriebsemissionen etwas mehr Treibhausgas freisetzt als in den nachwachsenden Baustoffen eingespeichert wird (siehe Abb. 53). Der Grund hierfür liegt vor allem in der Gebäudetechnik. Wie sich aus der nachfolgenden Grafik ergibt, werden für die Instandsetzung der Baukonstruktion über 50 Jahre in Variante 1 lediglich ca. 127 Tsd. kg CO₂-Äq. zusätzlich emittiert (440.013 kg CO₂-Äq. (Abb. 52) minus 312.679 kg CO₂-Äq. (Abb. 54)).

Da die Baukonstruktion bereits optimiert geplant wurde, lässt sich eine Umkehrung der positiven Emissionen aus Variante 1 über den gesamten Lebenszyklus vor allem über eine Optimierung der Gebäudetechnik erreichen. Nullemission im Gebäudetrieb ist dafür Voraussetzung. Durch Produktion von erneuerbarer Energie, beispielsweise einer Photovoltaikanlage, kann über die Nutzungszeit hinweg ein weiterer negativer Eintrag im Treibhauspotential erreicht werden. Selbst nach einer Nutzungszeit von 25 Jahren und weiterer Investition von Rohstoffen und Energie (durch Instandhaltung und Wartung) kann Variante 1 ein negatives Treibhauspotential erzielen. Diese Potenziale müssen in der Weiterentwicklung untersucht werden.

Abb. 53: Treibhauspotential in [kg CO₂-Äq.]Errichtung und Instandsetzung auf 50 Jahre KG 300-400Abb. 54: Treibhauspotential in [kg CO₂-Äq.] Errichtung und Instandsetzung auf 50 Jahre KG 300

Auf Bauteilebene in den anschließenden Grafiken zeigt sich in der Ökobilanz sehr deutlich, dass die Massivholzdecken in den Gebäudevarianten 1 und 3 einen wesentlichen Einfluss auf die reduzierten Treibhausgasemissionen haben. Die Kunststoffenster, Stahlbetondecken und Kalksandstein-Außenwände mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS) fallen bei Variante 2 sehr deutlich negativ ins Gewicht. Der Vergleich der Holzbauteile aus Variante 1 und 3 zeigt auf, dass der Verzicht auf Leim in den Holzbauteilen (z. B. tragende Innenwände) durchaus positiv in der Ökobilanz ablesbar ist, jedoch in der Gesamtbilanz nicht wesentlich ins Gewicht fällt. Bei Variante 3 wirken sich der Fließestrich und der konventionelle Trockenbau negativ gegenüber Variante 1 aus.

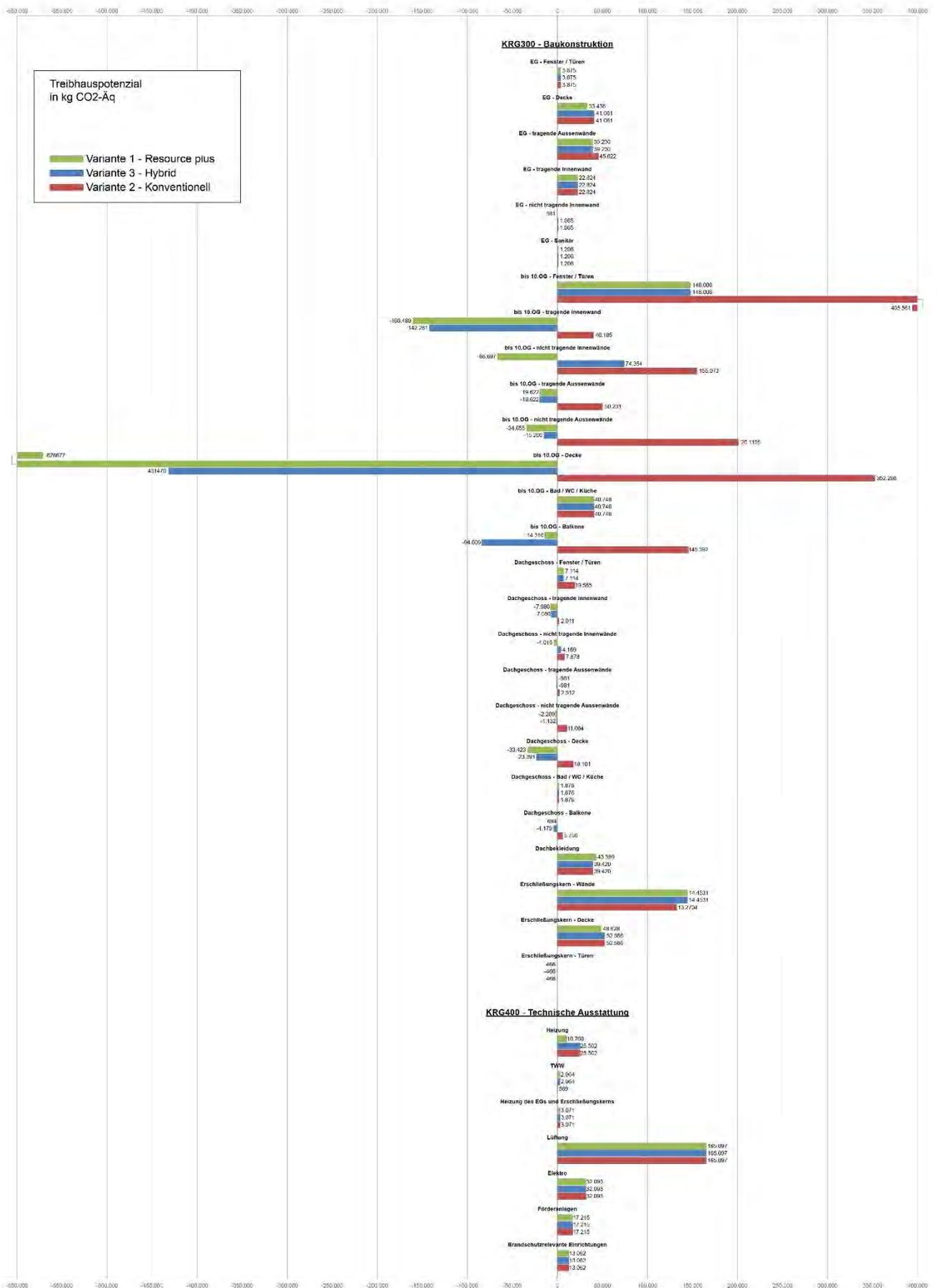


Abb. 55: Treibhauspotenzial in [kg CO₂-Äq.]bauteilbezogen KG 300-400

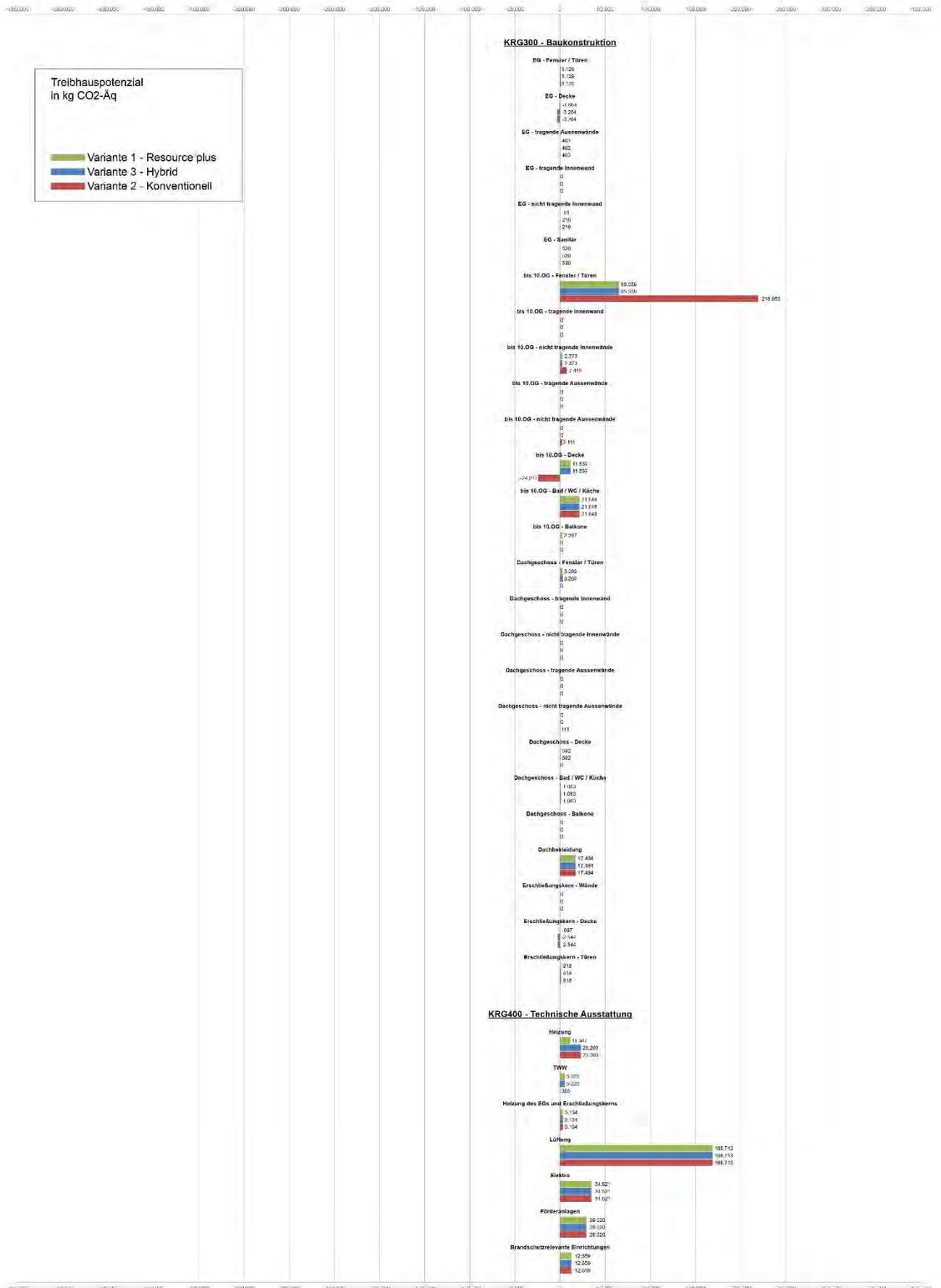


Abb. 56: Treibhauspotenzial in [kg CO₂-Äq.] Instandsetzung auf 50 Jahre, bauteilbezogen KG 300-400

In dem bauteilbezogenen Treibhauspotential zeigt sich abermals, dass sich die geplanten Betonfertigteile auf den Balkonen aus Variante 1 negativ in der Bilanz niederschlagen. Die Herstellung dieser Fertigteile stößt wesentlich mehr CO₂ aus als der klassische Aufbau der Variante 3 mit Steinbelag, Schotterschicht und Abdichtung. Es ist deshalb ratsam, hier den Aufbau aus Variante 3 zu bevorzugen.

Aus der bauteilbezogenen Untersuchung der Instandsetzung auf 50 Jahre geht hervor, dass das Treibhauspotential insbesondere der Lüftungsanlage in allen Varianten und der Kunststofffenster in Variante 2 besonders schlecht ausfällt. Erstaunlich ist hierbei, dass der Austausch des Laminatbelages in Variante 2 (Decken) sich positiv in der Treibhausbilanz auswirkt. Dies erklärt sich nur durch den Holzanteil im Laminat. Aufgrund des Materialverbundes dieses Bodenbelages und des damit verbundenen Müllanfalls kann dieses Ergebnis jedoch nicht positiv bewertet werden. Interessant ist auch, dass die mineralische Wärmedämmung mit Blechfassade an den Stahlbetonaußenwänden des Erschließungskernes der Variante 1 und 3 bezogen auf das Treibhauspotential schlechter abschneiden als das Wärmedämmverbundsystem der Variante 2. Was die Rezyklierbarkeit betrifft, so bleibt das WDVS-System jedoch fraglich. Wie eingangs beschrieben zeigt sich hier deutlich, dass bei der Betrachtung von ökologischen Vorteilen in einer Kategorie darauf geachtet werden sollte, dass damit keine Nachteile in einer anderen verursacht werden.

Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP):

Dieser Wert beschreibt die Reduktion des globalen Bestandes an nicht erneuerbaren Rohstoffen, welche nicht den Energieträgern zuzuordnen sind (Metalle, Mineralien, Stein, Kies, Erde etc.). Als „nicht erneuerbar“ wird ein Entstehungszeitraum von mindestens 500 Jahren definiert. Die Verknappung der Ressourcen, die nicht den Energieträgern zuzuordnen sind, wird mit dem Indikator abiotischer Ressourcenverbrauch beschrieben (Einheit in kg Antimon-Äquivalent (Sb bezeichnet dabei das Element Antimon (Stibium))). Es wird somit erstmals möglich, den Einfluss von nicht erneuerbaren, nicht energetischen Ressourcen aufzuzeigen.

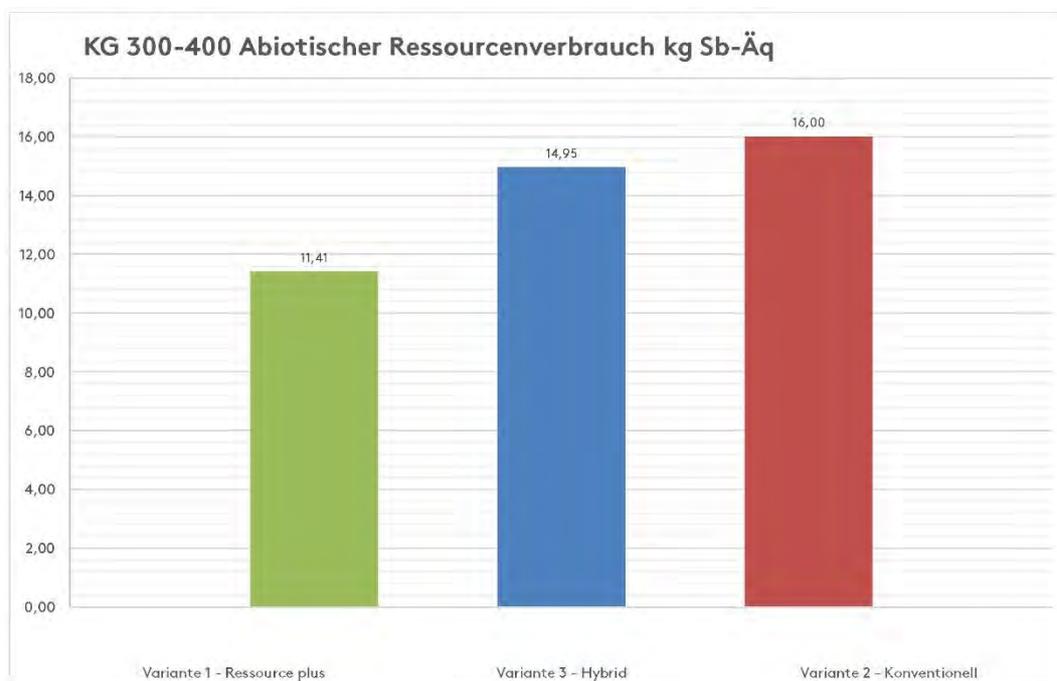


Abb. 57: KG 300-400 Abiotischer Ressourcenverbrauch in kg Sb-Äq

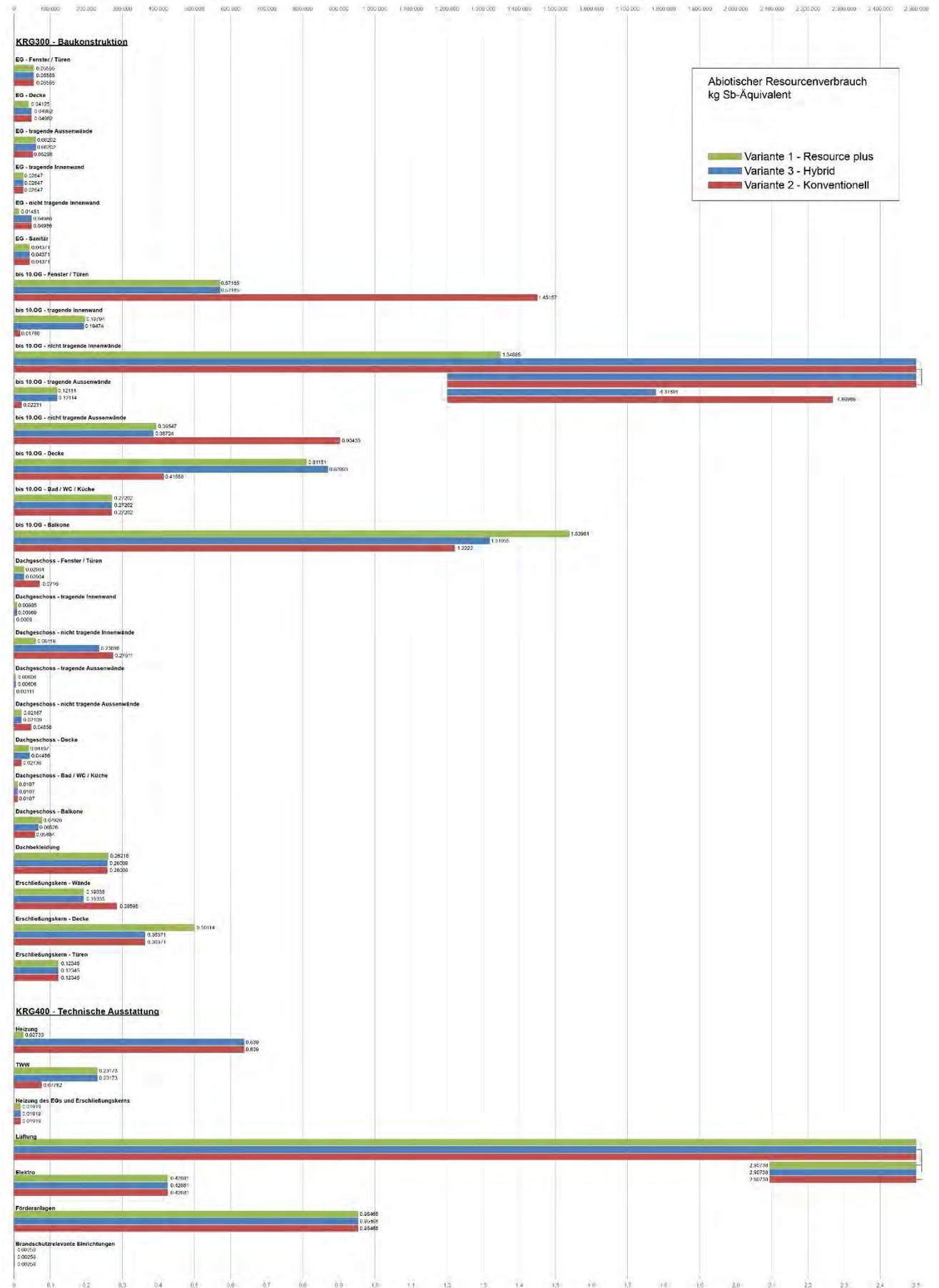


Abb. 58: Abiotischer Ressourcenverbrauch in kg Sb-Äq bauteilbezogen KG 300-400

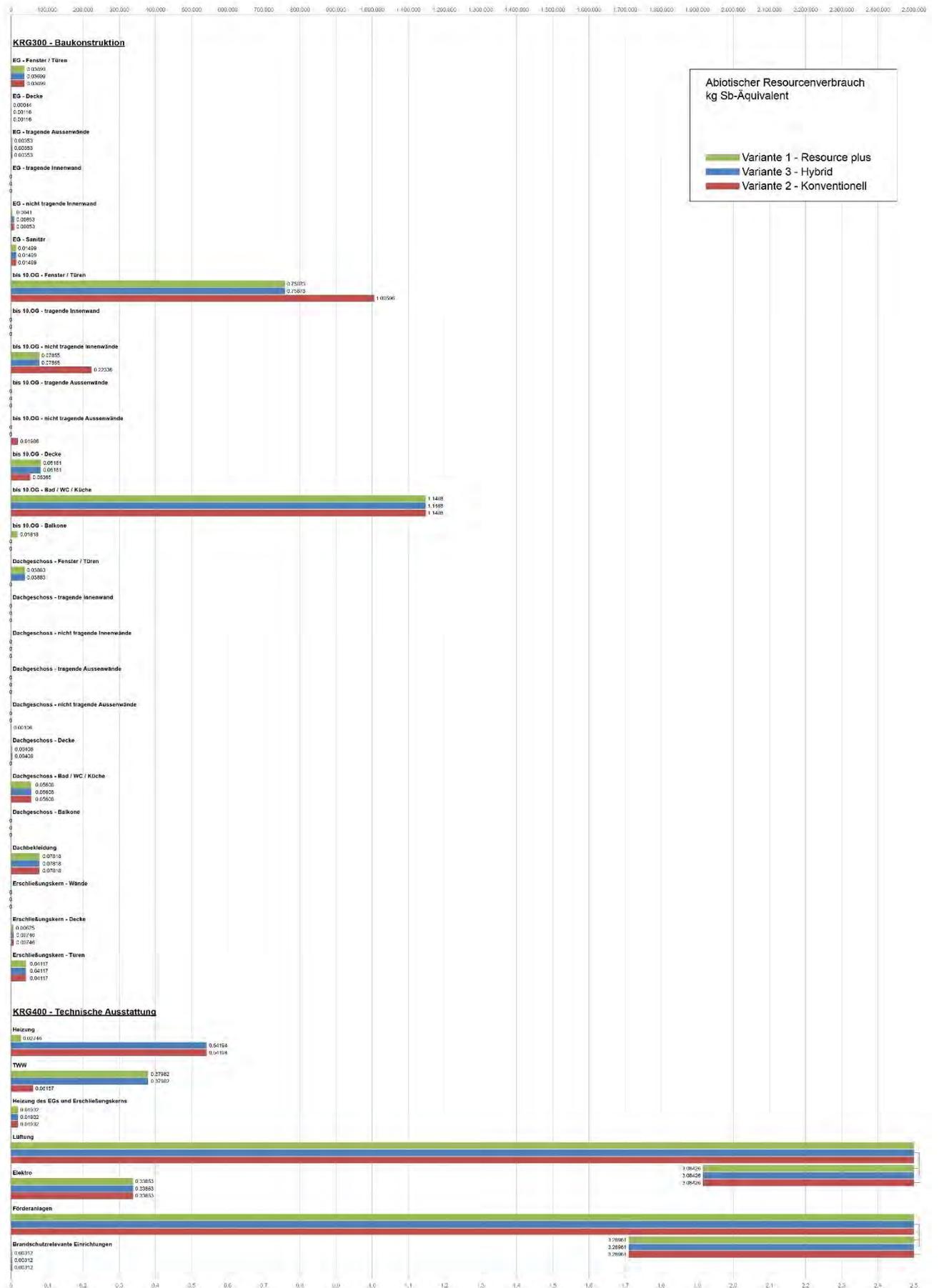


Abb. 59: Abiotischer Ressourcenverbrauch in kg Sb-Äq bauteilbezogen Instandsetzung auf 50 Jahre KG 300-400

In der bauteilbezogenen Auswertung des abiotischen Ressourcenverbrauchs zum Zeitpunkt der Errichtung ist interessant zu sehen, dass der konventionelle Trockenbau der nichttragenden Innenwände in Varianten 2 und 3 sehr negativ ins Gewicht fällt. Ebenso stechen die Kunststofffenster in Variante 2 und die Lüftungsanlage in allen Varianten negativ ins Auge. Bei den Balkonen in allen Varianten fallen die Stahlgeländer negativ ins Gewicht. Interessant ist, dass die Decken der Variante 1 und 3 verhältnismäßig schlecht abschneiden. Dies resultiert aus dem Hartöl zur Behandlung des Holzbodens. In den Ökodaten des Hartöls scheint hier ein fossiler Ursprung angenommen worden zu sein. Eine pflanzliche Alternative ist hier aus raumklimatischen Gründen und für die Umweltwirkung in jedem Fall zu empfehlen.

Bei der Instandsetzung auf 50 Jahre fallen die sanitäre Ausstattung sowie die Fenster und Türen ins Gewicht. Den stärksten Einfluss hat allerdings die Wartung der Aufzugs- und Lüftungsanlage. Heizung, Trinkwarmwasserbereitung und Elektro sind dabei vergleichsweise gering.

Der Vollständigkeit halber werden im Folgenden die restlichen Kategorien der Wirkungsbilanz tabellarisch aufgelistet:

- Ozonabbaupotential (ODP) – Beitrag zum Abbau der Ozonschicht (Ozonloch)
- Ozonbildungspotential (POCP) – Beitrag zur Sommersmogbildung
- Versauerungspotential (AP) – Beitrag zu saurem Regen / Waldsterben
- Eutrophierungspotential (NP) – Beitrag zur Überdüngung (Umkippen von Gewässern etc.)

Tabelle 22 Ozonabbaupotential (ODP) in kg CFC11-Äq

Variante 1	Variante 2	Variante 3
Ozonabbaupotential in kg CFC-11-Äq.	Ozonabbaupotential in kg CFC-11-Äq.	Ozonabbaupotential in kg CFC-11-Äq.
0,0001136150	0,0000628730	0,0001293360

Tabelle 23 Ozonbildungspotential (POCP) in kg Ethen-Äq

Variante 1	Variante 2	Variante 3
Sommersmogpotential in kg Ethen-Äq.	Sommersmogpotential in kg Ethen-Äq.	Sommersmogpotential in kg Ethen-Äq.
16,16	40,61	40,19

Tabelle 24 Versauerungspotential (AP) in kg SO₂-Äq.

Variante 1	Variante 2	Variante 3
Versauerungspotential in kg SO ₂ -Äq.	Versauerungspotential in kg SO ₂ -Äq.	Versauerungspotential in kg SO ₂ -Äq.
220,97	244,14	236,62

Tabelle 25 Eutrophierungspotential (AP) in kg P-Äq.

Variante 1	Variante 2	Variante 3
Überdüngungspotential in kg P-Äq.	Überdüngungspotential in kg P-Äq.	Überdüngungspotential in kg P-Äq.
28,24	30,42	29,85

Es zeigt sich, dass Variante 1 auch bei den übrigen Kategorien der Wirkungsbilanz sehr positiv abschneidet und damit in der Gesamtbetrachtung in keiner Kategorie der Wirkungsbilanz einen Kompromiss macht.

7.3 Fazit

Die Untersuchungen aus der Ökobilanzierung zeigen, dass Variante 1 (Ressource plus) in allen Kategorien der Wirkungsbilanz am besten abschneidet und damit eine optimierte Umweltwirkung aufweist. Bei der Gebäudekonstruktion der Variante 1 wirkt die massive Holzkonstruktion als CO₂-Speicher. Das bedeutet, das gebundene CO₂ trägt während der Nutzungsphase nicht zum Treibhauseffekt bei. Durch die thermische Verwertung der Holzkonstruktion am Ende des Lebenszyklus wird zusätzlich Energie erzeugt, die Energie aus anderen, nicht erneuerbaren Quellen ersetzt. Beides wirkt sich positiv auf das Treibhauspotential aus. Bei Variante 1 gleichen die positiven Effekte der nachwachsenden Baustoffe die vorhandenen Emissionen aus anderen Bauteilen, insbesondere aus den verbleibenden mineralischen Anteilen und Stahlbetonbauteilen, aus. Die Variante 1 hat damit zum Zeitpunkt der Errichtung eine negative CO₂-Bilanz in der Gebäudekonstruktion sowie technischen Ausstattung und erzielt damit ein sehr positives Ergebnis. Es ist erstaunlich festzustellen, dass die leimfreien Brettsperrholzelemente aus Variante 1 einen unerwartet positiven Effekt in der Ökobilanz aufweisen. Zudem wird deutlich, dass die aus Gründen des Brandschutzes nicht brennbare Dämmung und Fassadenbekleidung sowie der Erschließungskern aus Stahlbeton und das konventionelle Erdgeschoss die Gesamtbilanz negativ beeinflussen. Bei den baukonstruktiv optimierten Varianten fällt die Gebäudetechnik besonders ins Gewicht. Insbesondere für die Lüftungsanlage wären noch ökologischere Alternativen zu entwickeln.

Wie eingangs beschrieben beträgt das Holzwachstum laut Bundeswaldinventur 121,6 Mio. m³ pro Jahr. Davon werden durchschnittlich ca. 76 Mio. m³ Rohholz pro Jahr gerodet. In einem WOODSCRAPER sind etwa 1.600 m³ Holz verbaut. Mit der jährlichen Holzernte in Deutschland könnten hypothetisch gesehen 47.500 WOODSCRAPER jährlich gebaut werden. Das entspräche 2.185.000 Wohnungen in Deutschland pro Jahr. Das BBSR spricht derzeit von einem Wohnungsbedarf von etwa 272.000 Wohnungen.⁴³ Daraus lässt sich ableiten, dass etwa 12,5 % (9,5 m³ Mio.) der jährlichen Holzernte in Deutschland ausreichen würde, um den gesamten Neubaubedarf an Wohnungen in der hier beschriebenen Massivholzbauweise zu errichten.

Um über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes ein ebenso positives Ergebnis wie zum Zeitpunkt der Errichtung zu erzielen, sollten folgende Aspekte in der weiteren, ökologischen Optimierung der Gebäude berücksichtigt werden:

- Balkonbelag wie in Variante 3
- Infrarotheizung
- Alternative bzw. verbesserte Lüftungsanlagentechnik
- Regenerative Energieerzeugung am Gebäude (sehr hohe Priorität)
- Berücksichtigung der Betriebsemissionen (sehr hohe Priorität)

Die Hybrid-Variante 3 liegt, wie zu erwarten, im Mittelfeld dieses Vergleiches. Hier sorgt ein Mix im Einsatz von nachwachsenden und mineralischen Baustoffen dafür, dass die nachwachsenden Baustoffe einen großen Teil des Treibhauspotentials der nicht nachwachsenden Baustoffe ausgleichen. Allerdings führt dies nicht so weit, dass ein „CO₂-Speicher“ in der Errichtungsphase entsteht.

In der Ökobilanz werden die sehr negativen Umweltauswirkungen der konventionellen Variante 2 sehr deutlich. Im Vergleich lassen sich die wesentlichen Einflussfaktoren sehr gut ausmachen und in der Planung ökologisch zu bewerten.

⁴³ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Wohnflächennachfrage in Deutschland bis 2030, (2019): https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/WohnenImmobilien/Wohnungsmarktprognosen/Fachbeitraege/Prognose2030/Prognose2030_no.de.html

8 Investitionskosten

Dieses Kapitel widmet sich den Investitionskosten der WOODSCRAPER. Die Investitionskosten sind ein Aspekt dieses Projekts, das weit in Projektentwicklung, den Wohnungsmarkt und die Vermarktung reicht. Deshalb beschränkt sich diese Betrachtung hier im Wesentlichen auf die Baukosten und stellt Bezüge zu weiteren Kosten in dem Projekt her. Alle hier dargestellten Kosten (wenn nicht anders beschrieben) sind Nettokosten, also Kosten ohne Mehrwertsteuer.

Die Baukosten für die hier beschriebenen Varianten werden zum einen durch eine bauteilbasierte Modellierung der integralen Planungssoftware LEGEP auf Basis der sirAdos-Baudatenbank ermittelt und zum anderen durch einen Kostenvergleich einer ausführenden Firma für Variante 2 und 3 überprüft. Überraschenderweise liegen die Zahlen aus der sirAdos-Baudatenbank und der ausführenden Firma erstaunlich dicht beieinander. Die vorliegenden Kosten der ausführenden Firma sowie die eigenen Kosten enthalten keine GU-Zuschläge und stellen die reinen Baukosten KG 300-400 dar. Der Unterschied bei Variante 2 macht lediglich 0,8 % aus und bei Variante 3 nur 2,4 %.

Tabelle 26 Baukosten KG 300-400 netto für Haus J

Variante 1	Variante 2	Variante 2	Variante 3	Variante 3
Quelle sirAdos-Datendank	Quelle sirAdos-Datendank	Ausführende Firma (ohne GU-Anteil)	Quelle sirAdos-Datendank	Ausführende Firma (ohne GU-Anteil)
8.312.297,95 €	7.189.435,38 €	7.217.349,71 €	8.207.947,26 €	8.013.096,91 €

Wie zu erwarten, geht aus der obigen Baukostentabelle hervor, dass die ökologisch optimierte Variante mit leichtem Vorsprung in der Errichtung die teuerste Variante ist. Um den Vergleich übersichtlich zu halten werden im Folgenden nur die eigenen Zahlen aus der sirAdos-Datendank miteinander verglichen. Beim Baukostenvergleich ist hier jedoch zunächst zu beachten, dass nicht unterschiedliche Standards in der Ausführungsqualität miteinander verglichen werden. Die Variante 2 ist hier in einem sehr einfachen konventionellen Standard gerechnet worden. Sie enthält Kunststofffenster, Laminatfußboden, eine Wärmedämmverbundfassade (WDVS), sowie einfache Spanplattentüren.

Tabelle 27 Aufschlüsselung der Standards ab 1. OG in KG 300-400 netto für Haus J

Bauteile	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Differenz Standard
Gesamtkosten	8.312.297,95 €	7.189.435,38 €	8.207.947,26 €	(zu V1) 1,122,862.54 €
Fenster/Türen	1.380.732,56 €	879.396,36 €	1.380.732,56 €	501.336,20 €
Fassade	570.692,87 €	389.747,01 €	570.692,87 €	180.945,86 €
Bodenbelag	281.577,36 €	167.865,31 €	281.577,36 €	113.712,05 €
Rohbau Holz/Konventionell	1.255.540,10 €	1.033.022,35 €	1.255.540,10 €	222.517,75 €
Leimfrei/Strohwände/Trockenestrich				104.350,68 €

Aus der vorherigen Aufstellung geht hervor, dass die Mehrkosten der ökologisch besseren Varianten vor allem aus qualitativ hochwertigeren und langlebigeren Bauprodukten resultieren. Die größten Mehrkosten, mit etwa 36 % Unterschied zueinander, sind bei den Fenstern, Holz-Alu versus Kunststoff, auszumachen. Von der Höhe der Summe folgt der Rohbau, wobei der Holzbau gegenüber der konventionellen Bauweise sich lediglich um 18 % von einander unterscheidet. Die hinterlüftete Blechfassade ist dabei um 32 % teurer als die WDVS-Fassade. Der Massivholzboden in Variante 1 und 3 fällt dabei in seiner Summe nicht so sehr ins Gewicht, unterscheidet sich aber vom Laminatboden aus Variante 2 um 40 %. Der Faktor leimfreie Brettsperrholzelemente, Strohtrockenbau und Trockenestrich verursachen zusammen mit 104.350,68 € die geringste

Kostensteigerung. Die ökologischen Mehrkosten machen also mit 1.122.862,54 € aus der Variante 1 gegenüber Variante 2 13,50 % der Baukosten aus.

Es wird dabei deutlich, dass sich ein direkter Baukostenvergleich der Varianten mit den jeweiligen Umweltwirkungen schwer sinnvoll darstellen lässt. Die unterschiedlichen Umweltwirkungen gehen zwangsläufig mit qualitativ unterschiedlichen Ausführungsstandards einher und verursachen zudem über den Lebenszyklus unterschiedliche Kosten. Es wäre fast so, als wolle man die ökologischen Mehrkosten durch einen Kostenvergleich zwischen einem Trabbi und einem VW-Golf ermitteln.

Deshalb erscheint es sinnvoll zu sein, sich unter ganzheitlicher Betrachtung die Kostenvorteile der ökologischen Variante 1 zu verdeutlichen:

Kostenvorteile der Variante 1:

1. Verkürzte Bauzeit durch Vorelementierung
 - geringere Finanzierungskosten
 - verkürzte Baustelleneinrichtung
 - verkürzte Projektsteuerung
 - Geringere Baumängelbeseitigung
 - frühere Vermietung
2. Einpreisung von vergesellschafteten Folgekosten (Klimakosten)
3. Lebenszykluskosten
4. Geringere Entsorgungskosten (da schadstofffrei und geringer Anteil an Verbundstoffen)
5. Gesundes Innenraumklima
6. Wertvolle und rückbaubare Rohstoffe im Gebäude

Bei einer anvisierten Bauzeitverkürzung der Variante 1 von ca. 6 Monaten lassen sich, bei Fremdfinanzierung des Gebäudes, ca. 215.000 € Finanzierungskosten einsparen. Diese Summe gleicht damit etwa den Mehrkosten aus dem Holzbau. Aus dieser Erkenntnis lässt sich deutlich ableiten, dass Holzbau keine Mehrkosten verursacht. Der Verzicht auf ein Fassadengerüst durch Vorelementierung sowie die geringere Zeit für die Baustelleneinrichtung machen konservativ betrachtet etwa 85.000 € aus. Hinzu kommt die verkürzte Projektsteuerung mit etwa 95.000 €. Die frühere Vermietung und die geringere Mängelbeseitigung lassen sich hier zum jetzigen Kenntnisstand noch nicht beziffern. Die zu beziffernden Einsparungen der Bauzeitverkürzung, belaufen sich somit auf ca. 395.000 €.

Die günstigste Variante 2 weist mit der höchsten Klimabelastung die schlechteste Ökobilanz zum Zeitpunkt der Errichtung auf. Sie enthält jedoch keine Folgekosten ihrer Bauweise. Zukünftige Generationen müssen diese Kosten somit als Gesellschaft tragen. „So haben allein die deutschen Treibhausgas-Emissionen im Jahr 2016 Umweltkosten in Höhe von 164 Milliarden Euro verursacht.“⁴⁴ Das Umweltbundesamt hat in seinem Bericht „Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze“⁴⁵ dazu folgende Klimakosten ermittelt:

Tabelle 28 Klimafolgekosten vom Umweltbundesamt

	Klimakosten in € ₂₀₁₆ / t CO ₂ äq		
	2016	2030	2050
1 % reine Zeitpräferenzrate	180 €	205 €	240 €
0 % reine Zeitpräferenzrate	640 €	670 €	730 €

⁴⁴ Umweltbundesamt (UBA), (2019): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#textpart-1>

⁴⁵ Umweltbundesamt (UBA), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten, Kostensätze (Stand 02/2019): https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf

Multipliziert man die 2.055 t CO₂ Äq. der konventionellen Variante 2 mit konservativen 180 € aus dem Jahr 2016 ohne Inflationsfaktor, so erhält man Klimafolgekosten von 369.900 €. Werden vergleichend dazu die Negativ-Emissionen der Variante 1 mit -195 t CO₂ Äq. mit 180 € multipliziert, so würden hier 35.100 € gutgeschrieben. Zusammen ergibt die Differenz eine Summe von 405.000 €.

Schaut man sich vergleichend die Lebenszykluskosten aus dem anschließenden Kapitel an, so relativiert sich der zahlenmäßige Baukostenunterschied bei ganzheitlicher Betrachtung im Gesamtergebnis stark. In den Zahlen der Lebenszykluskosten wurde die Reinigung sowie der Betrieb nicht mitberücksichtigt (mehr dazu im Kapitel Lebenszykluskosten):

Tabelle 29 Lebenszykluskosten und Herstellungskosten im Vergleich KG 300-400

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Differenz V1 +V2
Herstellungskosten	8.312.297,95 €	7.189.435,38 €	8.207.947,26 €	1.122.862,54 €
LCC ohne Betrieb + Reinigung, 50 Jahre	4.292.973,00 €	4.645.183,00 €	4.444.114,00 €	352.210,00 €

Was die Kosten der Entsorgung, den Mehrwert eines gesunden Innenraumklimas sowie die enthaltenen Werte in den sortenrein rückbaubaren Baustoffen der Variante 1 anbelangt, so besteht hier ein Wissensdefizit, um belastbar und quantifizierbar, mit Zahlen unterlegt, eine Untersuchung durchführen zu können. Zur weiteren Beurteilung erscheint daher eine Aufteilung der Kosten in die wesentlichen Forschungsthemen sinnvoll, um eine vollständige Bewertung vornehmen zu können.

Wenn wir jedoch bei den bereits bekannten und hier aufgelisteten Kosten bleiben, so ergibt sich aus nachfolgender Tabelle, dass die Mehrkosten der Variante 1 für die Errichtung bei ganzheitlicher und konservativer Betrachtung tatsächlich geringere Mehrkosten im Gesamtergebnis darstellen:

Tabelle 30 Kostenvorteile bei ganzheitlicher Betrachtung Variante 1

	Kostenvorteile Variante 1
Verkürzte Bauzeit	-395.000,00 €
Folgekosten	-405.000,00 €
Lebenszykluskosten (siehe Kapitel 8)	-352.210,00 €
Kostenvorteile Gesamt	-1.152.210,00 €
Mehrkosten Errichtung Variante 1	1.122.862,54 €
Differenz	-29.347,47 €

Hieraus leitet sich sehr anschaulich die spannende Fragestellung ab: „Was lässt sich unternehmen, um die tatsächlichen Kosten eines Gebäudes schon zum Zeitpunkt der Errichtung mitzuberechnen?“ Das Fehlen der beschriebenen Folgekosten zum Zeitpunkt der Errichtung verleitet in der Praxis meist dazu, diese Kosten in die Zukunft und auf andere Nutzer sowie Generationen zu verlagern. Um wirklich ökologischem Bauen zur breiten Anwendung zu verhelfen, sind hierfür geeignete Methoden zu entwickeln, um hinreichende finanzielle Anreize schon während der Errichtung zu schaffen.

Bei der Kostenbetrachtung ist festzustellen, dass die Baukosten der WOODSCRAPER insgesamt relativ hoch sind. Eine tiefere Untersuchung gibt hierbei Aufschluss über die Ursache dieses Sachverhaltes. Ein Blick auf die Flächeneffizienz des geplanten Gebäudes zeigt, dass mit 75,60 % ein

sehr effizientes Wohnflächenverhältnis (WF) zu Brutto-Grundfläche (BGF) vorliegt. Die verhältnismäßig hohen Baukosten können somit nicht aus mangelnder Flächeneffizienz resultieren.

Tabelle 31 Baukostenkennwerte nach BGF, NGF und WF brutto KG 300-400

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Brutto-Grundfläche (BGF)	1.875,00 €	1.622,00 €	1.832,00 €
Netto-Grundfläche (NGF)	2.150,26 €	1.860,16 €	2.100,96 €
Wohnflächenverhältnis (WF)	2.213,21 €	1.914,61 €	2.162,46 €

Ein wesentlicher Faktor für die Kosten ist die hochhausrelevante Ausstattung nach Muster-Hochhausrichtlinie (MHHR). Bei konventioneller, nichtbrennbarer Bauweise kann, unter Einhaltung des Brandüberschlages, eine Ausnahme für den Verzicht auf eine Sprinkleranlage von der MHHR geltend gemacht werden. Dies hätte hier den Verzicht auf bodentiefe Fenster zur Folge gehabt. Deshalb wurde diese mögliche Ausnahme bei Variante 2 nicht beansprucht. Somit ist die hochhausrelevante Ausstattung hier für alle Varianten identisch in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 32 Hochhausrelevante Ausstattung

	Variante 1
Sprinkleranlage	586.200,00 €
Druckbelüftung	201.149,00 €
Notstrom	35.260,00 €
Brandmeldeanlage	135.927,00 €
Feuerwehraufzug	125.623,00 €
Gesamt	1.084.159,00 €

Wird der Gesamtbetrag der hochhausrelevanten Ausstattung von 1.084.159,00 € auf die BGF von 5.282 m² bezogen, so erhält man Kosten von 205,26 € netto/BGF und 244,25 € brutto/BGF.

Tabelle 33 Baukostenkennwerte ohne hochhausrelevante Ausstattung nach BGF brutto

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Brutto-Grundfläche (BGF)	1.875,00 €	1.622,00 €	1.832,00 €
Faktor Hochhaus	-244,25 €	-244,25 €	-244,25 €
Abzüglich Hochhausfaktor	1.630,75 €	1.377,75 €	1.587,75 €

Die Hochhausgrenze wird hier mit nur 3,5 Geschossen überschritten. Aufgrund dieser Überschreitung wird diese aufwändige, hochhausrelevante Ausstattung notwendig. Es ist daher anzunehmen, dass sich das Kostenverhältnis bei einer höheren Anzahl an Geschossen verbessert. Die gleiche Infrastruktur kann nach Muster-Hochhausrichtlinie (MHHR) bis zu einer Gebäudehöhe von 60 m eingesetzt werden (das entspricht 20 Stockwerken). Die Anlagentechnik muss hierfür nur etwas größer ausgelegt und die Leitungsführung ergänzt werden.

In der folgenden Grafik sind die Baukosten bauteilbezogen aufgeschlüsselt. Vorangegangene Auswertungen spiegeln sich auch hier in den Kosten wider. Die Holz-Alu-Fenster der Variante 1 und 3, sowie die Holzdecken fallen besonders ins Gewicht. Die Balkone der Variante 1 reißen auch kostenmäßig wegen der Betonfertigteile aus und sollten wie in Variante 3 ausgeführt werden. Die brandschutzrelevante, technische Infrastruktur wird dicht gefolgt von der sanitären Ausstattung.

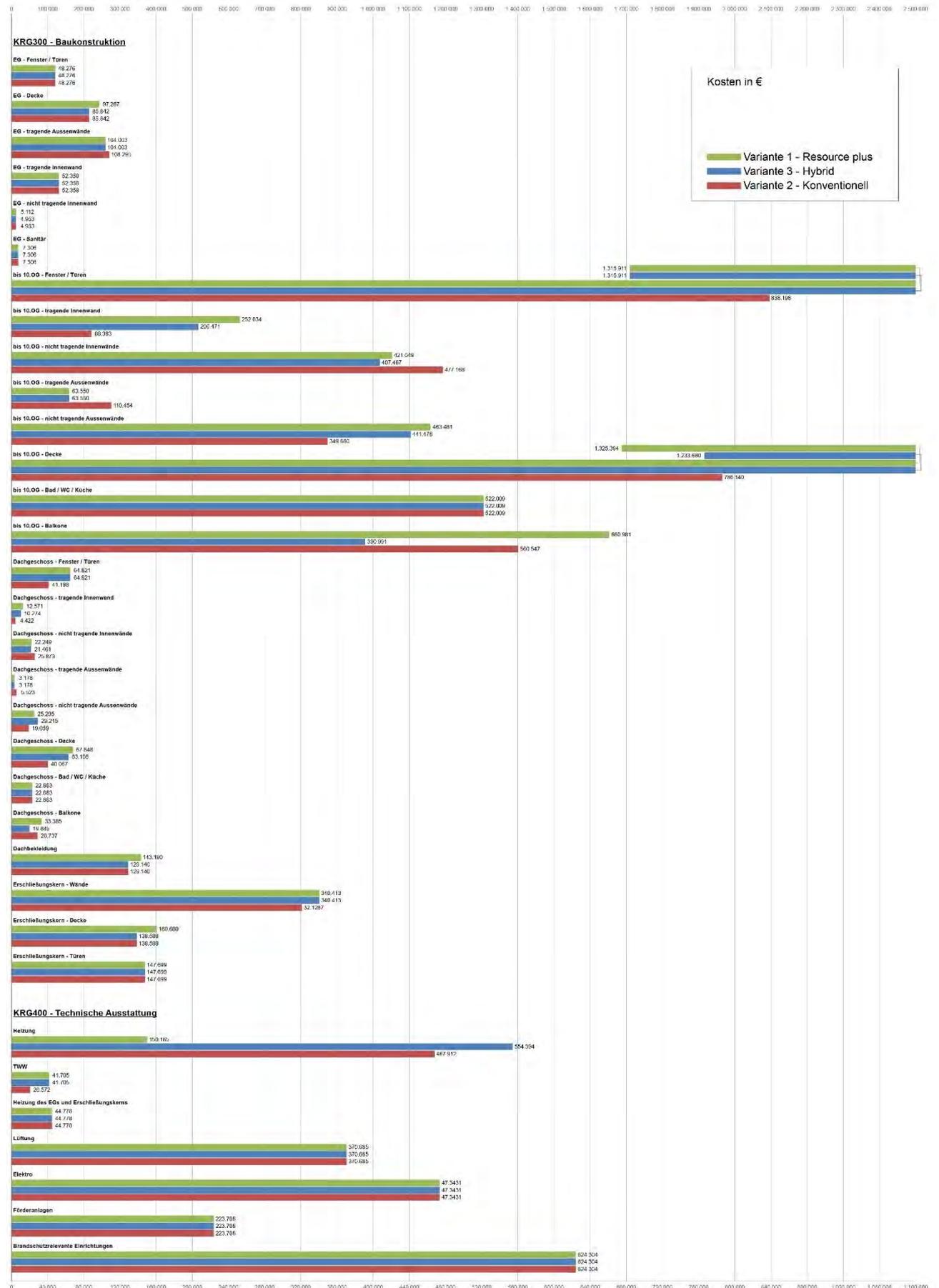


Abb. 60: Investitionskosten bauteilbezogen in Euro KG 300-400

9 Lebenszykluskosten

Die Lebenszykluskosten (LCC) sind eine Erweiterung der Kostenbetrachtung über einen angenommenen Nutzungszeitraum von 50 Jahren. Für die Lebenszykluskostenberechnung der diskutierten Varianten wird die Berechnung der Herstellungskosten nach DIN 276 durch die zusätzlichen Phasen der Lebenszyklus nach DIN 18960 erweitert.

Grundlagen der Lebenszykluskostenberechnungen sind

- die Herstellungs- oder Baukosten.

Diese werden ergänzt durch die verschiedenen Kostenstellen der Nutzungskosten nach DIN 18960:

- Reinigung,
- Wartung,
- Instandsetzung,
- Betrieb und
- Rückbau (Austausch).

Entscheidenden Einfluss auf die Gebäudeleistung für den Nutzungszeitraum hat der Zyklus der auszuführenden Arbeiten. Die Lebenszykluskosten werden hier statisch und etwas eingeschränkter betrachtet. Die Inflation wurde demnach nicht mitberücksichtigt. Da für den Gebäudebetrieb noch einige Aspekte zu klären sind, wird er auch bei dieser Betrachtung ausgeklammert. In der folgenden Tabelle zu den Lebenszykluskosten ist zu beachten, dass in Zeile „LCC ohne Betrieb + Reinigung“ die Reinigung abgezogen wurde. Das hat den Grund, dass es sich bei den WOODSCRAPER um Wohngebäude handelt und davon auszugehen ist, dass die Reinigung von den Bewohner*innen selbst übernommen wird. Interessant ist trotzdem, dass bezogen auf die Reinigung die Lebenszyklusbetrachtung enorme Unterschiede zwischen den Varianten aufzeigt. Zwischen Variante 1 und 2 ergibt sich ein Kostenunterschied von fast 1,4 Mio. € auf 50 Jahre.

Tabelle 34 Lebenszykluskosten (LCC) statisch über 50 Jahre in KG 300-400 netto

	Variante 1	LCC 50 Jahre	Variante 2	LCC 50 Jahre	Variante 3	LCC 50 Jahre
Herstellungskosten	8.312.297,95 €		7.189.435,38 €		8.207.947,26 €	
LCC ohne Betrieb		8.699.851,50 €		10.448.302,50€		9.405.981,00 €
LCC ohne Betrieb + Reinigung		4.292.973,00 €		4,645.183,00 €		4.444.114,00 €
Reinigung / a	88.137,57 €	4.406.878,50 €	116.062,39 €	5.803.119,50 €	99.237,34 €	4.961.867,00 €
Wartung / a	20.348,49 €	1.017.424,50 €	14.943,08 €	747.154,00 €	19.862,07 €	993.103,50 €
Instandsetzung / a	62.367,87 €	3.118.393,50 €	71.453,54 €	3.572.677,00 €	65.681,22 €	3.284.061,00 €
Betrieb / a						
Rückbau / a	3.143,10 €	157.155,00 €	6.507,04 €	325.352,00 €	3.338,99 €	166.949,50 €

In Zeile „LCC ohne Betrieb + Reinigung“ beträgt die Kostendifferenz zwischen Variante 1 und 2 352.210,00 € und ist bei der hier untersuchten Lebenszyklusbetrachtung am größten. Dieser Betrag ist in die Tabelle 30 zu „Kostenvorteile bei ganzheitlicher Betrachtung Variante 1“ im vorherigen Kapitel „Investitionskosten“ eingeflossen ist.

10 Fazit

Wir stehen am Anfang einer tiefgreifenden, überlebensnotwendigen Transformation unserer Gesellschaft, zu der auch der energie- und ressourcenintensive Bausektor seinen Beitrag leisten muss, um das zu viel freigesetzte CO₂ wieder zu binden, Biodiversität und vitale Lebensräume zu schaffen, sowie den Erhalt und Zuwachs von Ressourcen sicherzustellen.

„Cradle to Cradle“ als Prinzip kann dazu beitragen, unser Handeln und Gestalten nach dem Vorbild der Natur so auszurichten, dass eine gesunde, vielfältige und lebendige Umgebung geschaffen und nachfolgenden Generationen hinterlassen wird. Konkret auf das Gebäude bezogen, bedeutet dies unter anderem: der Einsatz von reinen, gesundheitsfördernden und schadstofffreien Rohstoffen, die Schaffung hoher Lebensqualität bei gleichzeitiger Erzeugung größtmöglicher positiver Synergieeffekte an dem jeweiligen Standort, eine unkomplizierte Umnutzbarkeit sowie eine einfache Demontage eingesetzter Baustoffe zur Weiterverwendung oder Rückführung wertvoller Ressourcen in einen technischen oder biologischen Kreislauf.

Als Ergebnis dieser umfangreichen Betrachtungen lässt sich feststellen, dass mit dem Prinzip WOODSCRAPER durch die angewandte integrale Planung sowie die bauteilbezogene Nachverfolgung der Umweltwirkung und der Kosten eine Strategie für ein modular umnutzbares, zirkuläres und ressourcenpositives Gebäudeprinzip für schadstofffreies Bauen aus nachwachsenden Rohstoffen mit schlanker Gebäudetechnik entwickelt werden konnte. Selbst im Typus Hochhaus speichert dieses Prinzip schon zum Zeitpunkt der Errichtung mehr Klimagase in der Konstruktion ein als für die Herstellung benötigt werden. Die regenerativen Baustoffanteile sind über den gesamten Lebenszyklus mindestens ein Mal nachgewachsen und lassen sich durch die geplante Demontierbarkeit am Ende aus dem Gebäude zurückgewinnen. Im Ergebnis stehen der Gesellschaft damit am Ende des Lebenszyklus mehr Ressourcen zur Verfügung – ohne dabei einen Mangel oder Schaden hinterlassen zu haben. Unter ganzheitlicher Betrachtung ist eine Umsetzung dieses Prinzips sogar kostenneutral möglich.

Im Vordergrund stand die Frage, ob ein Hochhaus in Holzbauweise realisierbar ist. Es zeigte sich bald, dass bei sorgfältiger Planung der Baustoff Holz in vielen Fällen im Vergleich zu konventionellen Bauweisen und auch beim Brandschutz mit Vorteilen punktet. Massives Holz braucht relativ lange, um zu entflammen. Wenn es anfängt zu brennen, ist die Standfestigkeit eines Bauwerks durch gesicherte und präzise Werte zum Brandverhalten kontrollierbar und genau vorherzusehen. Es kommt dabei auf eine ausreichende Dimensionierung der Holzbauteile an, um die Standfestigkeit auch im Brandfall sicherzustellen. Während eines Brandes ist kein unkontrolliertes Abplatzen von Beton oder plötzliches Versagen des Stahls jenseits der Fließgrenze zu erwarten. Ein unkontrolliertes Entflammen von Brandlasten in angrenzenden Räumen wird durch die guten Dämmeigenschaften von Holz zudem minimiert. Bei einer 20-cm-Brettsperrholzwand erhöht sich die Temperatur beispielsweise nach 90 Minuten auf der Rückseite des Brandherdes um lediglich 3 °Celsius. In Faserrichtung ist Holz sogar druckfester als Beton. Zudem beschleunigt die Vorelementierung die Bauzeit und senkt damit auch die Baukosten. Aufgrund dieser Vorteile kann Holz in waldreichen Regionen damit als Baustoff des 21. Jahrhunderts bezeichnet werden.

Durch die eingehenden Untersuchungen lässt sich feststellen, dass Variante 1 (Ressource plus) aus ökologischer Perspektive eindeutig allen anderen Bauweisen vorzuziehen ist. Eine abschließende Entscheidung zur Gebäudetechnik konnte noch nicht getroffen werden. Die gebäudetechnischen Standardlösungen, die den vorliegenden Berechnungen zugrundeliegen, zeigen in der Ökobilanz noch einigen Handlungsbedarf. Insbesondere die Lüftungsanlage oder die Art ihrer Ausführung sollten nach dem Ergebnis der Ökobilanz hinterfragt und überarbeitet werden. Ein großes Potenzial steckt weiterhin in der Infrarotheizung in Kombination mit regenerativer Energieerzeugung (siehe Kapitel „Bewertung der Varianten“, Variante 1 und 2). Für eine Umsetzung in einer kompakten Bauweise wie einem Hochhaus besteht jedoch noch Forschungsbedarf, um die Vorgaben der EnEV

einzuhalten. Die regenerative Energieerzeugung sowie deren Speicherung für den Gebäudebetrieb ist ein weiteres Thema für die Weiterentwicklung des „Ressource-Plus“-Prinzips.

Die nachfolgende Auflistung holt die ökologischen Optimierungspotentiale der Variante 1 nochmals ins Bewusstsein:

- Balkonbelag wie in Variante 3
- Infrarotheizung
- Alternative bzw. verbesserte Lüftungsanlagentechnik
- Überarbeitung der gesamten Gebäudetechnik mit dem Ziel, CO₂-Emissionen zu minimieren
- Regenerative Energieerzeugung am Gebäude und deren Speicherung
- Berücksichtigung der Betriebsemissionen mit dem Ziel, mindestens null Emissionen zu erreichen

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass der maximale Einsatz nachwachsender Baustoffe die Voraussetzung für das Ziel des ressourcenpositiven Bauens ist. Nachwachsende Rohstoffe unterscheiden sich von allen anderen Baustoffen wesentlich durch das Potential, im Prinzip unerschöpflich nachzuwachsen. Sie lassen sich zudem durch die ohnehin notwendige Bewirtschaftung von Wald und Feldern zur Landschaftspflege realisieren. Wald und Nebenprodukte aus der Lebensmittelproduktion wie z. B. Stroh stehen dafür in ausreichendem Maße zur Verfügung. Eine nachhaltige Bewirtschaftung behält dabei immer die Vorteile für die nächste Generation im Auge. Eine wirtschaftliche Pflege der Natur ist dabei nur möglich, wenn eine Nachfrage nach den erzeugten Erträgen gegeben ist. Deshalb ist es ein wichtiges Ziel, die Nachfrage für Bauprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen zu sichern und zu erweitern. Die Entnahme von Holz zur Nutzung für Produkte schafft Platz für neue, CO₂-speichernde Bäume. Wenn das Holz in langfristig nutzbaren Produkten etwa in Gebäuden verwendet wird, wachsen die Kohlenstoffspeicher sowie die zugänglichen Ressourcen an und stehen am Ende anderen Nutzungen zur Verfügung.

Eine nachhaltige Waldbewirtschaftung, wie sie in Deutschland seit der Entstehung und Umsetzung des Nachhaltigkeitsgedankens praktiziert wird und welche die Kohlenstoffspeicher im Wald langfristig erhält, ist demzufolge eine wesentliche Voraussetzung für einen positiven Beitrag des Bausektors zur Holznutzung beim Klimaschutz.

Aus den ökobilanziellen Untersuchungen geht auch hervor, dass sich die Klimaziele nur durch eine ganzheitliche CO₂-Bilanz schnell und effektiv einhalten lassen. Die vom BBSR beauftragte Forschungsarbeit „Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung“⁴⁶ zeigt hierzu interessante Handlungsspielräume auf. Es bedarf einer CO₂-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes, wobei die Vorgaben zur Umweltwirkung den wissenschaftlich notwendigen Klimazielen der Bundesregierung und der UN angepasst sein müssen. Der Wahl der Baustoffe kommt dabei eine zentrale Rolle zu. Werden die Emissionen aus der Herstellung nicht mitberücksichtigt, sind die aktuellen Effizienzvorgaben der EnEV im Zweifel sogar Anreiz für mehr Energie- und Ressourcenverbrauch und sorgen damit für höhere CO₂-Emissionen. Die durch die EnEV-Vorgaben notwendigen höheren Aufwendungen für Technik und Dämmung zugunsten von Einspareffekten im Gebäudebetrieb amortisieren sich im besten Falle über den gesamten Lebenszyklus. Einspareffekte werden weit in die Zukunft verlagert, und Anreize für CO₂-neutrale und CO₂-speichernde Gebäude bestehen nicht. Ein EnEV-konformes Gebäude kann damit für die Errichtung sehr viel CO₂ emittieren, so lange es im Gebäudebetrieb die Vorgaben einhält. Eine Kompensation der Emissionen ist nicht erforderlich. Die EnEV verfehlt damit ihr zentrales Ziel, aktiven Klimaschutz im Bausektor zu leisten.

⁴⁶ Mahler, B., Idler, S., Ganter, J., (2019), Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung. Quelle: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/01_start.html?nn=2142082¬First=true&docId=2164916

Aufgrund des eingetretenen Klimanotstandes sowie der Verknappung von Rohstoffen kann weiteres Bauen nur noch mit dem Einsatz von überwiegend nachwachsenden und weiterverwendbaren Rohstoffen gerechtfertigt werden. Die Untersuchungen zu den Treibhausgasemissionen zeigen, dass sich nur so die Emissionen sofort zum Zeitpunkt der Errichtung einsparen und sogar umkehren lassen. Eine CO₂-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus muss hierfür Maßgabe werden, um den Bausektor rasch zu transformieren.

Es hat sich bei der Entwicklung der Strategie zur wirtschaftlichen Errichtung ressourcenpositiver Gebäude auch gezeigt, dass die vorhandenen Werkzeuge noch zu aufwändig sind, diese umfassenden Untersuchungen entwurfsbegleitend durchzuführen. Zur praxistauglichen Vereinfachung könnten hier belastbar berechnete Prozentanteile an nachwachsenden Rohstoffen in einem Gebäude oder vereinfachte Rechenverfahren als Nachweis dienen. Eine integrierte Schnittstelle in den verbreiteten BIM-Software Angeboten zur vorhandenen Ökobaudat sowie Lebenszyklusdatenbank könnten diese entwurfsbegleitenden Untersuchungen wesentlich vereinfachen. Eine größere Transparenz der Ökodata und eine kohärente Datengrundlage wären dabei hilfreich.

Obwohl ressourcenpositives Bauen schon heute realisierbar ist, hat sich auch die Notwendigkeit einfacher Bauweise mit schadstofffreien Baustoffen gezeigt. Eine transparente Nachweispflicht aller Inhaltsstoffe der Bauprodukte sollte eingeführt werden, und nachgewiesenermaßen schädliche Stoffe sollten verboten werden. Der komplette Verzicht auf Material- und Ressourcenverbund technischer und biologischer Rohstoffe sowie eine stringente Trennung von biologischen und technischen Kreisläufen ist dafür die Voraussetzung. Es werden mehr Baustoffhersteller benötigt, die ihre Produkte kreislauffähig umstellen und neue, kreislauffähige Produkte entwickeln. Mittel- und langfristig gesehen braucht es transparente Rücknahmesysteme, um die eingesetzten Materialien am Ende ihres Lebenszyklus wieder in die Herstellung neuer Materialien und Produkte, angetrieben von 100 % erneuerbarer Energie, zurückzuführen. Es erfordert ein grundsätzliches Umdenken aller am Projekt beteiligten Akteure. Produkte und Gebäude müssen dabei vom Ende her gedacht und entwickelt werden. Neben der Problemlösung üblicher Aufgaben müssen sich Gestalter und Ingenieure vor allem die Frage stellen, wie sich der anvisierte Lösungsansatz von der Errichtung über den gesamten Lebenszyklus auf Mensch und Umwelt auswirkt und was im Anschluss mit den immer knapper werdenden eingesetzten Ressourcen geschieht. Noch kostet es sehr viel Mühe, die vielen Projektbeteiligten in den komplexen Bauprozessen in diese notwendige Transformation mit einzubinden.

Bei den Untersuchungen zu den Kosten hat sich gezeigt, dass ein fairer Kostenvergleich nicht so einfach herzustellen ist. Ökologische Lösungen gehen meist mit einem qualitativ besseren Standard einher und verursachen meist geringfügig höhere Kosten in der Anschaffung. Ein Kostenvergleich wurde trotz der unterschiedlich hohen Ausführungsqualitäten vorgenommen, da sich die Faktoren Ökologie, Qualität und Kosten nicht voneinander trennen lassen. Dabei ließ sich feststellen, dass für eine vollumfängliche und ganzheitliche Kostenbetrachtung gewisse Wissensdefizite bestehen. Kostenersparnisse für geringere Baumängelbeseitigung konnten genauso wenig beziffert werden wie eine schnellere Vermietung durch eine verkürzte Bauzeit. Ebenso konnten Entsorgungskosten sowie die enthaltenen Werte in den sortenrein verbauten Baustoffen und die Weiternutzung von Bauteilen nicht beziffert werden. Mit der vorhandenen Information konnte jedoch belegt werden, dass bei ganzheitlicher Betrachtung für die ökologische Variante 1 (Ressource plus) trotz höherer Ausführungsqualität keine Mehrkosten entstehen. Einschränkend muss hier jedoch betont werden, dass dies nur unter Einbeziehung von ökologischen Folgekosten dargestellt werden konnte. Dieses Ergebnis wirft dabei die entscheidende Frage auf, wie sich in Zukunft die Folgekosten mit der Investition verknüpfen lassen, um als Anreiz für langfristig ökonomisch sinnvolle Entscheidungen zu dienen. Wenn hierzu keine geeignete Lösung gefunden wird, bleibt es dabei, dass die Folgekosten, zeitlich verschoben, nicht von den Verursachern getragen werden, sondern neue Eigentümer, die Gesellschaft oder zukünftige Generationen diese Folgekosten übernehmen müssen.

11 Quellenangaben

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Wohnflächennachfrage in Deutschland bis 2030, (2019):

https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/WohnenImmobilien/Wohnungsmarktprognosen/Fachbeitraege/Prognose2030/Prognose2030_node.html

Bundeswaldinventur (2016): <https://www.bundeswaldinventur.de/dritte-bundeswaldinventur-2012/rohstoffquelle-wald-holzvorrat-auf-rekordniveau/holzzuwachs-auf-hohem-niveau/>

„Bündnis für Wohnen und Leben in Wolfsburg“, Dokumentation der 4. Sitzung am 25. Juni 2013:

https://www.wolfsburg.de/~media/wolfsburg/statistik_daten_fakten/statistik_daten_und_fakten/buendnisfuerwohnendokumentation4_20150128.pdf?la=de-DE

Endbericht der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH in Zusammenarbeit mit der TU München, FfE-Nr. ZVEI-01, 2011

Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2017, Petra Icha, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Mai 2018:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-04_climate-change_11-2018_strommix-2018_0.pdf

ETH Zürich, Forschungsprojekt Nr. 2-71114-07, Vergleichende Untersuchung zum optimierten Wärmeschutz in unterschiedlichen Holzbausystemen, Abschlussbericht (2008)

Germanwatch e.V. (2018): FAQ zum deutschen und globalen Erdüberlastungstag, Stand: Juli 2018.

<https://germanwatch.org/de/15394>

Holzforschung München, WZWT Technische Universität München, Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz, 2010:

<https://www.cluster-forstholzbayern.de/images/stories/downloads/broschuere/broschuere-bauen-mit-holz-klimaschutz.pdf>

IPCC-Sonderbericht über 1,5°C globale Erwärmung (2019):

https://www.deipcc.de/media/content/Hauptaussagen_IPCC_SR15.pdf

Jos G.J. Olivier, Greet Janssens-Maenhout, Jeroen A.H.W. Peters, Trends in global co2 emissions, 2012 Report:

https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/PBL_2012_Trends_in_global_CO2_emissions_500114022.pdf

Joost Hartwig im Interview, 18. Februar 2019: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/massivholz-hausbau-klimabilanz-1.4335014-2>

Mahler, B, Idler, S, Ganter, J, (2019), Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung. Quelle:

https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/01_start.html?nn=2142082¬First=true&docId=2164916

MCC Sonderbericht Oktober (2018): So schnell tickt die CO₂-Uhr: <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html>

McDonough, W.; Braungart, M. (2002): Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things North Point Press, New York

McDonough, W.; Braungart, M. (2013): The Upcycle: Beyond Sustainability—Designing for Abundance. North Point Press, New York.

Ökobaudat (2016) <https://www.oekobaudat.de/>

Stober, I.; Bucher, K. (2014): Geothermie. Berlin, Springer Spektrum, 2., überarb. u. aktualisierte Aufl.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2018): Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) 2016, S. 33. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Abfallwirtschaft/Abfallbilanz.html>

Thomas, P. (2000), Trees: Their Natural History, Cambridge University Press, S. 43-45

TU Kaiserslautern, Dr.-Ing. Peter Kosack, Forschungsprojekt „Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich“, (2009): <http://www-user.rhrk.uni-kl.de/~kosack/forschung/?INFRAROT-STRAHLUNGSHEIZUNG>

Umweltbundesamt (2012): Daten zum Verkehr
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf>

Umweltbundesamt (2018): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-24_climate-change_12-2018_nir_2018.pdf

Umweltbundesamt (2019): „Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus“, FKZ 3715 41 111 0, Veröffentlichung voraussichtlich 2019

Umweltbundesamt (UBA), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten, Kostensätze (Stand 02/2019):
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf

Waldbericht der Bundesregierung (2017):
https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldbericht2017Langfassung.pdf?__blob=publicationFile

Wald & Holz Kleiner CO₂-Footprint, große Klimaschutzwirkung, proHolz Austria, 2013:
https://www.holzistgenial.at/fileadmin/user_upload/Leporello_CO2_Footprint_final_Einzelseiten.pdf

12 Anlagen

1. Pläne
2. Wandaufbauten der Hüllfläche
3. Acht Varianten der EnEV-Berechnungen
4. Sommerlicher Wärmeschutz
5. Gliederung der Bauteile im Gebäude
6. Auszüge aus der Ökobilanz