

Seniorenwohnanlage Waldmünchen

Wechselwirkungen unterschiedlicher Konstruktionsaufbauten in Holzbauweise auf die Umweltwirkungen mit Fokus auf Innenraumluftqualität, Nutzerverhalten, Wohngesundheit und Lebenszyklusanalyse

Abschlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben

gefördert unter dem AZ 35426/01

von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Antragsteller:

Technische Universität München
School of Engineering and Design
Department Civil and Environmental Engineering
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Arcisstraße 21
80333 München

Projektbearbeitung:

Dipl.-Ing. Eva Bodemer, Anna Kirschstein, M.Sc.,
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Technische Universität München

Mitarbeit

Nicola Frank, Marie Meyer-Sternberg, B. Sc.
(wissenschaftliche Hilfskraft, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion)

Ort und Datum: München, 13.09.2024

Projektbeteiligte:

ASCONA
Gesellschaft für ökologische Projekte

Fa. Ascona, König – Voerkelius - Yama GbR
Gesellschaft für ökologische Projekte
Dipl. Ing. Architekt Holger König
Wacholderweg 1
D-82194 Gröbenzell



IQUH GmbH
Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene
Karl-Heinz Weinisch
Deutschordenstraße 4/3
97990 Weikersheim

Bauleitung:

- **Werner Tochtermann**
Türkenfelder Str. 8f
82269 Geltendorf

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Zusammenfassung	X
1 Hintergrund und Ziele	1
2 Datenermittlung und ganzheitliche Analyse	6
2.1 Vorgehen und Daten bei Lebenszyklusanalyse (ASCONA)	6
2.1.1 Vorgehen und Ziel bei der Lebenszyklusanalyse	6
2.1.2 Untersuchungsrahmen	6
2.1.3 Auswertung – Zertifizierung DGNB für Gebäude und Betrieb	11
2.1.4 Auswertung – Zertifizierung QNG für Gebäude und Betrieb	12
2.1.5 Auswertung – Kohlenstoffspeicherung und biogenes Treibhauspotential	14
2.1.6 Diskussion und kritische Reflektion der Ergebnisse	15
2.1.7 Schlussfolgerung und Ausblick	15
2.2 Vorgehen und Daten bei der Recyclingfähigkeitsanalyse (TUM)	17
2.2.1 Vorgehen bei der Recyclingfähigkeitsanalyse	17
2.2.2 Auswertung - Ressourcennutzung	20
2.2.3 Auswertung - Recyclingpotential der Baustoffe	22
2.2.4 Auswertung - Entsorgungsströme der Baustoffe - Bauteilebene	22
2.2.5 Auswertung - Wiederverwendungspotential der Baustoffe – Bauteilebene	23
2.2.6 Diskussion und kritische Reflektion der Ergebnisse	25
2.2.7 Schlussfolgerung und Ausblick	26
2.3 Vorgehen und Daten bei Innenraumluftmessung (IQUH)	28
2.3.1 Vorgehen und Ziel bei den Innenraumluftmessungen	28
2.3.2 Auswertung und Interpretation der Innenraumluftmessungen	29
2.3.3 Diskussion und kritische Reflektion der Ergebnisse	38
2.3.4 Schlussfolgerung und Ausblick	38
2.4 Vorgehen und Daten Nutzerbefragung (TUM)	39
2.4.1 Vorgehen und Ziel bei der Nutzerbefragung	39
2.4.2 Auswertung und Interpretation der Nutzerbefragung	41
2.4.3 Diskussion und kritische Reflektion der Nutzerbefragung	51
2.4.4 Schlussfolgerung und Ausblick	52

3	Zusammenschau der einzelnen Ergebnisse	54
3.1	Lebenszyklusanalyse (Ascona) und Recyclingfähigkeit (TUM)	54
3.2	Innenraumlufmessungen (IQUH) und Nutzerbefragung (TUM)	55
4	Literaturverzeichnis	58
ANHANG		64
Anhang 1	Konstruktionsaufbauten der Häuser A-L	65
Anhang 2	Checkliste für die Messraumvorbereitung der Raumlufmessungen (IQUH)	76
Anhang 3	Angaben zur der Laboranalytik (IQUH)	77
Anhang 3.1	TVOC-Analytik	77
Anhang 3.2	Aldehyde / Formaldehyd	77
Anhang 3.3	Biozide, Flammschutzmittel, Weichmacher, Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB)	77
Anhang 3.4	C1 – C8 Carbonsäuren / Alkansäuren	78
Anhang 4	Offizielle Richt- und Leitwerte	79
Anhang 5	Fragebogen zur Nutzerbefragung	82
Anhang 6	Auswertung - Nutzerbefragung zum Komfort	92
Anhang 7	Ökobilanz (ASCONA)	124
Anhang 7.1	Vorgehensweisen nach unterschiedlichen Bilanzierungsregeln	124
Anhang 7.2	Gebäudegröße, Nettoraumfläche und Energiebezugsfläche	124
Anhang 7.3	Informationen zu den betrachteten Lebenszyklusmodulen	126
Anhang 7.4	Datenerhebung und verwendete Daten	129
Anhang 7.5	Sachbilanz	130
Anhang 7.6	Auswertung - PreCheck	132
Anhang 7.7	Auswertung – QNG unter Berücksichtigung des Einsatzes von Photovoltaik	135
Anhang 7.8	Auswertung – Menge an nachwachsenden Rohstoffen	137

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Geographische Lage Waldmünchen (www.postleitzahl.org)	2
Abbildung 1-2 Lageplan Seniorenwohnanlage Waldmünchen (Haus K wurde in Mauerwerksbauweise erstellt alle anderen in Holzbauweise).....	3
Abbildung 1-3 Beispiel Grundriss und Schnitt Seniorenwohnanlage.....	3
Abbildung 1-4 Haus F, D, L	4
Abbildung 1-5 Haus I, B, H.....	4
Abbildung 1-6 Haus E, C, G.....	4
Abbildung 1-7 Haus A, K.....	4
Abbildung 2-1 Häuser, bei denen eine ökobilanzielle Analyse in diesem Forschungsprojekt durchgeführt wurde (orange)	7
Abbildung 2-2 Modulare Struktur der umweltbezogenen Informationen nach EN 15978 (DIN EN 15804:2014-07).....	8
Abbildung 2-3 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung DGNB Indikator PEnret in MJ/m ² NRFa	11
Abbildung 2-4 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung Indikator GWP kgCO ₂ -Äqu./m ² NRFa.....	12
Abbildung 2-5 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung Indikator PEnre in kWh/m ² NRFa	12
Abbildung 2-6 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung Indikator GWP kgCO ₂ -Äqu./m ² NRFa.....	13
Abbildung 2-7 Vergleich der Werte des GWP-biogen im Modul A1 in kgCO ₂ -Äqu./m ² NRFa	14
Abbildung 2-8 Übersicht über die Hierarchie der möglichen Verwertungswege (Hafner et al. 2020) basierend auf (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2012)	18
Abbildung 2-9 Ressourcenverbrauch in kg je Haus je m ² Nettoraumfläche.....	20
Abbildung 2-10 Durchschnittlicher Ressourcenverbrauch in kg je Bauweise je m ² Nettoraumfläche.....	21
Abbildung 2-11 Recyclingpotential der Baustoffe je Haus – Prozentualer Anteil der potenziellen Verwertungswege	22
Abbildung 2-12 Recyclingfähigkeit der Baustoffe je Haus – Prozentualer Anteil der aktuellen Verwertungswege im Bauteilkontext.....	23
Abbildung 2-13 Wiederverwendungspotential und Verwertungswege der Baustoffe je Haus– Prozentualer Anteil im Bauteilkontext.....	24

Abbildung 2-14 Durchschnittliches Wiederverwendungspotential je Bauweise – Prozentualer Anteil im Bauteil-kontext	25
Abbildung 2-15 Häuser, bei denen eine Innenraumluftmessung durchgeführt wurde (orange)	28
Abbildung 2-16: Übersicht der Emissionen TVOC, Formaldehyd, C1-C8-Carbonsäuren pro Haus	29
Abbildung 2-17 Beispielhafte Behaglichkeitsmessung.....	37
Abbildung 2-18 PMV-PPD Graphik - beispielhafte Behaglichkeitsmessung.....	38
Abbildung 2-19 Häuser, deren Bewohner:innen an der Nutzerbefragung teilgenommen haben (orange)	41
Abbildung 2-20 Fragebogenauswertung zum Temperaturempfinden vormittags	42
Abbildung 2-21 Fragebogenauswertung zum Temperaturempfinden nachmittags.....	42
Abbildung 2-22 Fragebogenauswertung zum Temperaturempfinden nachts	42
Abbildung 2-23 Fragebogenauswertung zum Raumluftfeuchte	43
Abbildung 2-24 Fragebogenauswertung zum Geruchsempfinden	43
Abbildung 2-25 Fragebogenauswertung zum Lüftungsverhalten morgens.....	44
Abbildung 2-26 Fragebogenauswertung zum Lüftungsverhalten nachmittags	44
Abbildung 2-27 Fragebogenauswertung zum Lüftungsverhalten auf Grund der CO ² -Geräte	45
Abbildung 2-28 Fragebogenauswertung zur Umgebung	46
Abbildung 2-29 Fragebogenauswertung zur Tageslichtversorgung / Fensteranordnung.....	46
Abbildung 2-30 Fragebogenauswertung zur Tageslichtversorgung.....	47
Abbildung 2-31 Fragebogenauswertung zur Akustik	47
Abbildung 2-32 Fragebogenauswertung zur Ästhetik von außen.....	48
Abbildung 2-33 Fragebogenauswertung zur Ästhetik von innen	48
Abbildung 2-34 Fragebogenauswertung zur Verwendung von Naturmaterialien.....	49
Abbildung 2-35 Fragebogenauswertung zur Verkehrsanbindung der Häuser in Waldmünchen	49
Abbildung 2-36 Fragebogenauswertung zu den Einkaufsmöglichkeiten der Häuser in Waldmünchen	50
Abbildung 2-37 Fragebogenauswertung zu den Erholungsmöglichkeiten in Waldmünchen	50
Abbildung 2-38 Fragebogenauswertung zu den Aktivitätsmöglichkeiten in Waldmünchen.....	51
Abbildung 2-39 Fragebogenauswertung zu Nachbarn innerhalb der Seniorenwohnanlage	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Zuteilung der Häuser zu spezifischen Bauweisen für die Recyclingfähigkeitsbetrachtung	17
Tabelle 2-2 Bewertung der Lösbarkeit der Fügmethoden nach Hafner et al. (2020) und Schwede und Störl (2017).....	19
Tabelle 3-1 Raumlufmessungen und Nutzerbefragung Seniorenwohnen	56

Abkürzungsverzeichnis

abP	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis
BiRN	Bau-Institut für Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen GmbH
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BRF	Bruttoraumfläche nach DIN 277
BRL	Bauregelliste des DIBt
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V.
ETK	Einheitstemperaturkurve nach DIN EN 1991-1-2
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GF	Gipsfaserplatte nach DIN EN 15283-2
GWP	Globales Erwärmungspotential
GWP-biogen	Biogenes Treibhauspotenzial
NaWoh	Nachhaltigkeit im Wohnungsbau
NO₂	Stickstoffdioxid
NRF	Nettoraumfläche nach DIN 277
O₂	Sauerstoff
PENRE	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar zur energetischen Nutzung
PENRT	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar total (stoffliche und energetische Nutzung)
PM1	Particulate Matter mit einem aerodynamischen Durchmesser von 1 Mikrometer oder weniger
PM2.5	Particulate Matter mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 Mikrometern oder weniger
PMV	Predicted Mean Vote). PMV ist ein Maß für das mittlere thermische Empfinden einer größeren Anzahl von Personen. Der Wert wird aus den Parametern Umgebungstemperatur, Strahlungstemperatur, Strömung, relative Feuchte, und aus den eingegebenen Werten Kleidungsindex, Aktivität ermittelt.
PPD	(Predicted Percentage Dissatisfied). PPD beschreibt den voraussichtlichen Anteil unzufriedener Personen mit einer raumklimatischen Situation. Der Wert wird in

Prozent angegeben und sinkt nicht unter einen Anteil von 5 % Unzufriedener, da es aufgrund individueller Unterschiede unmöglich ist, ein Umgebungsklima festzulegen, das jeden zufrieden stellt.

QNG Qualitätssiegel Nachhaltiges Bauen

RW II Der Richtwert II (RW II) ist ein wirkungsbezogener, begründeter Wert, der sich auf die gegenwärtigen toxikologischen und epidemiologischen Kenntnisse zur Wirkungsschwelle eines Stoffes unter Einführung von Unsicherheitsfaktoren stützt. Er stellt die Konzentration eines Stoffes dar, bei deren Erreichen bzw. Überschreiten unverzüglich Handlungsbedarf besteht, da diese Konzentration geeignet ist, insbesondere für empfindliche Personen bei Daueraufenthalt in den Räumen eine gesundheitliche Gefährdung darzustellen. Je nach Wirkungsweise des betrachteten Stoffes kann der Richtwert II als Kurzzeitwert (RW II K) oder Langzeitwert (RW II L) definiert sein.

SO₂ Schwefeldioxid

TVOC Total Volatile Organic Compounds

VoBi Vollständige Bilanzierung

VOC Volatile Organic Compounds

Zusammenfassung

Bauen mit Holz gewinnt insbesondere aufgrund der ökologischen Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen, mineralischen Bauweisen immer mehr an Bedeutung. Nichtsdestotrotz ist es notwendig Analysen durchzuführen, um die Auswirkungen auf die Umwelt, sowie die Wohngesundheit und das Wohlbefinden der Nutzer:innen weiter zu untersuchen. Denn der Baustoff Holz steht einerseits in der Kritik aufgrund dessen natürlichen Emissionscharakteristik im VOC-Spektrum, andererseits wirkt der Werkstoff behaglichkeitsfördernd.

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekt Seniorenwohnanlage Waldmünchen (AZ 35426/01) wurden *Wechselwirkungen unterschiedlicher Konstruktionsaufbauten in Holzbauweise auf die Umweltwirkungen mit Fokus auf Innenraumluftqualität, Nutzerverhalten, Wohngesundheit und Lebenszyklusanalyse* erforscht. Untersuchungsgegenstand in diesem Projekt waren elf (fast) baugleiche Einfamilienhäuser, die im Rahmen eines Wohnprojektes für Senior:innen in Waldmünchen gebaut wurden. Zehn der elf Häuser wurden in unterschiedlichen Holzbauweisen, ein Haus in Mauerwerksbauweise errichtet. Den Bau der Häuser nahmen 10 verschiedenen Firmen vor (zwei Häuser wurden von derselben Firma errichtet). Diese Firmen waren gleichzeitig Kooperationsunternehmen im Forschungsprojekt.

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen der unterschiedlichen Konstruktionsaufbauten bezüglich Innenraumluftqualität, Nutzerverhalten und Wohngesundheit wurden in den verschiedenen Häusern Innenraumluftmessungen durchgeführt sowie die Nutzer:innen befragt. Für die Innenraumluftmessungen wurden seitens IQUH GmbH TVOCs, Aldehyde, Formaldehyd, Biozide, Flammschutzmittel, Weichmacher, PAKs, PCBs und Carbonsäuren untersucht. Die Nutzer:innen wurden seitens der TUM über einen Zeitraum von Anfang Dezember bis Ende März alle 14 Tage zum Nutzerkomfort in den Häusern befragt. Es zeigt sich, dass trotz teilweise erhöhten TVOC - Werten der Nutzerkomfort als positiv bewertet wurde.

Um den Einfluss der Konstruktionen auf die Umwelt zu untersuchen, wurden eine Ökobilanz und eine Recyclingfähigkeitsbetrachtung durchgeführt. So können die Auswirkungen auf die Umwelt ganzheitlich untersucht werden. Sowohl für die Ökobilanzierung als auch für die Betrachtung der Recyclingfähigkeit der unterschiedlichen Aufbauten wurden zunächst notwendige Unterlagen und weiterführende Informationen von den beteiligten Unternehmen sowie den Auftraggebenden zusammengetragen. Die Ökobilanzierung wurde durch die Fa. Ascona, König – Voerkelius - Yama GbR mit der Software LEGEP durchgeführt. Für die Analyse der Recyclingfähigkeit der Bauteile bzw. der Gebäude wurde das bereits in einem Vorgängerprojekt (Hafner et al. 2020) entwickelte *Nachweisverfahren zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken* verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Holzbauweisen sowohl hinsichtlich der Ressourcennutzung und des Wiederverwendungspotentials als auch hinsichtlich der Umweltwirkungen Vorteile im Vergleich zur Mauerwerksbauweise haben können. Die Holzbauweisen an sich weisen insbesondere bezüglich des Potentials zur Wiederverwendung der zum Einsatz kommenden Baustoffe Optimierungsmöglichkeiten auf.

1 Hintergrund und Ziele

Der vermehrte Einsatz des nachwachsenden Rohstoffes Holz soll einen Beitrag dazu leisten die Klimaziele des Bundes und der Länder zu erreichen (BMEL 2023). Aktuelle Förderprogramme für den urbanen Holzbau in verschiedenen Bundesländern wie z.B. Berlin und Baden-Württemberg, sollen die Verwendung des Baustoffes Holz unterstützen und so einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourceneffizienz leisten (Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR) 2024; Abgeordnetenhaus von Berlin 2019). Holzverarbeitende Unternehmen sollen angeregt werden zusätzliche Standorte und Produktionskapazitäten entlang der gesamten Wertschöpfungskette aufzubauen, private Auftraggebende sollen Anreize durch diese Förderprogramme erhalten, um sich für Gebäude in Holzbauweise zu entscheiden (BMEL 2023).

Bei Planenden, Unternehmenden und Auftraggebern ist jedoch in den letzten Jahren eine Verunsicherung entstanden, die zunehmend größer wird. Diese ist unter anderem auf die Vielzahl an Richtwerten, Leitwerten und Orientierungswerten bezüglich VOCs und der gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten und deren Emissionen im Innenraum zurückzuführen. Ein rechtlich bindender Rahmen wurde 2017 erstmalig durch die Muster Verwaltungsvorschrift *Technischer Baubestimmungen (MVVTB)* zur gesundheitlichen Bewertung von Baustoffen und Bauteilen durch Mitaufnahme der Grundanforderungen Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz geschaffen (Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 2017). Darin enthalten sind Inhalte und Anforderungen an deutsche Bauprodukte bzw. Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes. Diese wurden auf Grundlage des AgBB-Bewertungsschemas (AgBB 2021) erarbeitet. Somit wurde das Bewertungssystem in den baurechtlichen Rahmen miteingeschlossen.

Ziel des nachhaltigen Bauens ist der Schutz allgemeiner Güter wie Umwelt, Ressourcen, Gesundheit, Kultur und Kapital (BMUB 2013). Gesunde Wohnverhältnisse, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit sind feste Bestandteile, um die soziokulturelle und funktionale Qualität, eine der Säulen des 3-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit, im Bauwesen zu beurteilen (El khouli et al. 2015). Im Rahmen des Bewertungssystems der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB), stellt die raumluftechnische Bewertung und die Raumlufmessung von VOCs beispielsweise ein kritisches Kriterium dar, ohne das kein Zertifikat vergeben werden kann (Ebert et al. 2010).

Es existiert ein Konflikt zwischen der Kritik an Holzhäusern bezüglich deren natürlichen Emissionscharakteristik im VOC-Spektrum und der Erkenntnis, dass der Werkstoff Holz schon immer mit Behaglichkeit in Verbindung gebracht wurde und Holzhäuser sich gemeinhin mit einem besonderen Wohlfühlfaktor auszeichnen. Daher besteht für die Holzbaubranche dringender Bedarf die während der Nutzungsphase von Holzhäusern freigesetzten Emissionen umfassend zu analysieren und gesundheitlich zu bewerten. Deshalb ist es notwendig den Einfluss und die Zusammenhänge der Raumklimavariablen auf das Wohlbefinden der Nutzer:innen im vorliegenden Projekt zu untersuchen. Untersuchungsgegenstand ist eine Wohnanlage für Senioren:innen, denn Senioren:innen gelten als besonders empfindliche Personengruppe und sind dem Raumklima zusätzlich deutlich länger ausgesetzt als Schüler:innen oder Personen, die täglich 8 Stunden in Schule oder Arbeitsplatz zubringen. Daher sind Erkenntnisse bezüglich der Auswirkungen auf Senioren:innen als repräsentativer einzuordnen als in weniger empfindlichen Probandengruppen. Darüber hinaus sind auch

die Auswirkungen unterschiedlicher Holzkonstruktionen auf die Umwelt und den Ressourceneinsatz zu untersuchen. Dadurch können Handlungsansätze für möglichst umweltschonende Holzkonstruktionen aufgezeigt werden.

Seniorenwohnanlage Waldmünchen

Die Seniorenwohnanlage befindet sich in Waldmünchen im Oberpfälzer Landkreis Cham. Das Grundstück befindet sich am östlichen Ortsrand der Gemeinde Waldmünchen.



Abbildung 1-1 Geographische Lage Waldmünchen (www.postleitzahl.org)

Im vorliegenden Projekt wurden 10 von 11 Einfamilienhäuser in verschiedenen Holzbauweisen und 1 Einfamilienhaus in Mauerwerksbauweise erstellt (siehe Abbildung 1-2 und Anhang 1). Die Bauleitung vor Ort hatte Werner Tochtermann.



Abbildung 1-2 Lageplan Seniorenwohnanlage Waldmünchen (Haus K wurde in Mauerwerksbauweise erstellt alle anderen in Holzbauweise)

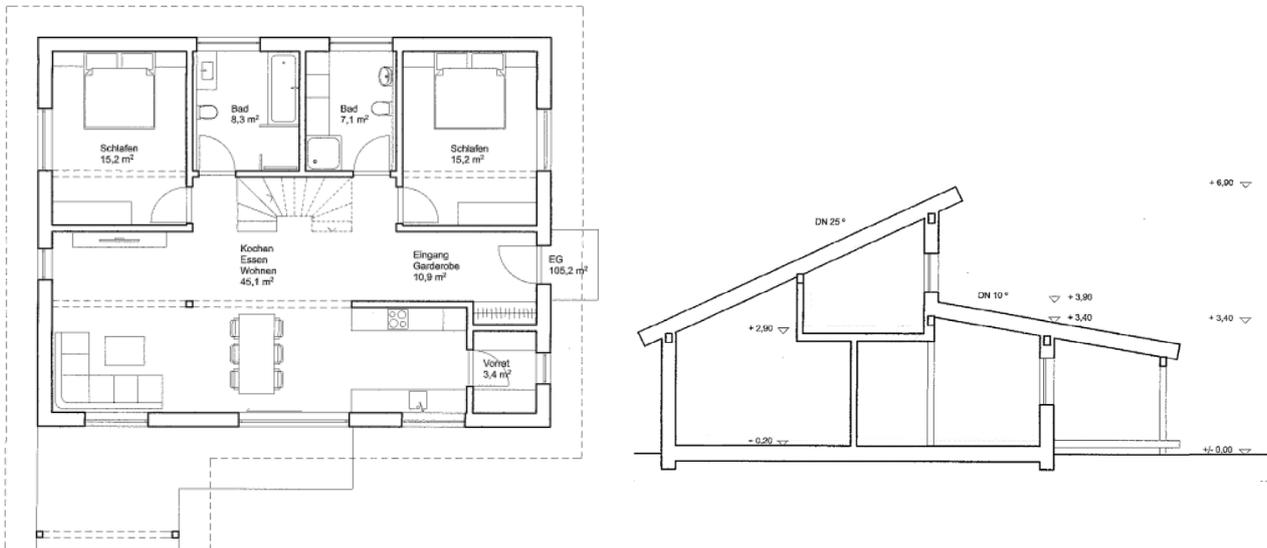


Abbildung 1-3 Beispiel Grundriss und Schnitt Seniorenwohnanlage

Alle Gebäude sind nach einem ähnlichen Grundriss- und Schnittmuster gebaut. Variationen sind

- die Größe (siehe Anhang 7.2)
- mit und ohne Galerie
- die Innenwandaufteilungen in Abhängigkeit von der Galerietreppe



Abbildung 1-4 Haus F, D, L



Abbildung 1-5 Haus I, B, H



Abbildung 1-6 Haus E, C, G



Abbildung 1-7 Haus A, K

Für alle Gebäude sollten durch das Durchführen einer Lebenszyklusanalyse die Umweltwirkungen und der Ressourceneinsatz abgebildet werden. Zusätzlich war Ziel, das aus dem DBU-Projekt *Ressourcennutzung Gebäude* (Hafner et al. 2020) entwickelte Nachweisverfahren zur Bewertung der Recyclingfähigkeit, der stofflichen Nutzung und des Potentials einer Kreislaufführung der Rohstoffe anzuwenden. Dadurch sollte außerdem vor allem die Ressourcennutzung und das Wiederverwendungspotential der zum Einsatz kommenden Konstruktionen zusätzlich zur durchgeführten Ökobilanz abgebildet werden.

Die in ähnlichen Grundriss- und Schnittmustern, Kubatur und geographischer Ausrichtung gebauten Holzhäuser sollten direkt nach Fertigstellung umweltanalytisch analysiert und nach dem Einzug der Senioren:innen durch eine Nutzerbefragung begleitet werden. Die wissenschaftliche Begleitung in Bezug auf die bauphysikalischen und konstruktiven Parameter, sowie die Nutzerbefragung und die Recyclingfähigkeitsbetrachtung sollte durch die TU München, die Umweltanalytik durch das Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene, IQUH GmbH und die Ökobilanzierung durch die Fima Ascona, König – Voerkelius - Yama GbR Gesellschaft für ökologische Projekte ASCONA, durchgeführt werden. Hierdurch sollte auf verschiedenen Ebenen aufgezeigt werden, dass nachhaltiges und gesundes Wohnen im Holzhausbau selbst für die als gesundheitlich sensibler einzustufende Zielgruppe der Senioren:innen gewährleistet wird.

Die Projektbeschreibung gliedert sich in

- Lebenszyklusanalyse (ASCONA)
- Recyclingfähigkeit (TUM)
- Innenraumluftmessung (IQUH)
- Nutzerbefragung (TUM)

auf. Die verschiedenen Arbeitspakete werden in Bezug zueinander gesetzt und abschließend bewertet.

2 Datenermittlung und ganzheitliche Analyse

2.1 Vorgehen und Daten bei Lebenszyklusanalyse (ASCONA)

2.1.1 Vorgehen und Ziel bei der Lebenszyklusanalyse

Ziel in diesem Kapitel ist das Identifizieren von Potentialen zur Umweltentlastung durch einen Vergleich unterschiedlicher Konstruktionen in Holzbauweise. Ergänzend zur Berechnung der potenziellen Umweltwirkung wurde der Beitrag der Konstruktionen hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung untersucht. Für die Ermittlung der Umweltwirkungen und des Ressourceneinsatzes wurde eine Lebenszyklusanalyse mit der Software LEGEP durchgeführt. Dazu wurden die vier Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040:2021-02 durchlaufen (DIN EN ISO 14040:2021-02). Zunächst wurde das Ziel und der Untersuchungsrahmen definiert, dann die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung erstellt und letzten Endes fand eine Auswertung und Interpretation der Ergebnisse statt. Betrachtet wurden 10 Häuser der Seniorenwohnanlage (Haus A bis Haus K). Berücksichtigt wurden die potenziellen Umweltwirkungen von der Herstellung und dem Betrieb bis zur Entsorgung.

Ziel der Ökobilanz

Ziel dieser Ökobilanz ist es, für die jeweilige Bauweise spezifische Ergebnisse zu erhalten und daraus allgemeine Schlussfolgerungen für zukünftiges Bauen mit Holz treffen zu können. Auch die Sensibilisierung der Hersteller:innen für die Umweltwirkungen der Gebäude soll dadurch stattfinden. Um die Ökobilanzergebnisse praktisch einordnen zu können, werden die berechneten Ergebnisse der Gebäudeökobilanz mit einer Einstufung nach dem DGNB-System (Version 2018) für kleine Wohngebäude verknüpft. Zu Projektbeginn war nicht absehbar, dass die Bauförderung der öffentlichen Hand im Jahr 2021 mit der Gebäudeökobilanz verknüpft werden würde, die NH-Klasse der Gebäudeförderung und das QNG (BMWSB 2021a). Deshalb wurde auch die QNG-Bilanzierung mit in die Projektauswertung aufgenommen. Folglich wurde für die Ökobilanz der Gebäude eine zweiter Berechnungsdurchlauf durchgeführt, da die Rechenregeln des QNG-Zertifikats für die Ökobilanzierung anders gestaltet sind als für die Zertifizierungssysteme (BMWSB 2021a; DGNB GmbH 2018). Eine Gegenüberstellung der allgemeinen Vorgehensweisen nach unterschiedlichen Bilanzierungsregeln ist in Anhang 7.1 abgebildet. Im Folgenden ist bei der Bezugnahme auf die Rechenregeln des QNG, die Berechnung nach den Siegeldokumenten bis 12/2022 gemeint (BMWSB 2024b). Die Rechenregeln nach DGNB beziehen sich auf die Rechenregeln der Version 2018 (DGNB GmbH 2018).

2.1.2 Untersuchungsrahmen

2.1.2.1 Produktsystem und funktionale Äquivalenz

Eine vergleichende Ökobilanz muss nach DIN EN 15978:2012-10 sicherstellen, dass die zu vergleichenden Objekte eine möglichst ähnliche Funktion erfüllen (DIN EN 15978:2012-10). Das funktionelle Äquivalent setzt die Erfüllung der technischen und funktionellen Mindestanforderungen voraus (DIN EN 15978:2012-10). Die folgenden Ausführungen sollen dies für die unterschiedlichen Objekte erläutern. Hier findet eine Untersuchung nahezu funktional äquivalenter Gebäude ohne und mit Galerie statt. Untersucht werden die

Einzelhäuser der verschiedenen beteiligten Hersteller:innen, da diese in unterschiedlichen Bauweisen errichtet wurden. Diese sind aber alle nahezu identisch in Orientierung, flächen- und volumenmäßiger Größe, sowie dem Energiestandard und der Energieversorgungssysteme. Damit können für alle Häuser die materiellen und konstruktiven Eigenschaften verglichen werden.

Grundsätzlich erfüllen alle berechneten Gebäude als funktionelle Qualität die Mindestanforderung der Einhaltung gesetzlicher Anforderungen und den Stand der Technik. Die Gebäudevarianten erfüllen die Anforderungen an Standsicherheit und Tragfähigkeit der Konstruktion, sowie die Brandschutzanforderungen. Hierfür bestehen die Bauteilanforderungen aus präskriptiven Vorgaben der Landesbauordnung nach Gebäudeklasse 1-3 für Einfamilien- und kleine Mehrfamilienhäuser. Alle Gebäudevarianten entsprechen den Anforderungen des Gebäudeenergiegesetz – kurz GEG (Stand 2020) (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2020). Der technische Ausbau wurde für alle Gebäude in gleicher Art und Weise durchgeführt. Alle Gebäude sind an die Nahwärmeversorgung des Ortes angeschlossen. Die Sanitäreinrichtungen sind nahezu identisch, die Elektroinstallation ebenso. Eine PV-Anlage wurde als Variante in der folgenden Untersuchung bei beiden Zertifizierungssystemen berücksichtigt. Außerdem beziehen sich die nachfolgenden Bewertungsergebnisse auf den Standardfall der Beheizung. Für die QNG-Berechnung werden zusätzlich zum Standardfall veränderte Rahmenbedingungen für die Beheizung (Nahwärmenetz mit unterschiedlichen fP-Werten) betrachtet.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse für alle erfassten Gebäude von A-K dargestellt. Das Gebäude K ist die einzige Variante in mineralischer Bauweise.



Abbildung 2-1 Häuser, bei denen eine ökobilanzielle Analyse in diesem Forschungsprojekt durchgeführt wurde (orange)

2.1.2.2 Funktionelle Einheit:

Ein wesentlicher Aspekt ist die Wahl einer geeigneten Bezugsgröße. Im Bewertungssystem DGNB (Version 2018) und QNG werden die Daten bei der Gebäudebilanzierung auf einen m² Nettoraumfläche (NRF) pro Jahr bezogen. Die für jedes Gebäude berechnete Nettoraumfläche ist in Anhang 7.2 wiederzufinden.

2.1.2.3 Systemgrenzen

Die Ökobilanzierung wurde nach den Regeln der DIN EN 15978:2012-10 für Gebäude und Betrieb durchgeführt (DIN EN 15978:2012-10). Die Untersuchung der Ökobilanz der zehn unterschiedlichen Gebäude war nach Errichtung der Gebäude geplant. Die Modellierung der Gebäude und ihrer Bauteilaufbauten erfolgte mit dem Ziel, den Energiebedarf und Umweltwirkungen in Herstellung, Betrieb und Entsorgung mit der Methode der Lebenszyklusanalyse zu berechnen. Die Festlegung der Systemgrenzen erfolgte anhand der Zieldefinition.

Der Betrachtungszeitraum orientiert sich an den Regeln des Zertifizierungssystems BNB (BBSR 2012) und NaWoh (NaWoh 2024), er wird im Sinne einer Konvention auf 50 Jahre festgesetzt. Vorhergehende Forschungsarbeiten zeigen, dass eine Verlängerung des Betrachtungszeitraums einen geringen Einfluss auf die absoluten Ökobilanzergebnisse eines Gebäudes hat (Hafner et al. 2017b; Hafner et al. 2017c). Die wesentlichen Unterschiede kommen u.a. im Modul B4 durch höhere Austauschzyklen der Bauteile, die sich zwangsläufig ergeben, zustande (weitere Erläuterungen siehe Anhang 7.3).

Für die Gebäudebewertung werden die Normen EN 15978:2012-10 *Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden* sowie auf Bauproduktebene und EN 15804:2014-07 zugrunde gelegt (DIN EN 15978:2012-10; DIN EN 15804:2014-07). Die umweltbezogenen Informationen über den Lebenszyklus eines Gebäudes sind in Abbildung 2-2 zu sehen und modular aufgebaut. Die rot umrandeten Bereiche der folgenden Abbildung bezeichnen diejenigen Module, die im Rahmen des Projekts bilanziert wurden.

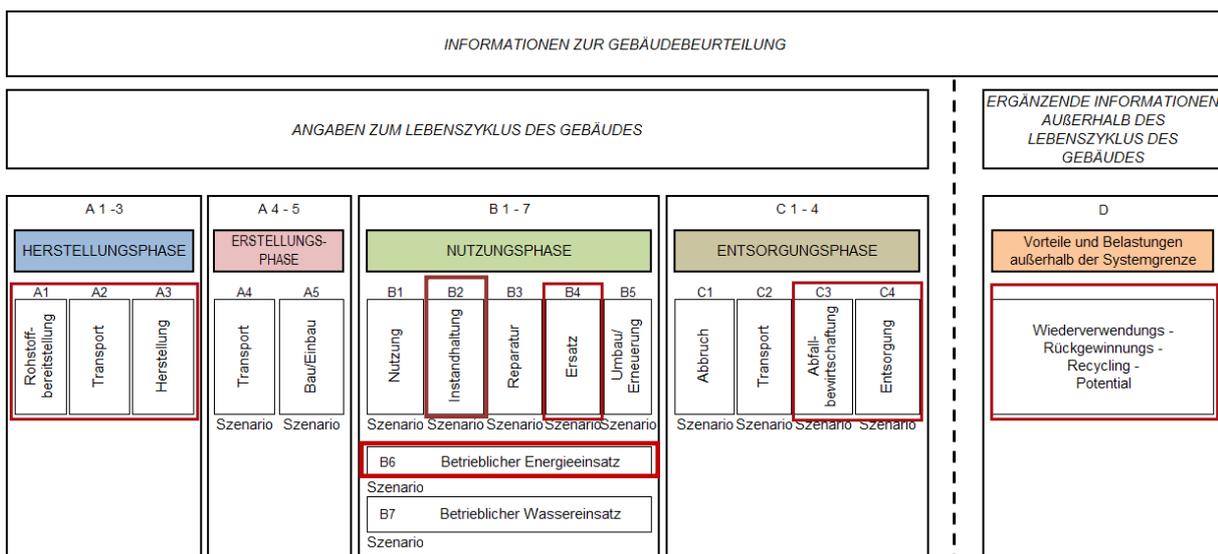


Abbildung 2-2 Modulare Struktur der umweltbezogenen Informationen nach EN 15978 (DIN EN 15804:2014-07)

Die Berechnungen orientieren sich damit methodisch an den Ökobilanzen im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung für Gebäude nach dem *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen* (BNB) und *Nachhaltiger Wohnungsbau* (NaWoh) und *Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnungsbau* (BNK) (BBSR 2017; NaWoh

2024; BiRN 2016). Bezüglich des Moduls D werden die Rechenregeln des DGNB-Systems berücksichtigt (vollständige Integration) (DGNB GmbH 2018). In der Gebäudebewertung nach QNG werden innerhalb der Systemgrenze die Module A1-A3 (Herstellung), Modul B2 (Instandhaltung) und B4 (Austausch, Ersatz) und die Module C3-C4 (Entsorgung) berücksichtigt. Modul D (Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze) wird als Informationsmodul separat ausgewiesen. Nachstehend wird dies detailliert erläutert. (BMWSB 2021a)

Nicht berücksichtigt werden gemäß den Rechenregeln des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) die Module A4 (Transport zur Baustelle), A5 (Errichtung/Einbau), B1 (Nutzung), B3 (Instandsetzung, Reparatur), B5 (Modernisierung), B7 (betrieblicher Wassereinsatz), C1 (Rückbau/Abriss) und C2 (Transport zur Abfallbehandlung/Beseitigung) (BMU 2012). Die Nichtberücksichtigung ist teilweise auf Datenlücken in der Ökobaudat für die genannten Module zurückzuführen (BMWSB 2024a). Modul A4/A5 ist in der Ökobaudat bei einigen Produkten enthalten (z. B. Beton, Ziegel, EPS) bei anderen aber nicht (z. B. XPS, KS Steine, Dachziegel, etc.) (BMWSB 2024a).

Für die vorliegende Arbeit wird der Bilanzierungsumfang beschrieben durch:

- die Lebenszyklusmodule A1-A3, B2, B4, C3-C4
- die Entsorgungsregeln der EoL-Phase entsprechend der Angaben im DGNB-Zertifizierungssystem 2018
- für das QNG-System das gesondert darzustellende Modul D (hier im Sinne von D1 – Recyclingpotenzial)
- für das DGNB-System 2018 das integrierte Modul D (hier im Sinne von D1 – Recyclingpotenzial)
- den Energiebedarf (B6.1, ggf. zusätzlich B6.2 und B6.3).

Weiterführende Angaben zu den in den einzelnen Lebenszyklusmodulen betrachteten Teil-Produktsystemen und Systemgrenzen sind Anhang 7 zu entnehmen.

2.1.2.4 Datenerfassung für die Sachbilanz:

Die Erstellung der Sachbilanz wurde auf Basis der Daten der Mengenermittlung und der Bauteilaufbauten anhand der durch die am Projekt beteiligten Firmen sowie die durch die Auftraggebenden zur Verfügung gestellten Unterlagen durchgeführt. So konnte die Ökobilanz durchgeführt werden. Hierbei wurde auf folgende Unterlagen zurückgegriffen:

- Werkpläne
- Bauteilaufbauten
- Bauproduktunterlagen
- Flächen- und Kubaturberechnung
- Energiebedarfsberechnung
- Lagepläne der Objekte
- Informationen zu den Bauteilaufbauten der beteiligten Firmen

Die erfassten Kostengruppen (DIN 276:2018-12) der Haustechnik in der vollständigen Bilanzierung umfassen:

- KG 410 ABWASSER-, WASSER-, GASANLAGEN

- KG 420 WÄRMEVERSORGUNGSANLAGEN
- KG 430 LUFTECHNISCHE ANLAGEN
- KG 440 STARKSTROMANLAGEN.

Durch die vollständige Erfassung der haustechnischen Komponenten fällt nach den Regeln der DGNB-Zertifizierung kein Malus an (DGNB GmbH 2018). Für die Berechnung nach QNG werden nur die Hauptkomponenten der Haustechnik erfasst, z.B. Heizwärmeübergabe für die Fernwärme. Die anderen Bestandteile der Haustechnik werden mit dem anzusetzenden Sockelbetrag des QNG-Systems abgedeckt (BMWSB 2021a). Die hier untersuchten Gebäude verfügen über keinerlei Kälteanlagen oder Wärmepumpen. Der Einfluss unterschiedlicher Kältemittel (F-Gase) wird deshalb nicht berücksichtigt.

Weitere Erläuterungen zu den getroffenen Annahmen und zur durchgeführten Gebäudemodellierung sind Anhang 7.5 zu entnehmen.

2.1.2.5 Vorgehen bei der Wirkungsabschätzung und verwendete Software

Nach Abgleich der Konstruktionsaufbauten und der Mengenermittlung wurden die Gebäude in der Software LEGEP vollständig modelliert und berechnet (LEGEP Software GmbH 2024). Kellenberger und Althaus Kellenberger und Althaus (2009) betonen die Bedeutung der Erfassungstiefe aller Bauteile mit allen erforderlichen Nebenleistungen. Diese hat eine wesentliche Bedeutung für das Gesamtergebnis der Ökobilanz. Die Modellierung der Gebäudebestandteile durch die kostenbasierte Elementmethode in LEGEP gewährleistet eine hohe Erfassungstiefe inklusive der notwendigen Nebenleistungen aller Bauteile.

Die Berechnung der Wirkungsabschätzung der im Studienziel festgelegten Indikatoren erfolgte mit den Daten der Ökobaudat (BMWSB 2024a). Eingesetzt wurde die Version der Ökobaudat 2020-II. Die QNG-Auswertung erfolgte mit der zugehörigen Rechenwertedatenbank, die aber bis auf wenige Ausnahmen identisch ist mit den verwendeten Datensätzen der Ökobaudat 2020-II (BMWSB 2024b). Die Auswertung und Interpretation der Umweltwirkungen erfolgte anhand der Indikatoren PENRET und GWP.

2.1.2.6 Vorgehen bei der Ergebnisermittlung und -zusammenstellung

Im Rahmen dieses Projektes wurden Berechnungen anhand unterschiedlicher Programm-Module in LEGEP durchgeführt. Im Anhang 7.6 sind die Berechnungsergebnisse zu finden, die mittels des Programm-Moduls *PreCheck* durchgeführt wurden. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die *Vollständige Bilanzierung* (VoBi) mit LEGEP aufgezeigt.

Die vollständige Bilanzierung erfasst jedes Gebäude mit den exakt modellierten Bauteilen und der verbauten Mengen. Diese Vorgehensweise wird auch in den jeweiligen Zertifizierungssystemen gefordert. In den vorliegenden Fällen wurden für die Gebäude auch die Haustechnikinstallationen für Sanitär, Heizung und Elektro modelliert. Deshalb kommt für die DGNB-Zertifizierung kein Malus in Ansatz (DGNB GmbH 2018). Beim QNG werden nur die Großgeräte für Heizung und Lüftung erfasst, die verbleibenden notwendigen Teile der Installation für Sanitär und Elektro wird über einen Sockelbetrag berücksichtigt. Dieser bezieht sich in der Menge auf die angegebene Nettoraumfläche.

Die Berechnung der Ergebnisse nach QNG erfolgte zunächst ohne Berücksichtigung von Photovoltaik (PV). Im Anhang 7.7 ist auch die Berechnung unter Berücksichtigung des Einsatzes von Photovoltaik wiederzufinden.

Die gesamte Siedlung wird über ein Nahwärmenetz versorgt, das auf dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen (Holzhackschnitzel) basiert. Praktische Erfahrungswerte zeigen, dass diese Form der Energieversorgung äußerst selten zum Einsatz kommt, nur in den Verdichtungsräumen besteht eine Fernwärmeversorgung, dann aber bevorzugt mit Kraft-Wärme-Kopplung. Es wurden deshalb unterschiedliche Berechnungen durchgeführt:

- Standardfall Gebäude mit 100 % regenerativer Heizungsquelle (Holzpellet): für PRECHECK-DGNB, PRECHECK-QNG, Vollständige Berechnung DGNB ohne und mit PV, Vollständige Berechnung QNG ohne PV und mit PV.
- Sonderfall Nahwärmenetz mit fP-Wert 0,2 (Energiebedarfsausweis) für QNG
- Sonderfall KfW- Reg. Nahwärmenetz mit fP-Wert 0,4 für QNG.

2.1.3 Auswertung – Zertifizierung DGNB für Gebäude und Betrieb

Die Auswertung der vollständigen Bilanzierung nach den Regeln des DGNB-Systems (Version 2018) erbringt folgende Werte für alle Gebäude:

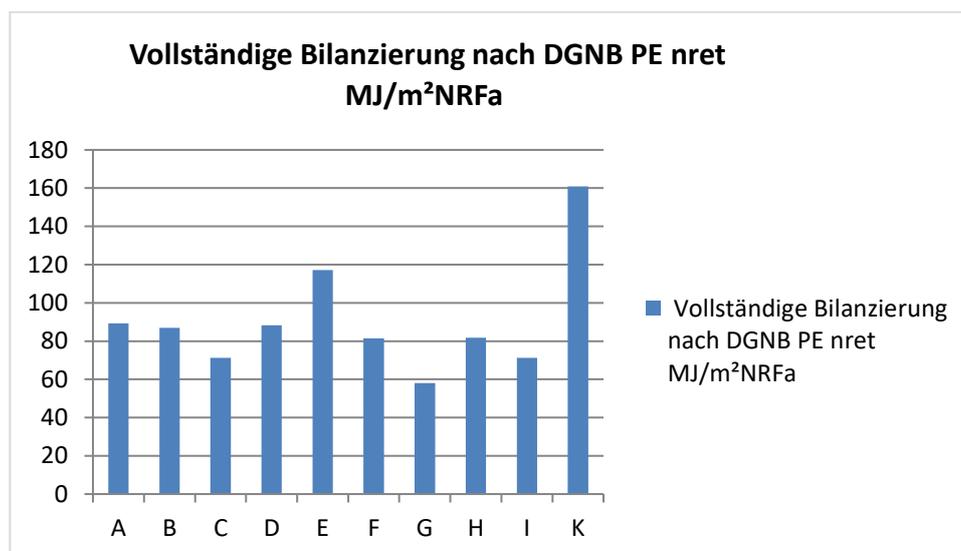


Abbildung 2-3 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung DGNB Indikator PE nret in MJ/m²NRFa

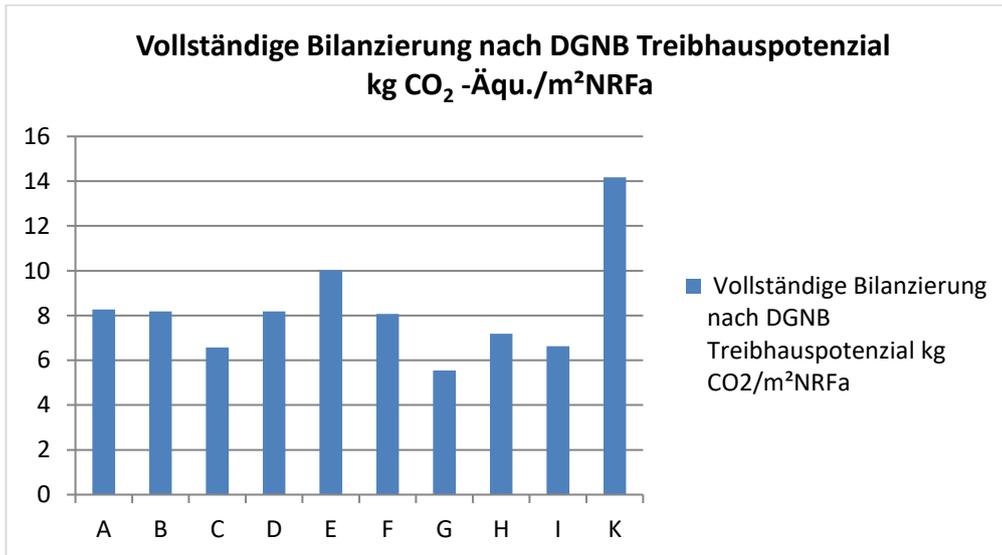


Abbildung 2-4 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung Indikator GWP kgCO₂-Äqu./m²NRFa

Die Gebäude mit einem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe (A-I) erreichen Werte zwischen 70 und 120 MJ/m²a (20 und 33 kWh/m²a) und 5,8 – 10 kg CO₂-Äqu./m²a. Das mineralische Gebäude erreicht Werte von 160 MJ/m²a und 14 kg CO₂-Äqu./m²a.

2.1.4 Auswertung – Zertifizierung QNG für Gebäude und Betrieb

Die Auswertung der vollständigen Bilanzierung nach den Regeln des QNG-Systems (QNG 2022) erbringt folgende Ergebnisse.

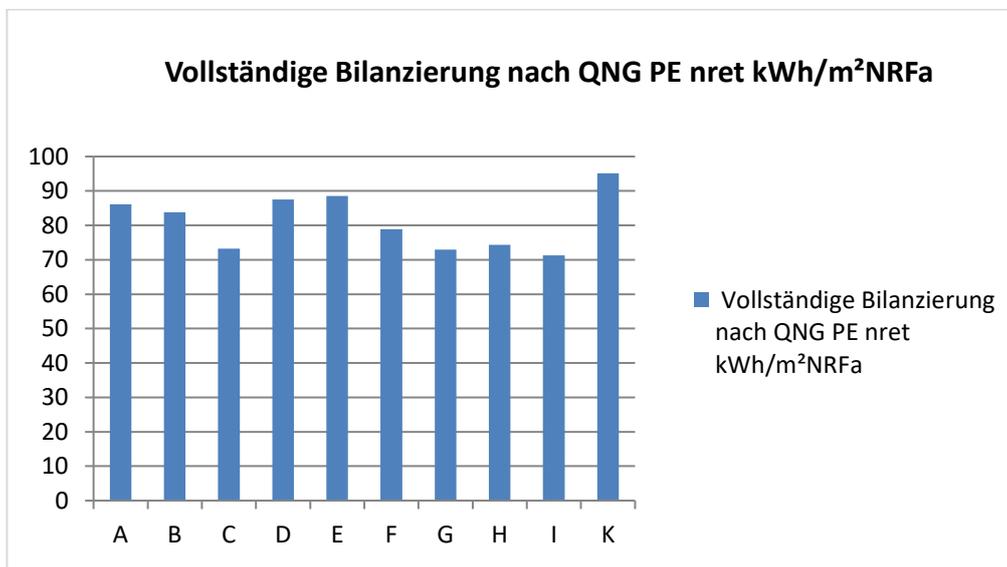


Abbildung 2-5 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung Indikator PE_{nret} in kWh/m²NRFa

Es ist zu berücksichtigen, dass die Einheit für den Indikator Primärenergie nicht erneuerbar im QNG-System mit kWh angegeben wird. Die QNG-Zertifizierung erreicht wesentlich höhere Ergebnisse als die DGNB. Grund dafür ist unter anderem, dass ein Nutzerstromanteil von 20 kWh/m² NRF*a im Betrieb zusätzlich angesetzt werden muss. Dies führt in Konsequenz auch zu einer wesentlich geringeren Differenz zwischen dem mineralischen Gebäude (Haus K) und den Gebäuden in unterschiedlichen Holzbauweisen. Die Unterschiede der Ergebnisse für die Gebäude A-I erreichen einen Maximalwert von ca. 30 %.

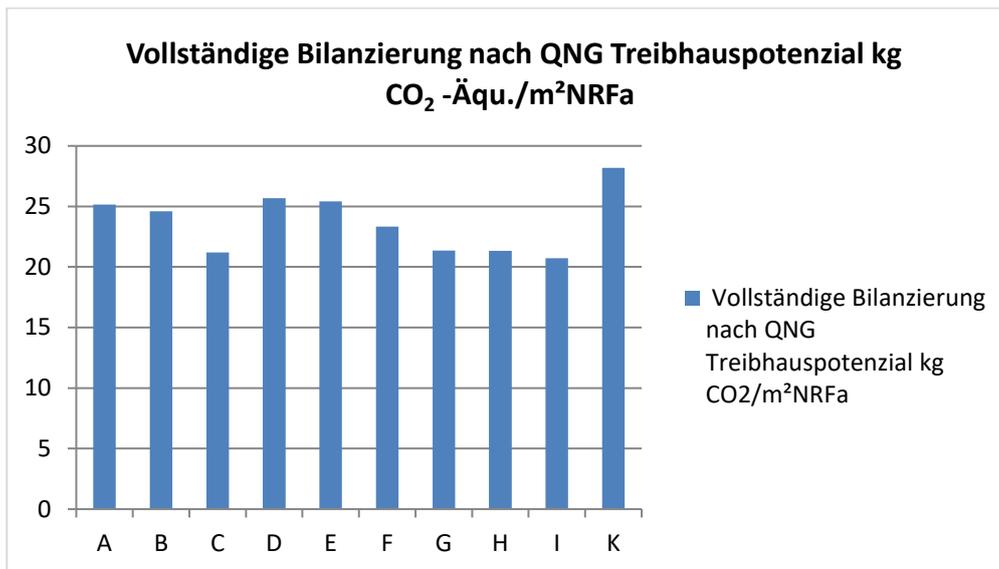


Abbildung 2-6 Vergleich der Werte der vollständigen Bilanzierung Indikator GWP kgCO₂-Äqu./m²NRFa

Die Ergebnisse nach den Berechnungsregeln der QNG-Zertifizierung sind wesentlich höher als die Ergebnisse nach Berechnungsregeln der DGNB. Grund dafür ist unter anderem, dass ein Nutzerstromanteil von 20 kWh/m² NRF*a im Betrieb zusätzlich angesetzt werden muss. Dies führt in Konsequenz auch zu einem wesentlich kleineren Unterschied der Ergebnisse für das mineralische Gebäude (Haus K) im Vergleich zu den Gebäuden in unterschiedlichen Holzbauweisen (ca. 10 %). Die Unterschiede der Gebäude A-I erreichen einen Maximalwert von ca. 25 kg CO₂/m² NRF a.

Umgerechnet liegen die nach DGNB-Version 2018 in MJ berechneten Ergebniswerte für den Indikator Primärenergie nicht erneuerbar total (PENRT) der einzelnen Gebäude bei 20 bis 33 kWh/m²a (70 bis 120 MJ/m²a). Bei der QNG-Zertifizierung liegen die Ergebnisse bei ca. 70 bis 95 kWh/m²a. Dies ist auf den Einfluss der unterschiedlichen Rechenregeln zurückzuführen:

- Anrechnung des Modul D bei der DGNB-Zertifizierung (Version 2018)
- 20 kWh/m²a Nutzenergie bei der QNG-Zertifizierung (QNG 2022)

Nach EN 15978 ist klar geregelt, dass das Modul D separat zu betrachten ist (DIN EN 15978:2012-10). Grund dafür ist, dass das Modul Informationen zu Vorteilen und Belastungen außerhalb der Systemgrenze des betrachteten Produktsystems beinhaltet (DIN EN 15978:2012-10; DIN EN 15804:2014-07). Dies wird in den Rechenregeln nach DGNB (Version 2018) nicht berücksichtigt (DGNB GmbH 2018). Wie die Ergebnisse allein aus dieser Studie zeigen, ist eine separate Ausweisung der Vorteile und Belastungen in diesem Modul jedoch notwendig, um robuste und einheitliche Ökobilanzergebnisse zu gewährleisten.

Bei der Berechnung der Gebäude ohne PV wird für das QNG-System der Grenzwert QNG-Plus für den Indikator Primärenergie nicht erneuerbar = 96 kWh/m²NRF*a für alle Gebäude erreicht und für den Indikator Treibhauspotenzial = 24 kgCO₂-Äqu./m²NRF*a für 5 Gebäude von 10 ebenfalls erreicht. Das Niveau QNG Premium wird bei keinem Indikator erreicht. Anders sieht dies aus, wenn der Einsatz von Photovoltaik mitberücksichtigt wird (siehe Anhang 7.7).

Eine Anmerkung ist an dieser Stelle zu den QNG-Ergebnissen mit Nahwärmenetz zu machen. Die fP-Werte (Primärenergiefaktoren) bezeichnen für die jeweilige Fernwärme auf die Anteile der erneuerbaren und nicht erneuerbaren Fernwärme. Diese beeinflussen die Ergebnisse der betrieblichen Ökobilanz. Die QNG-Werte mit dem im Energieausweis angesetzten fP-Wert von 0,2 haben erhebliche Steigerungen bei den Heizungswerten zur Folge. Bei dem vorgeschriebenen fP-Wert der KfW mit fP=0,4 fallen diese Werte nochmals höher aus. Ohne einen PV-Einsatz sind QNG-Pluswerte von keinem Gebäude erreichbar. Zu berücksichtigen ist, dass sich der Betrag der angegebenen fP-Werte jedoch zukünftig durch Vorgaben der KfW ändern kann.

2.1.5 Auswertung – Kohlenstoffspeicherung und biogenes Treibhauspotential

Zur Berechnung des biogenen Kohlenstoffgehalts der betrachteten Gebäude wurden in diesem Projekt zunächst die Daten für die Menge an nachwachsenden Rohstoffen ermittelt (siehe Anhang 7.8).

Daraus lässt sich überschlägig die zugehörige Menge an entzogenem äquivalentem Kohlenstoffdioxid für das jeweils betrachtete Gebäude und folglich das zugehörige GWP-biogen für das Modul A1 ermitteln (DIN EN 16449:2014-06). Stammen die verwendeten Holzprodukte aus nachhaltiger Forstwirtschaft, dann wird diese Menge an äquivalentem Kohlenstoffdioxid beim Eintritt in das Produktsystem mit einem negativen Vorzeichen versehen und am Lebensende wieder ausgebucht (DIN EN 15804:2022-03).

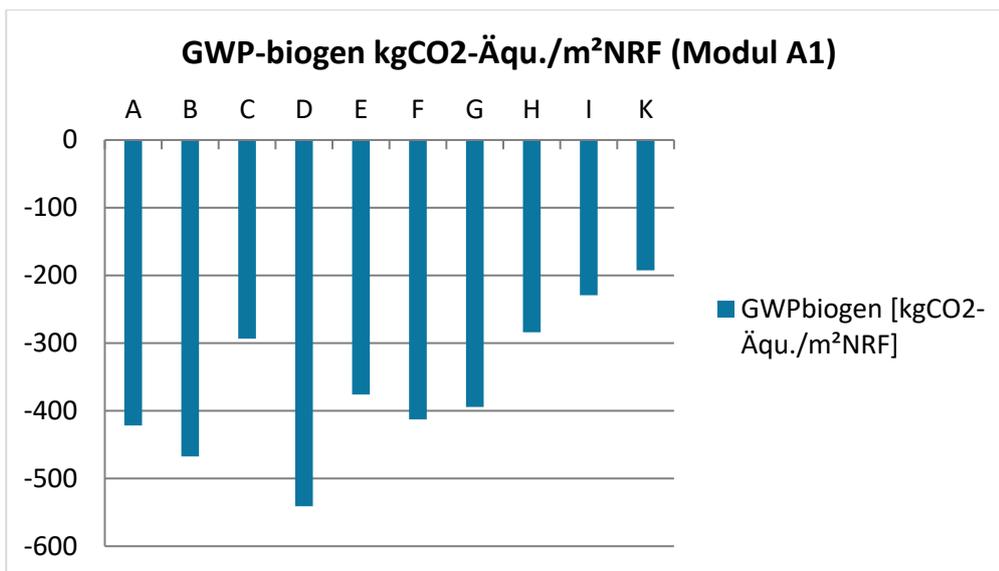


Abbildung 2-7 Vergleich der Werte des GWP-biogen im Modul A1 in kgCO₂-Äqu./m²NRFa

Das mineralische Gebäude K weist mit ca. -190 kgCO₂-Äqu. /m² NRF den geringsten Anteil in der Konstruktion auf. Zwischen den Gebäuden A bis I zeigen sich deutliche Unterschiede. Zwischen dem Ergebnis für Gebäude I (-230 kgCO₂-Äqu. /m²NRF) und dem Ergebnis für Gebäude D (-540 kgCO₂-Äqu. /m²NRF) besteht ein Unterschied von ca. 130%. Ursache sind die Unterschiede des gewählten Konstruktionsaufbaus für die Konstruktion der Außenwand, Innenwand, Decke und Dach. Bei den Gebäuden sind von holzsparenden Holztafelbauweisen bis zu mehrschaligen Blockwänden sehr unterschiedliche Varianten des Holzbaus vertreten. Je größer die verbaute Holzmenge, desto größer ist auch die Menge an nachwachsenden Rohstoffen und folglich der biogene Kohlenstoffgehalt der Konstruktion bzw. des Gebäudes. Der Durchschnittswert der Holzkonstruktionen liegt bei ca. -380 kgCO₂-Äqu. /m²NRF Nettoraumfläche.

Die Gebäude mit der größeren Nettoraumfläche weisen dann konsequenterweise auch die niedrigeren äquivalenten biogenen Kohlenstoffdioxidgehalte in $\text{kgCO}_2\text{-Äqu /m}^2\text{NRF}$ auf. Dies sind die Gebäude C, H, I. Den niedrigsten Wert erreicht das mineralische Gebäude K. Wegen des großen Holzdachstuhls wird aber auch bei diesem Gebäude ein Wert von etwa $-190 \text{ kgCO}_2\text{-Äqu /m}^2\text{NRF}$ erreicht.

2.1.6 Diskussion und kritische Reflektion der Ergebnisse

Ein bauphysikalischer Nachweis wurde durch ein Subunternehmen des Bauleiters für jedes Gebäude erstellt und zu Verfügung gestellt. Auf Nachfragen wurde sowohl der Endenergiebedarf spezifiziert als auch die Werte für das Referenzgebäude angegeben. Dieser Wert ist für die Zertifizierung nach DGNB notwendig.

Die Energiebedarfsberechnung wurde für eine Gebäudegröße und Kubatur aus der Reihe der 11 Häuser erstellt. Da sich die Gebäude in Größe und Kubatur etwas unterscheiden trifft die Energiebedarfsrechnung nur auf 5 von 11 Häusern zu. Diese Änderung ist für die Berechnung des Betriebsbedarfs in der Ökobilanz (Modul B6) relevant. Da es unwahrscheinlich war eine Neuberechnung für die angesprochenen Gebäude im Zeitfenster des Projekts zu erhalten, wurde versucht anhand von Analogieschlüssen entsprechend der Gebäudegröße und vergleichbaren U-Werte den Energiebedarf über einen Faktor anzupassen. Diese Lösung war vertretbar, da die Rahmenbedingungen für das Volumen, den Standort und die haustechnische Ausstattung bei allen Gebäuden identisch waren. In den bauphysikalischen Nachweisen wurden alle Hüllflächenbauteile beschrieben und mengenmäßig erfasst. Es ergaben sich in einigen Fällen erhebliche Abweichungen zwischen den Angaben des Energiebedarfsausweis und den Angaben der Hersteller mit den Detailplänen. Im Zweifelsfall wurden die Ausführungspläne der Hersteller als bindend für die Modellierung angenommen.

2.1.7 Schlussfolgerung und Ausblick

Wie bereits erläutert sind alle Gebäude nach einem ähnlichen Grundriss- und Schnittmuster gebaut. Es variiert deren Größe (siehe Flächen und Kubatur) und die Innenwandaufteilungen in Abhängigkeit von der Galerietreppe. Außerdem gibt es Gebäude mit und ohne Galerie.

Folgende Eingabeparameter haben einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Gebäudeökobilanzen in diesem Projekt:

- Die unterschiedlichen Kubaturen, Gebäudeflächen und Bauteilflächen bei unterschiedlichen Gebäudetypen;
- die Größe der Nettoraumfläche bei identischen Gebäudegrößen in Abhängigkeit der benötigten Konstruktionsfläche und der zusätzlichen Galerie;
- der absolute Energiebedarfsaufwand in Abhängigkeit des beheizten Volumens des Baukörpers.

Bezüglich der Nettoraumfläche ist folglich festzustellen, dass die Gebäude mit der größeren NRF in der Konsequenz die niedrigeren Werte bei allen Indikatoren und Rechenregeln aufweisen. Dies sind die Gebäude C, G, H, I. Die größere Nettoraumfläche durch die eingebaute Galerie, bei sonst gleichen Nettoraumflächen, bedeutet für diese Gebäude im Vergleich geringere Umweltwirkungen je Nettoraumfläche als für die untersuchten Gebäude ohne Galerie.

Zu erkennen ist an den Ergebnissen, dass Bauweisen mit einem hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen geringere potenzielle Umweltwirkungen aufweisen als Bauweisen mit einem geringeren Anteil an nachwachsenden Rohstoffen. Der Vorteil der nachwachsenden Rohstoffe bedingt sich aus der Tatsache, dass im Vergleich zu anderen Produkten aus mineralischen oder fossilen Grundstoffen das Treibhauspotenzial niedrig ausfällt. Das erleichtert auch das Erreichen der QNG-Grenzwerte. Außerdem ist an dieser Stelle anzumerken, dass durch den Einsatz nachwachsender, biobasierter Rohstoffe, wie Holz, Kohlenstoff in der Gebäudesubstanz gespeichert werden kann. So kommt es bis zum Ende der Lebensdauer des Gebäudes zur Speicherung des biogenen Kohlenstoffs in der Konstruktion. Die ermittelten Mengen an äquivalentem Kohlenstoffdioxid für die unterschiedlichen Gebäude zeigen, dass die Holzgebäude im Vergleich zum Mauerwerksgebäude durch das verbaute Holz ein hohes Potential zur Kohlenstoffspeicherung über ihren Lebenszyklus aufweisen.

Während der Bearbeitungszeit wurde die Ökobilanz in die staatliche Förderung seitens der KfW eingeführt (BMWSB 2024b). Zukünftig könnten Änderungen in den Regelungen des QNG und an zugehörigen Grenzwerten durchgeführt werden. In den vergangenen Jahren wurde zum Beispiel bereits der Grenzwert für QNG-Plus am 1.1.2023 von 28 kg CO₂ auf 24 kg CO₂/m²a abgesenkt (BMWSB 2023, 2021b). Folglich sind die dargestellten Werte von geringerer Bedeutung als die Systematik der Bearbeitung an sich.

Die Gebäude zeigen eine vorteilhafte Gesamtbewertung durch die Beheizung mit einem Nahwärmeversorgungsnetz auf der Basis nachwachsender Rohstoffe. Bei einer Anhebung des fp-Wertes (Primärenergiefaktor) nach den aktuellen KfW-Regeln würden die Gebäude den QNG-Plus-Grenzwert ohne PV-Anlage nicht mehr unterschreiten. Der Einbau einer Photovoltaikanlage bringt nach QNG besonders für kleine Wohngebäude ökobilanzielle Vorteile (siehe Anhang 7.7). Durch den Einsatz regenerativer Energie kann der meist höhere Energiebedarf durch die größeren Hüllflächen für Heizung, Warmwasser oder Nutzerstrom reduziert werden. Die erreichten Werte zeigen darüber hinaus, dass kleine Gebäude, ebenerdig mit relativ großem Volumen und daraus resultierender großer Hüllfläche mit entsprechendem Energieverlust die QNG-Pluswerte nur bedingt erfüllen können.

2.2 Vorgehen und Daten bei der Recyclingfähigkeitsanalyse (TUM)

2.2.1 Vorgehen bei der Recyclingfähigkeitsanalyse

Die in diesem Projekt untersuchten Gebäude und zugehörigen Konstruktionen wurden zur Analyse deren Kreislauffähigkeit bezüglich des Ressourcenverbrauchs, der Rückbaubarkeit, der Entsorgungsströme sowie des Recyclingpotentials untersucht. Dadurch soll der Ist-Zustand der Konstruktionen aufgezeigt und Optimierungsmöglichkeiten diskutiert werden. Durch die Analyse der unterschiedlichen Häuser soll es möglich sein auf andere Konstruktionen übertragbare Erkenntnisse bereitzustellen.

Um die Recyclingfähigkeit der Konstruktionen in diesem Forschungsprojekt analysieren und Empfehlungen für die praktische Umsetzung geben zu können, wurden die Details der untersuchten Häuser bezüglich deren Bauteilfügungen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in den Detaildarstellungen in Anhang 1 abgebildet. Hier sind für jedes Haus die zugehörigen Details für die Außenwände, die Innenwände und das Dach abgebildet. Für die Stahlbetonbodenplatte und (wenn vorhanden) die Galerie wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit jeweils derselbe Aufbau angenommen. Für die Analyse wurden die Häuser der Holzmassivbauweise, der Holztafelbauweise, der Blockbauweise aus Holz und der Mauerwerksbauweise zugeteilt (siehe Tabelle 2-1). Dies erfolgte anhand der Betrachtung der jeweiligen Außenwandkonstruktion. Der Begriff *Blockbauweise* wird hier für die Konstruktionen der Außenwände von Haus B und Haus L verwendet.

Tabelle 2-1 Zuteilung der Häuser zu spezifischen Bauweisen für die Recyclingfähigkeitsbetrachtung

Bauweise	Haus
Holzmassivbauweise	Haus A, Haus D, Haus F, Haus G
Holztafelbauweise	Haus C, Haus E, Haus H, Haus I
Blockbauweise	Haus B, Haus L
Mauerwerksbauweise	Haus K

Die Analyse der Recyclingfähigkeit wurde anhand der Erkenntnisse aus dem durch die DBU geförderten Projekts *Ressourcennutzung Gebäude* (Hafner et al. 2020) sowie des *Modell[s] der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene* (Ebert et al. 2020) durchgeführt. Hier wurden erste Modellansätze eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Bauteilen entwickelt (Hafner et al. 2020; Ebert et al. 2020). Hierdurch können die stoffliche Nutzung und das Potential einer Kreislaufführung von Bauteilen und der zugehörigen Rohstoffe abgebildet und bewertet werden. Die Bewertung wird anhand der folgenden in Abbildung 2-8 hierarchisch geordneten Begrifflichkeiten vorgenommen, deren Definitionen im Kreislaufwirtschaftsgesetz (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2012) festgehalten sind (Hafner et al. 2020). Anzustreben ist bestenfalls nach untenstehender Abbildung die Wiederverwendung, im schlechtesten Fall kommt es zur Deponierung/Beseitigung (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2012).

Kategorie	Abfallströme (Material)
1 Wiederverwendung	Material zur Wiederverwendung
2 Wiederverwertung	Sekundärmaterial zur stofflichen Nutzung mit gleichwertigen Stoffniveau
3	Sekundärmaterial zur stofflichen Nutzung mit minderwertigen Stoffniveau
4 Endgültige Verwertung	Material zur endgültigen, stofflichen Verwertung
5	Material zur endgültigen, energetischen Verwertung
6 Beseitigung	Material zur Beseitigung

Abbildung 2-8 Übersicht über die Hierarchie der möglichen Verwertungswege (Hafner et al. 2020) basierend auf (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2012)

Anhand des Modellansatzes können neben der Ressourcennutzung, die Recyclingfähigkeit einzelner Baustoffe basierend auf aktuellen Verwertungswegen und das zukünftige Wiederverwendungspotential ermittelt werden. Auf Bauteilebene spielen die Fügungen zwischen den Bauteilschichten eine entscheidende Rolle, wenn es um das Recyclingpotential der Baustoffe geht. Denn die zerstörungsfreie Lösbarkeit dieser Fügungen und des gefügten Materials ist Grundlage dafür, eine hochwertige Wiederverwendung oder stoffliche Verwertung der einzelnen Bauteilschichten überhaupt zu ermöglichen (Hafner et al. 2020). So kann es sein, dass ein Baustoff, der beispielsweise eigentlich das Potential zur Wiederverwendung (Stufe 1 der Abfallhierarchie) hätte, aufgrund dessen Fügung mit anderen Bauteilschichten stofflich verwertet oder sogar verbrannt oder deponiert werden muss. Die Lösbarkeit der Fügungen wurde von Hafner et al. (2020) unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von Schwede und Störl (2017) als Basis für die Bewertung anhand des Modellansatzes der Recyclingfähigkeit verwendet (siehe Tabelle 2-2). Grundlage hierfür waren die nach DIN 8591:2003-09 definierten Fügemethoden (DIN 8591:2003-09). Eine genauere Beschreibung des Vorgehens zur Bewertung der Recyclingfähigkeit ist im Abschlussbericht des zugehörigen Forschungsprojektes beschrieben (Hafner et al. 2020). In diesem Forschungsprojekt soll dieses Vorgehen angewandt, überprüft und daraus Möglichkeiten für dessen Weiterentwicklung identifiziert werden.

Tabelle 2-2 Bewertung der Lösbarkeit der Fügemethoden nach Hafner et al. (2020) und Schwede und Störl (2017)

Fügemethodik	Kürzel	Verbindung	Lösbarkeit
Zusammensetzen			
Auflegen, Aufsetzen, Schichten (lose)	AUF-I	FSV	+
Auflegen, Aufsetzen, Schichten (magnetisch)	AUF-m	FSV	+
Einlegen, Einsetzen (Zapfen, Versatz, Einklemmen)	EIN	FSV	+
Ineinanderschieben (Gelenkbolzen, Dübel)	INEIN	FSV	+
Einhängen (z.B. von Federn)	HÄNG	FSV	+
Einrenken (Reiß-, Klett-, Bajonettverschluss)	RENK	FSV	+
federnd Spreizen (Schnappverschluss)	SPREI	FSV	+
Füllen			
Einfüllen	FÜL	FSV	+
Tränken, Imprägnieren	IMP	SSV	-
An- und Einpressen			
Schrauben vorgeformt (Bolzen, SL, SLV, GV, GVP)	vSRA	KSV	+
Schrauben selbstformend (Holzschrauben)	sSRA+	KSV	o
Schrauben selbstformend (verdeckt, hohe Anzahl)	sSRA-	KSV	-
Klemmen / Klemmverschluss (z.B. Seilklemme)	KLEM	KSV	+
Klammern	KLAM	KSV	+
Fügen durch Presspassung (Schrumpfen/Dehnen)	PRESS	KSV	o
Nageln, Nagelplatten, Verstiften, Einschlagen	NAG+	KSV	o
Klammern, Holznägel, hohe Anzahl an Nägeln	NAG-	KSV	-
Verkeilen	KEIL	KSV	+
Verspannen	SPANN	KSV	+
Urformen			
Ausgießen (Gießen von Ortbeton, Halbfertigteile)	AGIE	SSV	o
Einbetten (Eingießen von Anschlussbauteilen)	EIBET	SSV	-
Vergießen von zwei Bauteilen (Fugen)	VGIE	SSV	-
Eingalvanisieren	GALV	SSV	-
Ummanteln	UMM	SSV	-
Kitten	KIT	SSV	-
Umformen			
Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper	UMFD	FSV	o
Fügen d. Umformen bei Blech-, Rohr- und Profiltteilen	UMFB	FSV	o
Fügen durch Nietverfahren	NIET	FSV	-
Schweißen			
Pressverbindungsschweißen	PSCHW	SSV	-
Schmelzverbindungsschweißen	SSCHW	SSV	-
Löten			
Verbindungsweichlöten	WLÖT	SSV	-
Verbindungshartlöten	HLÖT	SSV	-
Kleben			
Kleben mit physikalischen abbindenden Klebstoffen	PKLEB	SSV	-
Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen	CKLEB	SSV	-
Kleben mit löslichen Klebstoffen	KLEB+	SSV	o
Beschichten (aus dem flüssigen Zustand)			
Anstreichen, Lackieren	STR	SSV	-
Beschichten (aus dem plastischen Zustand)			
Spachteln	SPA	SSV	-
Beschichten (aus dem breiigen Zustand)			
Putzen, Verputzen	PUT	SSV	-

Anzumerken ist, dass neben der Lösbarkeit der Fügungen weitere allgemeine Prinzipien bereits bei der Planung befolgt werden sollten, um eine am Lebensende möglichst leichte Demontierbarkeit zu gewährleisten. So ist es nach ISO 20887:2020-01 notwendig, einen leichten Zugang zu den einzelnen Bestandteilen einer Konstruktion zu gewährleisten. Auch die Möglichkeit zur Entfernung von Bestandteilen, ohne andere zu beeinträchtigen (Unabhängigkeit) muss gegeben sein. Außerdem sind möglichst keine zusätzlichen Behandlungen und Beschichtungen durchzuführen, denn insbesondere gefährliche Stoffe können eine Wiederverwendung oder ein Recycling verhindern. Geschäftsmodelle, die die Wiederverwendung und das Potential zur Wiederverwendung ermöglichen, sind ebenfalls anzustreben. Darüber hinaus sind einfache Konstruktionen, die leicht nachvollziehbare Systeme beinhalten, zum Beispiel um Reparaturen zu vereinfachen, und

die Standardisierung und Sicherheit bei der Demontage notwendig, um die Demontierbarkeit im Gebäudekontext zu gewährleisten. (ISO 20887:2020-01)

2.2.2 Auswertung - Ressourcennutzung

Zur Untersuchung der für die Häuser in unterschiedlicher Bauweise genutzten Ressourcen, wurden zunächst die Mengen (Masse in kg) je Bauteil und Haus untersucht (Abbildung 2-9).

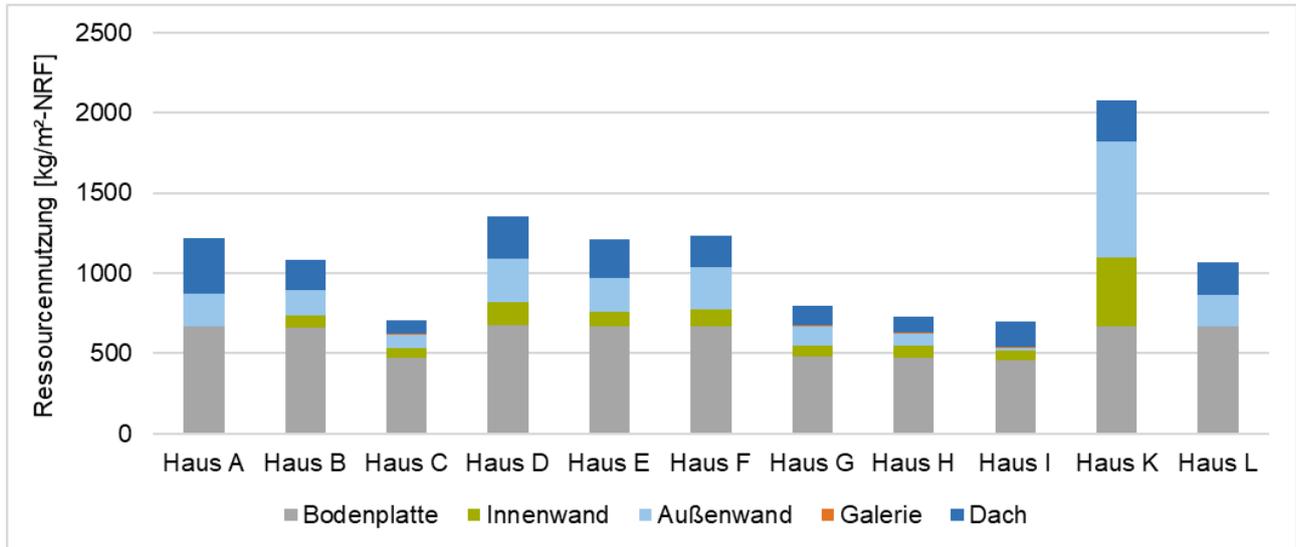


Abbildung 2-9 Ressourcenverbrauch in kg je Haus je m² Nettoraumfläche

Insgesamt ist festzustellen, dass die Masse je Nettoraumfläche für alle Bauteile des Mauerwerksgebäudes (Haus K) deutlich größer ist als die Masse der Bauteile der anderen Häuser. Dies liegt insbesondere an der deutlich größeren Masse der Mauersteine im Vergleich zur Masse der für die Holzbauweise zum Einsatz kommenden Materialien. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass der Unterschied durch eine volumenmäßige Betrachtung voraussichtlich viel geringer ausfallen würde. Da jedoch die Betrachtung der Holzbauweisen im Fokus steht, wird auf diese zusätzliche Darstellungsform verzichtet. Für die unterschiedlichen Holzbauweisen ist der massenmäßige Vergleich bezüglich der Untersuchung der Ressourcennutzung sinnvoller, da dadurch die verwendete Menge (Masse) an Holz, nicht aber das Volumen die ausschlaggebende Rolle spielt. So steckt beispielsweise in 1m³ Brettsperrholz eine größere Holzmenge (Masse), als in 1m³ Holzfaserdämmung.

Es ist zu erkennen, dass die Bodenplatte aus Stahlbeton bei allen Holzgebäuden einen Anteil an der Gesamtmasse von etwa 50% bis 70% ausmacht. Für das Mauerwerksgebäude besitzt die Bodenplatte einen Anteil von etwa 30% an der Gesamtmasse der Bauteile je Haus je m² Nettoraumfläche (Rohdichte von Holz geringer als Wichte Stahlbeton).

Die Galerie macht, wenn vorhanden, einen sehr geringen Anteil an der Gesamtmasse der verbrauchten Ressourcen aus. Allein auf die Holzgebäude bezogen, weisen die Holzmassivgebäude Haus A, Haus D und Haus F den massenmäßig größten Ressourcenverbrauch auf (ca. 1200-1350kg/m²-NRF). Den massenmäßig geringsten Ressourcenverbrauch je Nettoraumfläche verzeichnen Haus C und Haus I (ca. 700kg/m²-NRF). Dies ist auf die im Vergleich zu den anderen Häusern geringe Masse der in den Innen- und Außenwänden

sowie im Dach verwendeten Baustoffe zurückzuführen. Hierbei handelt es sich um Konstruktionen in Holztafelbauweise. Am Beispiel der Außenwände ist zu erkennen, dass die Verwendung der Massivholzkonstruktionen (Haus A, Haus D, Haus F) zu durchschnittlich höheren Massen und folglich zu einem höheren Verbrauch der Ressource Holz führt, als wenn beispielsweise eine Holztafelkonstruktion oder Blockbauweise mit Konstruktionsvollholz und Gefachdämmung aus Holzfaser gewählt wird.

Dies ist auch an Abbildung 2-10 zu erkennen, hier sind die durchschnittlich je Bauweise anfallenden Materialmengen (in kg) in Abhängigkeit des jeweiligen Bauteils dargestellt.

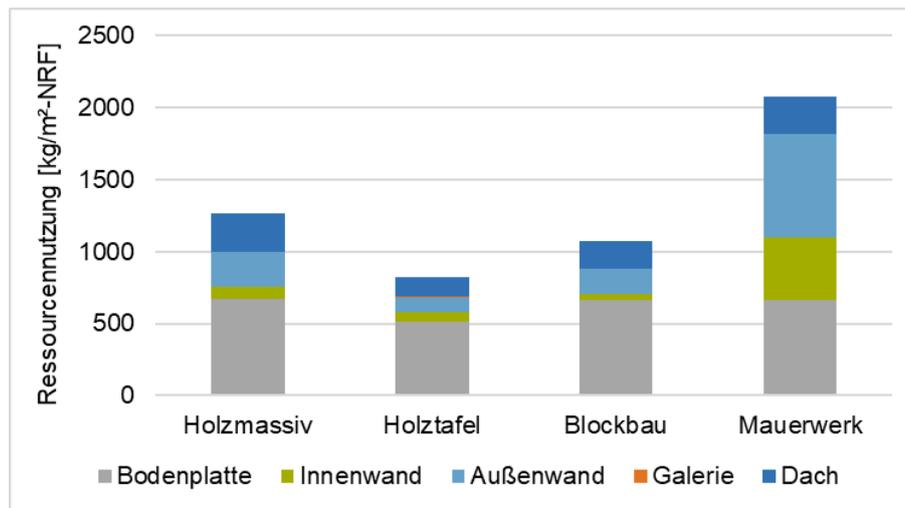


Abbildung 2-10 Durchschnittlicher Ressourcenverbrauch in kg je Bauweise je m² Nettoraumfläche

Die Bodenplatte besitzt, wie bereits erläutert, für die Holzmassiv- Holztafel- und Blockbauweise den größten Massenanteil. Grund dafür ist die im Vergleich zur Wichte der in den anderen Bauteilen verbauten Baustoffe hohe Wichte des Stahlbetons der Bodenplatte. Außenwände und Dach machen bei den Holzbauweisen jeweils etwa 15-20%. Die Innenwände sind für beide Holzbauweisen für ca. 4-8% der Masse an verbrauchten Ressourcen verantwortlich.

Für das Gebäude in Mauerwerksbauweise haben auch die mineralischen Baustoffe in den Wänden und dem Dach eine hohe Wichte und folglich Masse. Die Innen- und Außenwände sind zusammen für den größten massenmäßigen Anteil (ca. 58%) an verbrauchten Ressourcen verantwortlich. Die Bodenplatte macht hier etwa 30% aus. 12% der verbauten Masse ist bei der Mauerwerksbauweise auf dessen Dach in Holzbauweise zurückzuführen.

Schlussfolgernd ist zum Ressourcenverbrauch festzuhalten, dass für das Mauerwerksgebäude massenmäßig die größte Menge an Ressourcen anfällt. Für die Holzbauweisen machen, unter Vernachlässigung der Baustoffe aus der Bodenplatte, die Dämmungsschichten den größten massenmäßigen Anteil aus. Bei der Holzmassivbauweise und der Blockbauweise spielt hier außerdem die Masse des verbauten Massivholzes eine große Rolle, was zu einer deutlich höheren Masse dieser Konstruktionen im Vergleich zur Holztafelkonstruktionen führt und folglich zu einem größeren Verbrauch an der Ressource Holz.

2.2.3 Auswertung - Recyclingpotential der Baustoffe

Nach aktuellem Stand der Technik für baustoffspezifische Verwertungsmöglichkeiten kann das **Potential zur Verwertung der Baustoffe** (ohne Berücksichtigung des Bauteilkontexts) bestimmt werden (Hafner et al. 2020; Ebert et al. 2020).

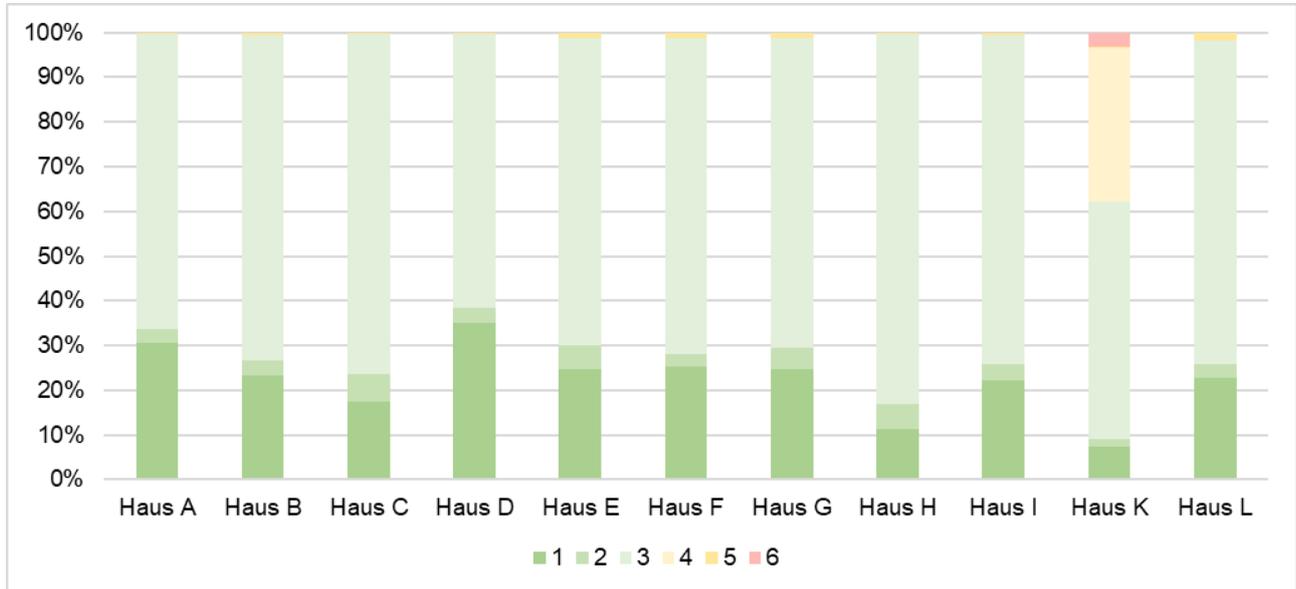


Abbildung 2-11 Recyclingpotential der Baustoffe je Haus – Prozentualer Anteil der potenziellen Verwertungswege

Das Ergebnis zeigt, dass die für die Häuser verwendeten Baustoffe ein hohes Potential zur stofflichen Verwertung und bestenfalls sogar zur Wiederverwendung haben (siehe Abbildung 2-11). Lediglich für Haus K müssten Baustoffe deponiert (Stufe 6) werden. Dies ist die zum Einsatz kommende Außen- und Innenwandfarbe. Haus K weist außerdem mit Abstand den größten Anteil an Materialien auf, die potenziell endgültig stofflich verwertet (Stufe 4) werden müssten. Grund dafür sind die mineralischen Bauabfälle, die durch den Abriss des Mauerwerksgebäudes entstehen. Denn der Mörtel zwischen den Mauersteinen verhindert ein sortenreines und zerstörungsfreies Trennen und führt zu einer Schädigung der Mauersteine beim Rückbau.

Das Wiederverwendungspotential für die Holzmassivkonstruktionen liegt hauptsächlich an den Bauteilschichten aus massivem Holz wie zum Beispiel Brettsperrholz und der eingebrachten weichen Dämmung. Die Gefachdämmung birgt auch für die Holztafel- und Blockkonstruktionen der Innen- und Außenwände das größte Potential zur Wiederverwendung. Diese besitzt auch massenmäßig einen großen Anteil am jeweiligen Bauteil (siehe Kapitel 2.2.2). Auch das Dach von Haus K ist in Holzbauweise ausgeführt. Deshalb ist auch für dieses Haus ein Wiederverwendungspotential zu verzeichnen, das auf die Dämmung, die Holzbalken und die Dachziegel zurückzuführen ist.

2.2.4 Auswertung - Entsorgungsströme der Baustoffe - Bauteilebene

Um die Ergebnisse für die **Recyclingfähigkeit nach aktuellem Stand der Abfallverwertung auf Bauteilebene** darstellen zu können, werden die zu entsorgenden Baustoffe unterschiedlichen Bauschuttgruppen zugeordnet (Ebert et al. 2020; Hafner et al. 2020). Dadurch können dann anteilig die aktuellen Verwertungswege ermittelt werden. So ist es möglich eine Einschätzung darüber zu treffen, welche Verwertungswege die betrachteten Baustoffe eines Bauteils am Lebensende gehen werden.

Abbildung 2-12 zeigt die Ergebnisse der Entsorgungsströme nach aktuellem Stand der Abfallverwertung je Haus je m² Nettoraumfläche.

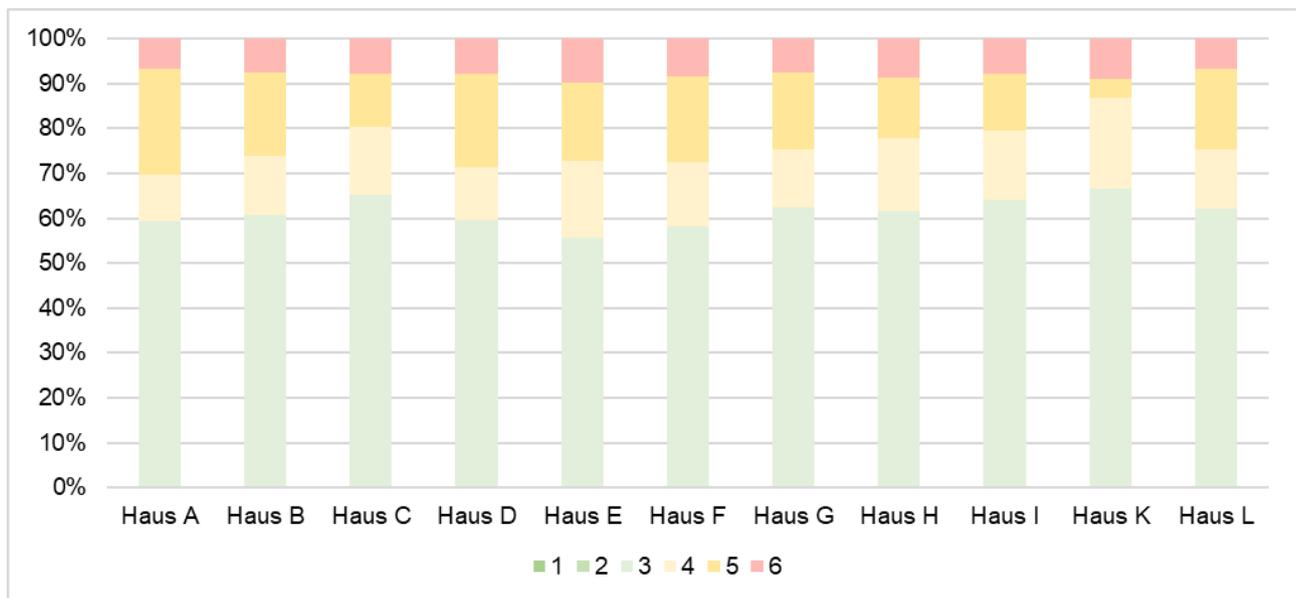


Abbildung 2-12 Recyclingfähigkeit der Baustoffe je Haus – Prozentualer Anteil der aktuellen Verwertungswege im Bauteilkontext

Es ist zu erkennen, dass nach aktuellem Praxisstand der Verwertung maximal eine minderwertige stoffliche Verwertung (Stufe 3) für die Baustoffe erreicht werden kann. Das bedeutet zum Beispiel im Kontext einer Spanplatte oder eines Konstruktionsvollholzes, dass hieraus bestenfalls wieder Späne gemacht werden können, die wieder für eine Spanplatte verwendet werden könnten. Der massenmäßige Anteil an Ressourcen, die minderwertig stofflich verwertet werden, stellt für jedes Haus den größten Stoffstrom dar. Der größte Anteil der minderwertigen sowie der endgültigen stofflichen Verwertung ist bezüglich der massenmäßig verbrauchten Ressourcen auf die Verwertung des durch die Bodenplatte und den Estrich hervorgerufenen Bauschutts zurückzuführen. Den größten Anteil an der energetischen Verwertung machen hier die holzba-sierten Dämmmaterialien und die Baustoffe aus Massivholz aus. Aktuell würden nahezu alle in den betrachteten Häusern verwendeten Baustoffe, mit Ausnahme der Bewehrung, zu einem geringen Anteil deponiert werden. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die am Lebensende aus einem Gebäude entnommenen Ressourcen verunreinigt sein können.

Die Ergebnisse weisen im Vergleich zu den potenziellen Verwertungswegen für die Baustoffe je Haus durchgehend schlechtere Ergebnisse auf. Insbesondere durch aktuell geltende Vorschriften, werden die Ressourcen auf einer niedrigeren Hierarchiestufe verwertet, als dies eigentlich nach aktuellem Stand der Technik möglich wäre. Dies zeigt, dass durch das Fügen von Baustoffen innerhalb von Bauteilen das Potential zum Recycling deutlich abnimmt. Auch wird deutlich, dass aktuelle Vorschriften das Potential zur möglichst hochwertigen stofflichen Verwertung hemmen (z.B. Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2002).

2.2.5 Auswertung - Wiederverwendungspotential der Baustoffe – Bauteilebene

Anhand einer weiteren Untersuchung kann das **Potential zur Wiederverwendung der Baustoffe im Kontext des Bauteils** (nach aktuellem Stand der Technik für baustoffspezifische Verwertungsmöglichkeiten bestimmt werden (Hafner et al. 2020; Ebert et al. 2020). Hier werden für den Kontext des Bauwesens die

aktuellen Verwertungswege in die Betrachtung mit einbezogen. Es wird davon ausgegangen, dass diejenigen Materialien, die grundsätzlich (ohne Berücksichtigung aktuell geltender Vorschriften nach aktuellem Stand der Technik) wiederverwendet werden könnten und die gleichzeitig und ohne Schädigung lösbar sind, wiederverwendet werden können.

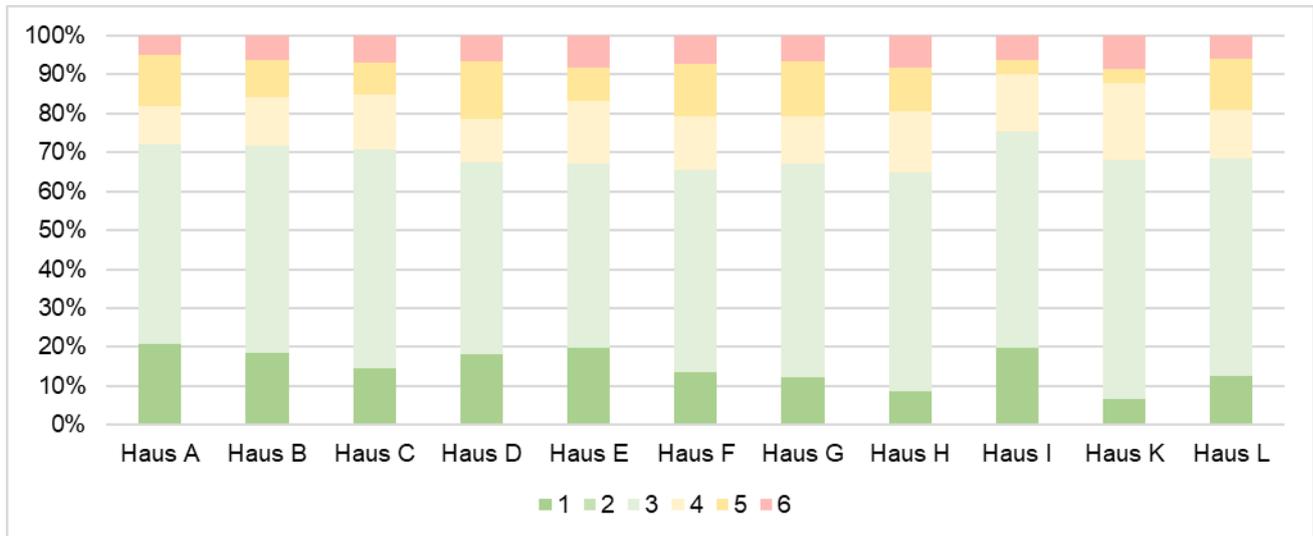


Abbildung 2-13 Wiederverwendungspotential und Verwertungswege der Baustoffe je Haus– Prozentualer Anteil im Bauteilkontext
 Ein Wiederverwendungspotential der Baustoffe ist in jedem Haus vorhanden (siehe Abbildung 2-13). Dieses Potential ist einerseits mit der individuellen Materialwahl und andererseits mit den verwendeten Fügungen zu begründen. Das Ergebnis zeigt, dass das Wiederverwendungspotential je Haus geringer ist als das ermittelte Potential auf Baustoffebene (siehe Kapitel 2.2.3, Abbildung 2-11). Grund dafür sind, wie bereits beschrieben, die Fügungen zwischen den Bauteilschichten sowie aktuell geltende Vorschriften für die Verwertung des Abfalls. Ein Potential zur Wiederverwendung im Bauteilkontext (inklusive der Lösbarkeit der Fügungen) für die elf Häuser unter Anwendung des Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken von Hafner et al. (2020) weisen letzten Endes nur die folgenden Baustoffe inklusive Fügung auf:

- Lose eingelegte (verdübelte) Dämmung
- Eingehängte Dachziegel
- Massivholzelemente, Konstruktionsvollholz und andere Vollholzelemente als Primär- oder Sekundärkonstruktion, die zerstörungsfrei lösbar mit den anderen Schichten verbunden ist

Dies gilt nur dann, wenn alle anderen Schichten innerhalb des betrachteten Bauteils zerstörungsfrei lösbar mit diesen Schichten verbunden sind.

Dämmung, Dachziegel und Massivholzelemente haben im Kontext des Bauteils insbesondere deshalb ein hohes Wiederverwendungspotential, weil sie gut und ohne Schädigung lösbar sind. Dies wird bei der Bewertung der Lösbarkeit der Fügemethoden nach Tabelle 2-2 deutlich, die dem hier angewandten Modell zu Grunde liegt. Ohne Schädigung lösbare Verbindungen werden hier mit “+“ gekennzeichnet. So ist die weiche Dämmung lose eingelegt und kann folglich leicht, ohne Schädigung, gelöst werden. Die Dachziegel sind eingehängt, die Massivholzelemente sind mit, im Verhältnis zu deren Fläche, einer geringen Verbindungsmittelzahl befestigt. Folglich ist auch für diese Materialien ein Lösen ohne Schädigung möglich. Dadurch, dass

sowohl ein Recyclingpotential der Materialien an sich sowie der Fügungen gegeben ist, ist ein Wiederverwendungspotential im Kontext des Bauteils vorhanden.

Die folgenden Ergebnisse zeigen beispielhaft den Einfluss der unterschiedlichen Bauweisen auf das Ergebnis der Recyclingfähigkeit der zu einem Bauteil zugehörigen Baustoffe. Hierfür wurde der jeweilige Mittelwert der Ergebnisse der Recyclingfähigkeit der Baustoffe über die Häuser in unterschiedlicher Bauweise gebildet (siehe Abbildung 2-14).

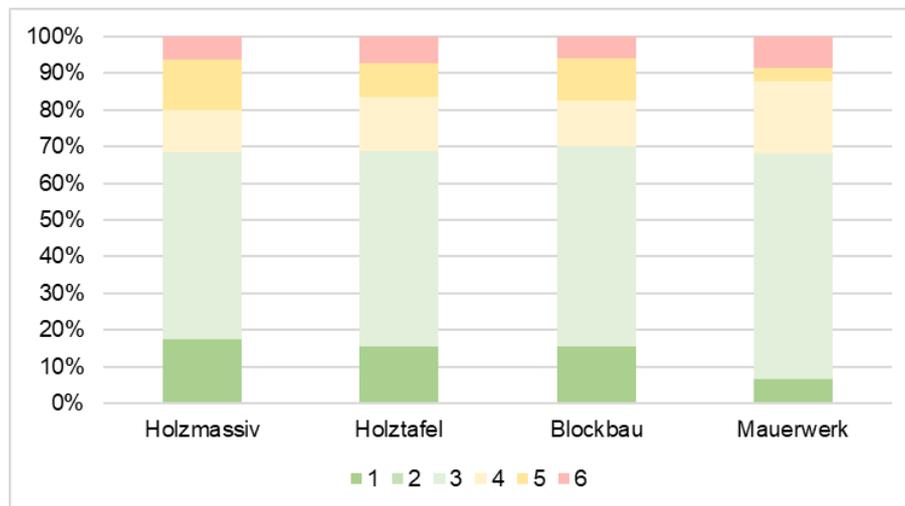


Abbildung 2-14 Durchschnittliches Wiederverwendungspotential je Bauweise – Prozentualer Anteil im Bauteil-kontext

Die Abbildung zeigt die Verwertungswege und das Wiederverwendungspotential in Abhängigkeit der Bauweise. Die Verwertungswege für die Holzbauweisen sind hier relativ ähnlich. Diese weisen, im Vergleich zur Mauerwerksbauweise ein höheres Wiederverwendungspotential auf. Dies liegt, wie bereits beschrieben, an dem durch die Mauerwerkswände hohen (massenmäßigen) Anteil an Bauschutt, der einer minderwertigen stofflichen Verwertung zur Verfügung steht. Aufgrund der nicht lösbaren Fügung der Mauersteine mit Mauermörtel, gibt es hierfür nach aktuellem Stand kaum Möglichkeit zur Wiederverwendung (Rosen 2021). Für die Mauerwerksbauweise weisen allein die weiche Dämmung und die Ziegel des Dachs von Haus K Wiederverwendungspotential auf, denn diese sind lose eingelegt beziehungsweise eingehängt und können folglich beim Rückbau herausgenommen werden.

2.2.6 Diskussion und kritische Reflektion der Ergebnisse

Die Recyclingfähigkeitsbetrachtung für die Häuser wurde basierend auf einer Recyclingfähigkeitsbetrachtung auf Bauteilebene durchgeführt. Hierbei wurden die Fügungen zwischen Bauteilen nicht berücksichtigt. Denn dies ist aktuell mit dem Modellansatz zur Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene nicht möglich (Ebert et al. 2020). Deshalb könnten die vorliegenden Ergebnisse des Recyclings- und Wiederverwendungspotentials für die betrachteten Häuser positiver ausfallen als in Realität. Jedoch kommen im Holzbau für das Fügen zwischen Bauteilen hauptsächlich wieder lösbare Schraubverbindungen zum Einsatz. Deshalb ist davon auszugehen, dass das Vernachlässigen der Fügungen zwischen den Bauteilen in dieser Studie keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat.

2.2.7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Menge an verbauten Ressourcen für die Holz- und das Mauerwerksgebäude verdeutlichen die Notwendigkeit eines reduzierten und möglichst kreislauffähigen Ressourceneinsatzes. Dies zeigt, dass es erforderlich ist, bestehende Konstruktionen zu überdenken und hinsichtlich der Ressourcennutzung und Recyclingfähigkeit zu optimieren.

In diesem Kapitel wurde das Potential zur Wiederverwendung auf Bauteilebene untersucht. Derzeit ist eine tatsächliche Umsetzung dieser Verwertungswege kaum möglich, da dies unter anderem durch aktuelle Vorgaben, gewohnte Vorgehensweisen und Gründen der Wirtschaftlichkeit in der Praxis nicht umgesetzt wird. Es zeigt jedoch, dass es bei den betrachteten Gebäuden zu einer Wiederverwendung von bis zu 20% der Masse der verwendeten Ressourcen kommen kann, wenn dafür zukünftig Möglichkeiten geschaffen werden. Für den Holzbau sind hierfür aktuell, unter Berücksichtigung der Ergebnisse des hier verwendeten Modellansatzes, die lose eingelegte Dämmung, eingehängte Dachziegel sowie zerstörungsfrei lösbare Massivholzelemente verantwortlich. Denn eine Wiederverwendung ist durch den Einsatz wiederverwendbarer Materialien in Kombination mit möglichst zerstörungsfrei lösbaren Verbindungen möglich, die eine Wiederverwendung oder eine hochwertige stoffliche Verwertung der Baustoffe fördern. Insbesondere für die Gebäude in Holzbauweise besteht zukünftig weiterer Optimierungsbedarf ein höheres Wiederverwendungspotential zu erreichen. So können für den Holzbau aufgrund des vielschichtigen Aufbaus mit unterschiedlichsten Ausführungsmöglichkeiten, Fügemethoden entwickelt und angewandt werden, die beim Lösen keine oder nur eine geringfügige Schädigung der Materialien mit sich bringen (siehe Tabelle 2-2). Folglich ist, wenn möglich, auf den Einsatz von Holzkonstruktionen, bei denen nur durch Zerstörung lösbare Fügungen zum Einsatz kommen zu verzichten. Solche Fügungen können z.B. geklebte Bauteilschichten oder das Fügen mit einer sehr hohen Anzahl an Schrauben, Nägeln oder Klammern sein. Denn diese bringen eine Schädigung der gefügten Bauteilschichten beim Lösen der Verbindung mit sich (siehe Tabelle 2-2). Für die Mauerwerksbauweise ist eine Optimierung hin zu schädigungsfreien Verbindungen aktuell schwer möglich, denn der Mörtelauftrag stellt eine Fügung dar, die aktuell hauptsächlich durch Zerstörung der Mauersteine lösbar ist (Rosen 2021).

Um ein möglichst hohes Potential zur Wiederverwendung auf Bauteilebene zu gewährleisten sind neben dem zum Einsatz kommenden Materialien und Fügemethoden auch die in Kapitel 2.2.1 nach ISO 20887:2020-01 einzuhaltenden Prinzipien zu befolgen. Nur so kann eine Wiederverwendbarkeit und hochwertige Recyclingfähigkeit bereits in der Planung ganzheitlich mitgedacht werden.

Die Anwendung des von Hafner et al. (2020) entwickelten *Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken* in diesem Forschungsprojekt zeigt, dass es grundsätzlich möglich ist das Recyclingfähigkeitspotential von Bauteilen anhand technischer Parameter abzubilden. Es wird auch deutlich, dass der verwendete Modellansatz eine Grundlage dafür liefert, die Kreislauffähigkeit von Konstruktionen zukünftig bewerten und die Ergebnisse für Vergleiche und als Entscheidungs- und Optimierungsgrundlage heranziehen zu können.

Zusätzlich wird durch die Anwendung des Nachweisverfahrens aufgezeigt, dass weitere Untersuchungen und Entwicklungen des Modellansatzes notwendig sind, um die Ressourcennutzung im Bauteil- und zukünftig auch im Gebäudekontext vollständig und möglichst realistisch abbilden zu können. Aktuell basiert die

Bewertung der Lösbarkeit der Fügungen auf Einschätzungen, die von Schwede und Störl (2017) und Hafner et al. (2020) getroffen wurden. Untersuchungen zur Lösbarkeit der Fügungen und zum Zerstörungsgrad der Verbindungsmittel sowie der betroffenen Baustoffe müssen anhand realer Konstruktionen durchgeführt werden, um die getroffenen Annahmen zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen oder zu erweitern. Außerdem könnte durch das Nachweisverfahren zukünftig nicht nur das Potential zur Wiederverwendung im Bauteilkontext, sondern auch das Potential zum Recycling abgebildet werden. Hier könnte durch die Bestimmung des Verunreinigungsgrades des zugehörigen Materials nach dem Lösen der Verbindungen, eine spezifischere Zuordnung zu aktuellen Verwertungswegen erfolgen. Um zukünftige potenzielle Stoffströme abzubilden, wäre eine Untersuchung zu zukünftigen möglichen Verwertungswegen durchzuführen und diese dann im Nachweisverfahren abzubilden. In diesem Projekt durchgeführte Betrachtungen beschränkten sich auf die Untersuchung des Ressourcennutzungspotentials auf Bauteilebene. Dieses Potential wurde dann auf die Gebäudeebene skaliert. Berücksichtigt wurden hierbei nicht die Fügungen zwischen den betrachteten Bauteilen und folglich das Potential zur Wiederverwendung ganzer Bauteile. Weitere Forschung ist notwendig, um die Recyclingfähigkeit auf Gebäudeebene inklusive der Berücksichtigung des Wiederverwendungspotentials ganzer Bauteile abbilden zu können.

2.3 Vorgehen und Daten bei Innenraumluftmessung (IQUH)

2.3.1 Vorgehen und Ziel bei den Innenraumluftmessungen

Für die Ermittlung der Innenraumluftqualität wurden 10 der 11 Häuser in Waldmünchen auf folgende Parameter über das akkreditierte Labor Analytik Aurachtal GmbH untersucht:

1. TVOC (Total Volatile Organic Compounds)
2. Aldehyde, Formaldehyd
3. Biozide, Flammschutzmittel, Weichmacher
4. Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
5. Polychlorierte Biphenyle (PCB)
6. Carbonsäuren/Alkansäuren (C1-C8)

Die untersuchten Häuser waren Haus A, B, C, D, E, G, H, I, K und L.



Abbildung 2-15 Häuser, bei denen eine Innenraumluftmessung durchgeführt wurde (orange)

Hierfür wurden die Messräume gemäß DIN 16000-1 feingereinigt (Mikroentstaubung durch Absaugen der Boden- und Wandoberflächen und Umwälzung der Luft mit HEPA 13 Filtern), gelüftet, über 8 Stunden verschlossen gehalten und anschließend gemessen (DIN EN ISO 16000-1). Exemplarisch wurde in einem Gebäude zusätzlich eine Messung nach 1,5 Std. durchgeführt, um zu prüfen, wie sich die Messwerte bei einem Lüftungsintervall von 1,5 Stunden verhalten. In allen Gebäuden liegt keine raumlufttechnische Anlage vor.

Damit die Messbedingungen in allen Gebäuden für einen Vergleich der Messergebnisse standardisiert sind und gemäß Norm durchgeführt werden können, wurde der Bauleitung eine Checkliste (siehe Anhang 2) vorgegeben. Diese beinhaltet Vorgaben für klimatische Bedingungen, Lüftungsverhalten, Arbeiten in den Gebäuden sowie Angaben zum Minimieren von Einflussfaktoren für Emissionen.

Ergänzend dazu wurden über Sensoren folgende Parameter während der Raumluftmessung erfasst:

- Temperatur

- Luftfeuchtigkeit
- Feinstaub (PM1, PM2.5, PM10)
- NO₂
- CO₂
- VOC
- O₂
- CO
- Ozon
- SO₂
- Lärm
- Taupunkt
- Luftdruck

In einem Gebäude wurden exemplarisch eine Luftundichtigkeitsmessung sowie eine Behaglichkeitsmessung durchgeführt.

Die beteiligten Hausbauunternehmen waren nur für den Rohbau beauftragt. Der Innenausbau wurde durch die Bauleitung über unterschiedliche Handwerksbetriebe organisiert. Bis auf Haus K wurden alle Häuser in Holzbauweise ausgeführt. Haus K wurde in Mauerwerksbauweise errichtet.

2.3.2 Auswertung und Interpretation der Innenraumlufmessungen

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Ergebnisse der Emissionsparameter **TVOC**, **Formaldehyd** und **C1-C8 Carbonsäuren**.

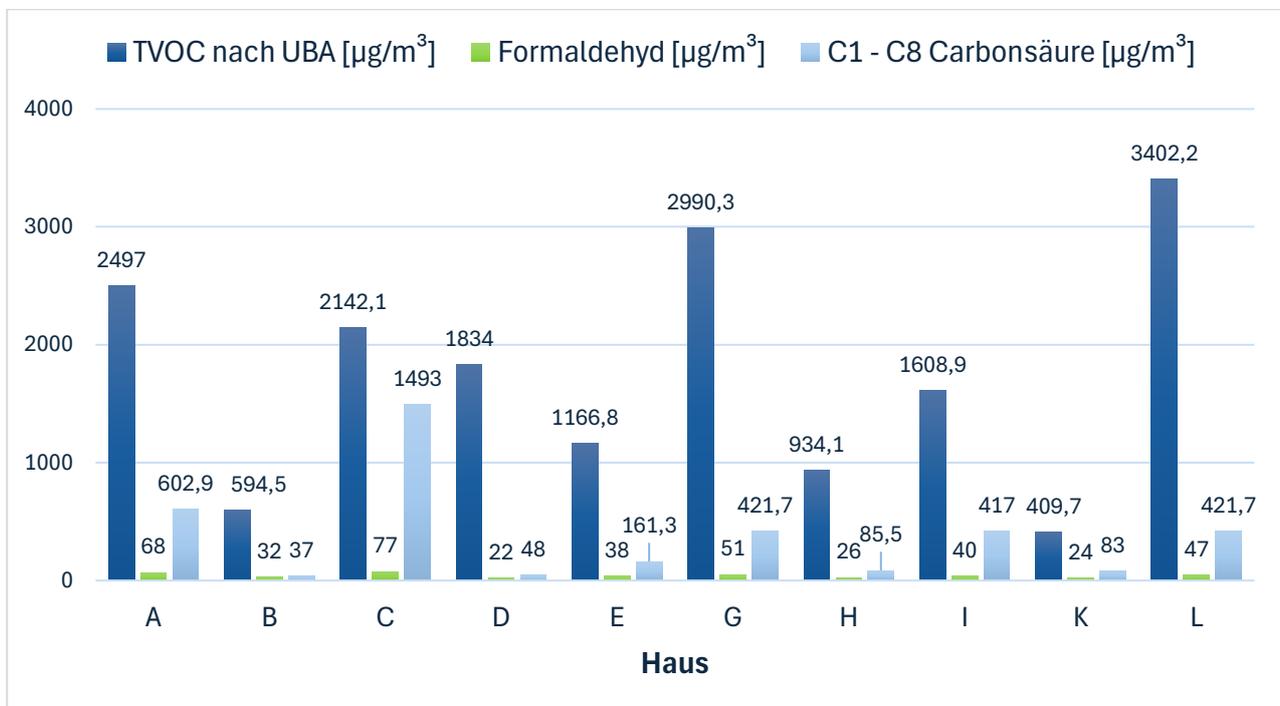


Abbildung 2-16: Übersicht der Emissionen TVOC, Formaldehyd, C1-C8-Carbonsäuren pro Haus

Beim Haus B, H, I und K war die Heizung zum Messtermin nicht in Betrieb beziehungsweise nicht eingestellt (Temperatur zwischen 14-17°C). Dadurch sind die Messergebnisse niedriger ausgefallen als sie zwischen 19 – 24 °C (Vorgabe) wären.

Bei Haus L wurde neben der Messung nach 8 Stunden noch eine Nutzungssimulation mit einer Messung nach 1,5 Stunden nach zehnmütiger Stoßlüftung durchgeführt. Hier lag der TVOC-Wert dann bei 1956,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Der Formaldehyd-Wert reduzierte sich auf 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und die Carbonsäuren auf 312 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Zu beachten bei Haus L ist, dass trotz vorheriger Vorgabe via Checkliste (siehe. Anhang 2), am Tag vor der Messung der Fliesenleg-, der Sanitärfachbetrieb und eine Schreinerei mit letzten Arbeiten beschäftigt waren. Die regelmäßige Lüftung in den Tagen vor der Messung wurde nicht umgesetzt. Die Beheizung des Messraumes wurde erst ca. einen Tag vor der Messung durch einen Baulüfter in Betrieb genommen.

Positiv hervorzuheben ist, dass alle VOC-Einzelergebnisse in allen Gebäuden kleiner dem Richtwert II des Umweltbundesamtes lagen. (Umweltbundesamt 2007)

In der nachfolgenden Abbildung ist die Summe der **Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK)** gegenübergestellt.

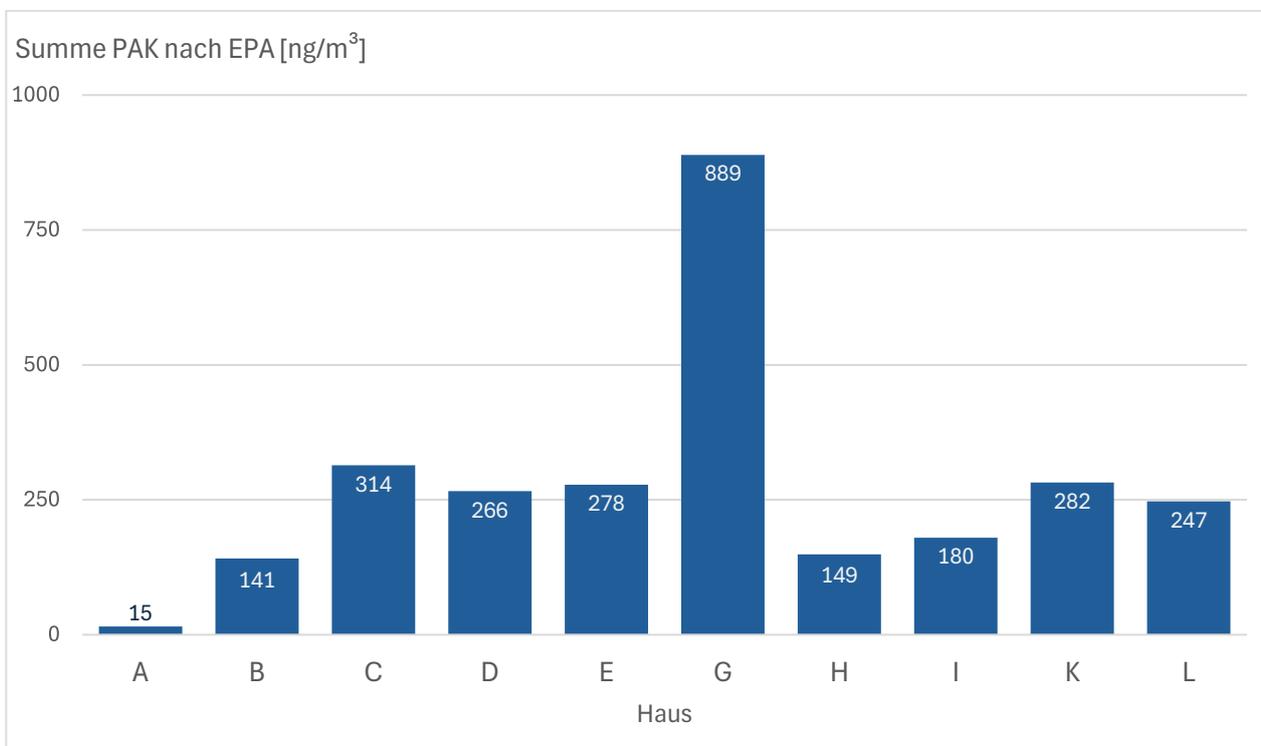


Abbildung 3: Übersicht der PAK (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) pro Haus

Bei allen Häusern wurden immer wieder ähnliche **Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)** im geringen Umfang gefunden. Quellen der PAK sind üblicherweise teerbasierte Produkte wie Abdichtungen, aber auch Abgase oder Raucher:innen könnten eine Ursache sein. Rechtlich relevante Richt- oder Grenzwerte wurden nicht überschritten.

Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Biozide lagen in allen Gebäuden unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Weichmacher und Flammschutzmittel sind ebenso in geringen Mengen gemessen worden. Dies wiederholte sich in den Häusern. Quellen sind erfahrungsgemäß Kunststoffe oder kunststoffhaltige Bauprodukte.

Parallel zu den Raumluftmessungen wurde jeweils eine **Sensormessung** mit einem Innenraumluftsensor (air-Q Pro mit 14 Sensoren) durchgeführt, bei der alle 1,8 Sekunden die Parameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Feinstaub (PM1, PM2.5, PM10), NO₂, CO₂, VOC, O₂, CO, Ozon, SO₂, Lärm, Taupunkt und Luftdruck

erfasst wurden. Die **Sensormessungen** dokumentierten die Effizienz der Feinreinigung, den normgerechten Raumverschluss sowie die Raumklimaparameter und die Emissionsentwicklung. Die Emissionsentwicklung ist jedoch nur orientierend – nicht absolut -zu bewerten, da einige Sensoren (wie VOC, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid) von Querempfindlichkeiten beeinflusst werden können, d. h. die Werte müssen immer auf Plausibilität geprüft und sollten im wissenschaftlichen Kontext nur als Indikatoren und zur Orientierung verwendet werden.

Nachfolgend Beispiele mit Erläuterungen:

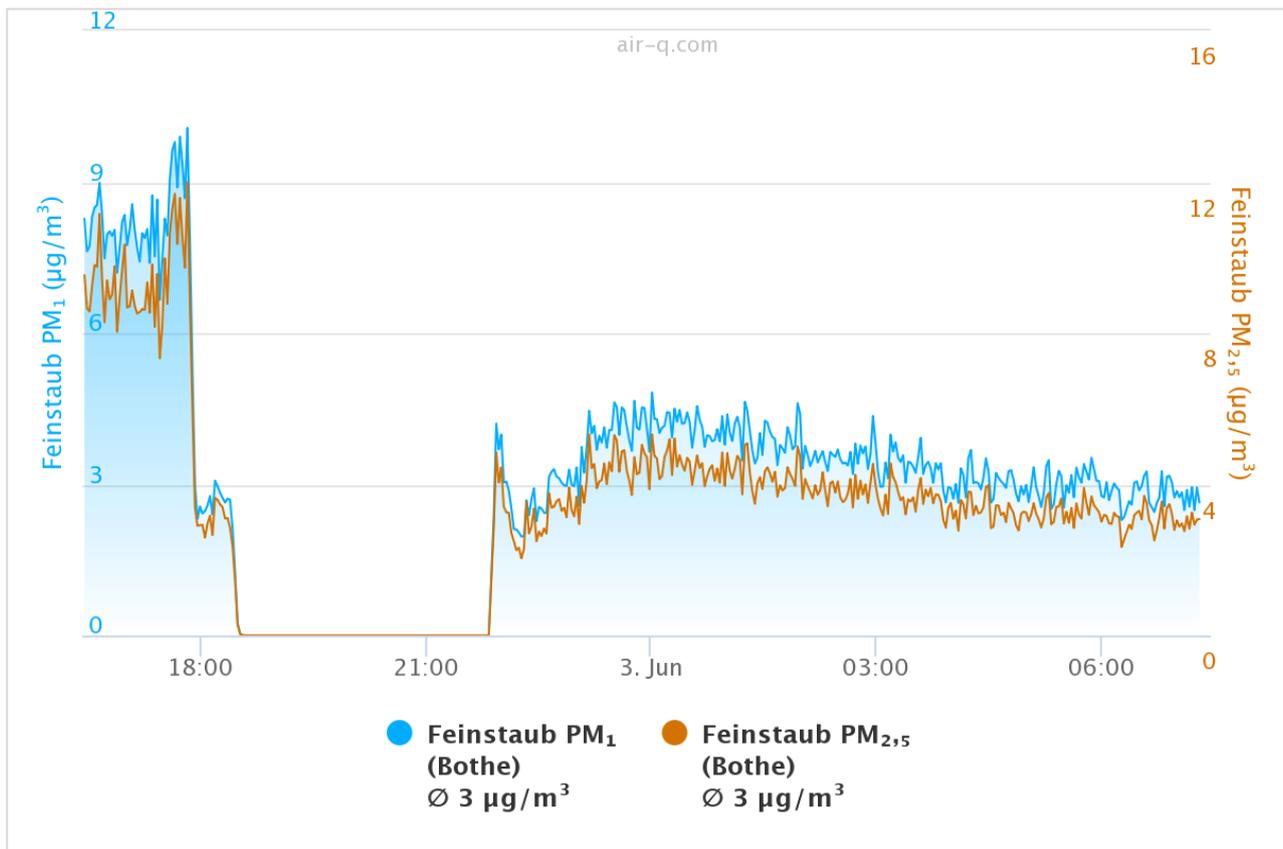


Abbildung 4: Beispielhafte Feinstaubmessung mit Sensor air-Q Pro

PM1 steht für *Particulate Matter* mit einem aerodynamischen Durchmesser von 1 Mikrometer oder weniger. PM2.5 steht für *Particulate Matter* mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 Mikrometern oder weniger. Der Leitwert (24 Stunden Mittelwert) für Feinstaub in der Innenraumluft liegt aktuell bei: 15 µg/m³ (Der 24-Stunden-Mittelwert gilt nur in reinen Wohninnenräumen in Abwesenheit innenraumspezifischer Staubquellen) (Umweltbundesamt 2008).

Deutlich zu erkennen ist die schnelle Reduzierung der Feinstaubpartikel ab ca. 18 Uhr. Um 22 Uhr wurden die Filtergeräte wieder aus dem Raum entfernt und der Raum verschlossen. Da die Vorräume / Flur häufig mehr Staub aufweisen, kann durch Öffnen der Türen wieder ein Eintrag von Stäuben möglich sein. Auch kann sich Staub aus Fugen, Ritzen etc. lösen oder durch Baustoffe frei werden. Das gesamte Feinstaubniveau hat sich jedenfalls signifikant verringert. Ziel des Einsatzes von Filtergeräten ist es, die Baustäube der Bauzeit zu entfernen. Da VOC-Emissionen auch an Feinstäuben anhaften, bewirkt die Feinstaubreinigung eine Verbesserung der Genauigkeit und Neutralität der Messung, um nur den Zielraum zu untersuchen.

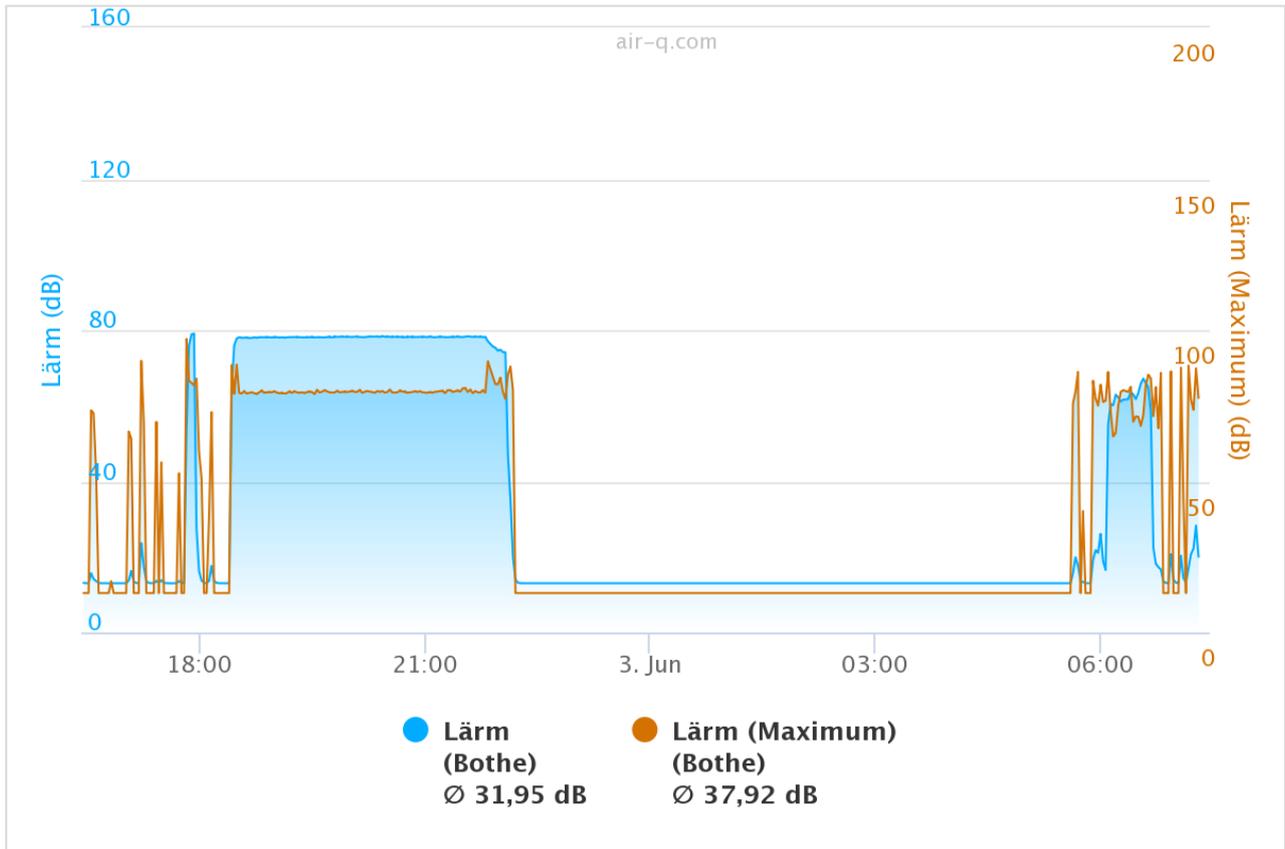


Abbildung 5: Beispielhafte Lärmmessung während der Raumlufthmessung mit Sensor air-Q Pro in [dB]

Der Lärm ist ein Indikator dafür, ob während der Verschlusszeit gemäß Norm und Abwesenheit des Mess-technikers Dritte den Raum betreten und so die Messung gegebenenfalls nach oben oder unten verfälscht haben. (Bei Messungen über Nacht ist das selten, tagsüber werden häufig Schilder übersehen und die Räume betreten).

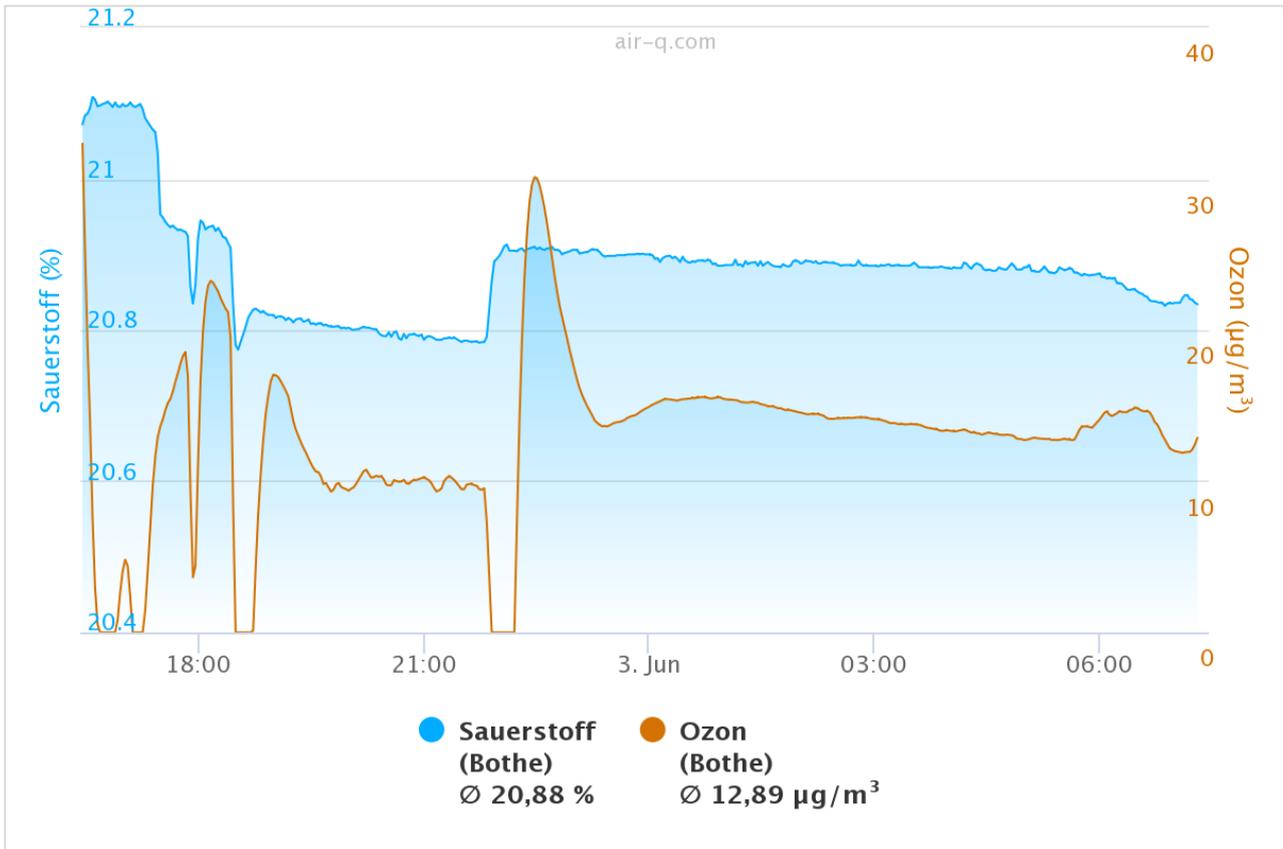


Abbildung 6: Beispielhafte Ozonmessung während der Raumluftrmessung mit Sensor air-Q Pro

Ozon ist bekannt für dessen Reaktionsfreudigkeit und für den Einsatz zur Geruchsreduzierung. Allerdings gibt es dabei Nebeneffekte, die zu einer Erhöhung von Emissionen führen können (Weschler 2000). Daher kann das Erfassen ein wichtiges Indiz im Falle von erhöhten Messwerten sein.

Der Sauerstoffgehalt ist in der Regel irrelevant für die Raumluftrmessungen, wird aber vom Sensor standardisiert miterfasst.

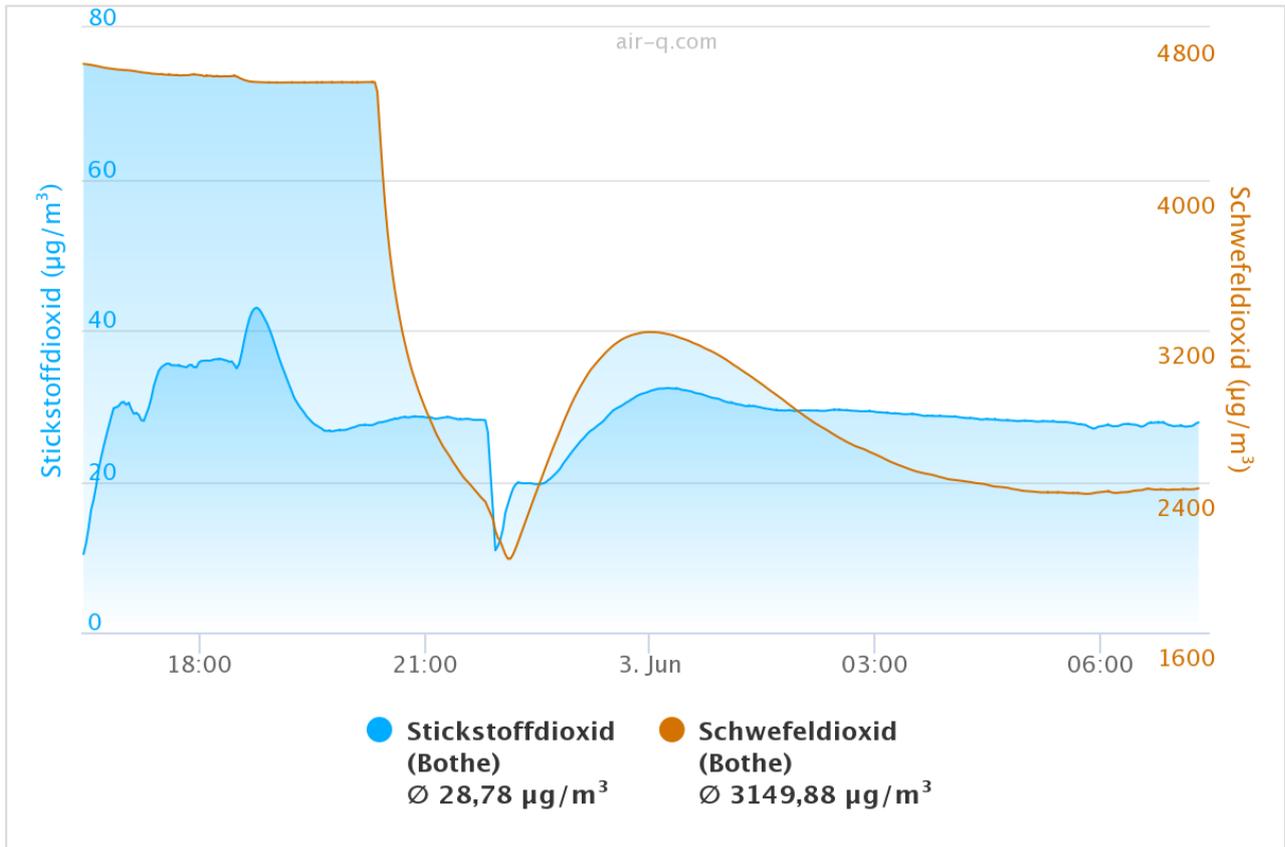


Abbildung 7: Beispielhafte Stickstoffdioxid- und Schwefeldioxidbestimmung während der Raumluftmessung mit Sensor air-Q

Stickstoffdioxid (NO_2) kann insbesondere in Gegenwart mit Sonnenlicht mit VOCs reagieren und Ozon bilden. Diese photochemische Reaktion ist ein Hauptbestandteil der Smogbildung und kann auch in Innenräumen auftreten, besonders in sonnenreichen Räumen oder solchen mit starker Beleuchtung. Auch die Bildung von sekundären organischen Aerosolen (SOA) ist möglich (Weschler 2004).

Schwefeldioxid (SO_2) kann in Gegenwart von VOCs und anderen Luftschadstoffen in Sulfat-Aerosole umgewandelt werden. Diese Reaktionen werden durch oxidative Prozesse katalysiert, oft unter Einfluss von Ozon (O_3) oder Hydroxylradikalen (OH). Die entstehenden Sulfat-Aerosole sind feinpartikulär und können tief in die Atemwege eindringen, was zu gesundheitlichen Problemen führen kann (Seinfeld und Pandis 2016). VOCs können mit SO_2 und anderen oxidierenden Substanzen wie Ozon und Hydroxylradikalen reagieren und dabei SOA bilden. Diese sekundären Aerosole tragen zur Feinstaubbelastung bei und haben ähnliche gesundheitsschädliche Auswirkungen wie direkt emittierte Feinstaubpartikel. (Huang et al. 2011) Stickstoffdioxid- und Schwefeldioxid entsteht jedoch immer durch Verbrennungsvorgänge. Da zum Messzeitpunkt noch keine Verbrennungsvorgänge innerhalb der Häuser stattfanden muss die gemessene Belastung auf die Außenluft zurückzuführen sein.

Erfahrungsgemäß sind die Messwerte der elektrochemischen Sensoren von NO_2 und SO_2 insbesondere in Kurzzeitmessungen (< 12Std.) mit Vorsicht bzgl. der Interpretation zu betrachten.

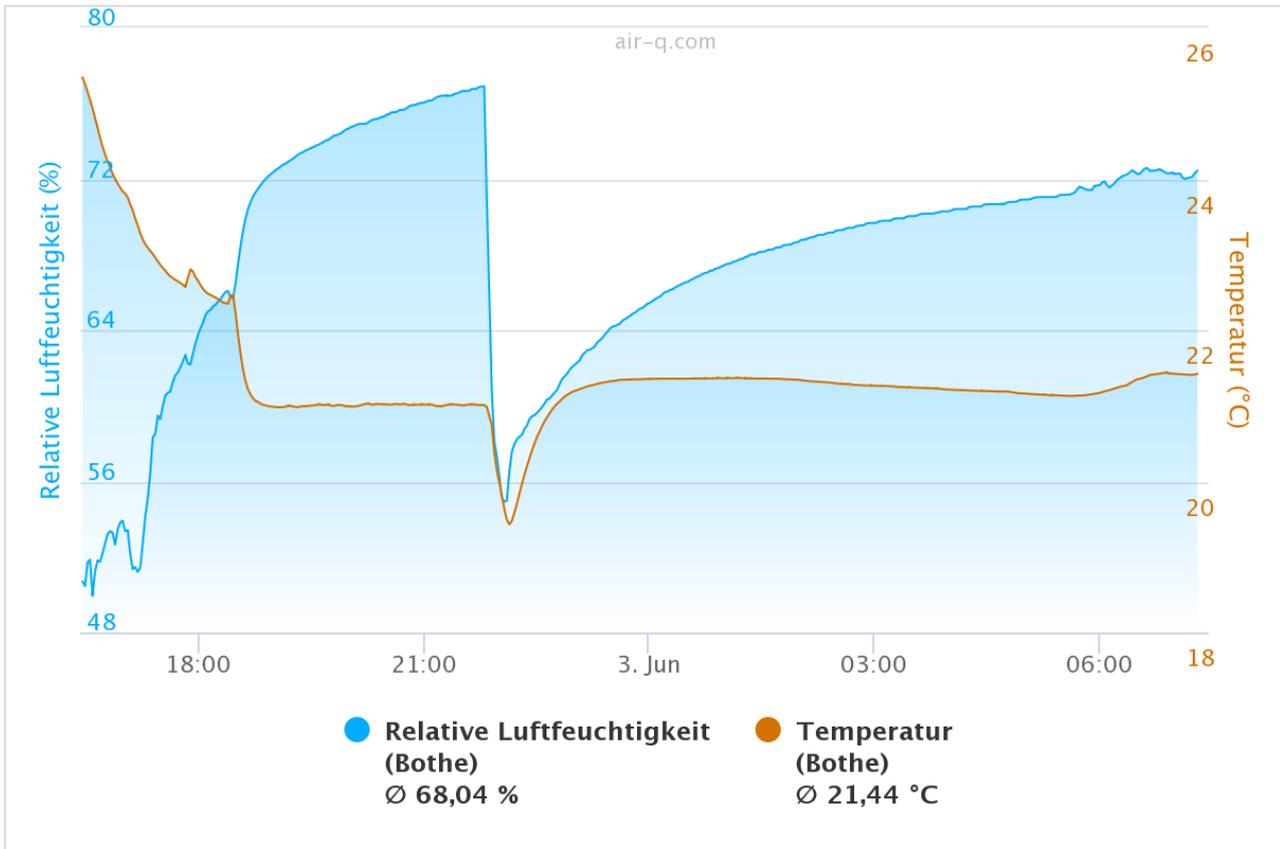


Abbildung 8: Beispielhafte Messung der relativen Luftfeuchtigkeit und der Raumlufttemperatur während der Raumluft-messung mit Sensor air-Q

Die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur sind essenziell für eine normgerechte Messung. Diese Parameter beeinflussen auch die Emissionen stark. Tendenziell steigen die Emissionen mit steigender Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

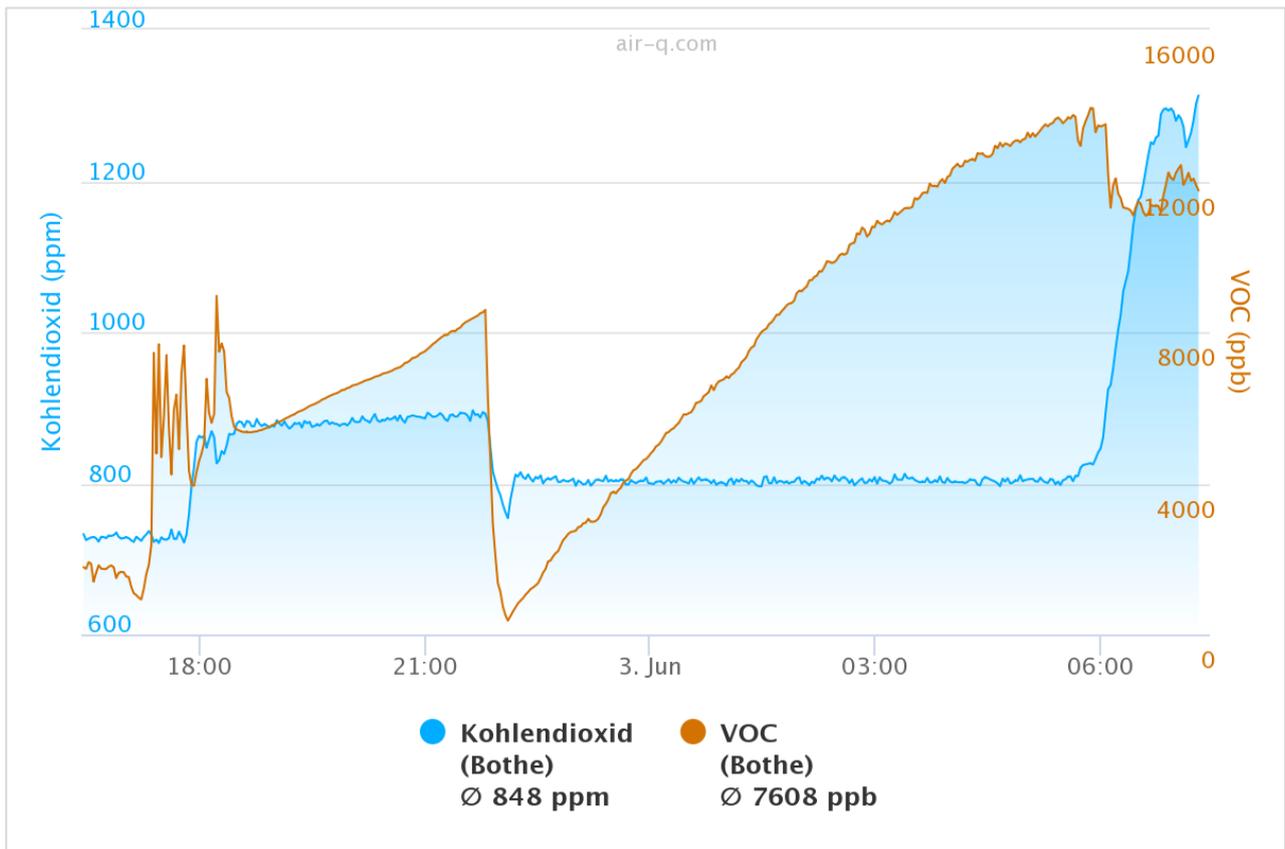


Abbildung 9: Beispielhafte Messung von Kohlendioxid und VOC-Messung

Die Grafik zeigt sehr deutlich, dass die Sensormesswerte vom Labormesswert abweichen kann. Der VOC-Wert wird hier in [ppb] angegeben. Gemäß Herstellerbeschreibung würde der Wert von 12.000ppb (ungefährer Wert während der Raumluftmessung) in [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] bei ca. 30.000 liegen. Der gemessene Laborwert beträgt $2.497 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nicht bei allen Ergebnissen ist diese Spreizung so groß, allerdings verdeutlicht das Beispiel, wie wichtig eine vorsichtige Interpretation bei diesem Wert ist.

Der Kohlendioxidwert ist erfahrungsgemäß deutlich genauer und wird natürlicherweise durch den Aufenthalt von Menschen oder Tieren erhöht. Nicht so bekannt ist allerdings, dass auch Baustoffe CO_2 freisetzen wie Beton, Polymere, Klimaanlage und Lüftungssysteme. Weitere Quellen können zum Beispiel Verbrennungsprozesse im Innen- und Außenbereich sein.

Die Sensormessung zeigt im Verlauf sehr gut auf wie stark die Stoßlüftung (jeweils kurz nach 21 Uhr) die Emissionen reduziert. Zusätzlich wird ersichtlich, dass sich nach 8 Std. noch keine Gleichgewichtskonzentration eingestellt hat. Das heißt der Zeitpunkt der Messung beeinflusst auch die Ergebnisse. Im Forschungsprojekt wurden alle Messungen nahe den 8 Std. durchgeführt, um möglichst vergleichbare Ergebnisse gemäß der DIN 16000 ff zu erhalten.

Bei der Luftundichtigkeitsprüfung in einem Haus wurde diese mit Unterdruck geprüft. Die Ergebnisse waren unauffällig und sind nur als Stichprobe anzusehen.



Abbildung 10: Luftundichtigkeitsprüfung an Bauteilen

Eine Behaglichkeitsmessung wurde ebenso als Stichprobe durchgeführt.

PMV	0,6			
PPD	12,5 %			
Datum/Uhrzeit	PMV	PPD [%]	290 [m/s]	676 TE2 [°C]
Durchschnitt gesamt	0,6	12,5	0,01	24,4
Datum/Uhrzeit	983 [°C]	983 [%rF]	290 [°C]	676 [bar]
Durchschnitt gesamt	24,2	41,8	24,9	0,9558
Datum/Uhrzeit	676 [hPa]	983 [bar]	983 [ppm]	983 Taupunkt- Temperatur [°C]
Durchschnitt gesamt	-0,004	0,9549	448	10,4
Datum/Uhrzeit	983 Feuchtkugeltempe- ratur [°C]	983 [g/m³]		
Durchschnitt gesamt	15,8	9,21		

Abbildung 2-17 Beispielhafte Behaglichkeitsmessung

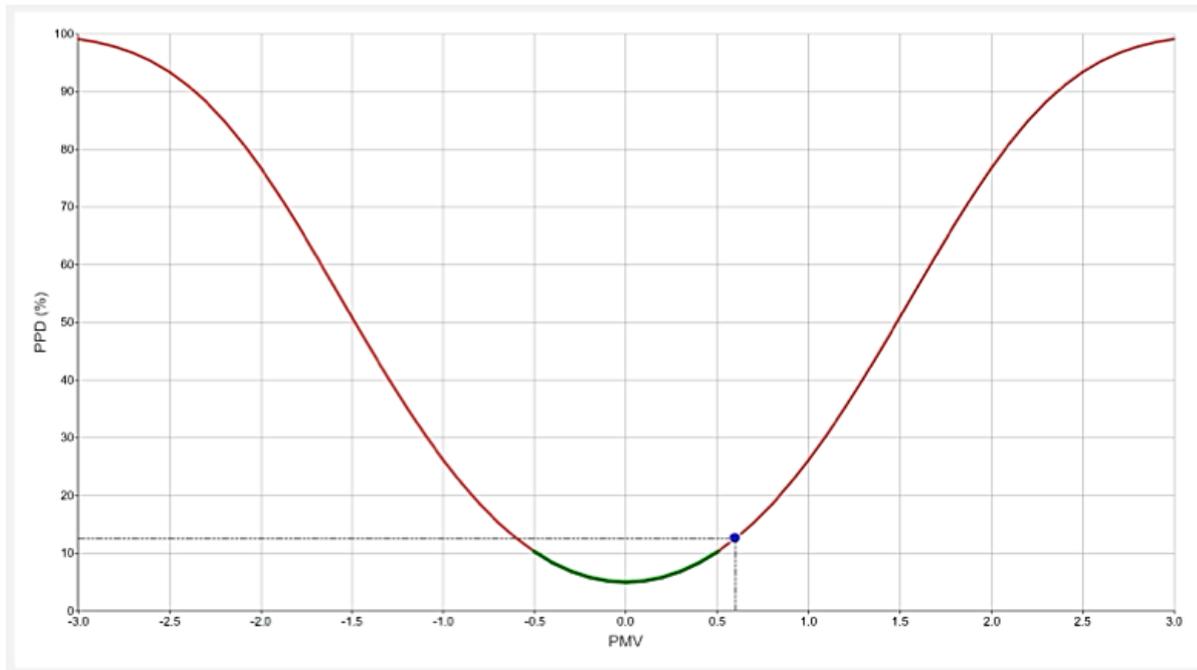


Abbildung 2-18 PMV-PPD Graphik - beispielhafte Behaglichkeitsmessung

Die Behaglichkeitsmessungen in Anlehnung an DIN EN ISO 7730:2023-04 dienen der normativen Beurteilung von Arbeitsplätzen und die Messwerte lagen nahe dem optimalen grün markierten Bereich (PMV, PPD). Die Temperatur war mit rund 24,2 °C etwas erhöht.

2.3.3 Diskussion und kritische Reflektion der Ergebnisse

Die größte Herausforderung lag in der Einhaltung der Vorgaben der Checkliste (siehe Anhang 2) durch die Bauleitung. Trotz mehrfacher Aufforderung wurde diese bei keinem Haus vollständig eingehalten. Zu nennen sind hierbei folgende Einflussparameter, die besonders häufig nicht ausreichend beachtet wurden:

- Die regelmäßige Lüftung in den Tagen vor der Messung wurde nicht umgesetzt oder konnte nicht durch die Bauleitung bestätigt werden.
- Unzureichende Klärung, welche Arbeiten an den Tagen vor der Messung durchgeführt wurden. Teilweise arbeiteten noch Handwerker am jeweiligen Haus beim Eintreffen des Messtechnikunternehmens.
- Das Vermeiden von emissionsintensiven Tätigkeiten (z. B. Beschichtungen, Abdichtungen) wenige Tage vor der Messung.
- Das Beschatten des Messraumes in den Tagen vor der Messung.
- Unzureichende Temperierung oder erst kurz vor der Messung.

Die aufgeführten Punkte haben einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Messergebnisse nur eingeschränkt möglich.

2.3.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die hygienischen TVOC-Raumluftwerte ohne raumluftechnische Anlagen in sieben der zehn geprüften Häuser im Bereich zwischen 1000 µg/m³ – 3000 µg/m³ liegen. Bei vielen Werkver-

trägen und Nachhaltigkeitszertifizierungen (DGNB, BNB) werden in der Regel Werte unter $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ teilweise $> 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gefordert. Daher ist es wichtig, das Lüftungskonzept entsprechend anzupassen. Ebenso zeigen die Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt, dass der Raumluftmessung eine entsprechende Relevanz beigemessen werden muss, d. h. durch die Bauleitung die Einhaltung der Checklisten zur Messraumvorbereitung priorisiert werden muss, wenn die Einhaltung von Grenzwerten durch den Werkvertrag gefordert ist. Wichtig zu beachten ist, dass der TVOC-Wert aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung des in der Innenraumluft auftretenden Substanzgemisches keine konkrete toxikologische Basis hat. (Umweltbundesamt 2007)

Trotz der teilweise erhöhten **TVOC – Werte** wurden keine hygienischen Richtwerte II des Umweltbundesamtes überschritten. Lediglich bei den Richtwerten I gab es Überschreitungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der **Formaldehyd – Richtwert** des Umweltbundesamtes in allen Gebäuden signifikant unterschritten wurden. Folglich liegen die eingesetzten Baumaterialien alle in einem akzeptablen Bereich.

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) werden in der Regel in Neubauten nicht mehr gemessen und sind gerade daher interessant in diesem Forschungsprojekt. Die Ergebnisse zeigen, dass nur noch geringe Mengen gemessen werden konnten und folglich die Einsatzbeschränkungen (Europäische Kommission und Rat 2006) funktionieren beziehungsweise die beteiligten Bauunternehmen entsprechende Baumaterialien ausgewählt haben.

Bei den **Polychlorierten Biphenylen (PCB)** und **Bioziden** lagen alle Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze und zeigen, dass die Verbote und Einsatzbeschränkungen (Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 1996) funktionieren.

Weichmacher und Flammschutzmittel wurden in geringen Konzentrationen festgestellt. Hier gibt es aktuell noch keine offiziellen Richt- oder Leitwerte. Hier besteht Forschungsbedarf, um die gesundheitliche Relevanz für den Innenraum zu bewerten und hygienische Richt- oder Leitwerte festzulegen.

Final kann festgehalten werden, dass die unzureichenden Messvorbereitungen seitens der Bauleitung ein Vergleich der Messergebnisse nur bedingt ermöglichen. Sie zeigen aber auf, dass mit einer unzureichenden Messvorbereitung im Großteil der Gebäude eine Überschreitung von hygienischen Richt- und Leitwerten vorlag. Es besteht Forschungsbedarf, um die Messvorbereitung und insbesondere die Einflüsse von Beschattung, Feinreinigung (Mikroentstaubung), Verschlusszeit zu verifizieren.

Behaglichkeitsmessungen sind aktuell nur für Arbeitsplätze / Schulen normiert. Für Wohnräume und insbesondere in Bezug auf Kleinkinder, Senior:innen und Vorerkrankte besteht ebenfalls der Bedarf einer Normierung.

2.4 Vorgehen und Daten Nutzerbefragung (TUM)

2.4.1 Vorgehen und Ziel bei der Nutzerbefragung

Ziel der Nutzerbefragung war es, in einer realen Umgebung eine sensible Nutzergruppe von Seniorinnen zu untersuchen, die in Häusern leben, die in Kubatur, Geometrie und der geographischen Ausrichtung nur

geringfügig voneinander abweichen. Für den Innenausbau wurden bei allen Häusern von der Bauleitung die gleichen Unternehmen beauftragt. Der Rohbau wurde von unterschiedlichen Hausherstellern gefertigt. (Siehe beteiligte Firmen)

Gerade ältere Menschen benötigen ein Wohnumfeld, das ihre körperliche, geistige und seelische Gesundheit unterstützt, da sie als sensibler gegenüber Schadstoffkonzentrationen eingeordnet werden müssen und im Vergleich zu Schüler:innen oder sich noch im Berufsleben befindenden Personen deutlich mehr Zeit innerhalb ihrer Wohnumgebung verbringen. Die Nutzerzufriedenheit und der Nutzerkomfort sollte in den 11 Häusern von unterschiedlicher Konstruktionsweise mit Hilfe eines speziell für dieses Projekt entwickelten Fragebogens abgefragt und bewertet werden. Der Fragebogen wurde in Papierform und als online-Fragebogen zur Verfügung gestellt (siehe Anhang 5).

Die Bewohner:innen wurden gebeten die Bewertung in Zeiträumen von jeweils 14 Tagen vorzunehmen. Die Befragung erstreckte sich, nach Einzug aller Bewohner:innen über den Zeitraum vom 01. Dezember 2023 bis 31. März 2024.

Der Fragebogen beinhaltete:

- Allgemeine Fragen zur Person
- Temperaturverhältnisse
- Belüftungsmöglichkeit und Raumluftqualität
- Möblierung und Gestaltung
- Umgebungsgeräusche
- Chronische und akute gesundheitliche Beschwerden

Zusätzlich wurden die Wahrnehmung und die Auswirkungen auf das Wohlbefinden durch die Verwendung von Naturmaterialien abgefragt.

Die evaluierten Zufriedenheitsparameter sollten in Verbindung mit den Daten, die durch das ursprünglich parallel geplante Monitoring der Innenraumklimaparameter erhoben werden sollten, bewertet werden. Daraus sollten Handlungsweisen für die beteiligten Holzbauunternehmen und die Bewohner:innen abgeleitet werden. Das Monitoring konnte jedoch auf Grund von Bedenken der Bewohner:innen nicht durchgeführt werden.

An der Befragung teilgenommen haben die Bewohner:innen der Häuser B, C, E, F, G und L. (siehe Abbildung 2-19).



Abbildung 2-19 Häuser, deren Bewohner:innen an der Nutzerbefragung teilgenommen haben (orange)

2.4.2 Auswertung und Interpretation der Nutzerbefragung

Der Fragebogen ist in folgende Bereiche unterteilt:

- Temperaturverhältnisse
- Luftqualität
- Lichtverhältnisse
- Akustik /Umgebungsgeräusche
- Lage und Gestaltung des Hauses
- Gesundheitliche Beschwerden

Das Alter der Bewohner:innen lag zum Befragungszeitraum zwischen 65 und 82 Jahren. 50% der Befragten waren weiblich, 50% männlich.

Temperaturverhältnisse

Die Temperatur wurde im Durchschnitt in allen Häusern als zufriedenstellend bis mittelmäßig empfunden. Auffallend war, dass die Raumtemperaturen zu allen Tageszeiten als eher kühl bis zu kalt empfunden wurden. Dies wird auf eine zu klein dimensionierte Wandheizung, die in allen Gebäuden verwendet wird, zurückgeführt.

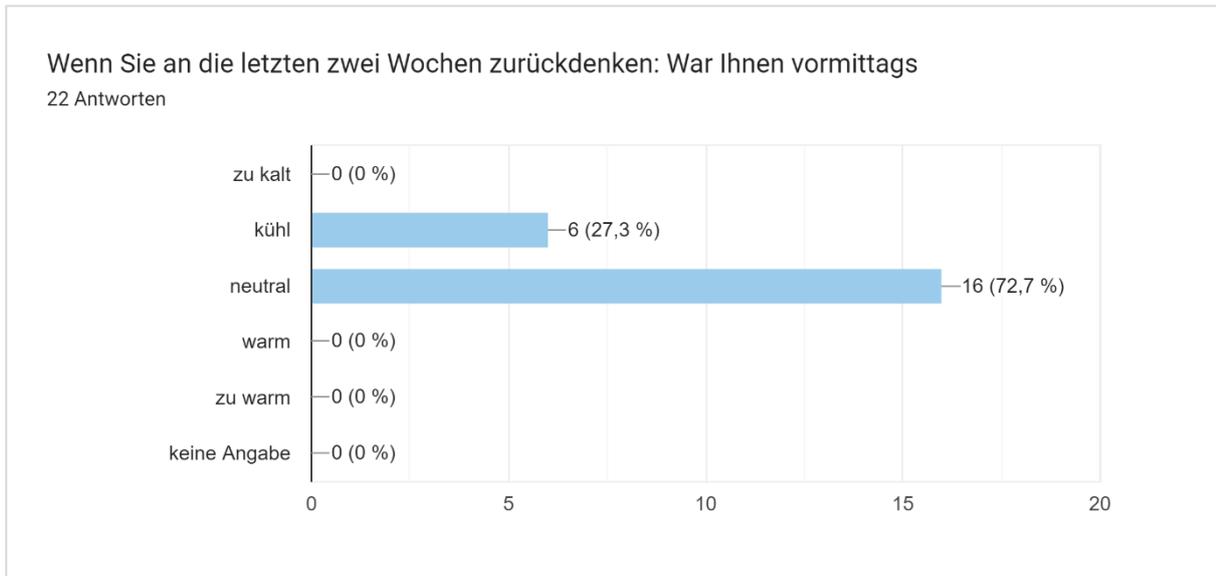


Abbildung 2-20 Fragebogenauswertung zum Temperaturempfinden vormittags

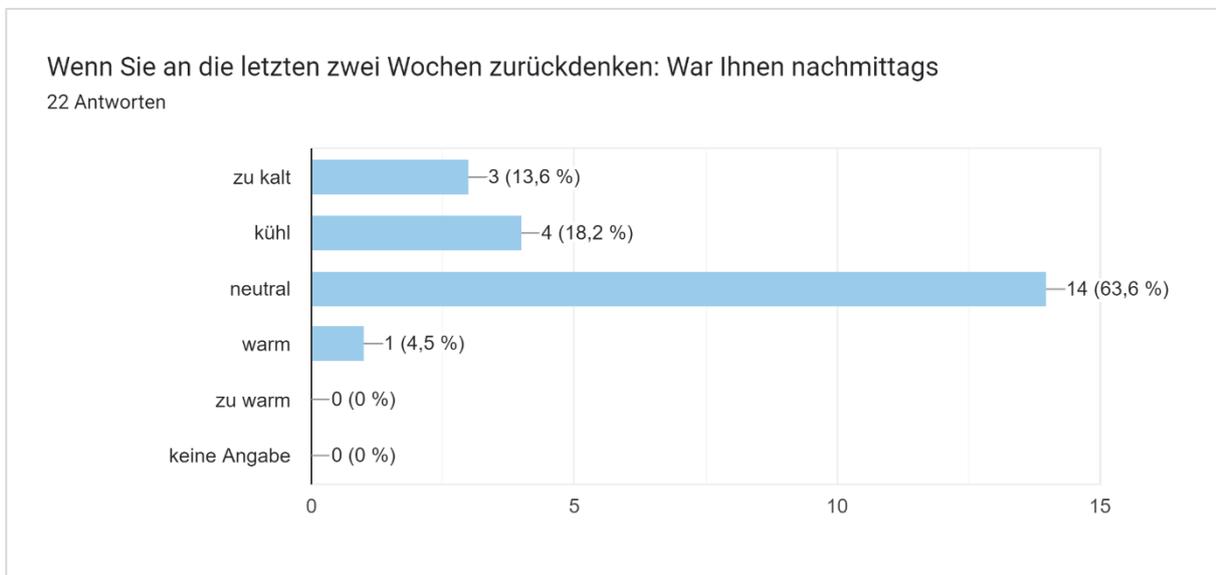


Abbildung 2-21 Fragebogenauswertung zum Temperaturempfinden nachmittags

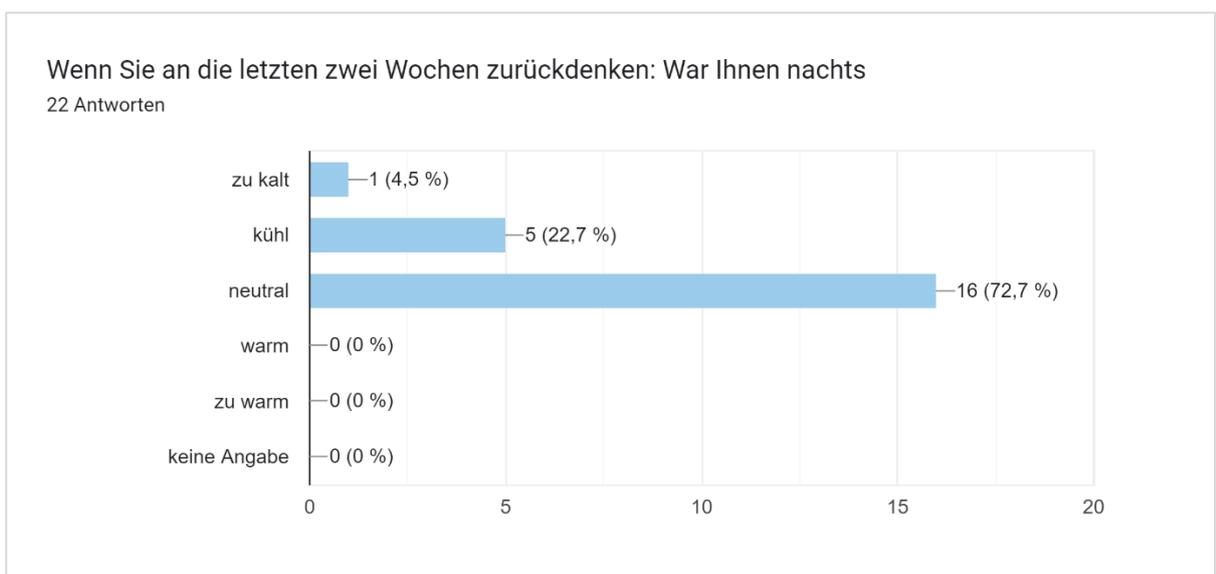


Abbildung 2-22 Fragebogenauswertung zum Temperaturempfinden nachts

Luftqualität

Die Luftqualität wurde allgemein als gut empfunden. Die Raumlufffeuchtigkeit wurde eher als trocken empfunden. Lediglich im Haus G wurde mehrfach die Raumluff als feucht beschrieben.

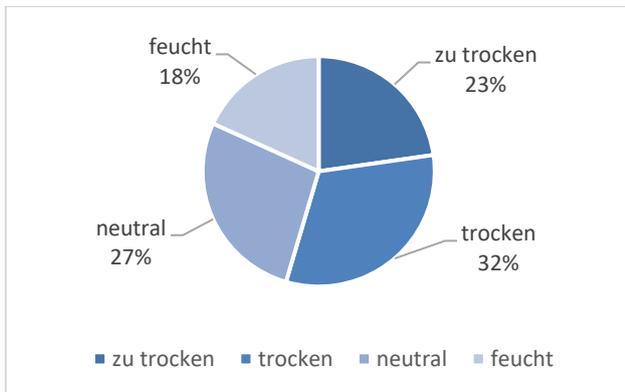


Abbildung 2-23 Fragebogenauswertung zum Raumlufffeuchte

Hinsichtlich der Geruchswahrnehmung wurden weder während noch nach dem Einzug unangenehme Gerüche wahrgenommen. Der Holzgeruch wurde als angenehm beschrieben.

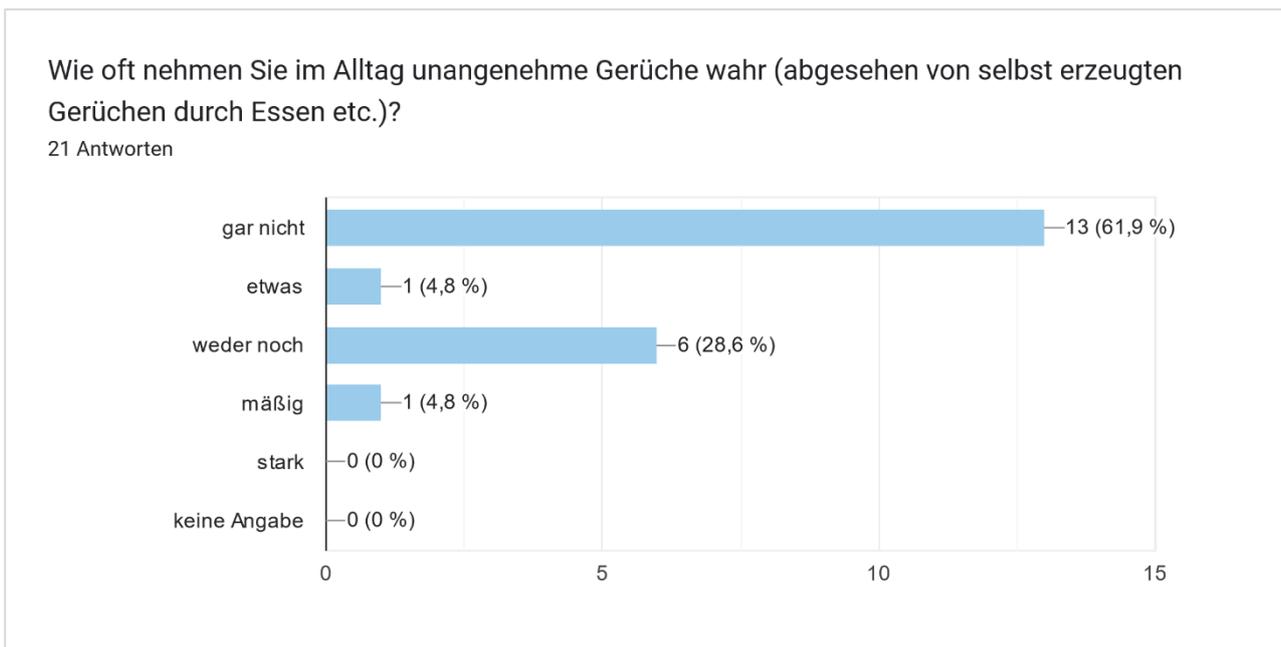


Abbildung 2-24 Fragebogenauswertung zum Geruchsempfinden

Auffallend war die hohe Fensterlüftungsintensität, trotz als eher zu kühl empfundener Innenraumtemperatur. Allerdings wurde die Lüftung sehr häufig durch die CO₂-Anzeige der Messgeräte ausgelöst.

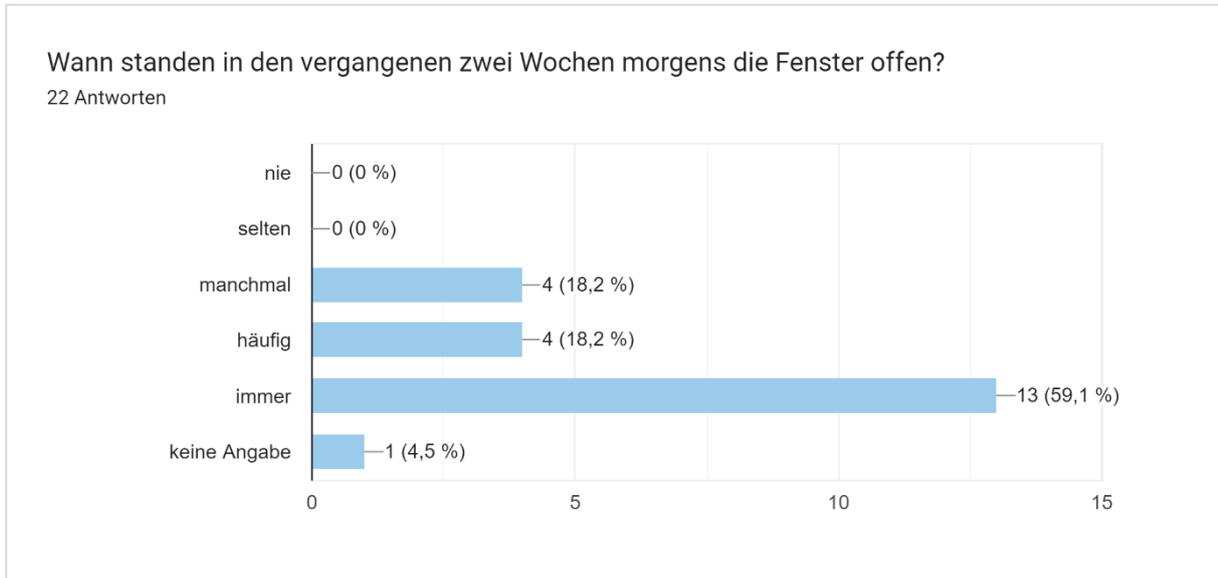


Abbildung 2-25 Fragebogenauswertung zum Lüftungsverhalten morgens

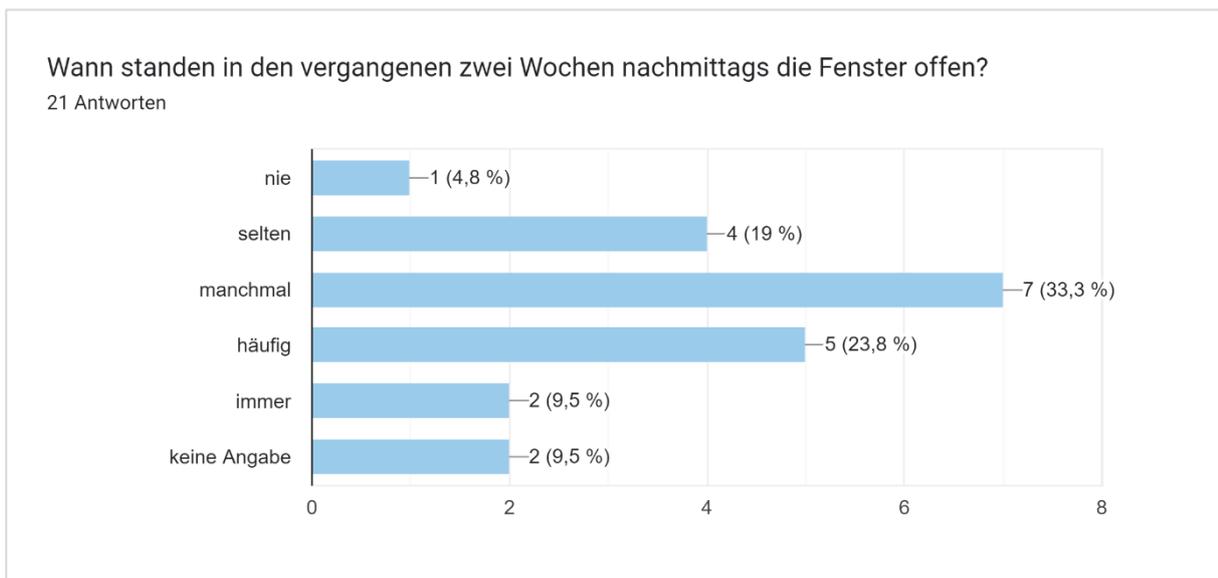


Abbildung 2-26 Fragebogenauswertung zum Lüftungsverhalten nachmittags

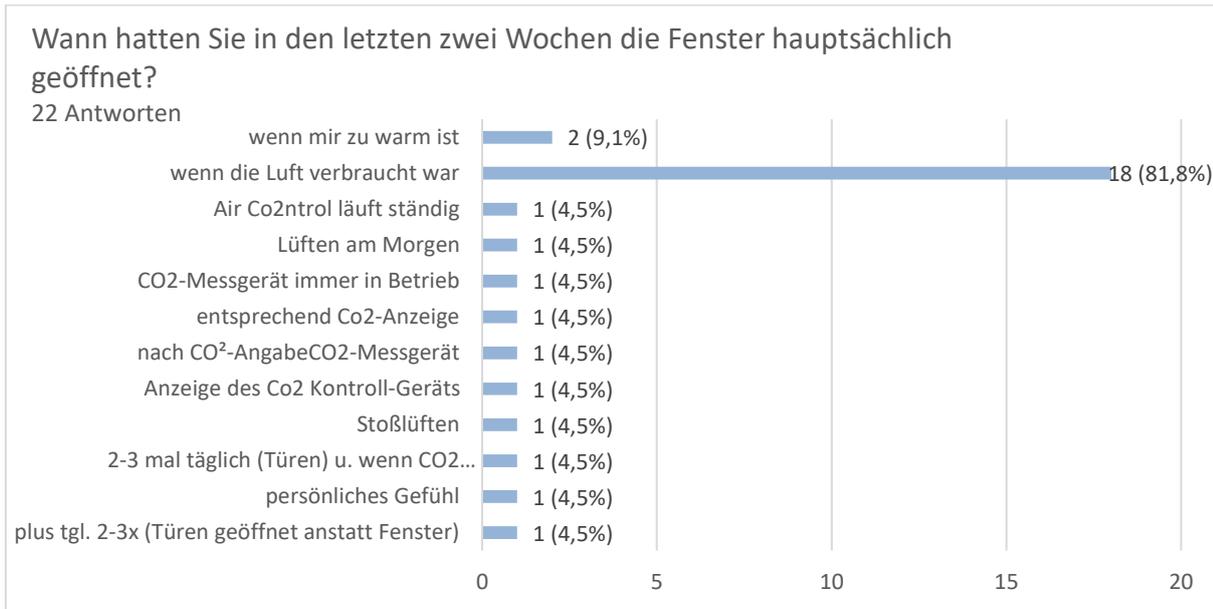


Abbildung 2-27 Fragebogenauswertung zum Lüftungsverhalten auf Grund der CO²-Geräte

Lichtverhältnisse

Alle Bewohner:innen gaben an, dass der Ausblick und die Wahrnehmung der Witterungsverhältnisse eher wichtig bis sehr wichtig ist. Aktuell wird der Ausblick unangenehm beurteilt, was auf die Verzögerungen der Außen- und Gartenanlagen zurückzuführen ist.

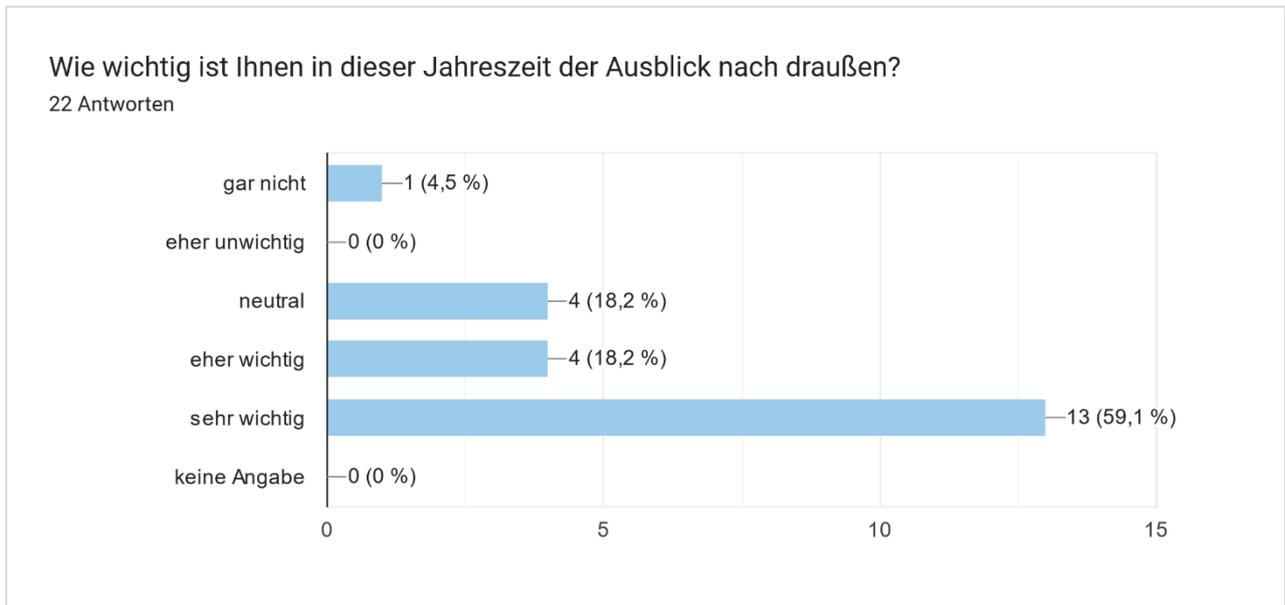


Abbildung 2-28 Fragebogenauswertung zur Umgebung

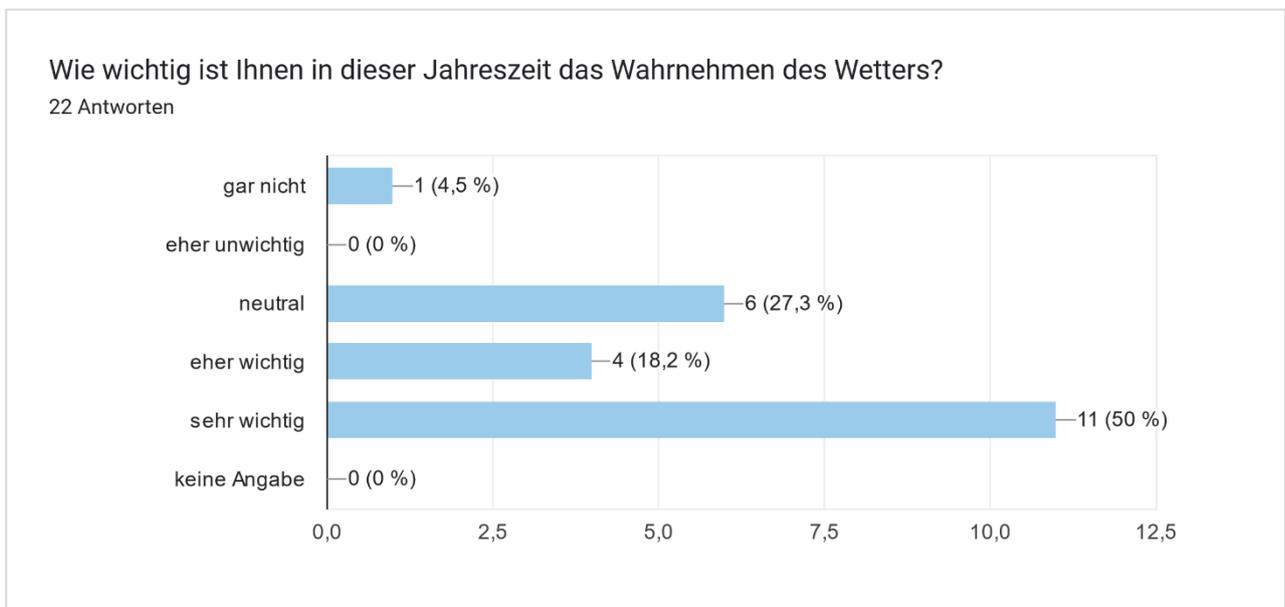


Abbildung 2-29 Fragebogenauswertung zur Tageslichtversorgung / Fensteranordnung

Die Beleuchtung durch die Tageslichtversorgung wurde in Haus E und Haus G als schlecht bis mittelmäßig beurteilt, in allen anderen Häusern wurde diese als sehr gut empfunden.

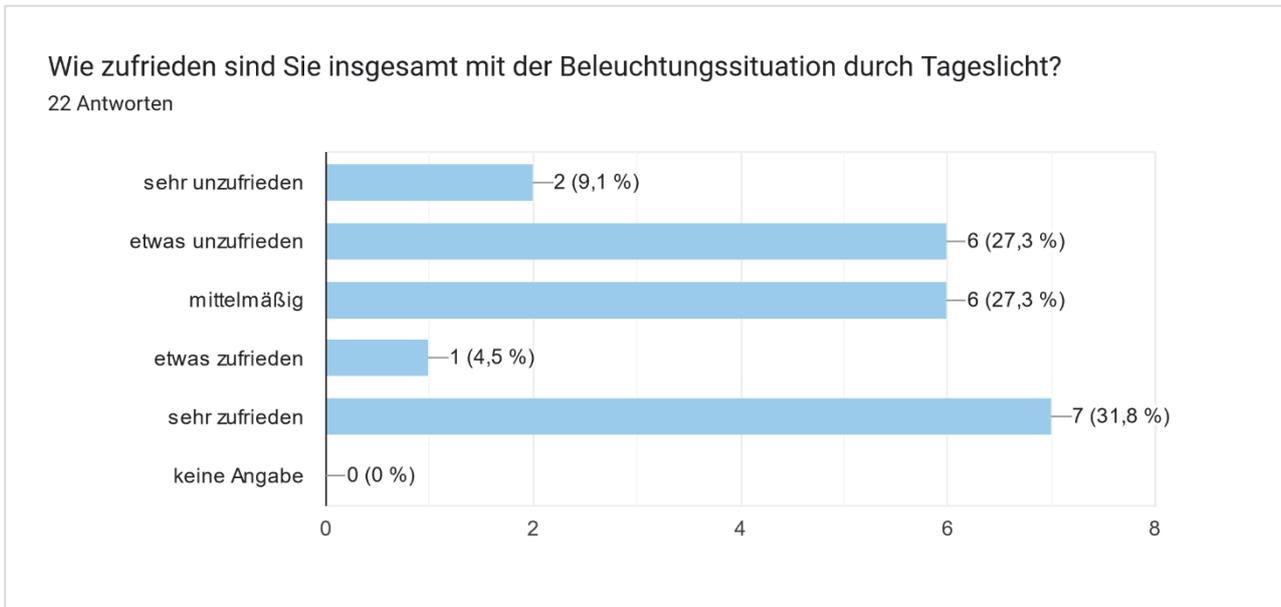


Abbildung 2-30 Fragebogenauswertung zur Tageslichtversorgung

Akustik / Umgebungsgeräusche

Die Akustik innerhalb der Häuser wurde sehr positiv bewertet. Die einzige Aussage hinsichtlich einer Beurteilung mit *mittelmäßig* wird durch das Tragen von Hörgeräten begründet.

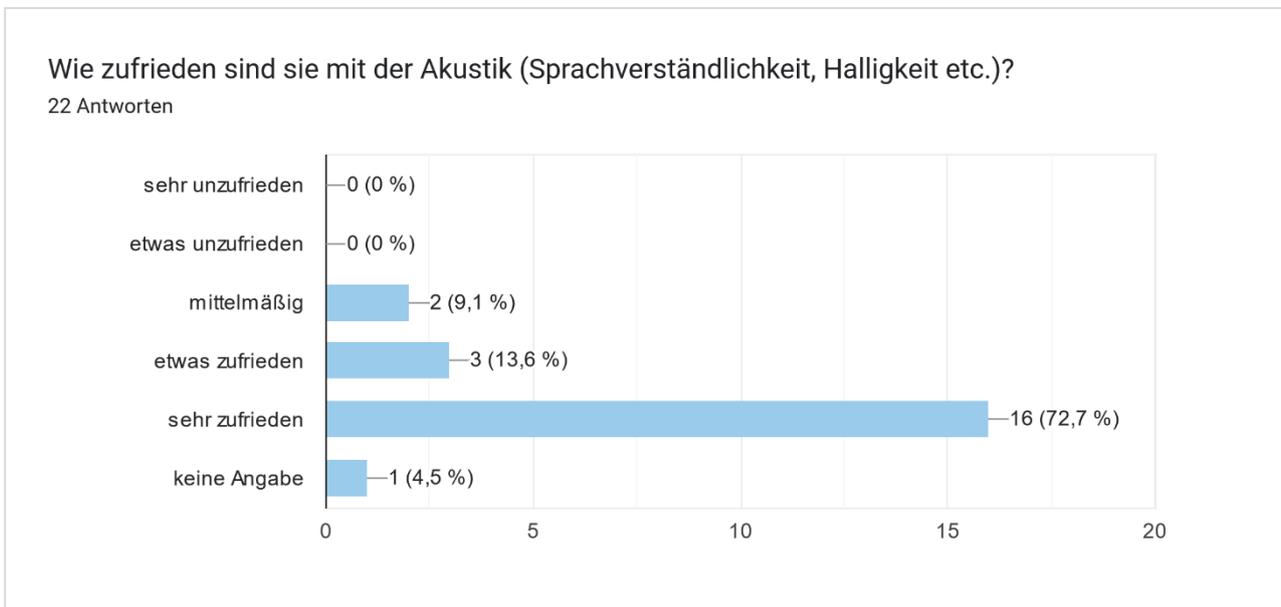


Abbildung 2-31 Fragebogenauswertung zur Akustik

Hinsichtlich störender Umgebungsgeräusche am Standort der Seniorenwohnanlage wurden weder tagsüber noch nachts kaum störende Geräusche wahrgenommen, trotz anhaltender Bautätigkeit zur Fertigstellung der Außenanlagen und der Lage innerhalb einer Flugschneise.

Gestaltung und Lage des Hauses

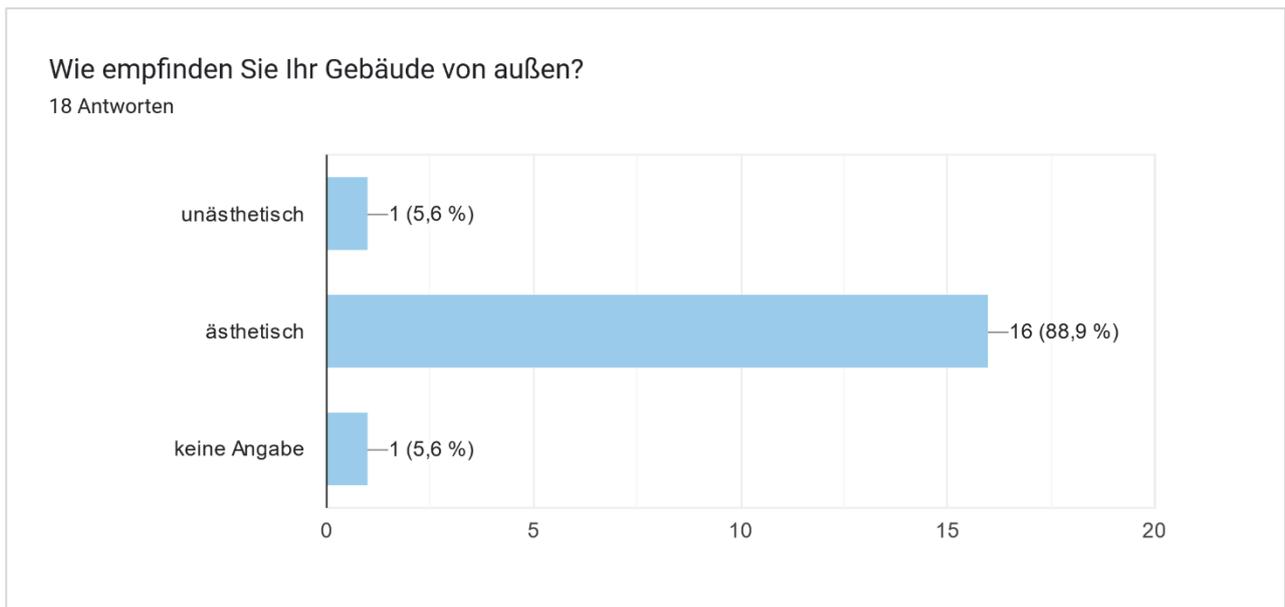


Abbildung 2-32 Fragebogenauswertung zur Ästhetik von außen

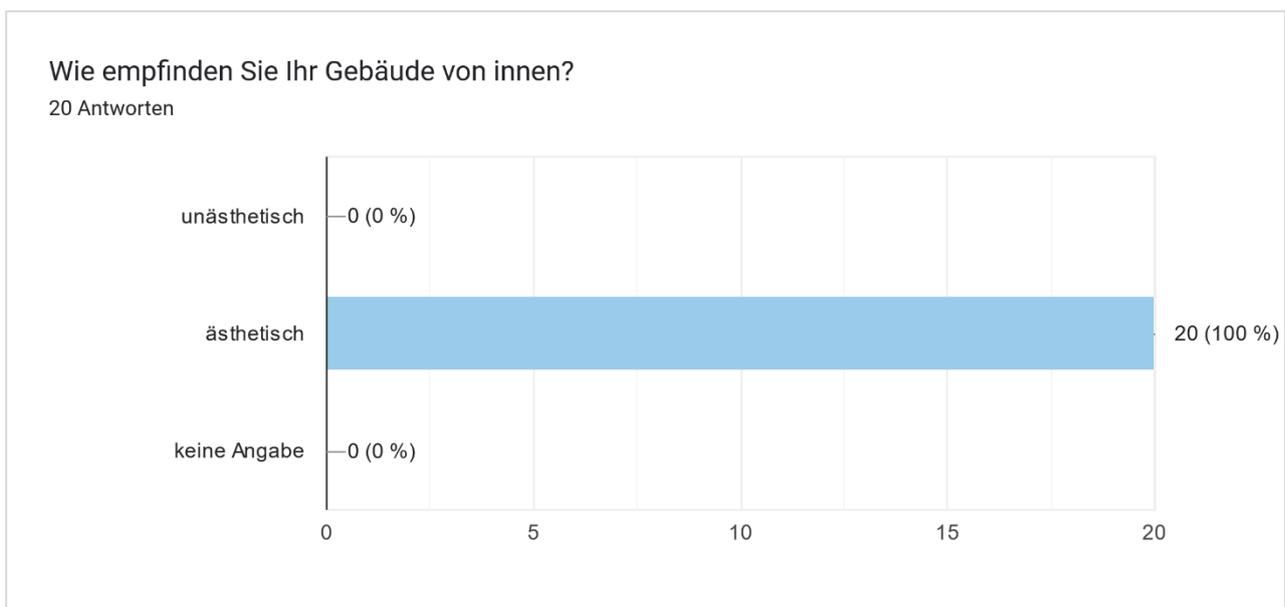


Abbildung 2-33 Fragebogenauswertung zur Ästhetik von innen

Die Häuser wurden von den Bewohner:innen sowohl von außen als auch von innen als ästhetisch und interessant (siehe Anhang 6) eingeordnet.

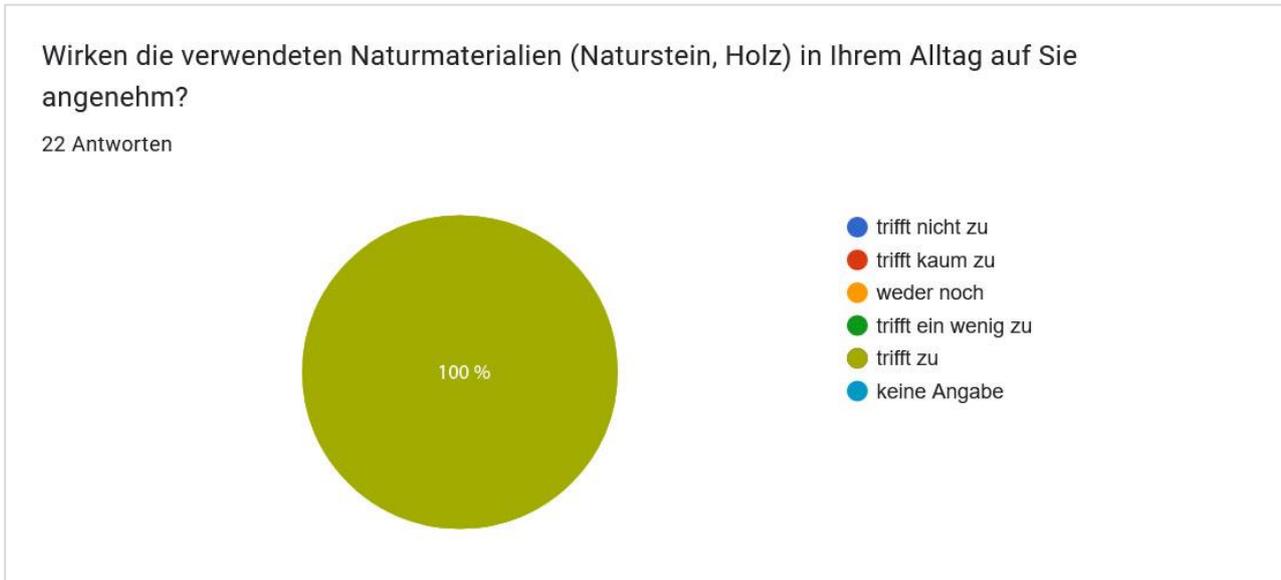


Abbildung 2-34 Fragebogenauswertung zur Verwendung von Naturmaterialien

Die Verwendung von Naturmaterialien wie Holz und Naturstein wurden von allen Bewohner:innen als angenehm und fast allen als beruhigend und gesund (siehe Anhang 6) bewertet.

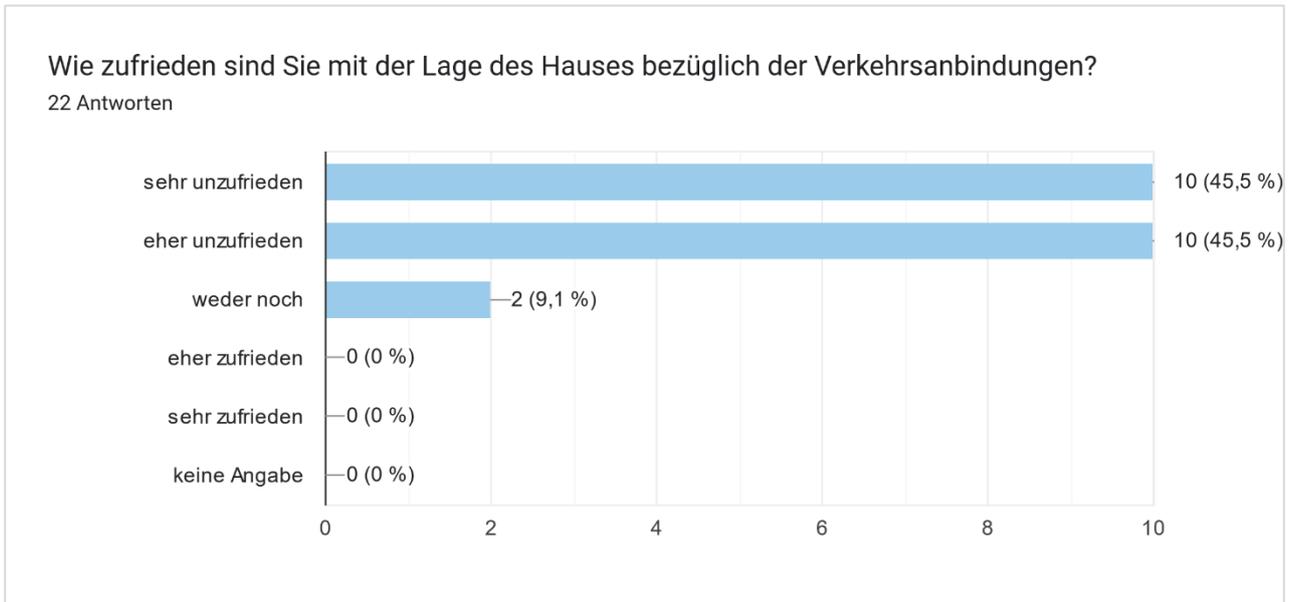


Abbildung 2-35 Fragebogenauswertung zur Verkehrsanbindung der Häuser in Waldmünchen

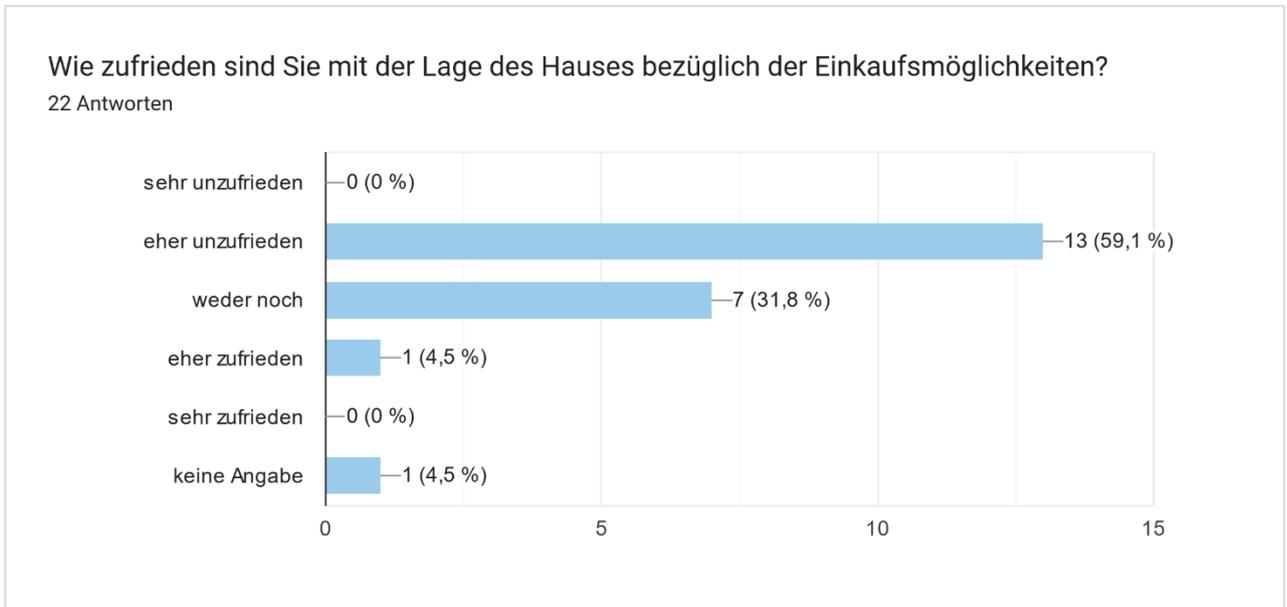


Abbildung 2-36 Fragebogenauswertung zu den Einkaufsmöglichkeiten der Häuser in Waldmünchen

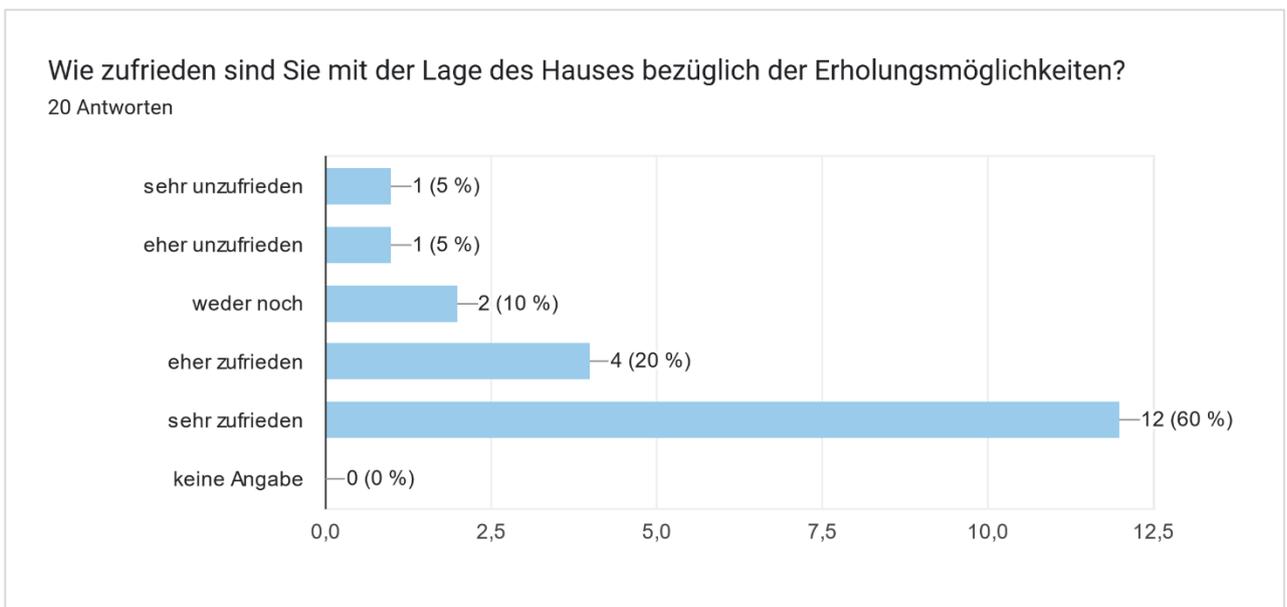


Abbildung 2-37 Fragebogenauswertung zu den Erholungsmöglichkeiten in Waldmünchen

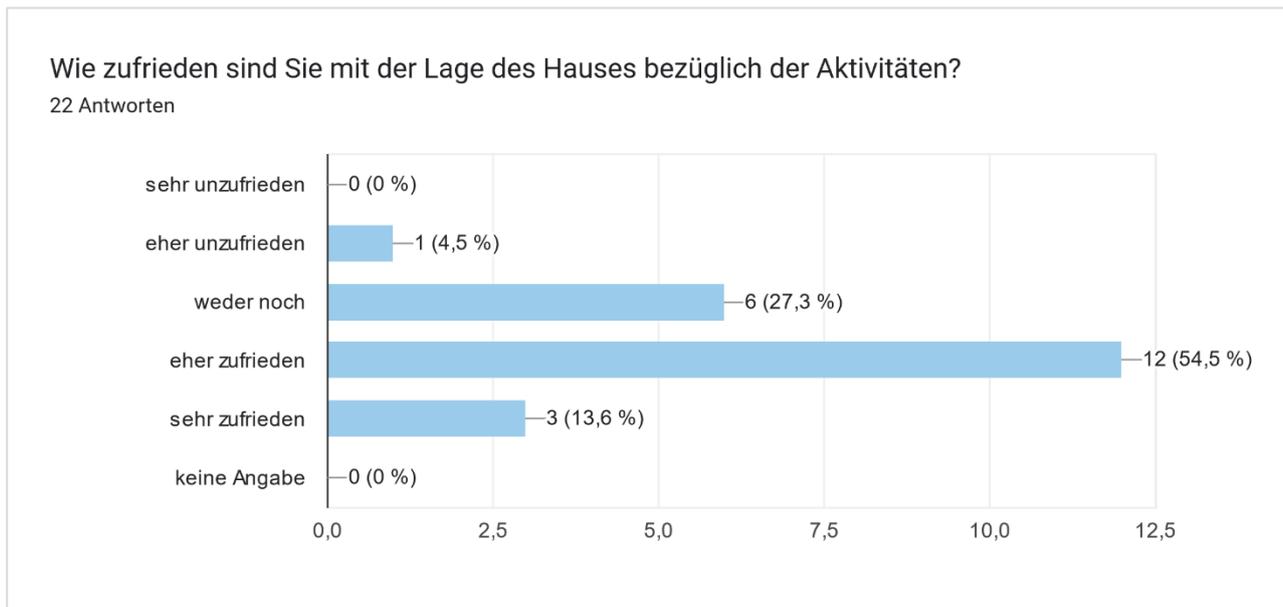


Abbildung 2-38 Fragebogenauswertung zu den Aktivitätsmöglichkeiten in Waldmünchen

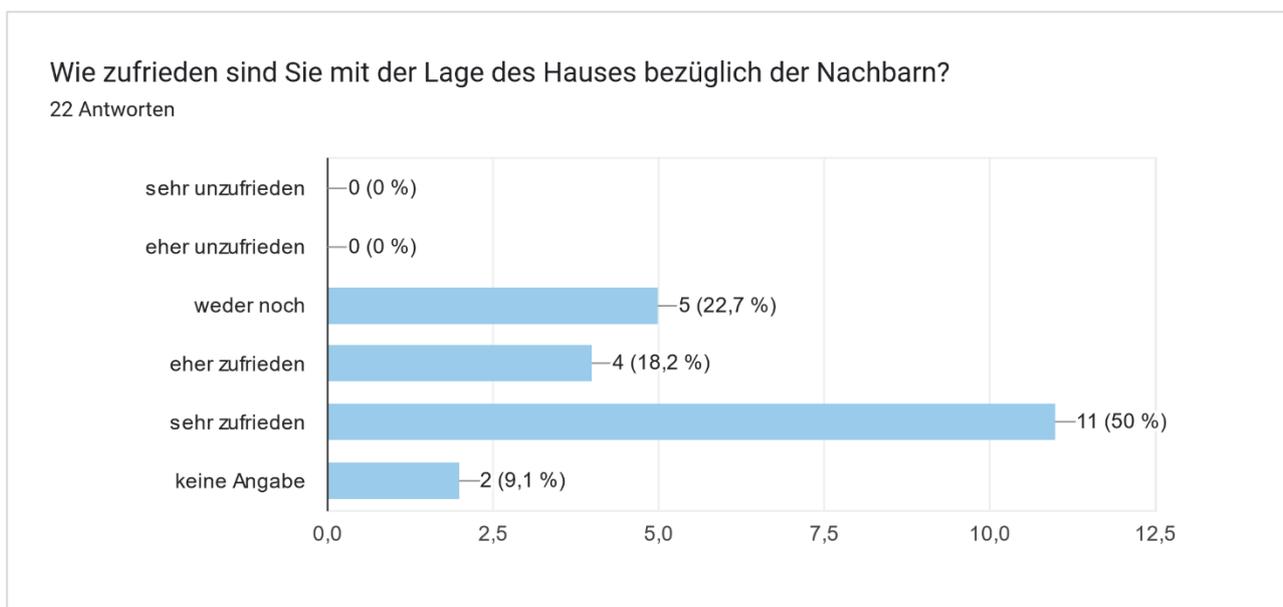


Abbildung 2-39 Fragebogenauswertung zu Nachbarn innerhalb der Seniorenwohnanlage

Die Lage der Seniorenwohnanlage wurde hinsichtlich der Verkehrsanbindung und Einkaufsmöglichkeiten negativ beurteilt. Grund hierfür ist die Ortsrandlage des Grundstückes und schlechte öffentliche Anbindung an die Einkaufsmöglichkeiten in Waldmünchen. Zusätzlich wurde die Hanglage als für Senior:innen erschwerlich beurteilt. Hinsichtlich der Erholungsmöglichkeiten und Aktivitätsmöglichkeiten, sowie die Nachbarschaft wurde die Seniorenwohnanlage positiv bewertet.

2.4.3 Diskussion und kritische Reflektion der Nutzerbefragung

Durch die pandemiebedingte enorme Verzögerung der Bauzeiten war es nicht möglich, dass die Bewohner:innen innerhalb einer kürzeren Zeitspanne die Häuser bezogen. Daher verengte sich das Zeitfenster einer parallelen Nutzerbefragung auf einen Zeitraum von 1. Dezember 2023 bis 31. März 2024. Das hatte

zur Folge, dass die Ergebnisse hinsichtlich eines Vergleiches der möglichen Auswirkungen von VOCs und Geruchsentwicklung, kaum möglich sind, da die Abklingkurven der VOCs zu unterschiedlichen Zeitpunkten einsetzen. Zusätzlich wurde von der Bauleitung nicht wie vereinbart mit allen Bewohner:innen vor eines Vertragsabschlusses bezüglich der Häuser besprochen, dass ein Raumluft-Monitoring und eine parallele Nutzerbefragung aller Häuser über einen Zeitraum von einem Jahr vorgesehen war. Nach Einbau der Monitoringsensoren gab es größte Bedenken der Bewohner:innen hinsichtlich der elektromagnetischen Strahlung des Monitorings. Diese konnten auch durch ein Hinzuziehen eines Experten hinsichtlich der elektromagnetischen Strahlungsbelastung nicht ausgeräumt werden und so kam ein permanentes Raumluftmonitoring nicht zu Stande und nur die Bewohner:innen in 6 von 11 Häusern beteiligten sich an der Nutzerbefragung. Dennoch können klare Tendenzen in den Beurteilungen aller Häuser hinsichtlich Temperatur, Geruch, Raumluftqualität, Gestaltung und Lage festgestellt werden. Hinsichtlich der gesundheitlichen Beschwerden lässt sich keine der getroffenen Aussagen klar mit den Häusern oder den gebauten Konstruktionen in Verbindung bringen. Dafür ist die Probandengruppe zu klein, die Beschwerden zu spezifisch und in direkten Gesprächen eher auf die finanzielle Situation zurückzuführen als mit der gebauten Umgebung.

2.4.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse der Nutzerbefragung zeigen eine positive Bewertung der **Raumluftqualität**, trotz der Beurteilung, dass die Luft im Winter als trocken oder zu trocken beurteilt wurde. Dem sollte Abhilfe geschaffen werden, um Reizerscheinungen der Schleimhäute vorzubeugen.

Da die **Raumlufttemperatur** teilweise zu kalt beurteilt wurde, sollte hier nachgebessert werden, da die Wandheizung zu gering dimensioniert erscheint. Die gemessenen Einflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit wie Zuglufterscheinungen, Luftfeuchte, Temperatur oder Strahlungstemperatur der Häuser lassen keine Mängel erkennen. Daher muss hier auch die individuelle Situation auf Grund des altersbedingten Temperaturempfindens berücksichtigt werden und die Temperatur angepasst werden.

Die **Tageslichtverhältnisse** und Fenstergrößen und -anordnung wurden als ausreichend und positiv bewertet, der Ausblick aus den Fenstern allerdings während des Untersuchungszeitraums als unangenehm. Dieser Punkt sollte zu einem späteren Zeitpunkt nochmal abgefragt werden, wenn die Außen- und Gartenanlagen abgeschlossen sind, da andere Studien zeigen, dass ein positiver Ausblick ins Grüne zur besseren Erholung beitragen kann (Ulrich 1984).

Die positive Bewertung der **Ästhetik** der Gebäude von außen und innen trägt zum Wohlbefinden bei, die **Verwendung von Naturmaterialien** wird in diesem Projekt ebenfalls als positiv und angenehm beurteilt. Andere Studien zeigten bislang bessere Konzentrations-, Leistungs- und Reaktionsfähigkeit sowie einer besseren Aktiviertheit auf Grund der Verwendung von Holzkonstruktionen (Stratev und Weigl 2015). Hinsichtlich der Biophilie gibt es allerdings noch Untersuchungspotenzial.

Die **Lage** der Seniorenwohnanlage wurde hinsichtlich der Einkaufs- und Verkehrsanbindung als nicht ausreichend bewertet. In Bezug auf die Erholungs- und Aktivitätsmöglichkeiten wurde jedoch die Lage in Waldmünchen sehr positiv beurteilt, sowie die positive Einstellung hinsichtlich der Nachbarn und der damit verbundenen Gemeinschaft. Die positive Bewertung der Aktivität und der Gemeinschaft kann zur Verbesserung

der Gesundheit und, wie in einer anderen Studien belegt, zu einer verstärkte Interaktion zwischen Senior:innen zur Verbesserung bei Demenzerkrankungen beitragen. (T. et al. 2012)

Auffallend ist die positive Bewertung der Häuser trotz eines im Laufe des Projektes eingetretenen Insolvenzverfahrens der gesamten Genossenschaft, was die Bewohner:innen als extrem belastend empfanden. Dennoch konnte eine große Zufriedenheit mit den Häusern festgestellt werden.

Trotz zahlreicher Beeinträchtigungen der Bewohner:innen durch einen verzögerten Bauablauf und finanzieller Belastung durch das Insolvenzverfahren ist die Nutzerbefragung der Bewohner:innen positiv ausgefallen und lässt auf ein für die Gesundheit der Senior:innen positives Umfeld schließen.

3 Zusammenschau der einzelnen Ergebnisse

3.1 Lebenszyklusanalyse (Ascona) und Recyclingfähigkeit (TUM)

Insgesamt ist zu erkennen, dass für die Gebäude in Holzmassivbauweise massenmäßig eine höhere Menge an Ressourcen genutzt wird als für die Gebäude in Holztafelbauweise bzw. Blockbauweise. Dies ist vor allem auf die Massivholzelemente zurückzuführen, die eine größere Menge an Holz beinhalten als eine mit Dämmung gefüllte Holzständerkonstruktion. In Hinblick auf ressourcensparende, suffiziente Konstruktionen, wäre hier die Holztafelbauweise der Blockbauweise und der Holzmassivbauweise vorzuziehen. Denn es müssen vergleichsweise weniger Ressourcen eingesetzt werden. Das sparsame Verwenden von Ressourcen ist notwendig, um die Transformation zu einem nachhaltigen Wirtschaften zu erreichen und die Ressourcenverfügbarkeit auch zukünftig zu gewährleisten.

Es ist jedoch anzumerken, dass nicht nur die Ressourcenschonung eine Rolle bei der Beurteilung der Umweltfreundlichkeit der betrachteten Gebäude spielt, sondern auch die dafür verursachten Umweltwirkungen. Die Betrachtung der Umweltwirkungen und des Ressourcenverbrauchs anhand der Indikatoren GWP (Globales Erwärmungspotential) und PENRET (Totale nicht erneuerbare Primärenergie zur energetischen Nutzung) lassen keine direkten Schlüsse darüber zu, ob die in diesem Projekt zum Einsatz kommenden Holzmassivbauweisen, Holztafelbauweisen oder Blockbauweisen als ökologisch sinnvoller zu bewerten sind. Grund dafür sind die in jedem Gebäude verwendeten unterschiedlichen Arten und Mengen an eingesetzten Materialien für die zugehörigen Holzkonstruktionen. Dies verdeutlicht, dass die Materialwahl und die eingesetzte Materialmenge einen Einfluss auf das Ökobilanzergebnis haben. Je weniger Material zum Einsatz kommt, desto geringer sind auch die damit verbundenen Umweltwirkungen und der Ressourceneinsatz. Im Vergleich zum Mauerwerksgebäude weisen alle Holzgebäude ein geringeres globales Erwärmungspotential und einen geringeren Primärenergieeinsatz auf.

Bei den Konstruktionen aus Holz ist außerdem der Aspekt der Kohlenstoffspeicherung in die Betrachtung mit einzubeziehen. Hier bringen die Gebäude in Holzbauweise einen deutlichen Vorteil gegenüber der Mauerwerksbauweise mit, da diese einen erheblich größeren Anteil an biobasierten Ressourcen beinhalten. Außerdem ist für nachwachsende biobasierte Rohstoffe anzumerken, dass diese bei energetischer Verwertung fossile Ressourcen für die energetische Nutzung substituieren können (Hafner et al. 2017b). Die stoffliche Verwertung ist, aus Sicht der Kreislaufwirtschaft und einer Vermeidung der Freisetzung von biogenem Kohlenstoff, der energetischen Verwertung immer vorzuziehen (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2012). So kann der Einsatz von Sekundärrohstoffen Primärrohstoffe substituieren. Der positive Effekt durch Substitution, wird anhand der Ergebnisse der Ökobilanz nach DGNB (2018) deutlich (siehe Kapitel 2.1.3). Hier werden die Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze (Modul D), gegensätzlich der normativen Vorgaben, mit in die Betrachtung mit einbezogen. Dies ist ein Grund dafür, dass hier die Ergebnisse Gebäude in Holzbauweise deutlich geringere Umweltwirkungen aufweisen als das Mauerwerksgebäude.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass die Planung und Umsetzung ressourcenschonender Holzbauweisen sowohl in Hinblick auf die Ökobilanz als auch auf die Ressourcennutzung eine notwendige Maßnahme seitens Planenden und Ausführenden sind, um Umweltwirkungen und Ressourceneinsatz sowie -verbrauch möglichst gering zu halten. Dabei sind sowohl die Umweltwirkungen und der Ressourceneinsatz als auch

die Kreislauffähigkeit im Blick zu behalten. Die Ergebnisse zeigen, dass suffiziente, materialsparende Holzkonstruktionen angestrebt werden müssen um vergleichsweise geringere Umweltwirkungen sowie einen geringen Ressourcenverbrauch zu gewährleisten. Zusätzlich ist die Wahl lösbarer Verbindungsmittel und recyclingfähiger Materialien für kreislauffähige Konstruktionen notwendig. So können Ressourcen im Materialkreislauf gehalten und folglich Umweltwirkungen und das Verwenden von Primärressourcen weiter reduziert werden.

3.2 Innenraumlufmessungen (IQUH) und Nutzerbefragung (TUM)

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über alle Raumlufmessungen und eine Auswahl der Ergebnisse der Nutzerbefragung zu einem repräsentativen Zeitraum.

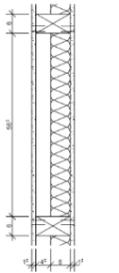
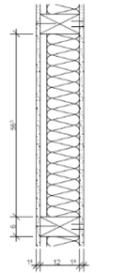
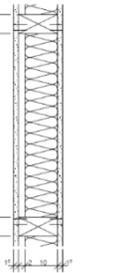
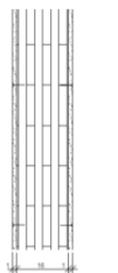
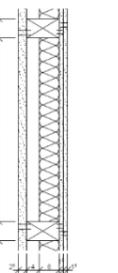
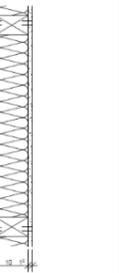
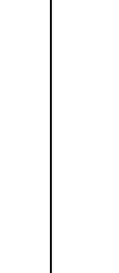
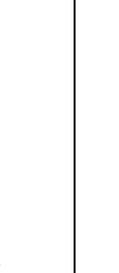
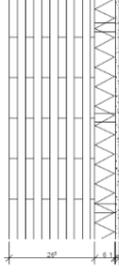
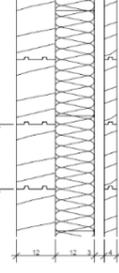
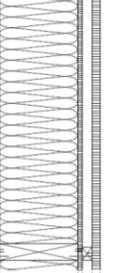
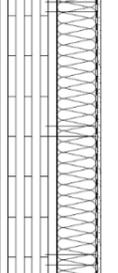
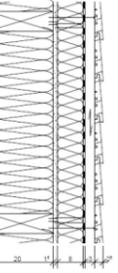
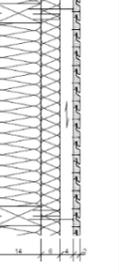
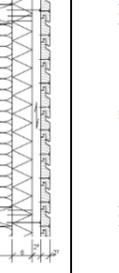
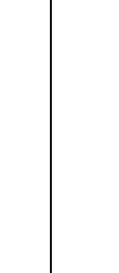
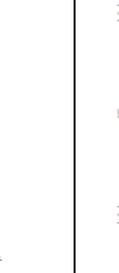
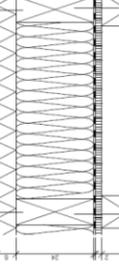
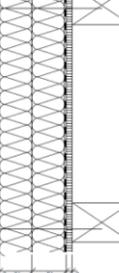
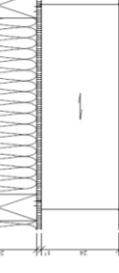
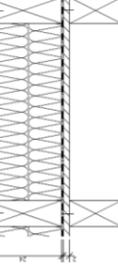
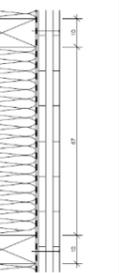
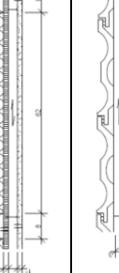
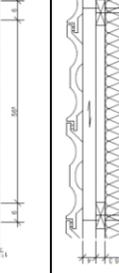
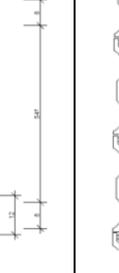
Die in den Raumlufmessungen gemessenen hohen TVOC-Werte der Häuser wurden in der Nutzerbefragung hinsichtlich gesundheitlicher Beschwerden oder einer Geruchsbelastung nicht wahrgenommen oder als negativ empfunden. Es wurde hingegen der Holzgeruch als angenehm beschrieben, wenn er überhaupt wahrgenommen wurde. Auch die hohen PAK-Werte im Haus G lassen sich nicht durch negative Wahrnehmungen oder Auswirkungen in der Nutzerbefragung wiederfinden.

Hinsichtlich der Behaglichkeit wurde die Sensormessung nicht durch die Nutzerbefragung bestätigt, da die Raumluf als zu kühl beschrieben wurde. Hier muss allerdings zwischen dem allgemein festgelegten Durchschnittlichen Behaglichkeitsfeld und der Situation von älteren Menschen unterschieden werden. Eine Überprüfung der Auslegung der Wandheizungen wäre dennoch zu empfehlen.

Im Vergleich zu einem ähnlich ausgelegt Projekt der Holzforschung Austria (Wood2New) zeigten sich bei allen dort untersuchten Fertigteilhäusern (6 Häuser in Holzmassivbauweise, 6 in Holztafelbauweise und ein mineralisches Haus), einen deutlichen Rückgang der VOC-Expositionen nach ca. 8 Monaten (Fürhapper et al. 2017). Daher ist auch in der Seniorenwohnanlage in Waldmünchen davon auszugehen, dass die VOC-Emissionskurven sich deutlich zurückentwickeln werden.

Tabelle 3-1 Raumluftmessungen und Nutzerbefragung Seniorenwohnen

	Haus A	Haus B	Haus C	Haus D	Haus E	Haus G	Haus H	Haus I	Haus K	Haus L
Raumluftmessung										
Messdatum	03.06.2023	07.10.2022	16.09.2022	16.09.2022	30.05.2022	11.06.2022	14.10.2022	11.02.2023	11.02.2023	27.04.2022
Wetterlage	gering bewölkt	bewölkt	bewölkt	bewölkt, partielle Tropfen	sonnig	sonnig	bewölkt	bewölkt	bewölkt	bewölkt, leichter Regen
Wind	windig	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering
Luftdruck	960 hPa	966 hPa	951 hPa	950 hPa	951 hPa	966 hPa	958 hPa	973 hPa	973 hPa	961 hPa
Außentemperatur	11,4 °C	4,4 °C	11,1 °C	11,2 °C	4,4 °C	8,9 °C	10,9 °C	-0,8 °C	0,2 °C	6,3 °C
Außenluftfeuchtigkeit	65 % r.F.	99 % r.F.	99 % r.F.	97 % r.F.	97 % r.F.	97 % r.F.	99 % r.F.	59 % r.F.	63 % r.F.	90 % r.F.
Temperatur (innen)	21 °C	16 °C	22 °C	20 °C	18,5 °C	22 °C	16,8 °C	14,7 °C	17,2 °C	22,3 °C
Luftfeuchtigkeit (innen)	62 % r.F.	72 % r.F.	67 % r.F.	62,6 % r.F.	60 % r.F.	64 % r.F.	72,6 % r.F.	68,3 % r.F.	61,4 % r.F.	53 % r.F.
Letzte Lüftung	vor ca. 8 Stunden	vor > 8 Stunden	vor ca. 8 Stunden	vor ca. 9 Stunden	vor ca. 8 Stunden	vor > 8 Stunden	vor ca. 8 Stunden	vor ca. 8 Stunden	vor ca. 10 Stunden	vor ca. 8 Stunden
Probenahmestelle	Raummitte	Raummitte	Raummitte	Raummitte	Raummitte	Raummitte	Raummitte	Raummitte	Raummitte	Raummitte
Probenahmehöhe	1,5 m	-	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m
Raumvolumen	Ca. 52,8 m³	Ca. 50 m³	Ca 36 m³	Ca 45 m³	Ca. 33,4 m³	Ca 50 m³	Ca. 39 m³	Ca. 41,8 m³	Ca. 40 m³	Ca 48-50 m³
Raumgrundfläche	13,83 m²	Ca. 13,6 m²	Ca. 11,6 m²	Ca. 11,7 m²	Ca. 12,8 m²	Ca 15 m²	Ca. 12,7 m²	Ca. 13,2 m²	Ca. 11,3 m²	13,19 m²
Raumhöhe	3,82 m (Mitte der Schräge)	2,8 m – 4,78 m (Schräge)	Ca. 2,75 m – 3,90 m	Ca. 3-4,75 m	2,60 m	Ca. 3,30 m	2,75-3,88 m (Schräge)	Ca. 3,16 m	Ca. 3,50 m mittel	2,73-4,50 m
Gebäudedichtheit	gut	gut	gut	gut	gut	gut	Gut	Gut	gut	gut
Geruch	unauffällig	unauffällig	Mischgeruch	Mischgeruch	unauffällig	unauffällig	Unauffällig	Unauffällig	unauffällig	-
Ausbauarbeiten	Ja (Neubau)	Ja (Türeingbau am 06.10, Fliesen, Silikon im Bad 06.10)	Ja (Neubau (letzte Arbeiten vor ca. 1 Woche) danach keine Lüftung mehr)	Ja (Neubau, Boden behandelt am Vortag im anliegenden Wohn-/Essbereich, Tür war offen (vermutlich Seife))	Ja (Neubau)	Ja (Neubau (zuletzt Türen, Heizung, Fliesen im Bad))				
Reinigungsarbeiten	Ja (Feinreinigung am Vortag)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)	Ja (Feinreinigung vor Raumverschluss)
Beschattung	nein	nein	nein	nein	nein	Ja	nein	nein	nein	nein
TVOC (Tenax)	2497	594,5	2142,1	1834	1166,8	2990,3	934,1	1608,9	409,7	3402,2
Formaldehyd/Aldehyde (DNPH)	68	32	77	22	38	51	26	40	24	47
C1-C8	602,9 µg/m³	37 µg/m³	1493 µg/m³	48 µg/m³	161,3 µg/m³	295 µg/m³	85,5 µg/m³	417 µg/m³	83 µg/m³	421,70 µg/m³
PAK	15 ng/m³	141 ng/m³	314 ng/m³	266 ng/m³	278 ng/m³	889 ng/m³	149	180	282 ng/m³	247 ng/m³
Bewohnter Zustand / Nutzerbefragung ausgewählter Zeitraum: Mitte-Ende Januar 2024										
Empfundene Raumtemperatur	-	kühl	zu kalt	-	neutral	neutral	-	-	-	neutral
Empfundene Raumluftfeuchte	-	zu trocken	trocken	-	trocken	trocken	-	-	-	neutral
Unangenehme Gerüche	-	gar nicht	gar nicht	-	gar nicht	gar nicht	-	-	-	gar nicht
Empfundene Luftqualität	-	zufrieden	mittelmäßig	-	sehr zufrieden	sehr zufrieden	-	-	-	sehr unzufrieden (kurz vor Auszug)

Empfundener Ausblick	-	eher unangenehm	eher unangenehm	-	unangenehm	eher unangenehm	-	-	-	weder noch
Tageslichtbeleuchtung	-	sehr zufrieden	sehr zufrieden	-	etwas unzufrieden	etwas unzufrieden	-	-	-	sehr zufrieden
Akustik	-	sehr zufrieden	keine Angabe (Hörgeräte)	-	etwas zufrieden	sehr zufrieden	-	-	-	sehr zufrieden
Verkehrsanbindung	-	sehr unzufrieden	sehr unzufrieden	-	eher unzufrieden	eher unzufrieden	-	-	-	eher unzufrieden
Einkaufsmöglichkeiten	-	eher unzufrieden	eher unzufrieden	-	weder noch	weder noch	-	-	-	weder noch
Aktivitätsmöglichkeiten	-	eher zufrieden	eher zufrieden	-	weder noch	eher zufrieden	-	-	-	sehr zufrieden
Nachbarn	-	eher zufrieden	weder noch	-	sehr zufrieden	weder noch	-	-	-	sehr zufrieden
Ästhetik außen	-	ästhetisch	keine Angabe	-	ästhetisch	ästhetisch	-	-	-	ästhetisch
Ästhetik innen	-	ästhetisch	ästhetisch	-	ästhetisch	ästhetisch	-	-	-	ästhetisch
Naturmaterialien Wirkung	-	beruhigend	weder noch	-	beruhigend	beruhigend	-	-	-	beruhigend
Generelles Unwohlsein	-	häufig	häufig	-	selten	nie	-	-	-	manchmal
Wohnkomfort	-	eher zufrieden	sehr zufrieden	-	eher zufrieden	sehr zufrieden	-	-	-	sehr zufrieden
Konstruktionsaufbauten										
Innenwand										
Außenwand										
Dach										

4 Literaturverzeichnis

Abgeordnetenhaus von Berlin (2019). Nachhaltigkeit auf dem Bau: Berlin baut mit Holz. Drucksachen 18/1471 und 18/1726 – Schlussbericht. Mitteilung – zur Kenntnisnahme. Online verfügbar unter <https://www.parlament-berlin.de/ad0s/18/IIIPlen/vorgang/d18-2225.pdf>.

AgBB (2021). AgBB – Bewertungsschema für VOC aus Bauprodukten; Stand Juni 2021. Anforderungen an die Innenraumluftqualität in Gebäuden: Gesundheitliche Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VVOOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/4031/dokumente/agbb_bewertungsschema_2021.pdf.

BBSR (Hg.) (2012). Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Neubau V2011_1. Kriterien – BNB Büro- und Verwaltungsgebäude-Neubau-Version 2011-1-: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2011_1/BNB_BN2011-1.zip.

BBSR (2017). Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Online verfügbar unter https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf.

BBSR (2018). Wege zum Effizienzhaus Plus. Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Online verfügbar unter <file:///C:/Users/ga67sus/Downloads/broschuere-wege-zum-effizienzhaus-plus2018.pdf>.

BiRN (Hg.) (2016). BNKIBNG (QNG) Kriteriensteckbriefe: Bau-Institut für Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen GmbH. Online verfügbar unter <https://bau-irn.com/bnkibng-qng-kriteriensteckbriefe>.

BMEL, BMWSB (2023). Handreichung. Holzbauintiative. Strategien der Bundesregierung zur Stärkung des Holzbaus als ein wichtiger Beitrag für ein klimagerechtes und ressourceneffizientes Bauen. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/holzbauintiative.pdf?__blob=publicationFile&v=11.

BMU (2011). Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/Erlaeuterungen_BNB-Tabelle_Nutzungsdauern_, zuletzt geprüft am 15.03.2017.

BMU (2012). Kriterien – BNB Büro- und Verwaltungsgebäude-Neubau-Version 2011-1-. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2012/LCA-Bilanzierungsregeln_BNB_BN_2012.pdf, zuletzt geprüft am 15.03.2017.

BMWSB (Hg.) (2021a). Anhang 3.1.1 zur ANLAGE 3. Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude, Stand 25.06.2021: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter https://www.qng.info/app/uploads/2023/01/2022-QNG_GMS_311_Anlage_3_LCA_Bilanzregeln_Wohngebaeude_210625.pdf.

BMWSB (2021b). ANLAGE 3 zum Handbuch des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude, Stand: 12.04.2022. GEBÄUDEANFORDERUNGEN. Besondere Anforderungen im öffentlichen Interesse an en Beitrag von Gebäuden zur Nachhaltigen Entwicklung. Online verfügbar unter https://www.qng.info/app/uploads/2023/01/2022-QNG_Handbuch_Anlage-3_besondere_Anforderungen_v1-1.pdf.

BMWSB (2023). ANLAGE 3 zum Handbuch des Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude, Stand: 01.03.2023. GEBÄUDEANFORDERUNGEN. Besondere Anforderungen im öffentlichen Interesse an den Beitrag von Gebäuden zur Nachhaltigen Entwicklung. Online verfügbar unter https://www.qng.info/app/uploads/2023/10/QNG_Handbuch_Anlage-3_AnforderungenBund_v1-3.pdf.

BMWSB (Hg.) (2024a). ÖKOBAUDAT: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter <https://www.oekobaudat.de/>.

BMWSB (Hg.) (2024b). QNG Siegeldokumente: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Online verfügbar unter <https://www.qng.info/qng/qng-anforderungen/qng-siegeldokumente/>.

Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2002. Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung - AltholzV). AltholzV. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/AltholzV.pdf>.

Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2012. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). KrWG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf>.

Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2020. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG). GEG. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>.

Churkina, Galina; Organschi, Alan; Reyer, Christopher P. O.; Ruff, Andrew; Vinke, Kira; Liu, Zhu et al. (2020). Buildings as a global carbon sink. In: *Nat Sustain* 3 (4), S. 269–276. DOI: 10.1038/s41893-019-0462-4.

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 1996. Richtlinie für die Bewertung und Sanierung Pentachlorphenol (PCB)-belasteter Baustoffe und Bauteile in Gebäuden (PCP-Richtlinie). PCB Richtlinie.

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) 2017. Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. Ausgabe 2017/1. mit Druckfehlerkorrektur vom 11. Dezember 2017. MVVTB.

DGNB GmbH (2018). ENV1.1 Ökobilanz des Gebäudes. DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau. VERSION 2018. Online verfügbar unter https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-system/de/gebaeude/neubau/kriterien/02_ENV1.1_Oekobilanz-des-Gebaeudes.pdf.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN V 18599-9:2018-09. Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen. Beuth verlag GmbH. Berlin.

- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 7730:2023-04. Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO/DIS 7730:2023); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 7730:2023 (ENTWURF). Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 8591:2003-09. Fertigungsverfahren Zerlegen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 277:2021-08. Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 16449:2014-06. Holz und Holzprodukte - Berechnung des biogenen Kohlenstoffgehalts im Holz und Umrechnung in Kohlenstoffdioxid; Deutsche Fassung EN 16449:2014. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 68800-1:2019-06. Holzschutz - Teil 1: Allgemeines. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 16000-1. Innenraumluftverunreinigungen - Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie (ISO 16000-1:2004); Deutsche Fassung EN ISO 16000-1:2006. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 276:2018-12. Kosten im Bauwesen. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 15978:2012-10. Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 15978-1:2021-09. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden – Teil 1: Umweltqualität; Deutsche und Englische Fassung prEN 15978-1:2021 (Entwurf). Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 15804:2014-07. Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 15804:2022-03. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 14040:2021-02. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Beuth verlag GmbH. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4108-2:2013-02. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Beuth verlag GmbH. Berlin.

Ebert, Samuel; Ott, Stephan; Krause, Karina; Hafner, Annette; Krechel, Marco (2020). Modell der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene. In: *Bautechnik* 97 (S1), S. 14–25. DOI: 10.1002/bate.201900109.

Ebert, Thilo; Eßig, Natalie; Hauser, Gerd (2010). Zertifizierungssysteme für Gebäude: DETAIL - Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.

El khouli, Sebastian; John, Viola; Zeumer, Martin (2015). Sustainable construction techniques: DETAIL - Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.

Europäische Kommission und Rat 2006. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission. REACH. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:136:0003:0280:DE:PDF>.

Fürhapper, C; Habla, E; Stratev, D; Weigl, M (2017). Wood 2New Konkurrenzfähige Materialien aus Holz für den Innenbereich. Endbericht AP3 - Innenraum. ProjektNr.: 101005. HFA-Nr.: F 471. Gefördert durch das BMLFUW und CEI Bois: Holzforschung Austria. Online verfügbar unter https://www.holzfor-schung.at/fileadmin/user_upload/Downloads/Broschueren/gratisdownloads/HFA-Forschungsbericht-Wood2New.pdf.

Hafner, Anette; Krause, Karina; Ebert, Samuel; Krechel, Marco (2020). Ressourcennutzung Gebäude: Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken. Abschlussbericht (AZ: 34301 / 01-25): Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Bochum. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34301_01-Hauptbericht.pdf.

Hafner, Anette; Rüter, Sebastian; Ebert, Samuel; Schäfer, Sabrina; König, Holger; Cristofaro, Lisa et al. (2017a). Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Forschungsprojekt: 28W-B-3-054-01 Waldklimafonds. Hg. v. BMEL/BMUB.

Hafner, Anette; Rüter, Sebastian; Ebert, Samuel; Schäfer, Sabrina; König, Holger; Cristofaro, Lisa (2017b). Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren. Forschungsprojekt: 28W-B-3-054-01 Waldklimafonds. Hg. v. BMEL/BMUB.

Hafner, Anette; Schäfer, Sabrina; Krause, Karina (2017c). Impact of different reference study periods in life cycle analysis of buildings on material input and global warming potential. Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure. Proceedings of the fifth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016).

Huang, X.; Qiu, R.; Chan, Chak K.; Ravi Kant, Pathak (2011). Evidence of high PM2.5 strong acidity in ammonia-rich atmosphere of Guangzhou, China: Transition in pathways of ambient ammonia to form aerosol

ammonium at $[\text{NH}_4^+]/[\text{SO}_4^{2-}] = 1.5$. In: *Atmospheric Research* 99 (3-4), S. 488–495. DOI: 10.1016/j.atmosres.2010.11.021.

International Organization for Standardization (ISO): ISO 20887:2020-01. Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance. ISO copyright office. Schweiz.

Kellenberger, Daniel; Althaus, Hans-Jörg (2009). Relevance of simplifications in LCA of building components. In: *Building and Environment* 44 (4), S. 818–825. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.06.002.

König, Holger (2012). Sensitivitätsanalyse von Gebäudeökobilanzen bezogen auf den Einzelaspekt Betrachtungszeitraum. Gröbenzell.

LEGEP Software GmbH (Hg.) (2024). LEGEP-Bausoftware. Online verfügbar unter <https://lekep.de/>.

Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR) (Hg.) (2024). Holzbau Offensive Baden-Württemberg. Nachhaltiges Bauen für die Zukunft.

NaWoh (Hg.) (2024). Qualitätssiegel Nachhaltiger Wohnungsbau 2016: Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau e.V. Online verfügbar unter <https://www.nawoh.de/vergebene-siegel/qualitaets-siegel-2016>.

Passivhaus Institut. Kriterien für den Passivhaus-, EnerPHit- und PHI-Energiesparhaus-Standard. Darmstadt. Online verfügbar unter https://passiv.de/downloads/03_zertifizierungskriterien_archiv_2015_9b_de.pdf.

Rosen, Dieter (2021). Re-Use und Recycling von Ziegeln. In: *Mauerwerk* 25 (2), S. 74–81. DOI: 10.1002/dama.202100002.

Schwede, Dirk; Störl, Elke (2017). Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen. In: *Bautechnik* 94 (1), S. 1–9. DOI: 10.1002/bate.201600025.

Seinfeld, John H.; Pandis, Spyros N. (Hg.) (2016). Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change. Third edition. Hoboken, New Jersey: Wiley.

Stratev, Daniel; Weigl, Martin (2015). BIGCONAIR Baubilologische Containerentwicklung. Endbericht. Projektnummer FFG/836468. HFA-Nr.: F464. Gefördert durch die FFG. Hg. v. HFA: Holzforschung Austria. Wien.

T., Anme; T. MA, Watanabe; K. MA, Tokutake; E. MA, Tomisaki; H. MA, Mochizuki; E. MA, Tanaka et al. (2012). Behavior Changes in Older Persons Caused by Using Wood Products in Assisted Living. In: *PHR* 2 (4), S. 106–109. DOI: 10.5923/j.phr.20120204.07.

Ulrich, R. S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. In: *Science (New York, N.Y.)* 224 (4647), S. 420–421. DOI: 10.1126/science.6143402.

Umweltbundesamt (2007). Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten. Handreichung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (50). In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* (7), S. 990–1005.

Umweltbundesamt (2008). Gesundheitliche Bedeutung von Feinstaub in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (51). In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* (11), S. 1370–1378.

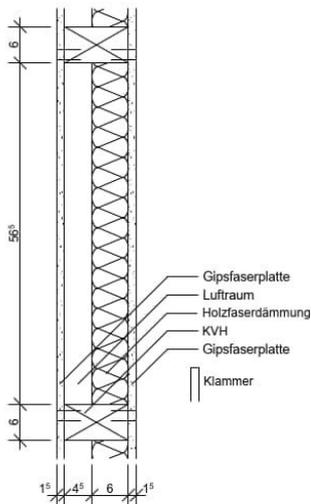
Weschler, C. J. (2000). Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. In: *Indoor air* 10 (4), S. 269–288. DOI: 10.1034/j.1600-0668.2000.010004269.x.

ANHANG

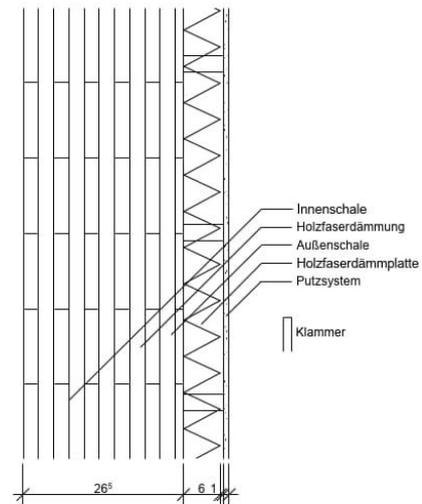
Anhang 1 Konstruktionsaufbauten der Häuser A-L

Haus A

Innenwand



Außenwand



Dach

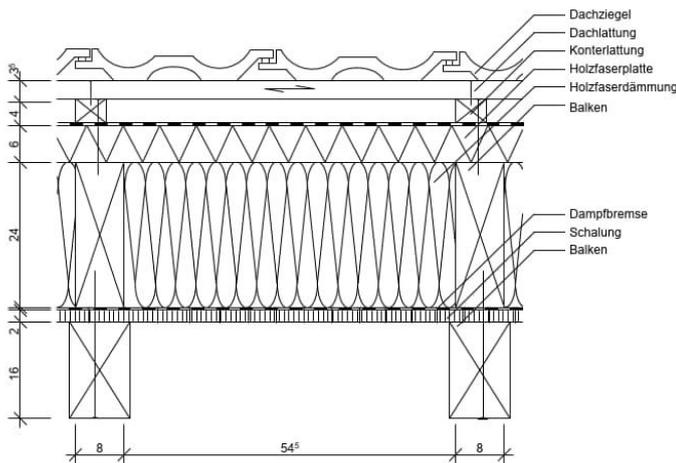
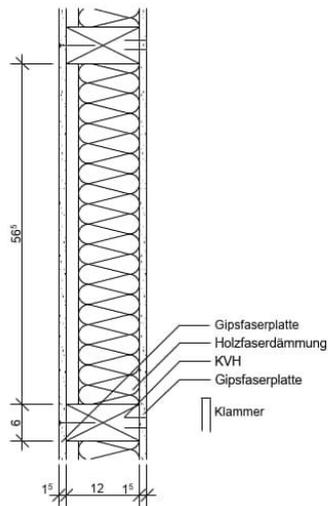


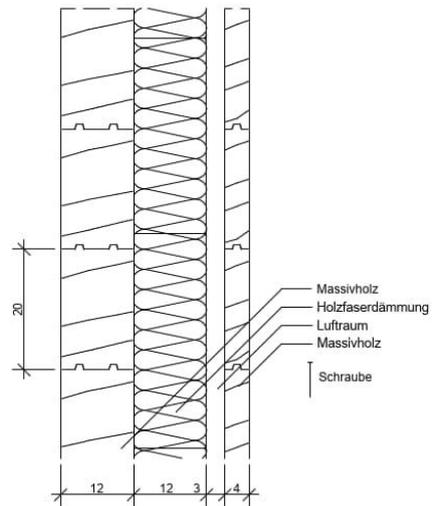
Abbildung - Anhang 3.2-1 Konstruktionsaufbau Haus A

Haus B

Innenwand



Außenwand



Dach

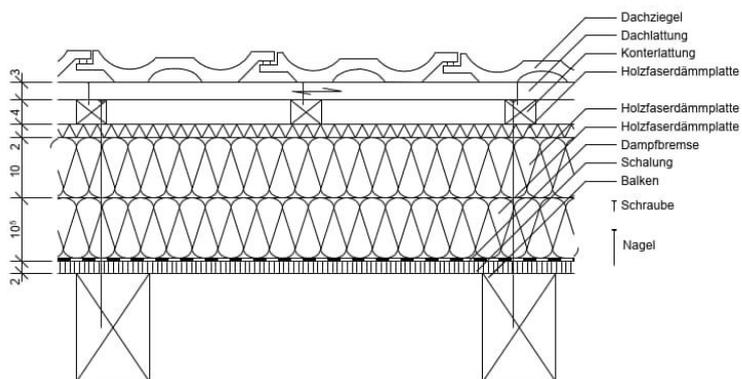
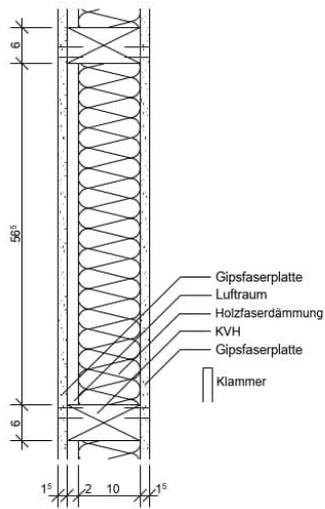


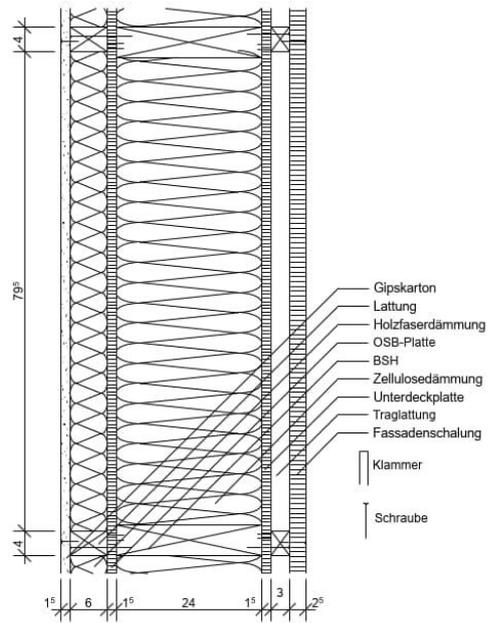
Abbildung - Anhang 3.2-2 Konstruktionsaufbau Haus B

Haus C

Innenwand



Außenwand



Dach

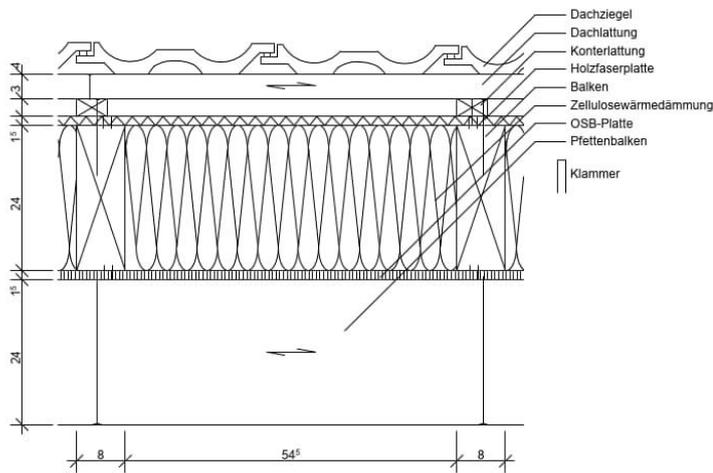
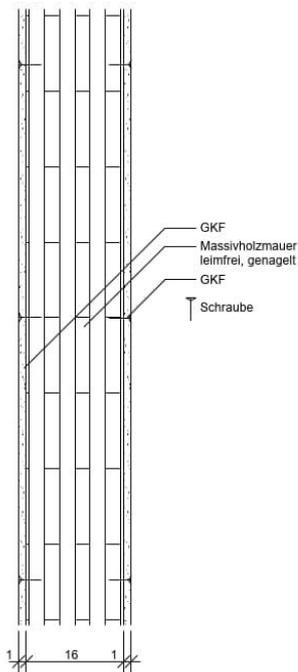


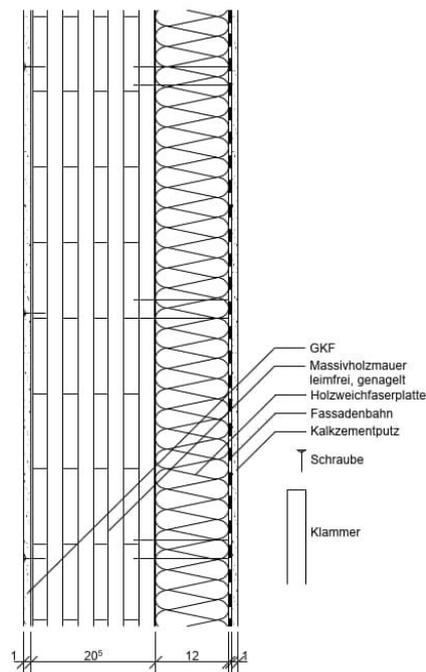
Abbildung - Anhang 3.2-3 Konstruktionsaufbau Haus C

Haus D

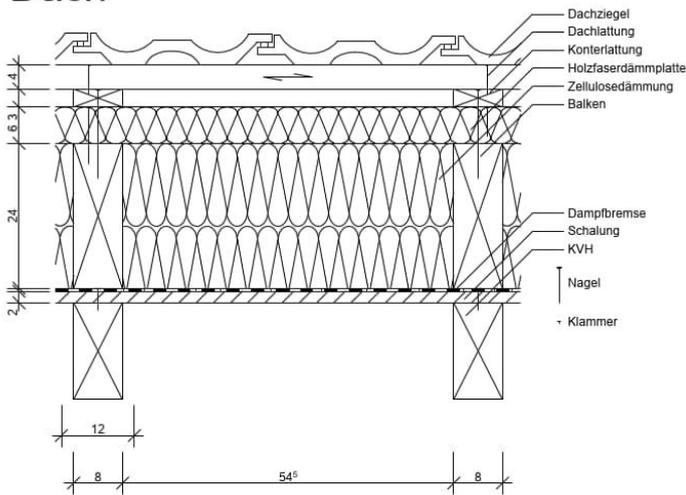
Innenwand



Außenwand

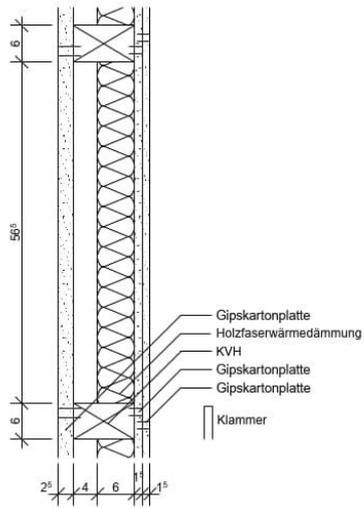


Dach

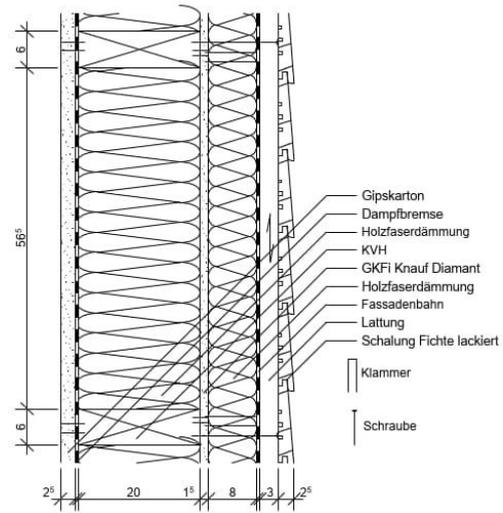


Haus E

Innenwand



Außenwand



Dach

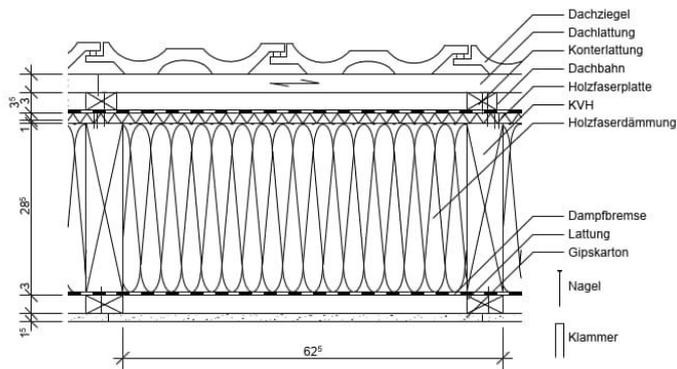
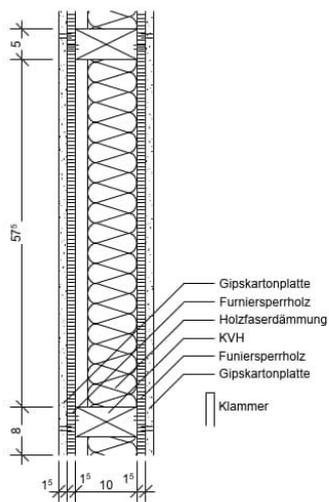


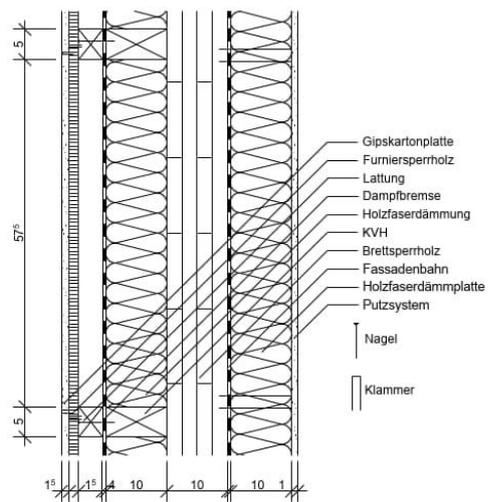
Abbildung - Anhang 3.2-4 Konstruktionsaufbau Haus D

Haus F

Innenwand



Außenwand



Dach

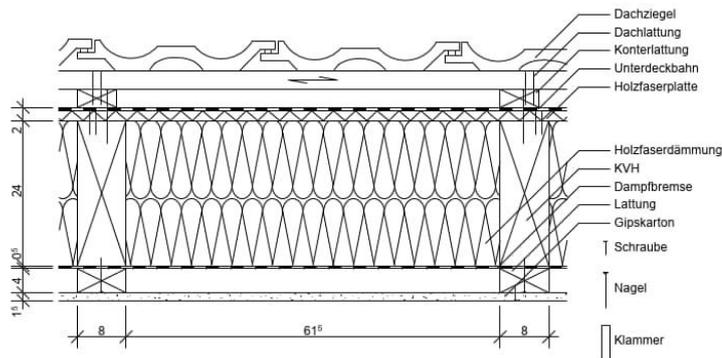
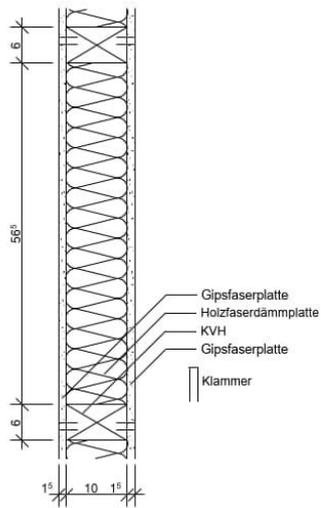


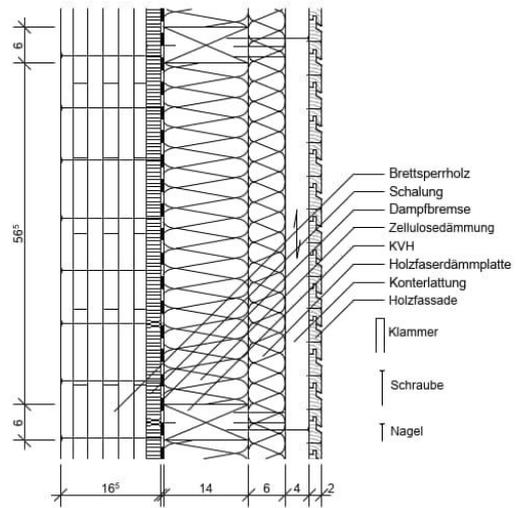
Abbildung - Anhang 3.2-5 Konstruktionsaufbau Haus F

Haus G

Innenwand



Außenwand



Dach

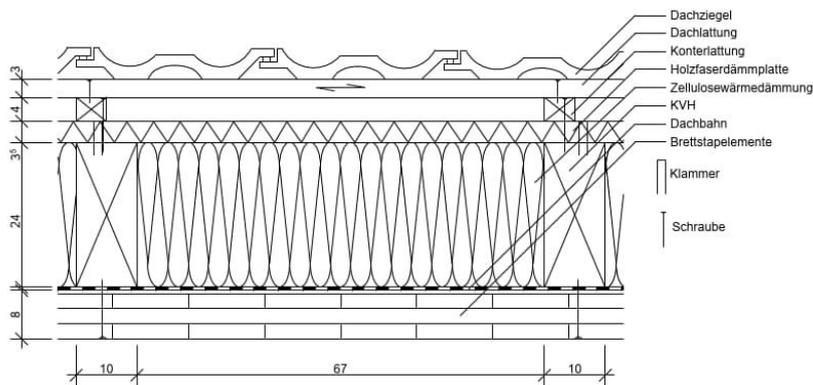
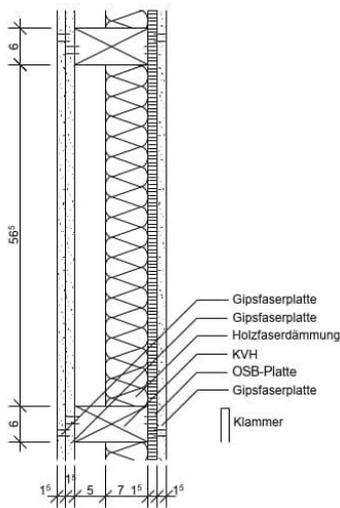


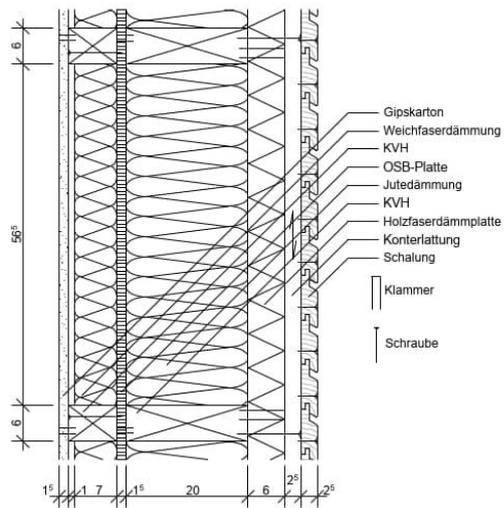
Abbildung - Anhang 3.2-6 Konstruktionsaufbau Haus G

Haus H

Innenwand



Außenwand



Dach

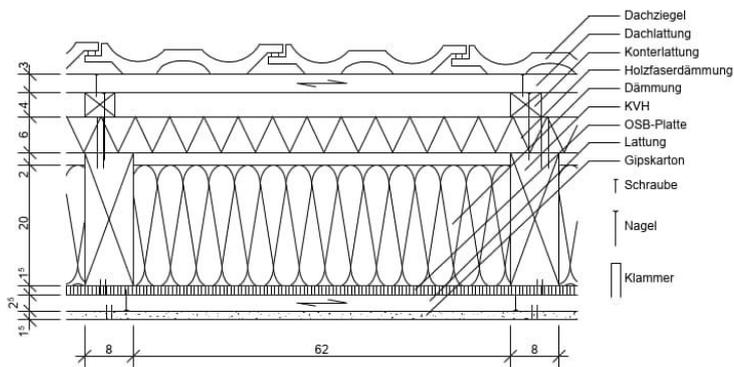
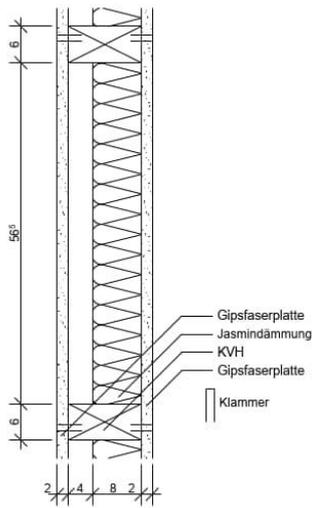


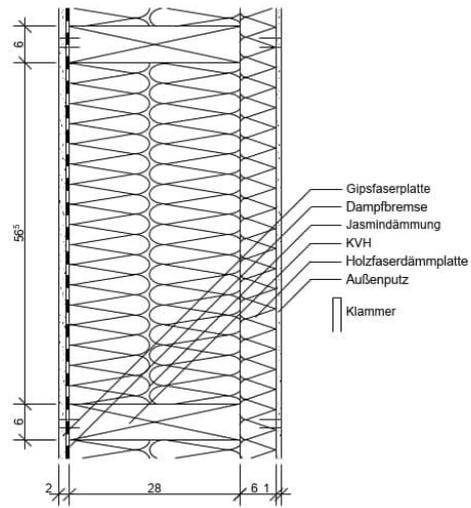
Abbildung - Anhang 3.2-7 Konstruktionsaufbau Haus H

Haus I

Innenwand



Außenwand



Dach

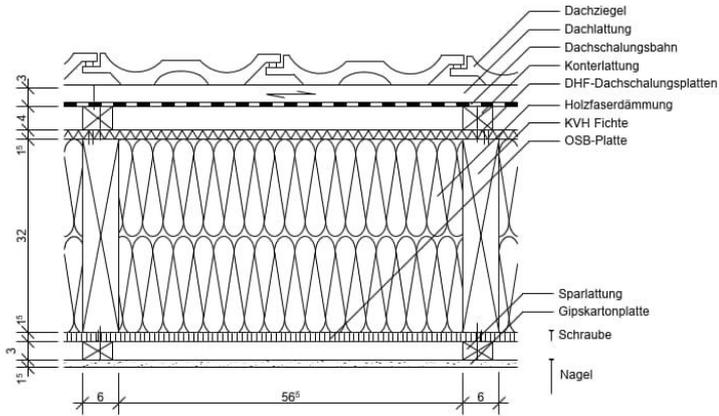
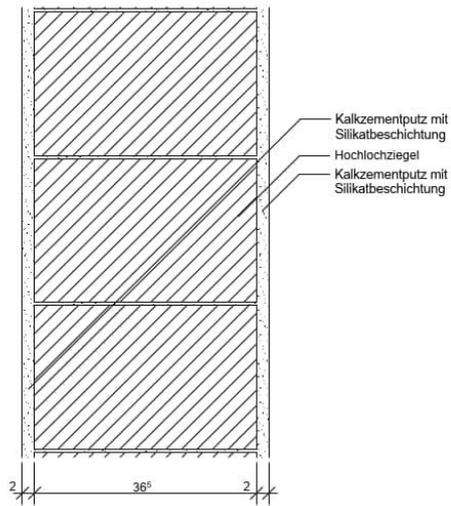


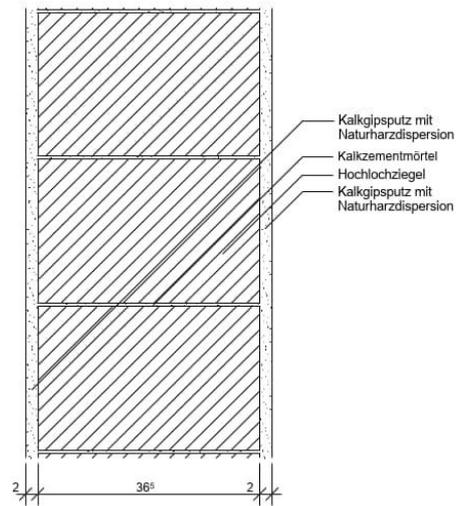
Abbildung - Anhang 3.2-8 Konstruktionsaufbau Haus I

Haus K

Innenwand



Außenwand



Dach

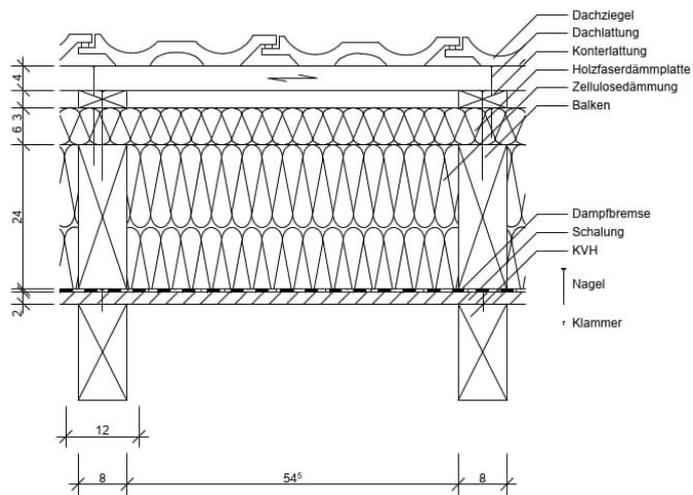
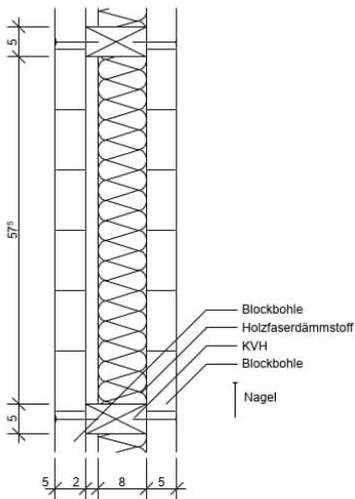


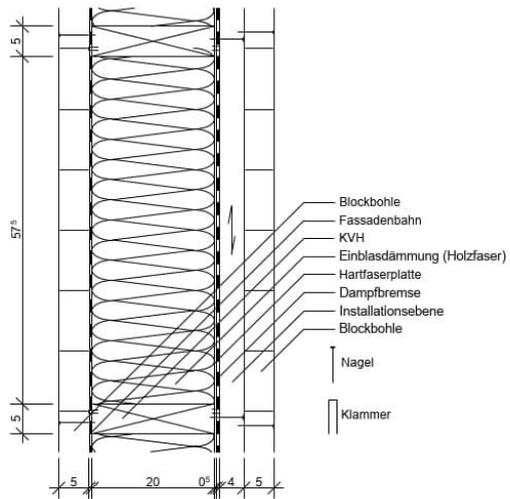
Abbildung - Anhang 3.2-9 Konstruktionsaufbau Haus K

Haus L

Innenwand



Außenwand



Dach

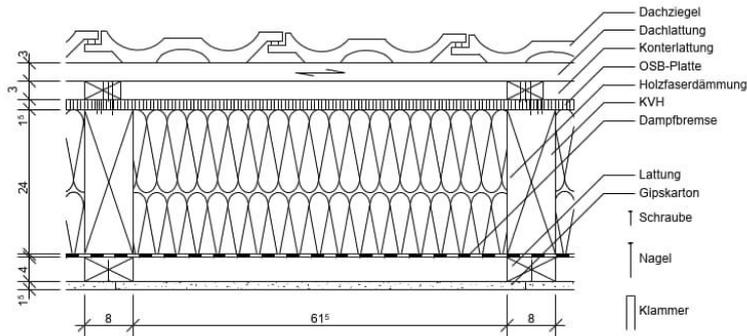


Abbildung - Anhang 3.2-10 Konstruktionsaufbau Haus

Anhang 2 Checkliste für die Messraumvorbereitung der Raumlufmessungen (IQUH)

Messraumvorbereitung

14 Tage vor der Messung

- Ständiges Lüften mit Luftwechselzahl > 2, wobei hier das aktuelle Außenklima zu beachten ist.
- Wenn RLT-Anlagen vorhanden sind, sollten diese nun durchgängig auf höchster Stufe laufen.
- Raumklimazielwerte 21 °C und ca.50 % relative Feuchte sollten angepeilt werden.
- Klebe-, Abdichtungs- und Silikonarbeiten vermeiden.

Spätestens 48 Stunden vor der Messung

- dürfen keine Reinigungs- und Bauarbeiten mit emittierenden Stoffen durchgeführt werden.
- Grobe Baustäube, Baustoffreste und Schutzfolien sind aus den zu messenden Räumen zu entfernen.
- Grobreinigung des Gebäudes ohne Reinigungsmittel, sondern mit Staubsauger und Wasser mit nebel-feuchtem Tuch.

Nachfolgend die Checkliste für den Messtermin zur Bestätigung wenige Tage vor der Messung:

- Strom vor/in den zu messenden Räumen?
- Fenster sind verschließbar?
- Messräume sind leer und besenrein gereinigt?
- Sämtliche Schutzfolien (z.B. Fußboden) sind entfernt?
- Türen sind vorhanden?
- Raumklimawerte entsprechen den Vorgaben (Raumlufttemperatur 19–24°C, Raumluftfeuchte < 65 % relative Luftfeuchte)?
- Ist eine mögliche Nachtabsenkung der Heizung für die Nacht vor der Messung ausgeschaltet?
- Die Messräume sind bei Sonnenschein beschattet?
- Falls eine Lüftungsanlage vorhanden ist, ist diese so eingestellt, dass diese auf mittlerer Leistungsstufe während der Messung durchläuft (keine CO2 oder Temperatur-Steuerung o. Ä.)?
- Es ist gewährleistet, dass keine Dritten (außer Messtechniker) die Messräume zwischen Messvorbereitung am Vortrag bis zur Messung betreten?
- Notfallkontakt, der durchgehend für den Messtermin erreichbar ist und vor Ort bei Bedarf unterstützen kann:
 - wie erfolgt der Zugang zum Gebäude?

Anhang 3 Angaben zur der Laboranalytik (IQUH)

Anhang 3.1 TVOC-Analytik

Das Adsorber-Material TENAX wurde mittels Thermodesorption und GC-MS gemessen (MARKES TD100-xr, Shimadzu GC-MS QP 2010 Ultra bzw. Shimadzu GC-MS-QP2020, 60 m Säule). Zur Übersichtsanalyse (Screening) wurde die Messung im Scan-Modus aufgenommen und die angegebenen Substanzen mit externen Standards quantifiziert. Die Durchführung erfolgte nach dem akkreditierten Verfahren nach DIN EN ISO 16000-6:2012-11. Die Messunsicherheit der Analytik ohne Probenahme liegt bei 23 %. Diese gemittelte Messunsicherheit wurde über ein kombiniertes Verfahren mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ berechnet.

Aufgrund prinzipieller analytischer Gegebenheiten sind die Konzentrationen der Carbonsäuren sowie die der sehr polaren Verbindungen mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet. Essigsäure besitzt aufgrund einer Blindwertproblematik eine signifikant erhöhte Unsicherheit, sodass diese Konzentrationen nur orientierend zu werten sind.

Im Rahmen der Untersuchung wurde für die Probenahme mit TENAX ein Feldblindwert mit analysiert. Die ermittelten Konzentrationen wurden über das Auswerteprogramm sowohl bei den Einzelverbindungen wie auch bei dem TVOC direkt von den Messwerten abgezogen, sodass die erhaltenen Luftkonzentrationen blindwertkorrigiert sind.

Anhang 3.2 Aldehyde / Formaldehyd

Zur Bestimmung der sehr leichtflüchtigen Aldehyde wurde das Adsorber-Material (mit 2,4-Dinitrophenyl-hydrazin DNPH dotiertes Silikagel) mit Desorptionsmittel (Acetonitril) versetzt und das Eluat mittels HPLC-DAD (Shimadzu HPLC LC40) vermessen. Die Quantifizierung erfolgte mit internen und externen Standards. Die Durchführung erfolgte nach dem akkreditierten Verfahren a DIN EN ISO 160003:2013-01. Für die gesättigten, die kurzkettigen ungesättigten und die aromatischen Aldehyde sowie die Ketone liegt die Messunsicherheit ohne Probenahme bei 12 %. Diese gemittelte Messunsicherheit wurde über ein kombiniertes Verfahren mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ berechnet.

Anhang 3.3 Biozide, Flammschutzmittel, Weichmacher, Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Der PU-Schaum wurde mit Lösemittel extrahiert. Das Lösemittel wurde eingengt und der Extrakt mittels gekoppelter Gaschromatographie-Massenspektrometrie GC-MS (Shimadzu GC-MS QP 2010) vermessen. Zur Quantifizierung der angegebenen Substanzen wurde die Messung im SIM-Modus aufgenommen, die Kurve integriert und mit internem und externem Standard quantifiziert. Die Durchführung erfolgte nach der VDI 2464 Blatt 1:2009-09. Die Messunsicherheit der Analytik ohne Probenahme liegt bei 11 %. Diese gemittelte Messunsicherheit wurde über ein kombiniertes Verfahren mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ berechnet.

Analysiert wurden folgende Verbindungen:

Biozide: Aldrin, Bromophos, Chlorpyrifos, Chlorthalonil, p,p'-DDT, Methoxychlor, Dichlofluanid, Dichlorphos/Naled, Dieldrin, a-Endosulfan, Endrin, Furmecycloxy, Deltamethrin, Permethrin, Heptachlor, Hexachlorbenzol, Lindan (g-HCH), a-HCH, b-HCH, d-HCH, Pentachlorphenol, 2,3,5,6-Tetrachlorphenol, 2,3,4,6-Tetrachlorphenol, Parathion-ethyl (E605), Phoxim, Piperonylbutoxid, Propiconazol, Tebuconazol, Tolyfluanid.

Flammschutzmittel: Tris-(2-chlorethyl)-phosphat, Tris-chlorpropyl-phosphat, Tris-2,3-dichlorpropyl-phosphat, Triethylphosphat, Tributylphosphat, Tris-(2-ethylhexyl)-phosphat, Tris-(2-butoxyethyl)-phosphat, Triphenylphosphat.

Weichmacher (Phthalate): Dimethylphthalat, Diethylphthalat, Di-methoxyethyl-phthalat, Dibutylphthalat, Diisobutylphthalat, Dipentylphthalat, Benzylbutylphthalat, Dioctylphthalat, Di(2-ethylhexyl)phthalat, Diisononylphthalate, Diisodecylphthalate.

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK): Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benz(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren, Indeno(123cd)pyren, Dibenz(ah)anthracen, Benzo(ghi)perylene.

Polychlorierte Biphenyle (PCB): PCB Nr. 28, PCB Nr. 52, PCB Nr. 101, PCB Nr. 138, PCB Nr. 153, PCB Nr. 180, PCB Nr. 118.

Anhang 3.4 C1 – C8 Carbonsäuren / Alkansäuren

Das Silikagel wurde mit Lösemittel extrahiert. Der Extrakt wurde mittels gekoppelter Gaschromatographie-Massenspektrometrie GC-MS (Shimadzu GC-MS QP 2010) vermessen. Zur Quantifizierung der angegebenen Substanzen wurde die Messung im SIM-Modus aufgenommen, die Kurve integriert und mit internem und externem Standard quantifiziert.

Anhang 4 Offizielle Richt- und Leitwerte

Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft (2007)

Stufe	Konzentrationsbereich [mg TVOC/m ³]	Hygienische Bewertung
1	≤0,30 mg/m ³	Hygienisch unbedenklich
2	0,30 - 1,0 mg/m ³	Hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen
3	1,0 - 3,0 mg/m ³	Hygienisch auffällig
4	3,0 - 10 mg/m ³	Hygienisch bedenklich
5	>10 mg/m ³	Hygienisch inakzeptabel

Abbildung - Anhang 3.2-11 Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft (UBA 2007)

Version: 2023.01 (31. März 2023)

Festgelegte Richtwerte vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR)

Name	CAS-Nr.	Jahr ^[2]	RW II	RW I	Einheit	Anmerkung ^[3]
Aldehyde						
Formaldehyd	50-00-0	2016	-	0,10	mg/m ³	
Acetaldehyd	75-07-0	2013	1,0	0,10	mg/m ³	
2-Furaldehyd	98-01-1	2011	0,10	0,010	mg/m ³	
Benzaldehyd	100-52-7	2010	0,20	0,020	mg/m ³	V
∑ C ₄ -C ₁₁ Aldehyde ^[1]	diverse ^[1]	2009	2,0	0,10	mg/m ³	G
Aliphatische Kohlenwasserstoffe						
∑ C ₉ -C ₁₄ -Alkane / Isoalkane ^[1]	diverse ^[1]	2005	2,0	0,20	mg/m ³	G
Alkohole						
1-Propanol	71-23-8	2022	46	14	mg/m ³	
Methanol	67-56-1	2022	40	13	mg/m ³	60 min
2-Propanol	67-63-0	2021	45	22	mg/m ³	
Propan-1,2-diol	57-55-6	2017	0,60	0,060	mg/m ³	
1-Butanol	71-36-3	2014	2,0	0,70	mg/m ³	
2-Ethylhexanol	104-76-7	2013	1,0	0,10	mg/m ³	V, S
Benzylalkohol	100-51-6	2010	4,0	0,40	mg/m ³	
Aromatische Kohlenwasserstoffe						
∑ C ₇ -C ₈ Alkylbenzole	diverse ^[1]	2016	1 ^[1]	1 ^[1]	-	G, R
Toluol	108-88-3	2016	3,0	0,30	mg/m ³	
∑ Xylole	diverse ^[1]	2015	0,80	0,10	mg/m ³	G
∑ Naphthalin und Naphthalin-ähnliche Verb.	diverse ^[1]	2013	30	10	µg/m ³	G
Ethylbenzol	100-41-4	2012	2,0	0,20	mg/m ³	
∑ C ₉ -C ₁₅ Alkylbenzole	diverse ^[1]	2012	1,0	0,10	mg/m ³	G
∑ Kresole	diverse ^[1]	2012	50	5,0	µg/m ³	G
Phenol	108-95-2	2011	0,20	0,020	mg/m ³	
Styrol	100-42-5	1998	0,30	0,030	mg/m ³	
Carbonsäuren						
Methansäure	64-18-6	2023	1,0	0,51	mg/m ³	
Ethansäure	64-19-7	2023	3,7	1,3	mg/m ³	
Propansäure	79-09-4	2023	1,6	0,78	mg/m ³	
Ester						
Methylmethacrylat	80-62-6	2021	2,1	1,1	mg/m ³	
Ethylacetat	141-78-6	2014	6,0	0,60	mg/m ³	
Tris(2-chlorethyl)phosphat (TCEP)	115-96-8	2002	50	5,0	µg/m ³	
Glykole / Glykoether / Glykolester						
2-Phenoxyethanol	122-99-6	2018	0,10	0,030	mg/m ³	

Ethylenglykolmonomethylether (EGME)	109-86-4	2013	0,20	0,020	mg/m ³	
Diethylenglykolmethylether (DEGME)	111-77-3	2013	6,0	2,0	mg/m ³	V
Diethylenglykoldimethylether (DEGDME)	111-96-6	2013	0,30	0,030	mg/m ³	
Ethylenglykolmonoethylether (EGEE)	110-80-5	2013	1,0	0,10	mg/m ³	
Ethylenglykolmonoethyletheracetat (EGEEA)	111-15-9	2013	2,0	0,20	mg/m ³	V
Diethylenglykolmonoethylether (DEGEE)	111-90-0	2013	2,0	0,70	mg/m ³	V
Ethylenglykolbutylether (EGBE)	111-76-2	2013	1,0	0,10	mg/m ³	
Ethylenglykolbutyletheracetat (EGBEA)	112-07-2	2013	2,0	0,20	mg/m ³	V
Diethylenglykolbutylether (DEGBE)	112-34-5	2013	1,0	0,40	mg/m ³	V
Ethylenglykolhexylether (EGHE)	112-25-4	2013	1,0	0,10	mg/m ³	
2-Propylenglykol-1-methylether (2PG1ME)	107-98-2	2013	10	1,0	mg/m ³	
Dipropylenglykol-1-methylether (D2PGME)	34590-94-8	2013	7,0	2,0	mg/m ³	V, S
2-Propylenglykol-1-ethylether (2PG1EE)	1569-02-4	2013	3,0	0,30	mg/m ³	
2-Propylenglykol-1-tertbutylether (2PG1tBE)	57018-52-7	2013	3,0	0,30	mg/m ³	
Default-Wert: Glykolether ^[1]	diverse ^[1]	2013	0,050	0,0050	ppm	V, [4]
Σ Glykolether	diverse ^[1]	2013	1 ^[1]	1 ^[1]	-	R
Halogenkohlenwasserstoffe						
Tetrachlorethen	127-18-4	2017	1,0	0,10	mg/m ³	
2-Chlorpropan	75-29-6	2015	8,0	0,80	mg/m ³	
Polychlorierte Biphenyle (PCB) ^[1]	diverse ^[1]	2007	[1]	[1]	mg/m ³	G
Dichlormethan	75-09-2	1997	2,0	0,20	mg/m ³	24 h
Pentachlorphenol (PCP)	87-86-5	1997	1,0	0,10	µg/m ³	
Ketone						
Acetophenon	98-86-2	2022	220	66	µg/m ³	
Aceton	67-64-1	2021	160	53	mg/m ³	
Methylisobutylketon	108-10-1	2013	1,0	0,10	mg/m ³	
Terpene						
Σ Monozyklische Monoterpene (Limonen) ^[1]	5989-27-5	2010	10	1,0	mg/m ³	S, L
Σ Bizyklische Terpene (α-Pinen, β-Pinen, 3-Caren) ^[1]	diverse ^[1]	2003	2,0	0,20	mg/m ³	L

Abbildung - Anhang 3.2-12 Richtwerte vom Ausschuss für Innenraumluftwerte (AIR)

Anhang 5 Fragebogen zur Nutzerbefragung

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Forschungsvorhaben: Waldmünchen



Fragenkatalog zur Erfassung des Nutzerkomforts

Allgemeine Fragen

Alter _____

Datum _____

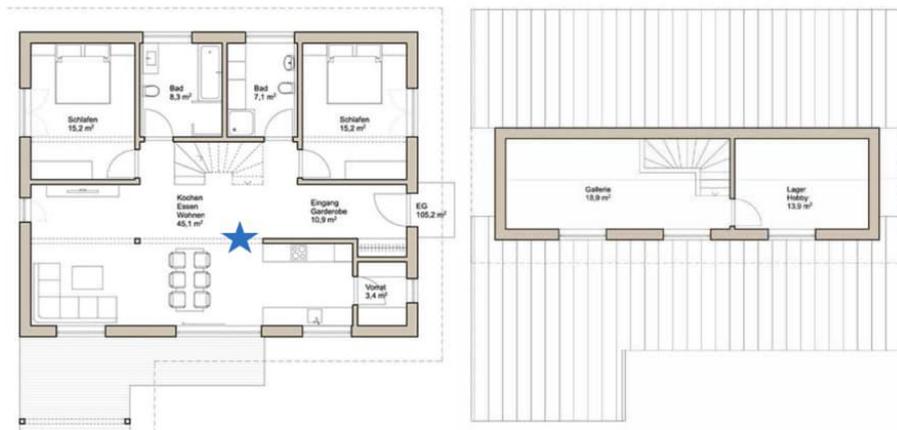
Uhrzeit _____

Hausnummer _____

Datum des Einzugs _____

Geschlecht männlich weiblich divers

Alle Angaben sollen sich auf den Bereich Kochen/Essen/Wohnen beziehen.





1. Wie fühlen Sie sich im Moment (einschließlich Gesundheit, Zufriedenheit)?

sehr gut		weder noch		sehr schlecht	keine Angabe
<input type="checkbox"/>					

2. Wie stark beeinträchtigen folgende Faktoren Ihr Wohlbefinden im Alltag?

	stark			gar nicht	keine Angabe
Beleuchtung	<input type="checkbox"/>				
Geräusche	<input type="checkbox"/>				
Temperatur	<input type="checkbox"/>				
Akustik	<input type="checkbox"/>				
Luftqualität	<input type="checkbox"/>				
Gerüche	<input type="checkbox"/>				

Sonstige und zwar: _____

3. Wie stark fühlen Sie sich im Moment durch das Raumklima (einschließlich der gesamten in Frage 2 genannten Faktoren) beeinträchtigt?

sehr stark				gar nicht	keine Angabe
<input type="checkbox"/>					

Temperaturverhältnisse

4. Wie empfinden Sie momentan die Temperatur?

zu kalt				zu warm	keine Angabe
<input type="checkbox"/>					



5. Wenn Sie an die letzten zwei Wochen zurückdenken: War Ihnen

	zu kalt			zu warm			keine Angabe
vormittags	<input type="checkbox"/>						
nachmittags	<input type="checkbox"/>						
nachts	<input type="checkbox"/>						

6. Wie war die Luft in den vergangenen zwei Wochen?

zu trocken				zu feucht		keine Angabe
<input type="checkbox"/>						

7. Wie stark empfanden Sie in den letzten zwei Wochen unangenehme Temperaturschwankungen im Tagesverlauf?

gar nicht	weder noch		sehr	keine Angabe
<input type="checkbox"/>				

8. Wie zufrieden waren Sie die vergangenen zwei Wochen insgesamt mit der Temperatur?

sehr unzufrieden	mittelmäßig		sehr zufrieden	keine Angabe
<input type="checkbox"/>				

9. Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit der Temperatur nachts im Schlafzimmer zu dieser Jahreszeit?

sehr unzufrieden	mittelmäßig		sehr zufrieden	keine Angabe
<input type="checkbox"/>				

Luftqualität

10. Wie oft haben Sie in den vergangenen zwei Wochen Zuglufterscheinungen im Alltag erlebt?

nie	manchmal		immer	keine Angabe
<input type="checkbox"/>				



11. Wie sehr beeinflussen Gerüche Ihr Wohlbefinden?

gar nicht		weder noch		stark		keine Angabe
<input type="checkbox"/>						

12. Wie oft nehmen Sie im Alltag unangenehme Gerüche wahr (abgesehen von selbst erzeugten Gerüchen durch Essen etc.)?

gar nicht		weder noch		immer		keine Angabe
<input type="checkbox"/>						

Und zwar: _____

13. Wie oft empfanden Sie während des Einzugs unangenehme Gerüche (abgesehen von selbst erzeugten Gerüchen durch Essen etc.)?

gar nicht		weder noch		immer		keine Angabe
<input type="checkbox"/>						

Und zwar: _____

14. Wie oft empfanden Sie während Renovierungsmaßnahmen unangenehme Gerüche (abgesehen von selbst erzeugten Gerüchen durch Essen etc.)?

gar nicht		weder noch		immer		keine Angabe
<input type="checkbox"/>						

und zwar: _____

15. Wie hatten Sie in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet?

- gar nicht
- auf Kippstellung
- maximaler Öffnungswinkel



16. Wann hatten Sie in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet?

- wenn mir zu warm ist
- wenn die Luft verbraucht war

Sonstiges: _____

17. Wann standen in den vergangenen zwei Wochen die Fenster offen?

	nie		manch mal		immer		keine Angabe
morgens	<input type="checkbox"/>						
vormittags	<input type="checkbox"/>						
mittags	<input type="checkbox"/>						
nachmittags	<input type="checkbox"/>						
nachts	<input type="checkbox"/>						

18. Wie zufrieden sind sie insgesamt in den letzten zwei Wochen mit der Luftqualität?
 (Bitte Grund für mittelmäßig bis sehr unzufrieden angeben.)

sehr unzufrieden		mittelmäßig			sehr zufrieden	keine Angabe
<input type="checkbox"/>						

Grund: _____

Lichtverhältnisse

19. Wie beurteilen Sie die Größe der Fenster?

zu klein		weder noch			zu groß	keine Angabe
<input type="checkbox"/>						

Sonstige Räume, und zwar: _____



20. Wie wichtig sind Ihnen in dieser Jahreszeit?

	gar nicht				sehr	keine Angabe
Der Ausblick nach draußen	<input type="checkbox"/>					
Das Wahrnehmen des Wetters	<input type="checkbox"/>					
Das Wahrnehmen des Sonnenstandes	<input type="checkbox"/>					

21. Wie empfinden Sie den Blick aus Ihrem Fenster in dieser Jahreszeit?

unangenehm	Weder noch		angenehm		keine Angabe
<input type="checkbox"/>					

22. Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit der Beleuchtungssituation durch Tageslicht?

sehr unzufrieden	mittelmäßig		sehr zufrieden		keine Angabe
<input type="checkbox"/>					

Sonstige Räume, und zwar: _____

Umgebungsgeräusche

23. Wie zufrieden sind sie mit der Akustik (Sprachverständlichkeit, Halligkeit etc.)?
 (Bitte den Grund für „mittelmäßig bis sehr unzufrieden“)

sehr unzufrieden	mittelmäßig		sehr zufrieden		keine Angabe
<input type="checkbox"/>					

Grund: _____

24. Wie oft nehmen Sie störende Geräusche wahr?

	gar nicht				immer	keine Angabe
tagsüber	<input type="checkbox"/>					
nachts	<input type="checkbox"/>					

und zwar (z.B. Verkehr etc.) _____



Lage und Gestaltung des Hauses

25. Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses?

	sehr unzufrieden		Weder noch		sehr zufrieden		keine Angabe
Verkehrsanbindungen	<input type="checkbox"/>						
Einkaufsmöglichkeiten	<input type="checkbox"/>						
Erholungsmöglichkeiten	<input type="checkbox"/>						
Aktivitäten	<input type="checkbox"/>						
Nachbarn	<input type="checkbox"/>						
Stadtviertel	<input type="checkbox"/>						
Insgesamt	<input type="checkbox"/>						
Sonstiges: _____	<input type="checkbox"/>						

26. Wie bewerten Sie die soziale Atmosphäre in Ihrer Umgebung?

sehr unfreundlich	mittelmäßig		sehr freundlich		keine Angabe
<input type="checkbox"/>					

27. Wie empfinden Sie Ihr Gebäude?

von außen								keine Angabe
	unästhetisch	<input type="checkbox"/>	ästhetisch	<input type="checkbox"/>				
	langweilig	<input type="checkbox"/>	interessant	<input type="checkbox"/>				
von innen								
	unästhetisch	<input type="checkbox"/>	ästhetisch	<input type="checkbox"/>				
	beengt	<input type="checkbox"/>	geräumig	<input type="checkbox"/>				
	langweilig	<input type="checkbox"/>	interessant	<input type="checkbox"/>				



28. Wie wirken die verwendeten Naturmaterialien (Naturstein, Massivholz) in Ihrem Alltag auf sie?

	trifft nicht zu		weder noch		trifft zu		keine Angabe
angenehm	<input type="checkbox"/>						
beruhigend	<input type="checkbox"/>						
gesund	<input type="checkbox"/>						
Sauber/rein	<input type="checkbox"/>						
langweilig	<input type="checkbox"/>						

Gesundheitliche Beschwerden

29. Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter den folgenden Beschwerden?

	nie			immer			keine Angabe
Rasche Ermüdung	<input type="checkbox"/>						
Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>						
Trockene Nase	<input type="checkbox"/>						
Trockene Augen	<input type="checkbox"/>						
Halsschmerzen	<input type="checkbox"/>						
Laufende Nase	<input type="checkbox"/>						
Tränende Augen	<input type="checkbox"/>						
Verspannungen:wo?_____	<input type="checkbox"/>						
Generelles Unwohlsein	<input type="checkbox"/>						
Konzentrationsschwäche	<input type="checkbox"/>						
Allergie:welche?_____	<input type="checkbox"/>						
Sonstiges_____	<input type="checkbox"/>						

30. Litten Sie nach dem Einzug an diesen Symptomen?

ja, welche? _____ nein keine Angabe



31. Litten Sie nach Renovierungsmaßen an diesen Symptomen?

ja, welche? _____ nein keine Angabe

32. Wie entwickelten sich diese Symptome im Laufe der Tage?

	verschlechtert				verbessert		keine Angabe
Einzug	<input type="checkbox"/>						
Renovierung	<input type="checkbox"/>						

33. Haben Sie im Moment eine akute oder chronische Erkrankung?

Ja, akut ja, chronisch nein keine Angabe

34. Wie zufrieden sind Sie alles in allem mit Ihrem Komfort?

sehr unzufrieden	mittelmäßig		sehr zufrieden		keine Angabe
<input type="checkbox"/>					

35. Haben Sie bei der Beantwortung der Fragen (insbesondere der Temperaturverhältnisse) nur die letzten zwei Wochen berücksichtigt?

nur die letzten zwei Wochen oder einen kürzeren Zeitraum

mehr als zwei Wochen innerhalb dieser Jahreszeit

36. Waren die vergangenen zwei Wochen Ihrer Meinung nach von den Witterungsverhältnissen und der Raumklimasituation in Ihrem Haus repräsentativ für diese Jahreszeit?

ja

nein

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Forschungsvorhaben: Waldmünchen



Anmerkungen

Mängel an oder in dem Gebäude:

Positive Anmerkungen:

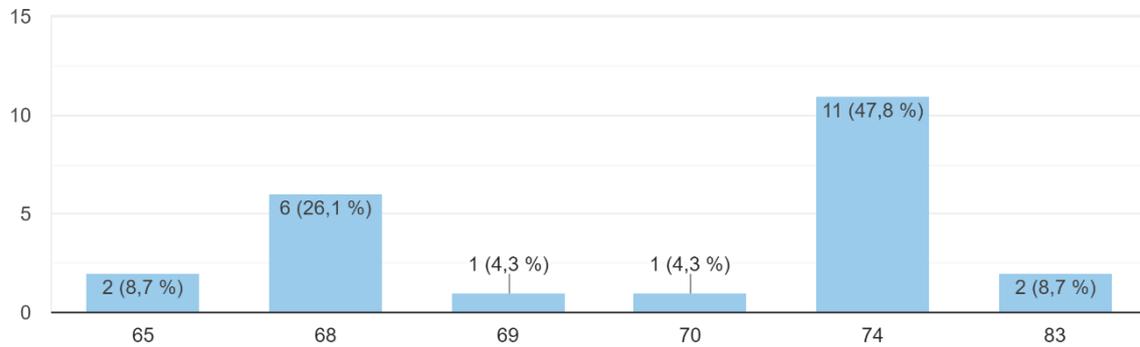
Sonstiges (z.B. Kommentare zum Fragebogen):

Vielen Dank für das Ausfüllen des Fragebogens!

Anhang 6 Auswertung - Nutzerbefragung zum Komfort

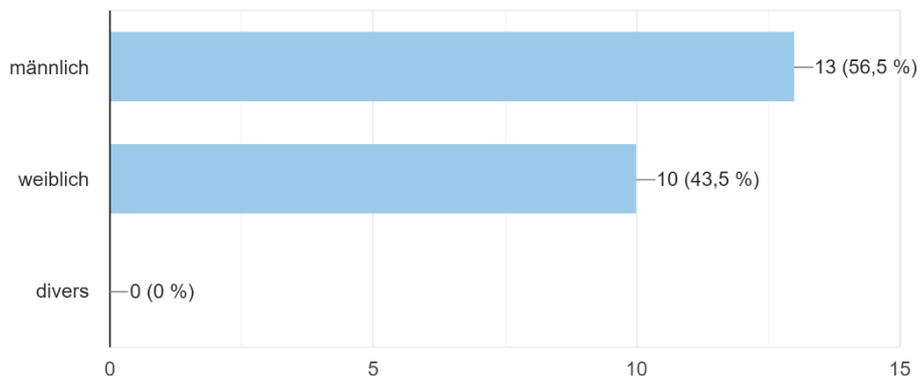
Alter

23 Antworten



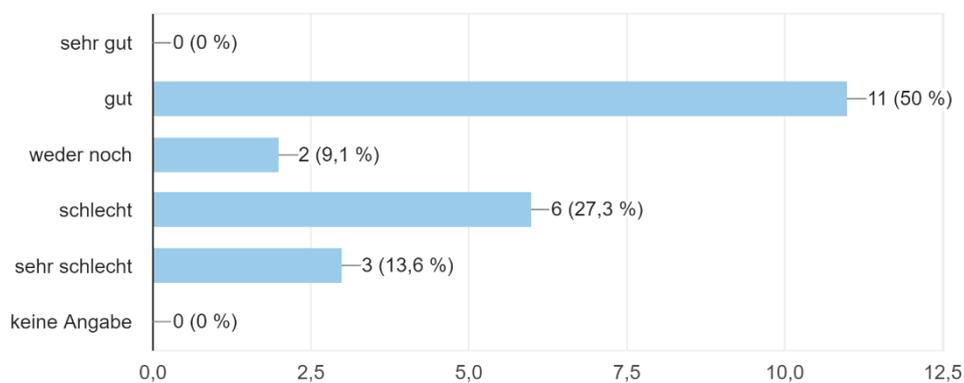
Geschlecht

23 Antworten



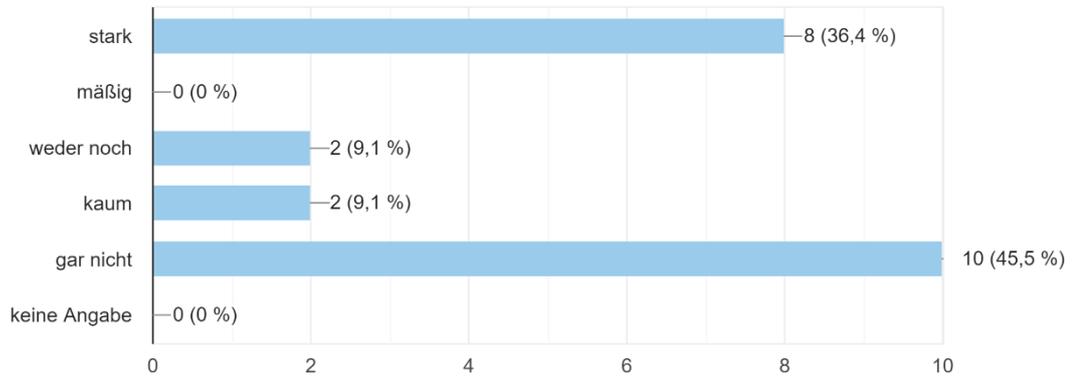
Wie fühlen Sie sich im Moment (einschließlich Gesundheit, Zufriedenheit)?

22 Antworten



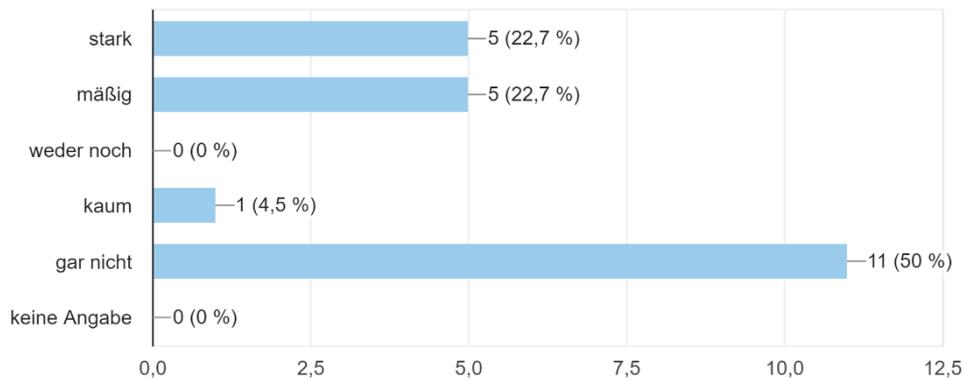
Wie stark beeinträchtigt die Beleuchtung Ihr Wohlbefinden im Alltag?

22 Antworten



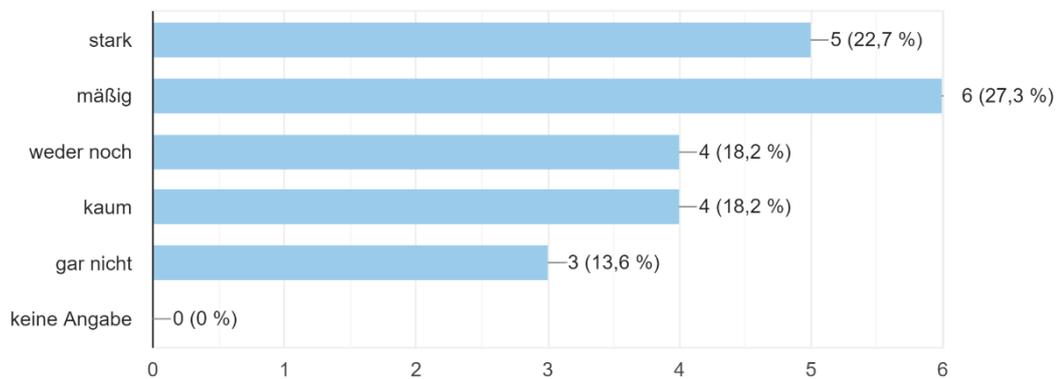
Wie stark beeinträchtigen Geräusche Ihr Wohlbefinden im Alltag?

22 Antworten



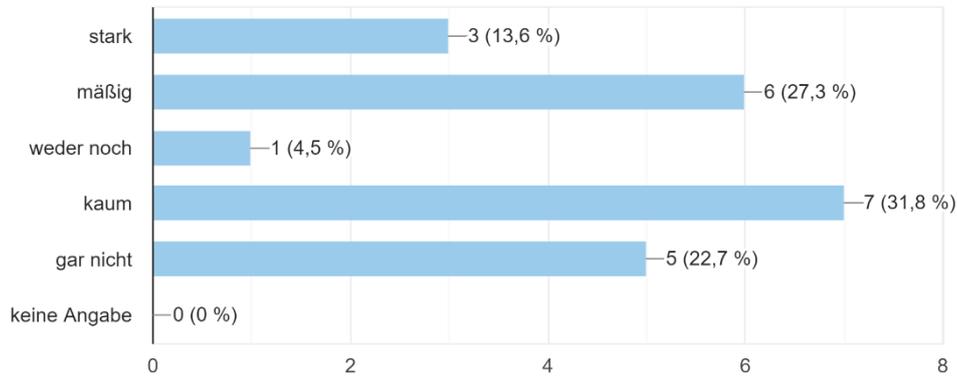
Wie stark beeinträchtigt die Temperatur Ihr Wohlbefinden im Alltag?

22 Antworten



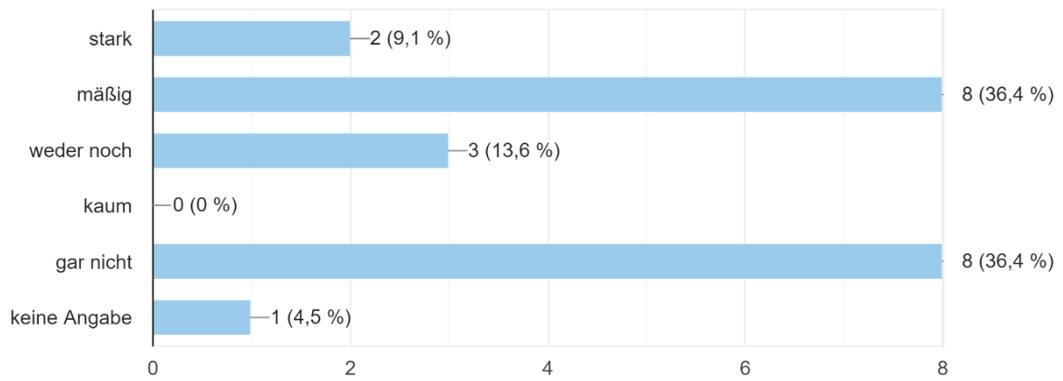
Wie stark beeinträchtigt die Akustik Ihr Wohlbefinden im Alltag?

22 Antworten



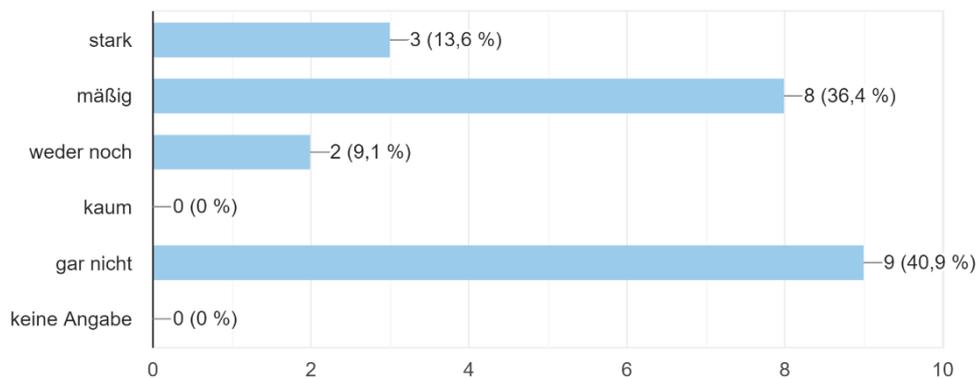
Wie stark beeinträchtigt die Luftqualität Ihr Wohlbefinden im Alltag?

22 Antworten



Wie stark beeinträchtigen Gerüche Ihr Wohlbefinden?

22 Antworten



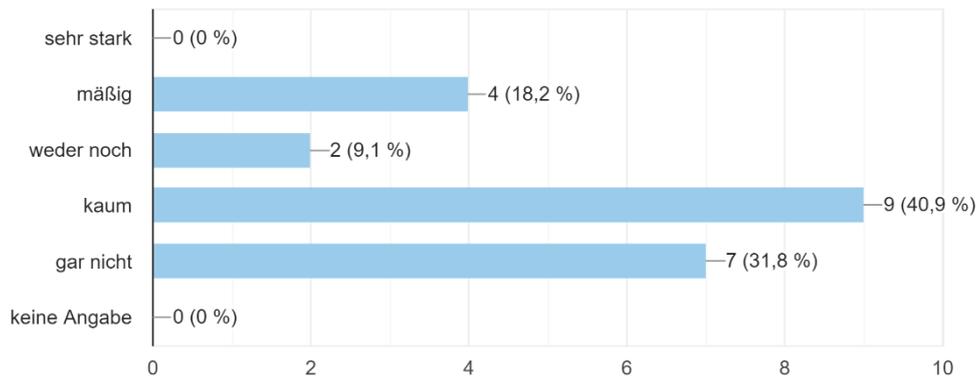
Sonstige und zwar

1 Antwort

Es dürfte im Übergang/Winter abends wärmer sein

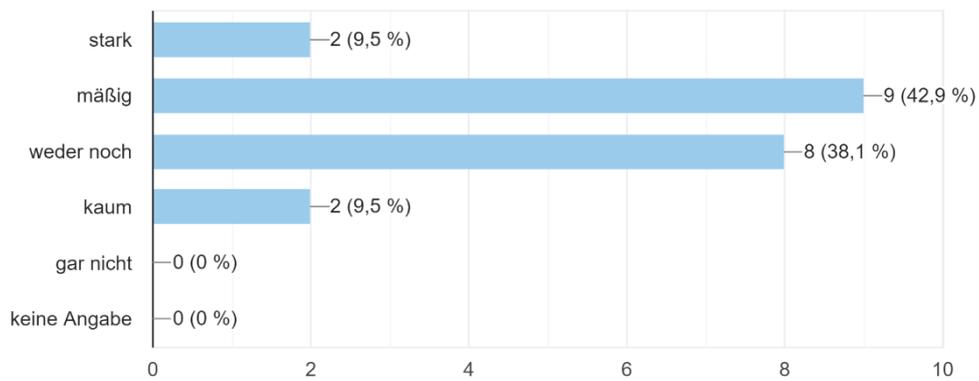
Wie stark fühlen Sie sich im Moment durch das Raumklima (einschließlich der gesamten vorherigen Frage genannten Faktoren) beeinträchtigt?

22 Antworten



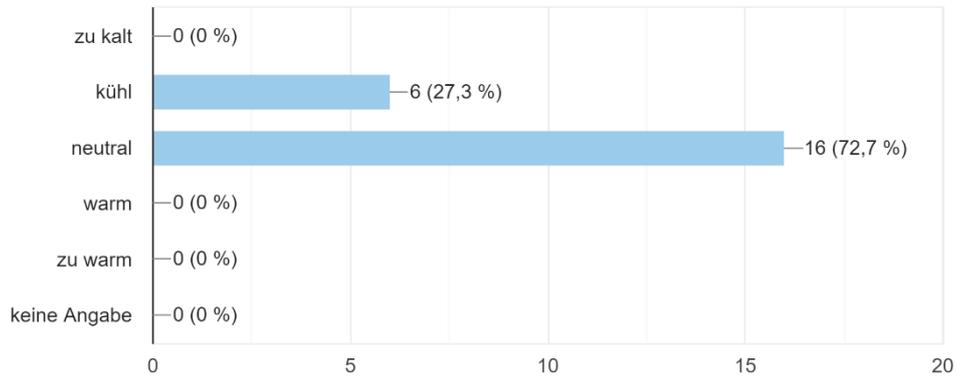
Wie empfinden Sie momentan die Temperatur?

21 Antworten



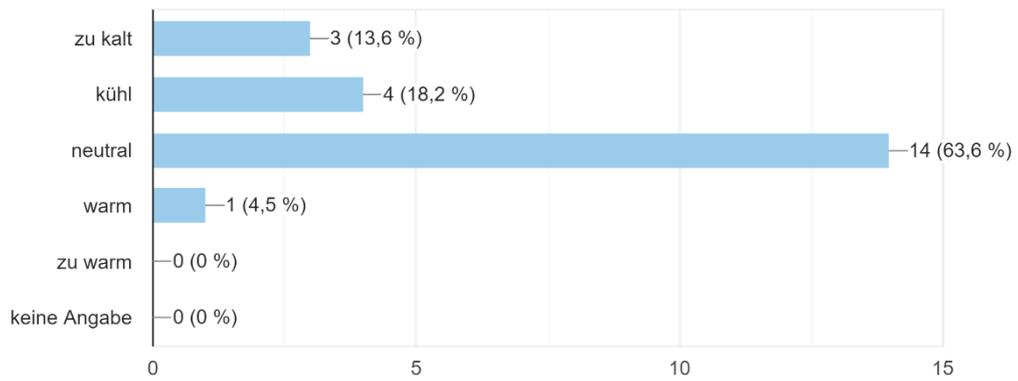
Wenn Sie an die letzten zwei Wochen zurückdenken: War Ihnen vormittags

22 Antworten



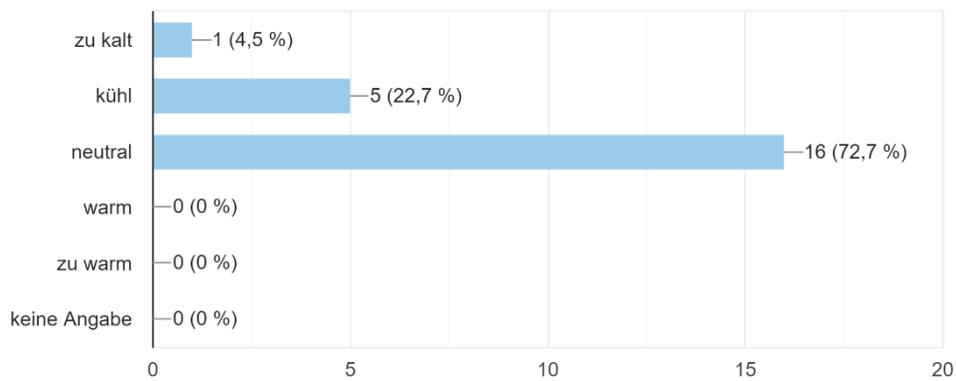
Wenn Sie an die letzten zwei Wochen zurückdenken: War Ihnen nachmittags

22 Antworten



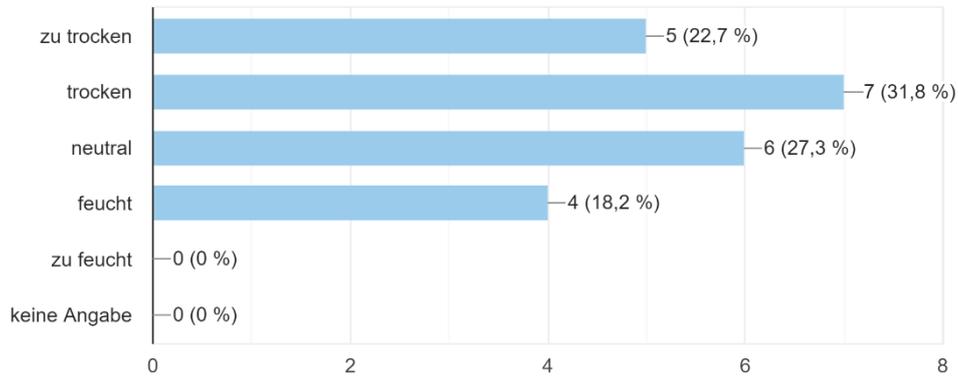
Wenn Sie an die letzten zwei Wochen zurückdenken: War Ihnen nachts

22 Antworten



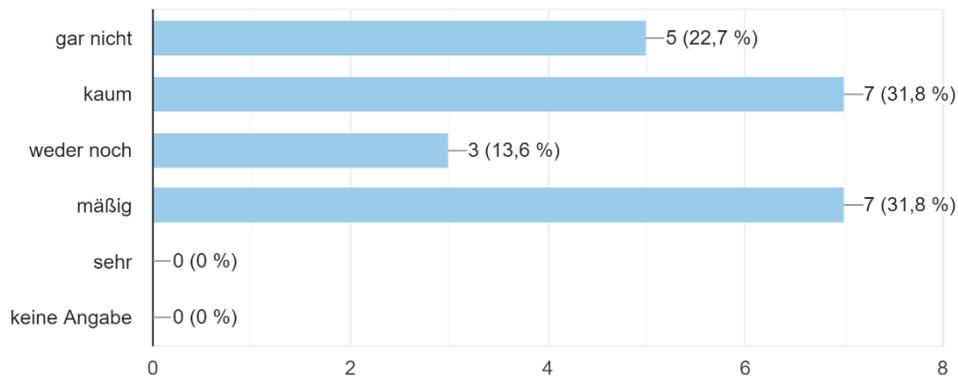
Wie war die Luft in den vergangenen zwei Wochen?

22 Antworten



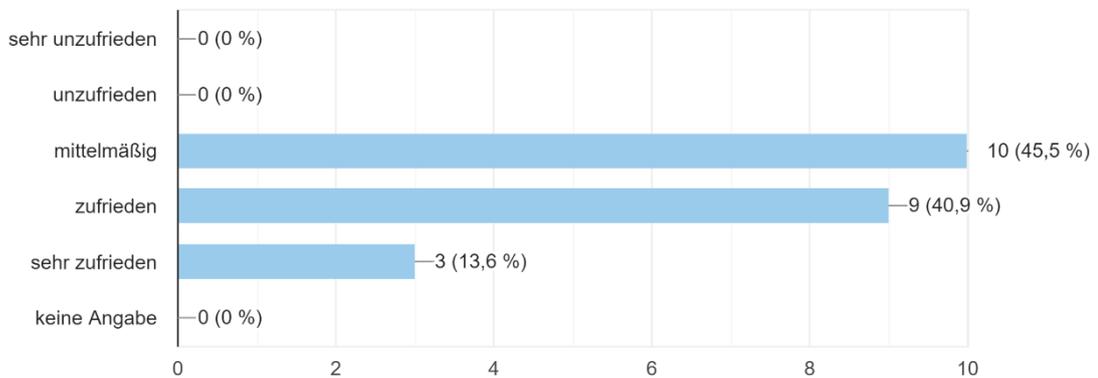
Wie stark empfanden Sie in den letzten zwei Wochen unangenehme Temperaturschwankungen im Tagesverlauf?

22 Antworten



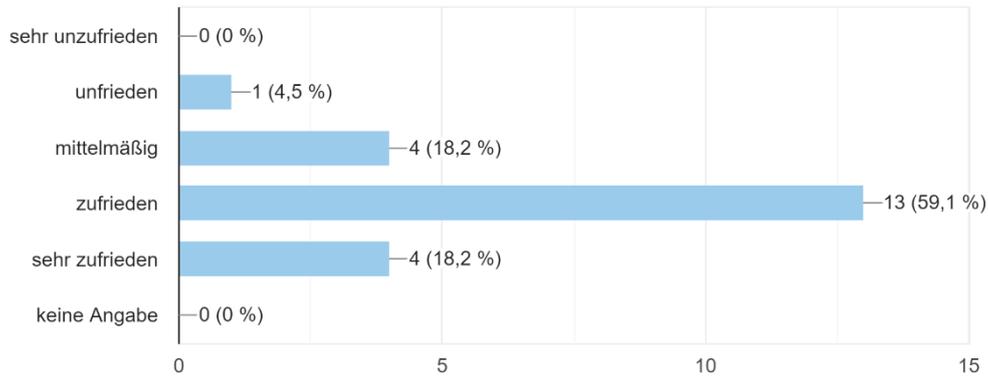
Wie zufrieden waren Sie die vergangenen zwei Wochen insgesamt mit der Temperatur?

22 Antworten



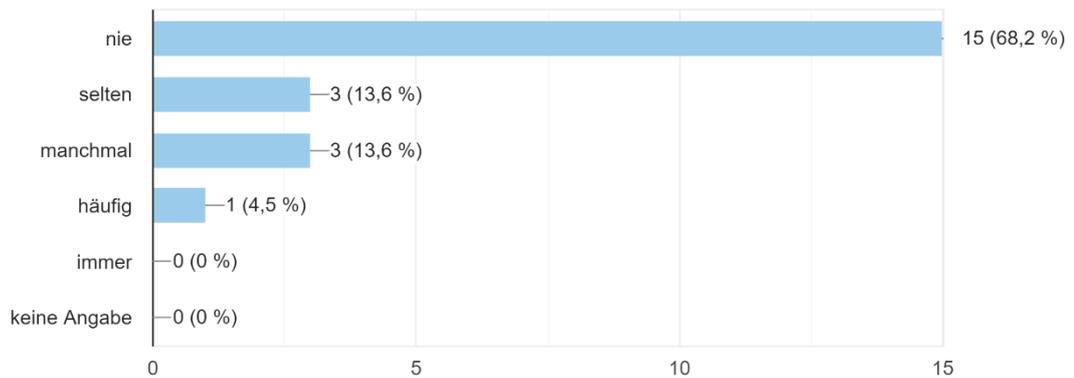
Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit der Temperatur nachts im Schlafzimmer zu dieser Jahreszeit?

22 Antworten



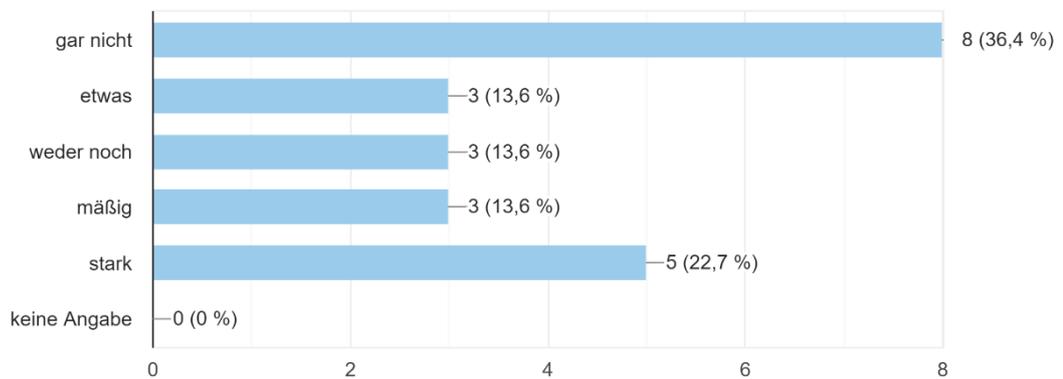
Wie oft haben Sie in den vergangenen zwei Wochen Zuglufterscheinungen im Alltag erlebt?

22 Antworten



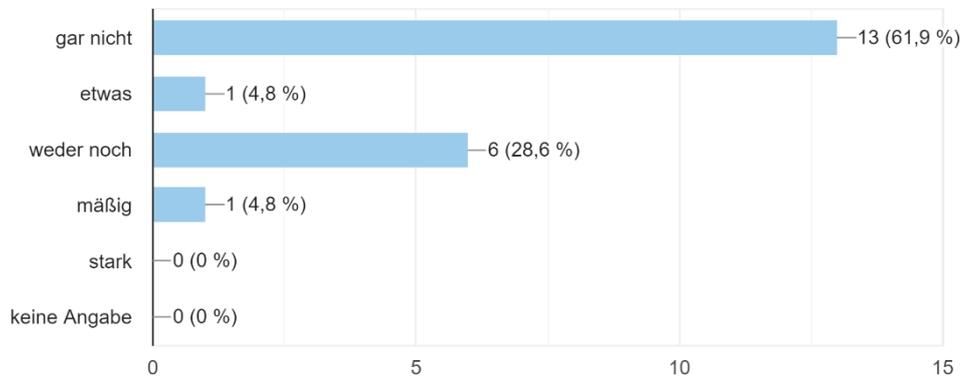
Wie sehr beeinflussen Gerüche Ihr Wohlbefinden?

22 Antworten



Wie oft nehmen Sie im Alltag unangenehme Gerüche wahr (abgesehen von selbst erzeugten Gerüchen durch Essen etc.)?

21 Antworten



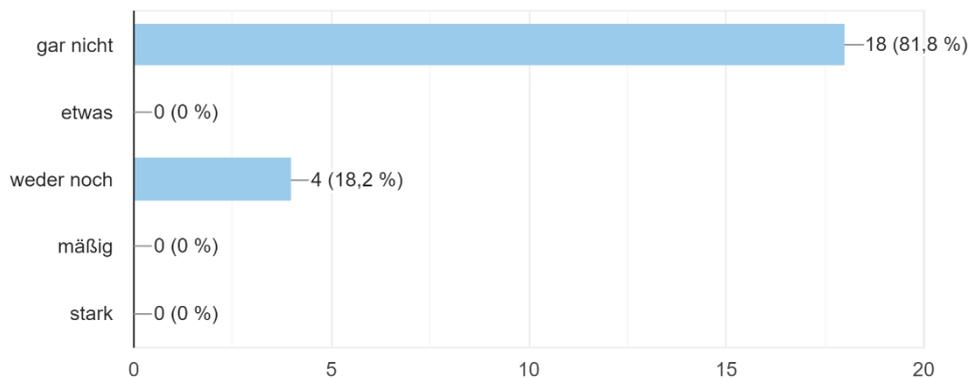
Welche Gerüche nehmen Sie wahr

5 Antworten

- angenehmer Holzgeruch
- Essen, Spülmaschine
- Schlafzimmer neu - Vollholz
- Rauch durch Holzfeuerung in der Nachbarschaft
- "Gülle"?

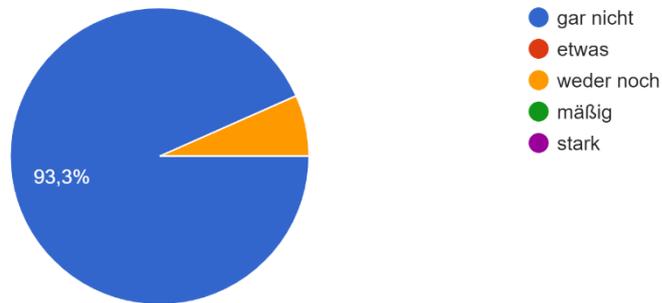
Wie oft empfanden Sie während des Einzugs unangenehme Gerüche (abgesehen von selbst erzeugten Gerüchen durch Essen etc.)?

22 Antworten



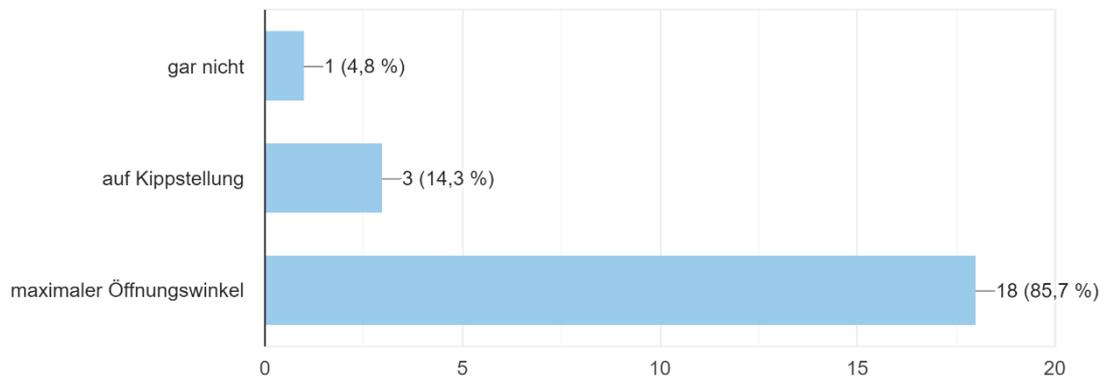
Wie oft empfanden Sie nach dem Einzug unangenehme Gerüche (abgesehen von selbst erzeugten Gerüchen durch Essen etc.)?

15 Antworten

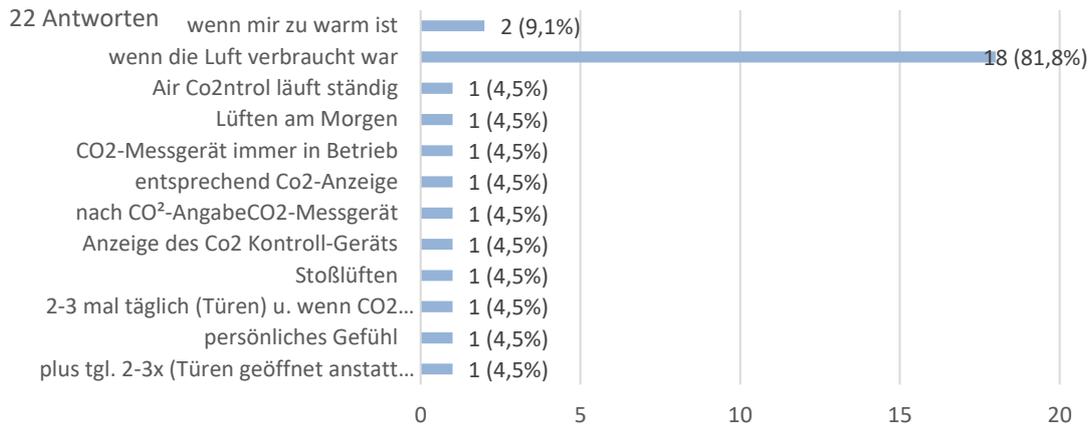


Wie hatten Sie in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet?

21 Antworten

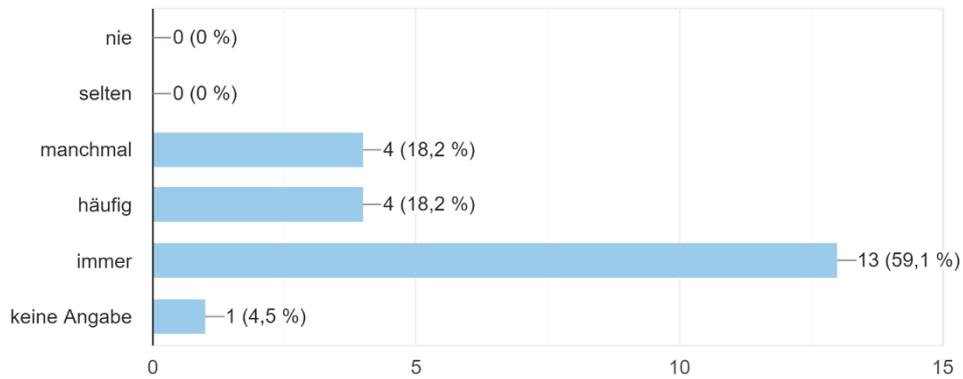


Wann hatten Sie in den letzten zwei Wochen die Fenster hauptsächlich geöffnet?



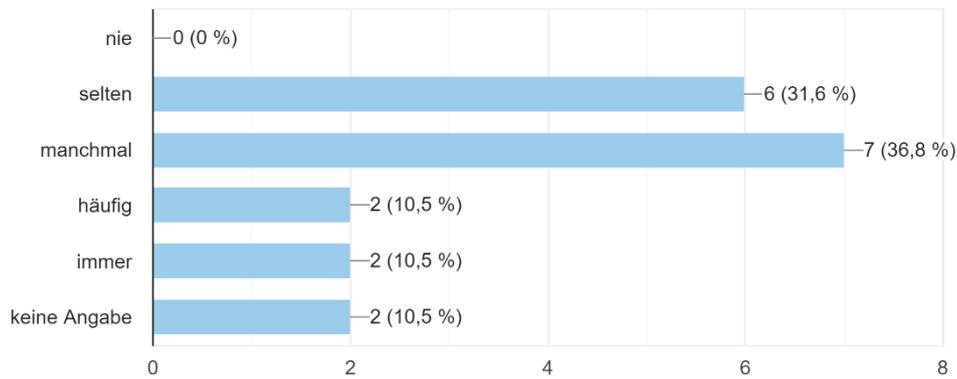
Wann standen in den vergangenen zwei Wochen morgens die Fenster offen?

22 Antworten



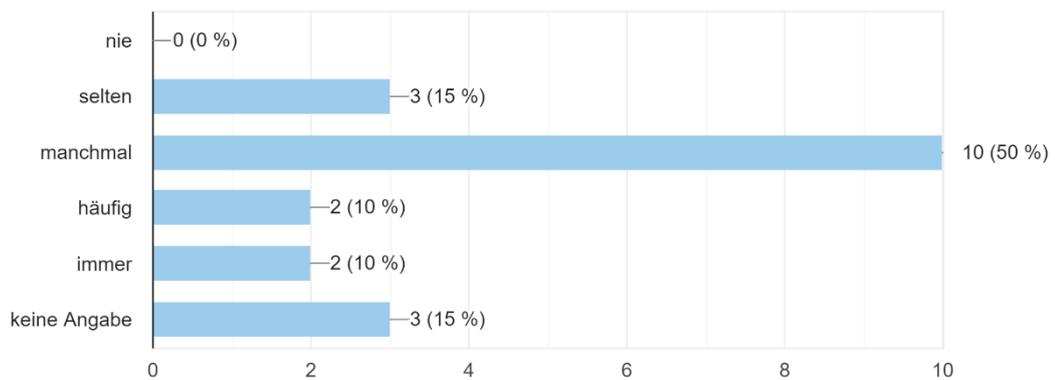
Wann standen in den vergangenen zwei Wochen vormittags die Fenster offen?

19 Antworten



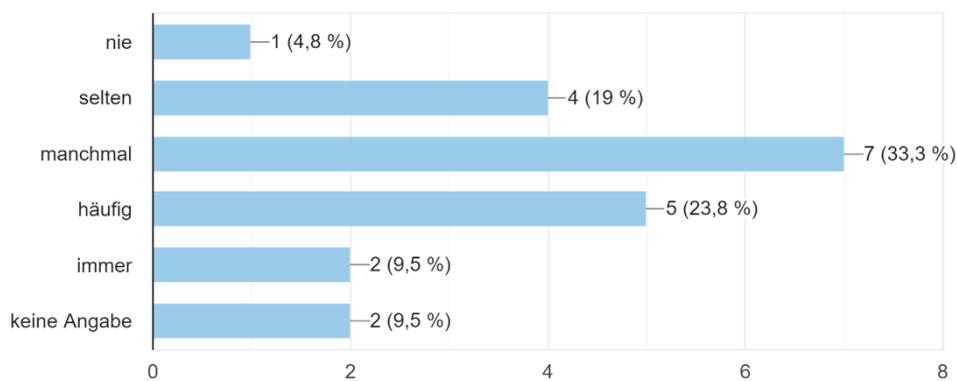
Wann standen in den vergangenen zwei Wochen mittags die Fenster offen?

20 Antworten



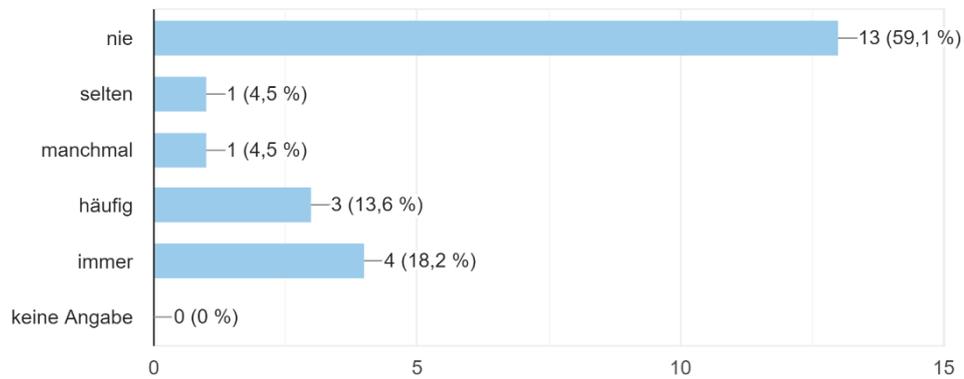
Wann standen in den vergangenen zwei Wochen nachmittags die Fenster offen?

21 Antworten



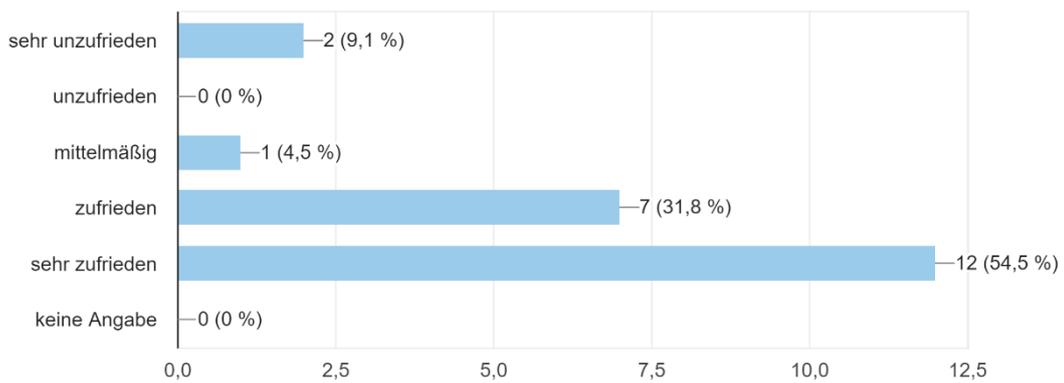
Wann standen in den vergangenen zwei Wochen nachts die Fenster offen?

22 Antworten



Wie zufrieden sind sie insgesamt in den letzten zwei Wochen mit der Luftqualität?

22 Antworten



Bitte Grund für mittelmäßig bis sehr unzufrieden mit Luftqualität angeben.

3 Antworten

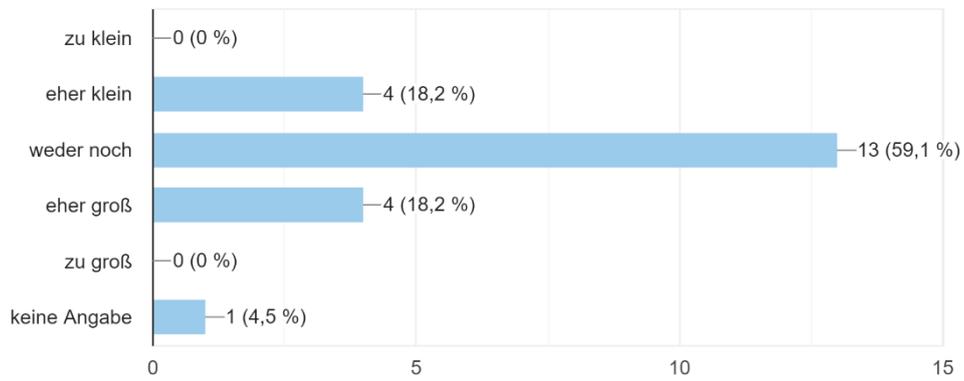
Es ist Winter mit -3 bis -12 grad

Wenn es draußen kalt ist, kann ich nicht so oft die Fenster alle Stunde öffnen, sehr ungemütlich

die Luft ist sehr trocken, Hölzer haben Risse bekommen

Wie beurteilen Sie die Größe der Fenster?

22 Antworten



Sonstige Räume, und zwar:

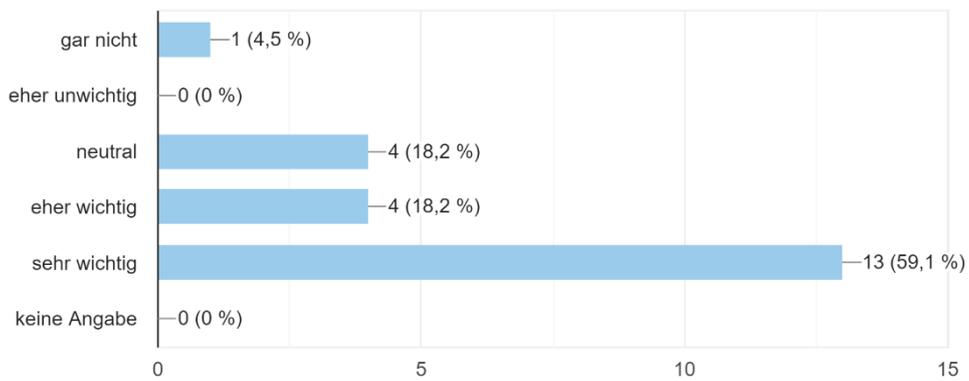
2 Antworten

angemessene Fenstergröße in allen Räumen

Die Fenster sind überall ok

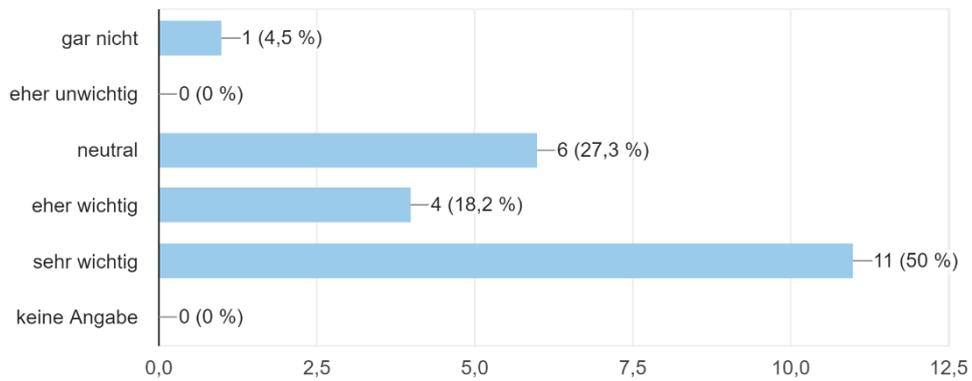
Wie wichtig ist Ihnen in dieser Jahreszeit der Ausblick nach draußen?

22 Antworten



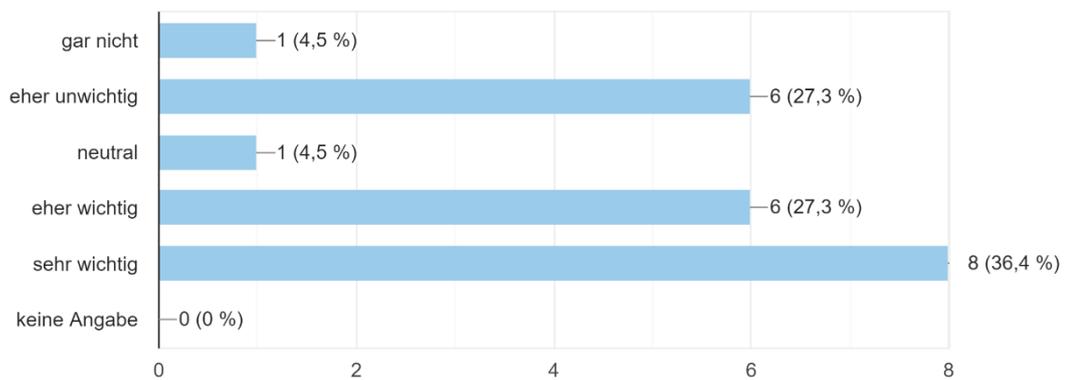
Wie wichtig ist Ihnen in dieser Jahreszeit das Wahrnehmen des Wetters?

22 Antworten



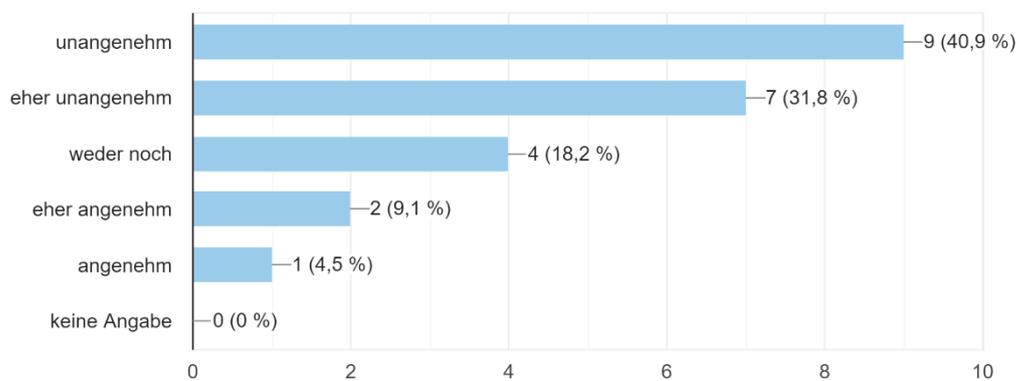
Wie wichtig ist Ihnen in dieser Jahreszeit das Wahrnehmen des Sonnenstandes?

22 Antworten



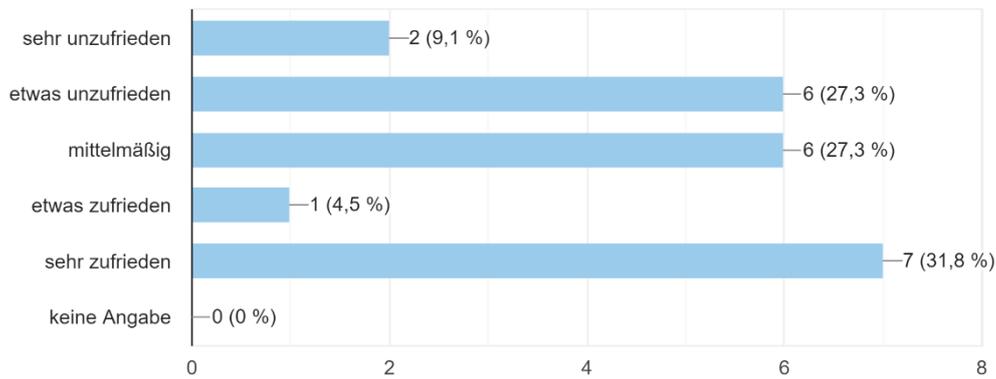
Wie empfinden Sie den Blick aus Ihrem Fenster in dieser Jahreszeit?

22 Antworten



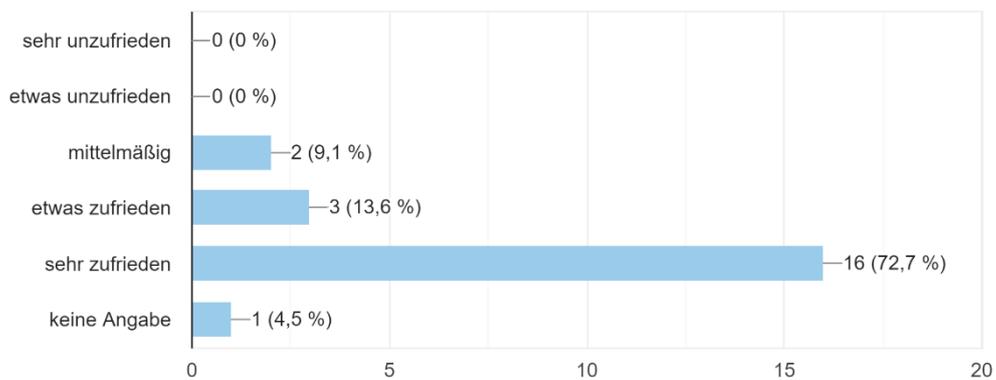
Wie zufrieden sind Sie insgesamt mit der Beleuchtungssituation durch Tageslicht?

22 Antworten



Wie zufrieden sind sie mit der Akustik (Sprachverständlichkeit, Halligkeit etc.)?

22 Antworten



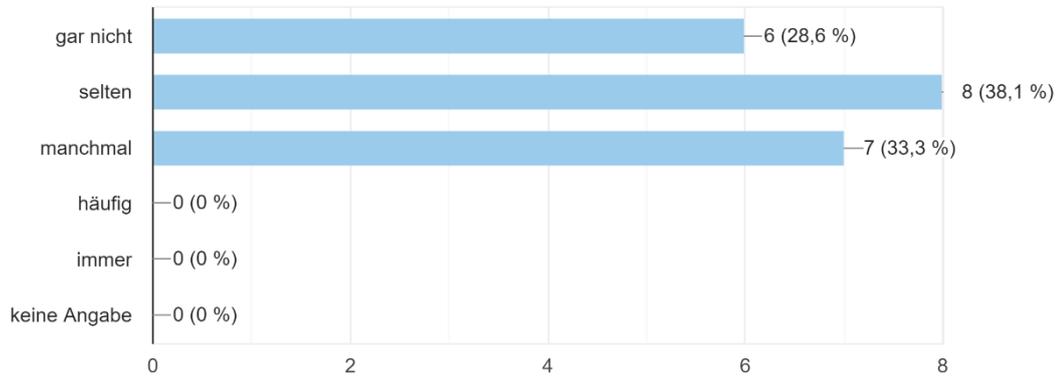
Bitte nennen Sie den Grund für Ihre Unzufriedenheit, wenn Sie die Akustik mit „mittelmäßig bis sehr unzufrieden“ beurteilt haben.

1 Antwort

Wir tragen Hörgeräte

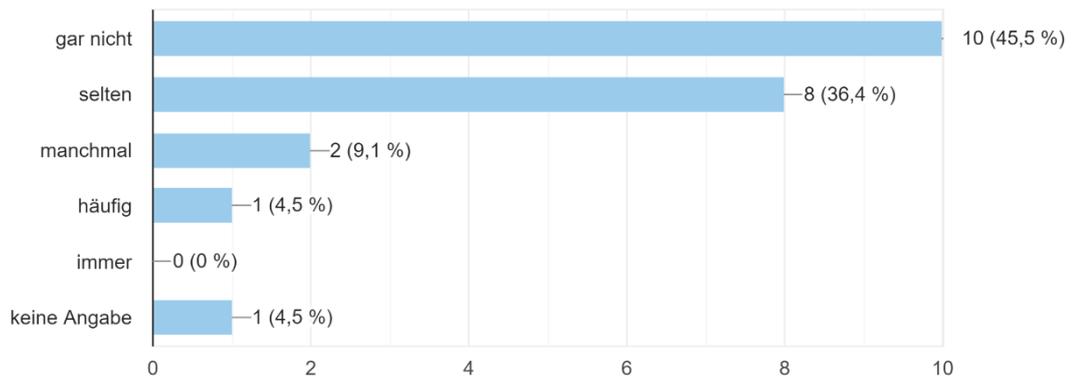
Wie oft nehmen Sie tagsüber störende Geräusche wahr?

21 Antworten



Wie oft nehmen Sie nachts störende Geräusche wahr?

22 Antworten



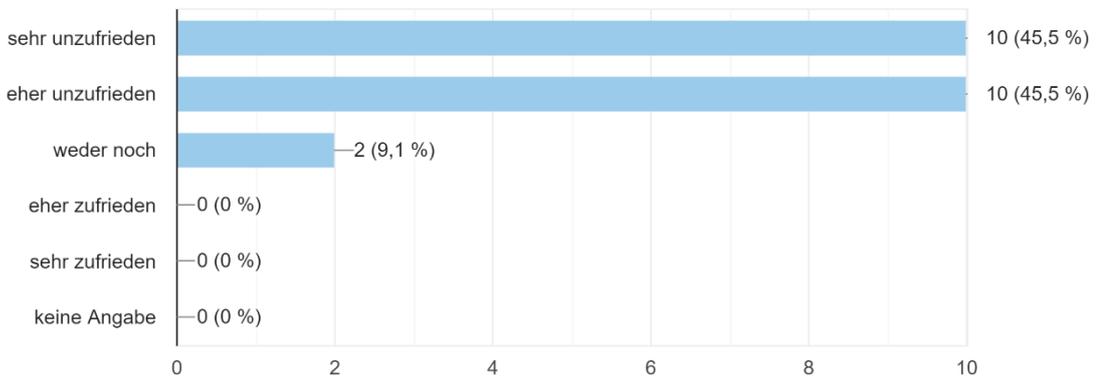
Welche störenden Geräusche nehmen Sie wahr?

11 Antworten

- Straßenverkehr
- einparkende Fahrzeuge
- Bau-und Gartenarbeiten in der Nachbarschaft
- Seniorenpark liegt in der Flugschneise
- Flugschneise

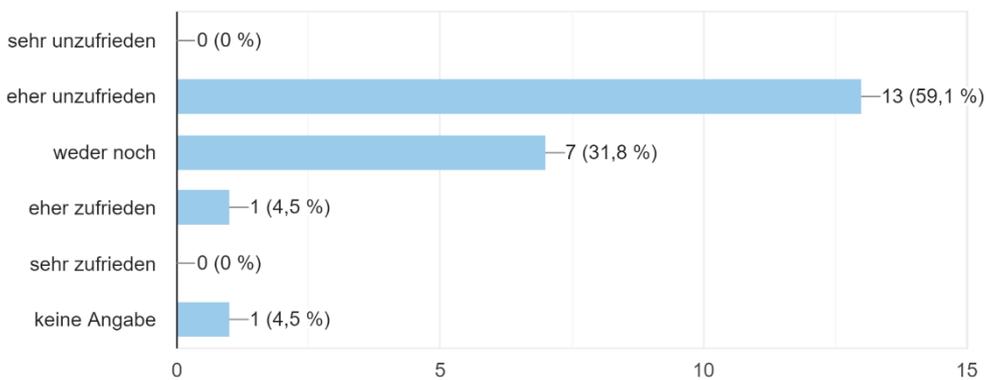
Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses bezüglich der Verkehrsanbindungen?

22 Antworten



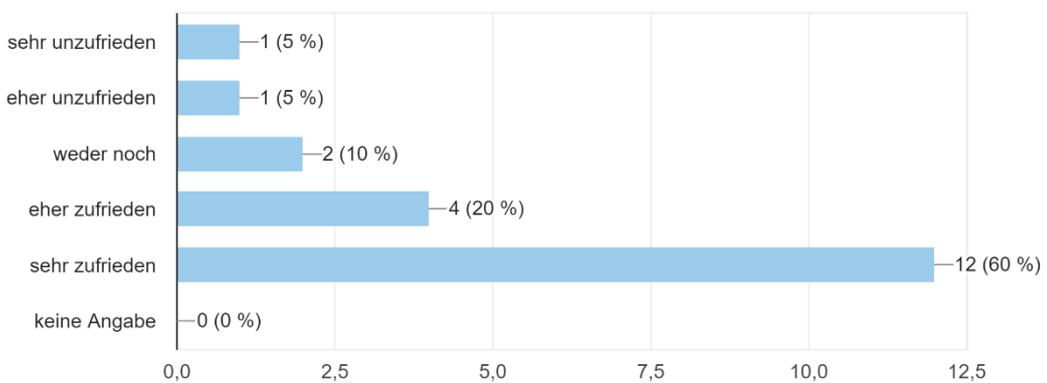
Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses bezüglich der Einkaufsmöglichkeiten?

22 Antworten



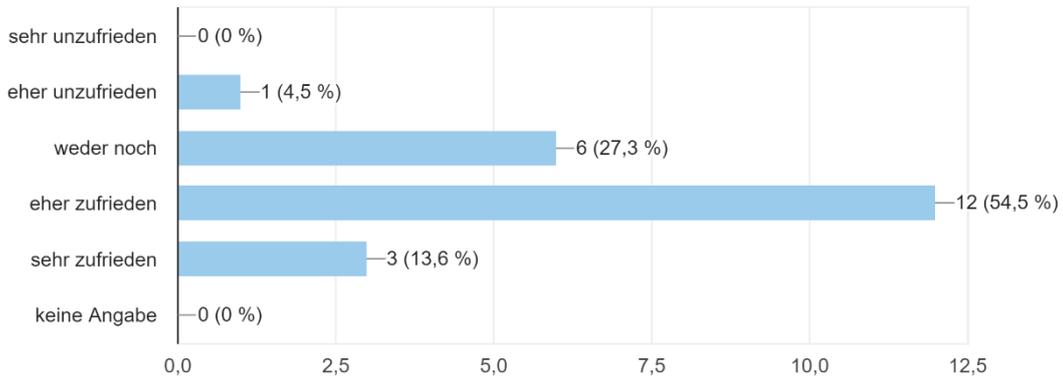
Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses bezüglich der Erholungsmöglichkeiten?

20 Antworten



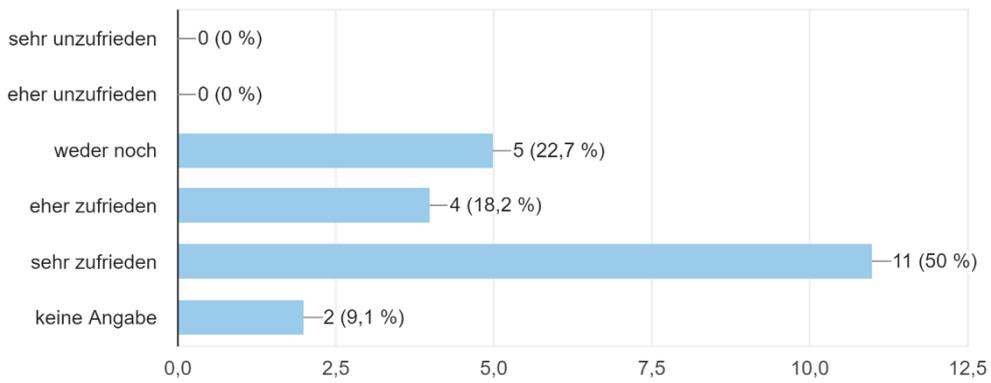
Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses bezüglich der Aktivitäten?

22 Antworten



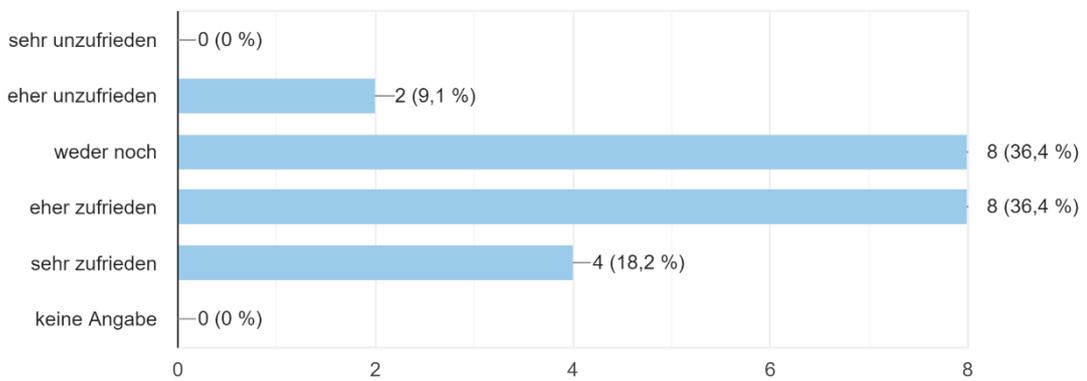
Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses bezüglich der Nachbarn?

22 Antworten



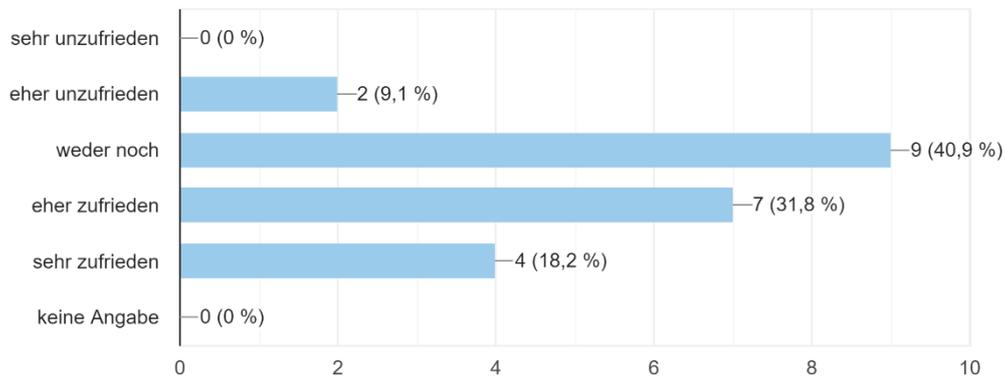
Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses bezüglich des Stadtviertels?

22 Antworten



Wie zufrieden sind Sie mit der Lage des Hauses insgesamt?

22 Antworten



Sonstiges:

13 Antworten

Sehr schlechter Anschluß an den ÖPNV.

zu steil am Hang für Senioren

Ausblick mäßig

Lage sehr ruhig

Anbindung an den ÖPNV

an 2 Seiten von Straße umgeben, kaum Fernblick

ÖPNV-Anschluß

Straßen an zwei Fronten

Das Haus liegt am Hang, für uns alte Leute nicht seniorengerecht

schlechte Straßenzustände, trotz Schild "Gesperrt für Fahrzeuge aller Art" fahren Einheimische, Zusteller die Schächtlstraße entlang und schleudern Steine an unsere Autos

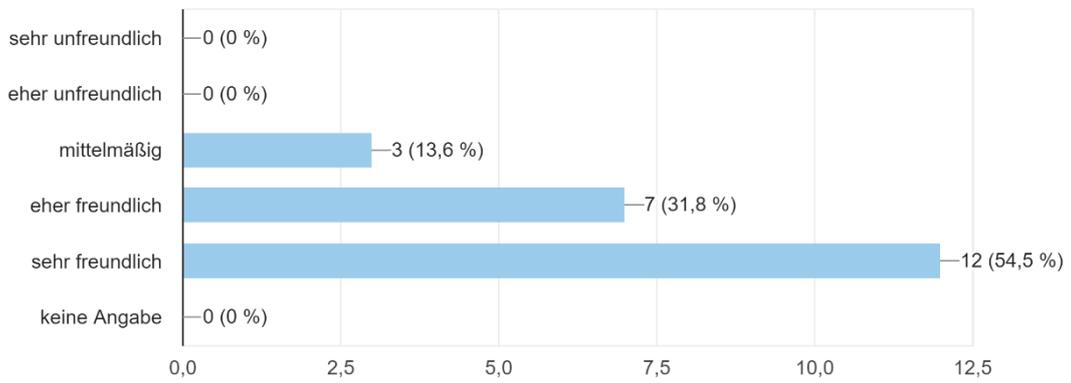
direkt von 2 angrenzenden Straßen umgeben

an zwei Seiten führt Straße vorbei (davon eine Stichstraße)

Grundstück ist von 2 Straßen begrenzt

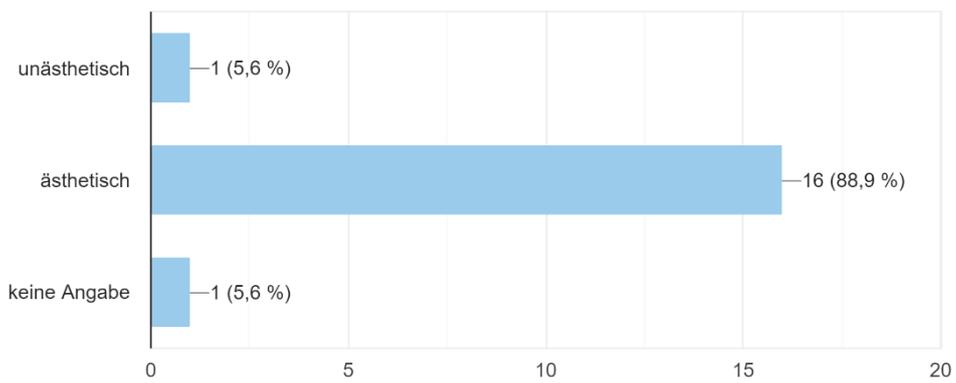
Wie bewerten Sie die soziale Atmosphäre in Ihrer Umgebung?

22 Antworten



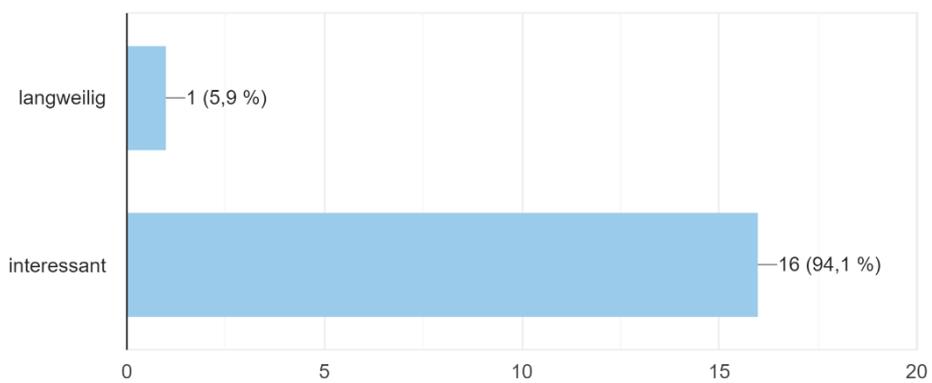
Wie empfinden Sie Ihr Gebäude von außen?

18 Antworten



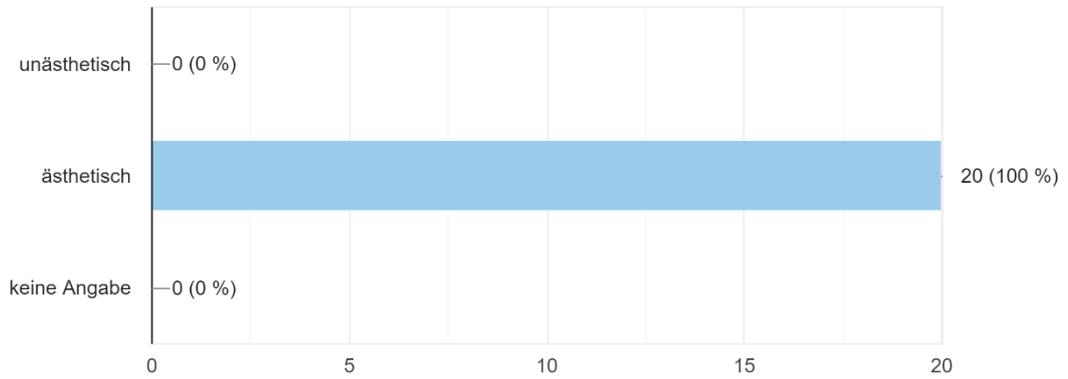
Wie empfinden Sie Ihr Gebäude von außen?

17 Antworten



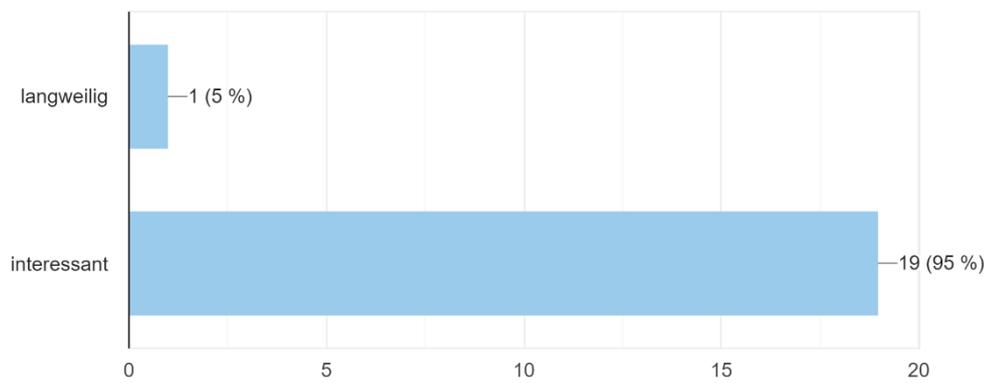
Wie empfinden Sie Ihr Gebäude von innen?

20 Antworten



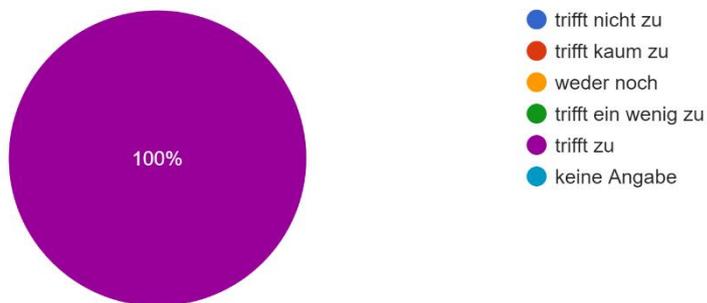
Wie empfinden Sie Ihr Gebäude von innen?

20 Antworten



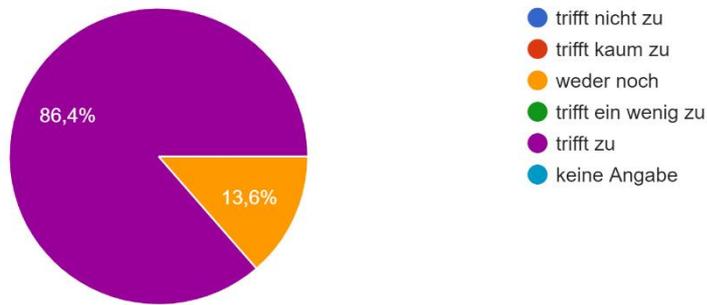
Wirken die verwendeten Naturmaterialien (Naturstein, Holz) in Ihrem Alltag auf Sie angenehm?

22 Antworten



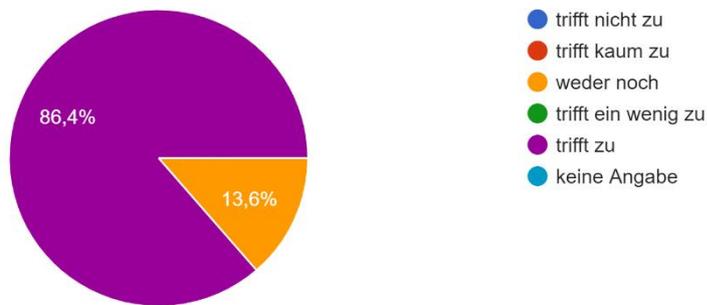
Wirken die verwendeten Naturmaterialien (Naturstein, Holz) in Ihrem Alltag auf Sie beruhigend?

22 Antworten



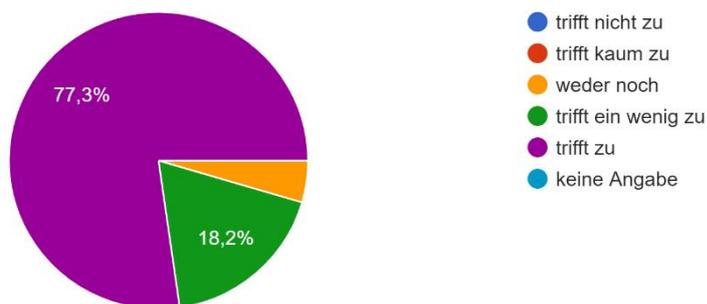
Wirken die verwendeten Naturmaterialien (Naturstein, Holz) in Ihrem Alltag auf Sie gesund?

22 Antworten



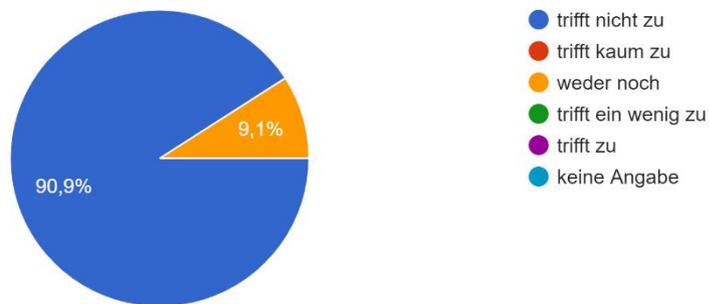
Wirken die verwendeten Naturmaterialien (Naturstein, Holz) in Ihrem Alltag auf Sie sauber/rein?

22 Antworten



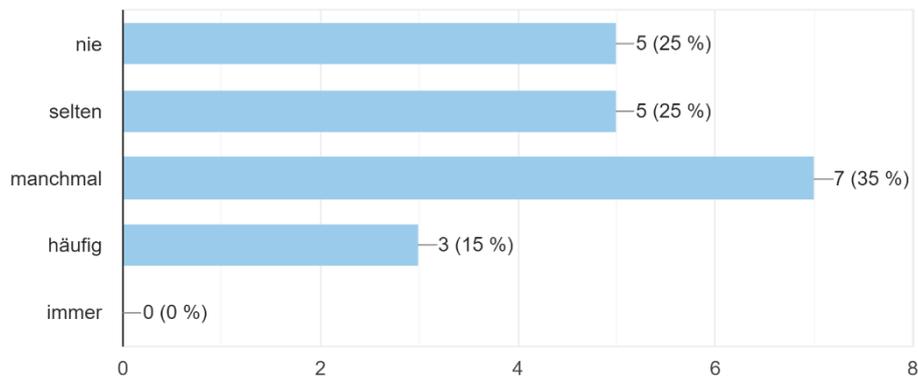
Wirken die verwendeten Naturmaterialien (Naturstein, Holz) in Ihrem Alltag auf Sie langweilig?

22 Antworten



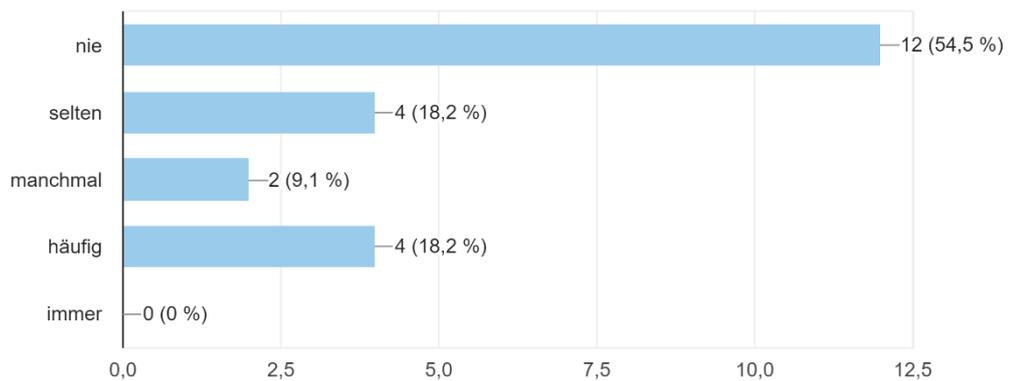
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter rascher Ermüdung?

20 Antworten



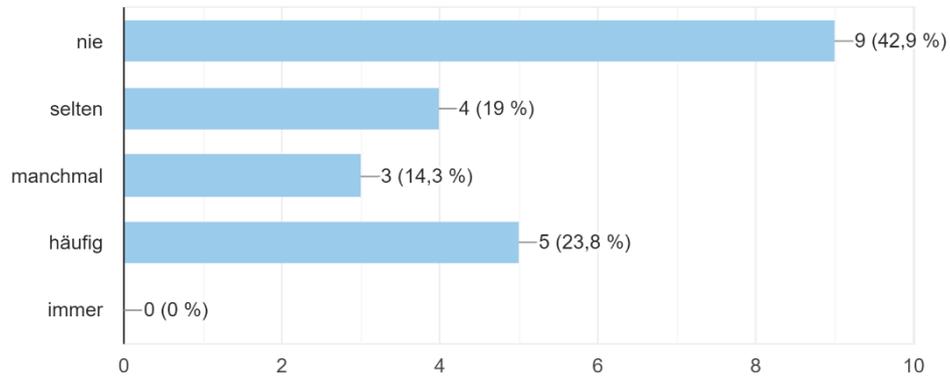
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter Kopfschmerzen?

22 Antworten



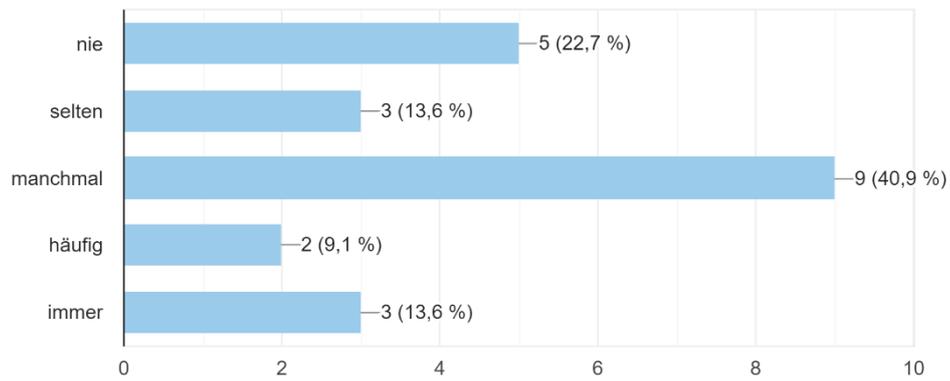
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter trockene Nase?

21 Antworten



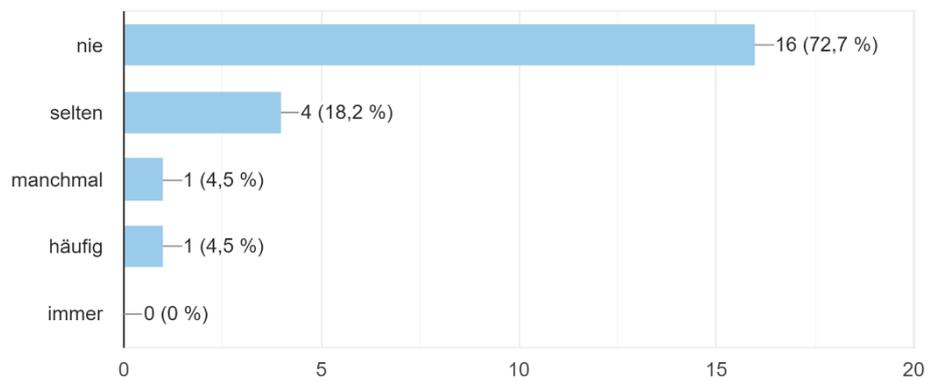
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter trockene Augen?

22 Antworten



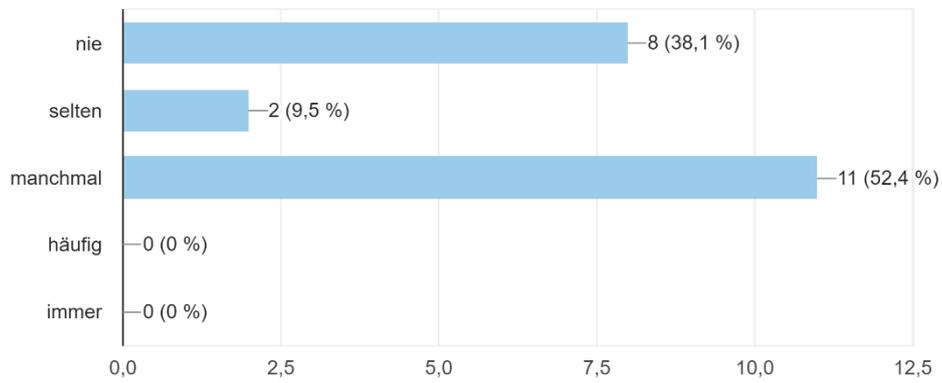
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter Halsschmerzen?

22 Antworten



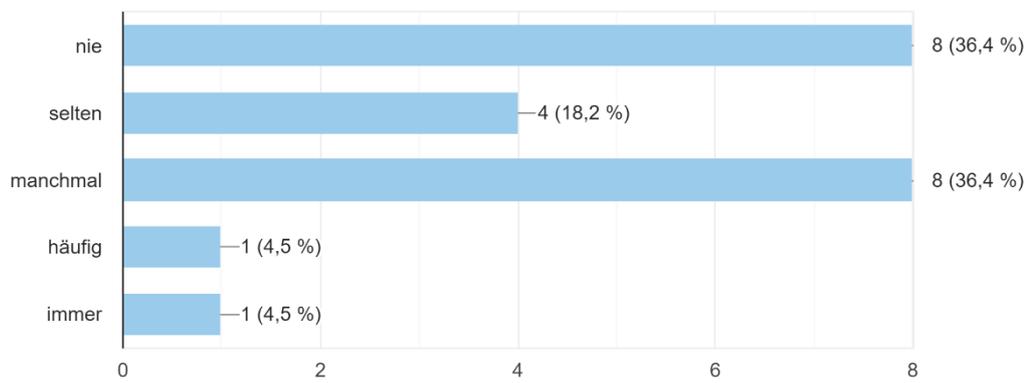
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter einer laufenden Nase?

21 Antworten



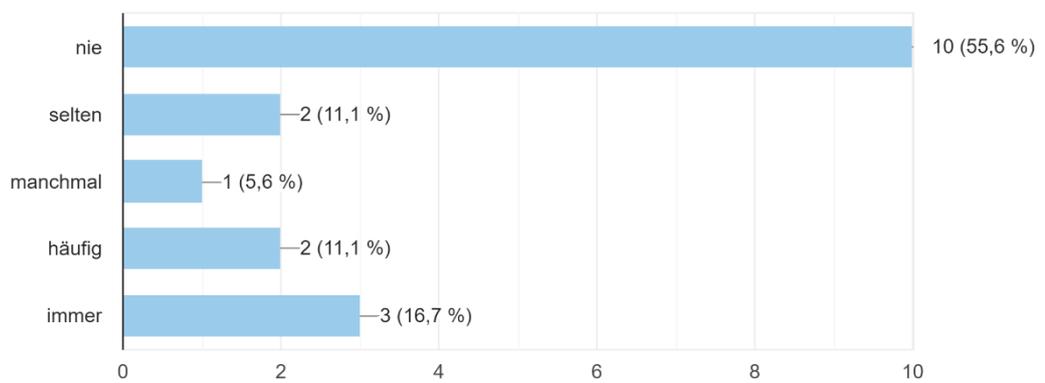
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter tränenden Augen?

22 Antworten



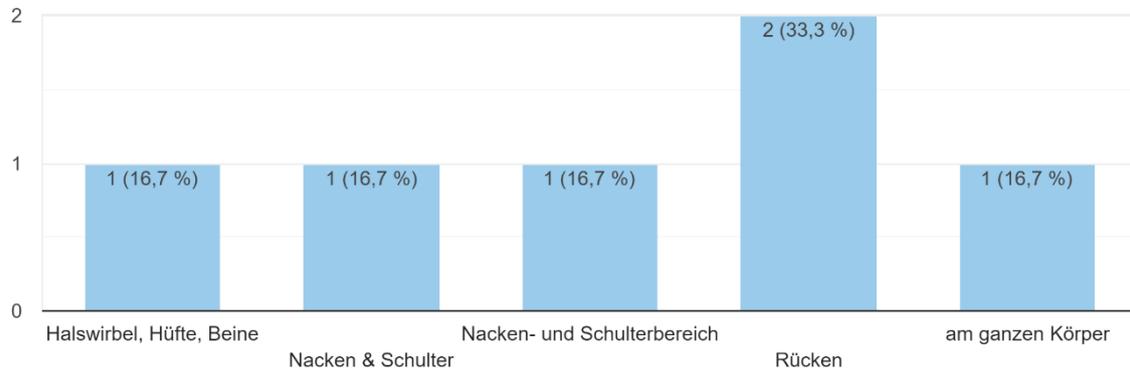
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter Verspannungen?

18 Antworten



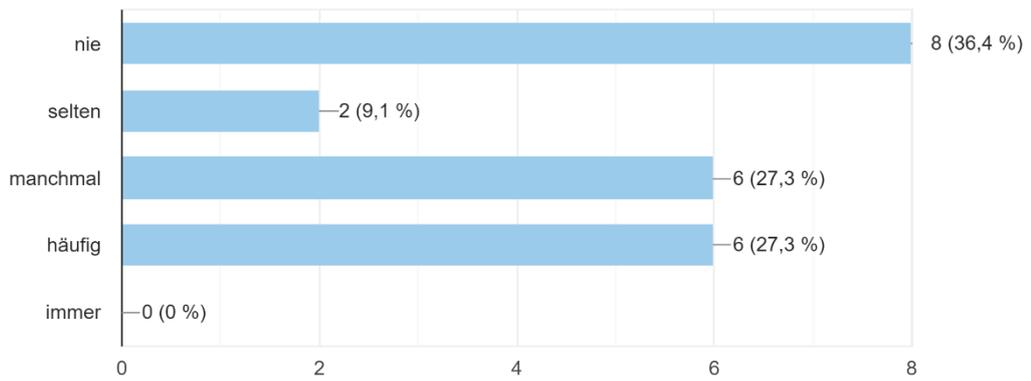
Wo traten die Verspannungen auf?

6 Antworten



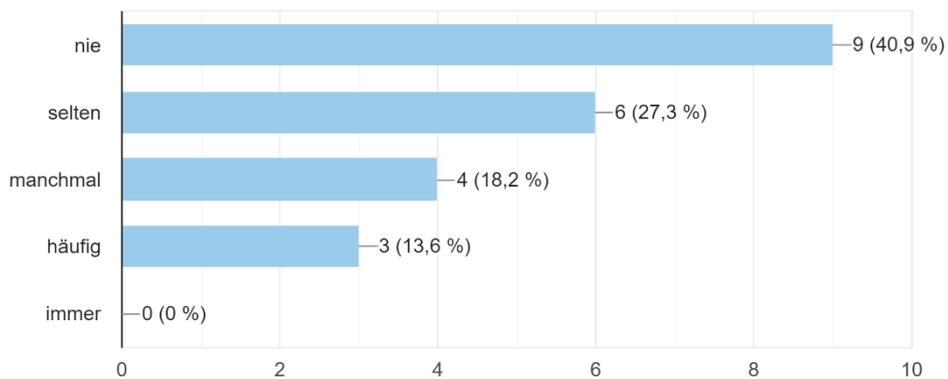
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter generellem Unwohlsein?

22 Antworten



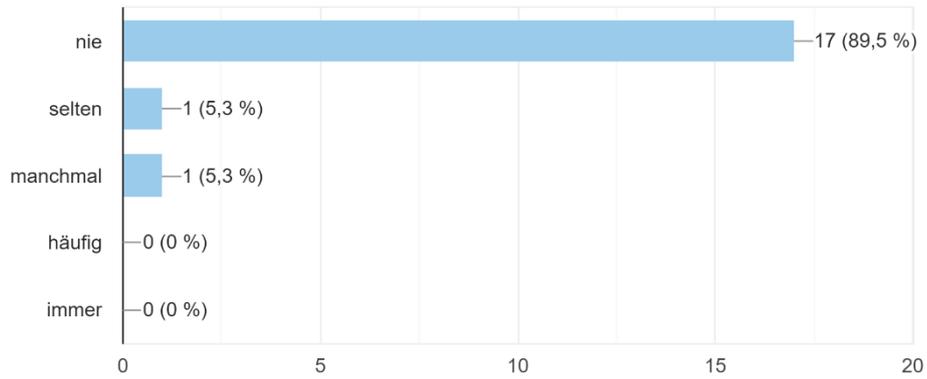
Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter Konzentrationsschwäche?

22 Antworten



Wie häufig litten Sie in den vergangenen 2 Wochen unter Allergien?

19 Antworten



Welche Allergie(n) trat(en) bei Ihnen auf?

3 Antworten

Ekzeme, Nießen

Haselnuss-Pollen

Pollen

Sonstiges

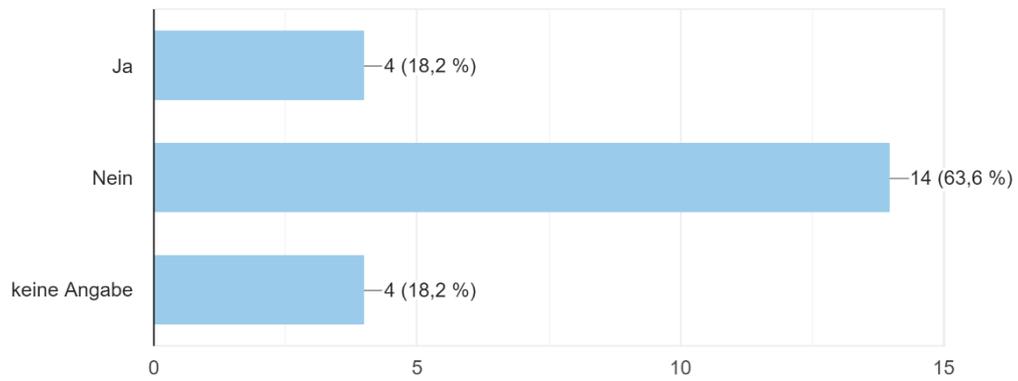
2 Antworten

Die Fragen sind etwas "schwarz-weiß". Allergie und Konzentrationsschwäche kommen von der Situation wegen der Insolvenz

Nickel

Litten Sie nach dem Einzug an einem oder mehreren dieser Symptome?

22 Antworten



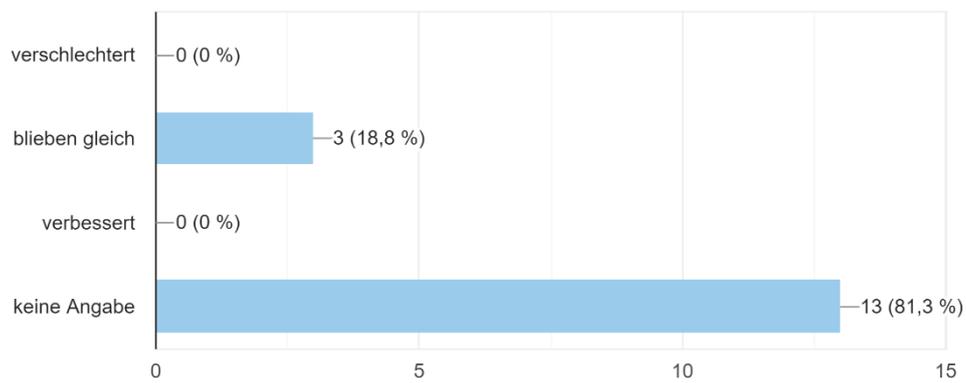
Wenn ja, an welchen?

3 Antworten

- Rheumatische Beschwerden
- extreme Nervosität, Vergesslichkeit, hochgradige Verspannungen
- 3, 4, 7, 8, 9, 10 (9&10 stark wegen der finanziellen & sonstigen Situation)

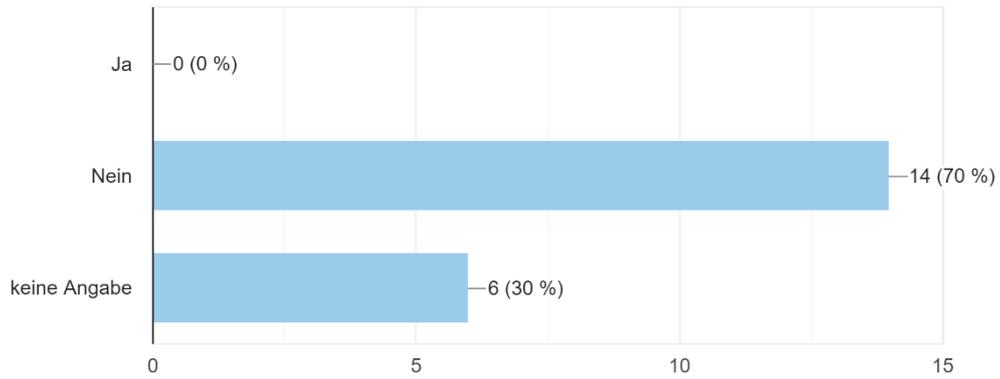
Wie entwickelten sich diese Symptome im Laufe der Tage?

16 Antworten



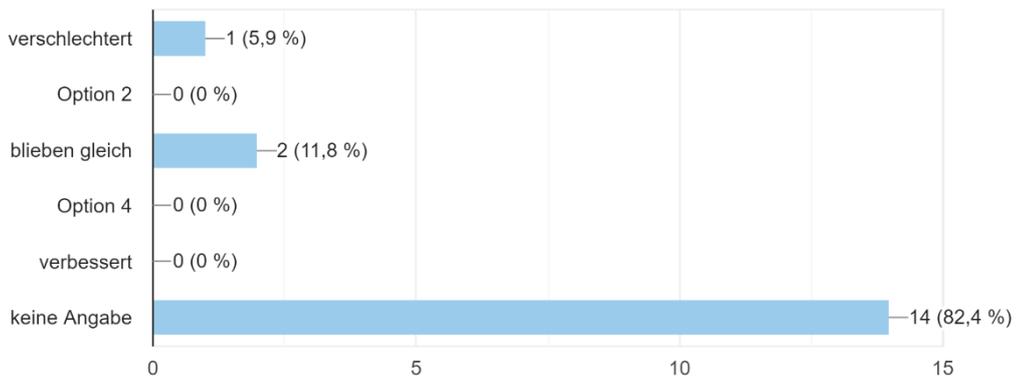
Litten Sie nach dem Einzug an einem oder mehreren dieser Symptome?

20 Antworten



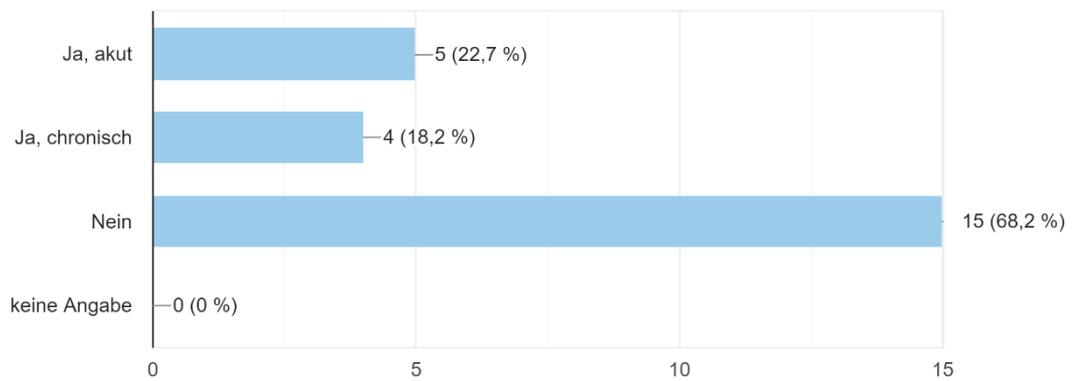
Wie entwickelten sich diese Symptome im Laufe der Tage?

17 Antworten



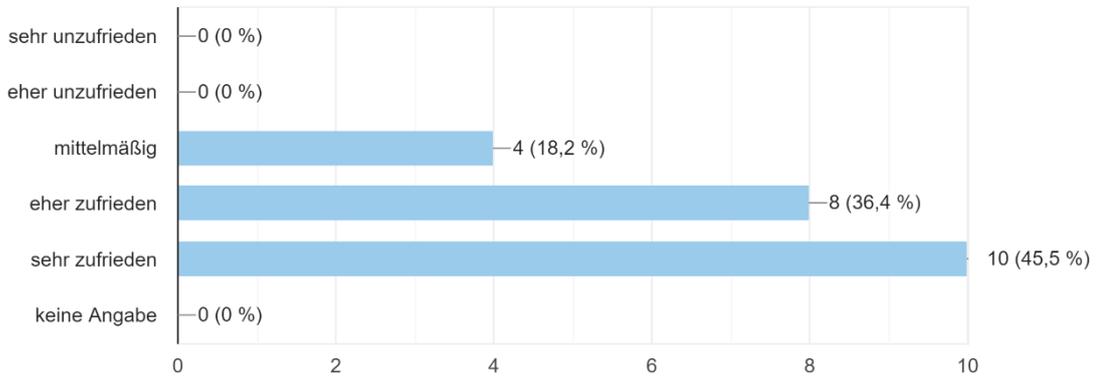
Haben Sie im Moment eine akute oder chronische Erkrankung?

22 Antworten



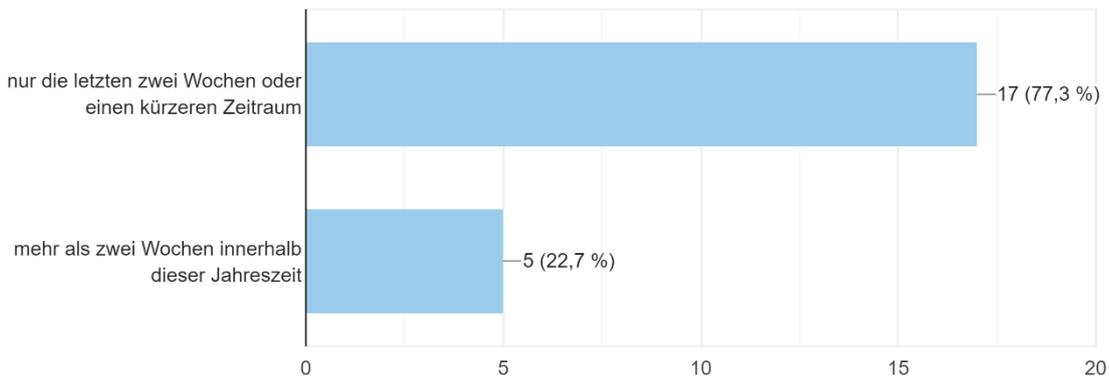
Wie zufrieden sind Sie alles in allem mit Ihrem Wohnkomfort?

22 Antworten



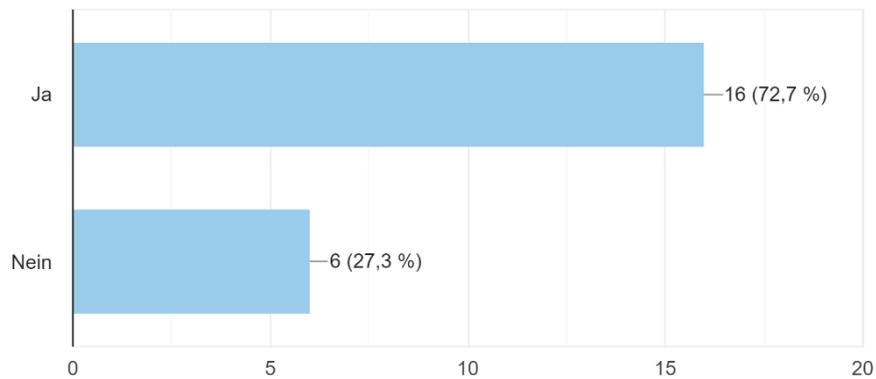
Haben Sie bei der Beantwortung der Fragen (insbesondere der Temperaturverhältnisse) nur die letzten zwei Wochen berücksichtigt?

22 Antworten



Waren die vergangenen zwei Wochen Ihrer Meinung nach von den Witterungsverhältnissen und der Raumklimasituation in Ihrem Haus repräsentativ für diese Jahreszeit?

22 Antworten



Mängel an oder in dem Gebäude

12 Antworten

keine

Es ist oft fußkalt, die Fußbodenheizung in der Küche kann man nicht separat einstellen ist mit Fußbodenheizung im Flur gekoppelt.

Galerie hat keine Heizung, Temperatur dort fällt im Winter auf 18-19°C

Hausumfeld noch nicht fertiggestellt (Grobplanie)

Fußbodenheizung in der Küche ist an Flur gekoppelt und kann nicht separat abgeschaltet werden

Die Wandheizung ist eine Lachnummer. Man muss immer eine Jacke oder Pullover parat haben. Abends beim Lesen oder Fernsehen ist eine Decke erforderlich. Ein Pultdach ist für die geringe Heizleistung nicht förderlich. Türen zu den Bädern mit Fußbodenheizungen müssen immer offen bleiben!

Temperatur in der (unbeheizten) Galerie nie über 19°C

Galerie (ohne Heizung) kühlt im Winter auf 18-19°C ab

Es hatte im Küchenbereich 3-4 mal hereingeregnet, was sehr ärgerlich war. Ein Spengler aus WÜM konnte den Schaden richten.

Eingangstür nicht in Ordnung. Diverse Wände nicht richtig verputzt.

Positive Anmerkungen zum Gebäude

12 Antworten

hoher Qualitätseindruck

kaum messbare Strahlenbelastung (kurzwellig) in allen Räumen

Alles in allem ein schönes Haus in dem wir gerne wohnen, leider fehlt Carport und Schuppen und der Garten, der zur Lebensqualität beiträgt, ist nicht angelegt. Mein e-Dreirad steht im Hausflur.

keine bis wenig Strahlenbelastung (HF, NF)

hohes Qualitätsniveau

sehr angenehmes Wohnklima, kaum messbare kurzwellige Strahlenbelastung (Sender)

Der Grundriss ist für uns optimal

Ein wunderbares Holzhaus, schöne Fenster, geräumig, gemütlich

Schönes Chiemgauer Holzhaus, tolle Verarbeitung, gute Luftqualität. Könnte alles so schön sein!

keine Schwankungen beim Heizungsbetrieb. Angenehme gleichbleibend Temperaturen im Gegensatz zu vielen anderen Bewohnern

Anhang 7 Ökobilanz (ASCONA)

Anhang 7.1 Vorgehensweisen nach unterschiedlichen Bilanzierungsregeln

Tabelle - Anhang 3.2-1 Unterschiede der Systeme GEG, DGNB (Version 2018), BNB, QNG (Stand 2021)

Thema	GEG	DGNB	BNB	QNG
System	DIN 18599	Versch. Nutzungskategorien	Versch. Nutzungskategorien	Wohnungsbau und Nichtwohnungsbau
Gebäudeerfassung	Nur Hüllflächenbauteile, Reduzierung Bodenaufbauten, hinterlüftete Fassaden	Vollständige Erfassung nach DIN 276 KGR, Abschneideregeln	Vollständige Erfassung nach DIN 276 KGR, Abschneideregeln	Vollständige Erfassung nach DIN 276 KGR, Abschneideregeln
Technische Anlagen Wärme, Energieerzeugung	Beschreibung Heizung, WW, Lüftung, PV, Batterie	Großgeräte für Heizung, WW, Lüftung, PV, Batterie,	Großgeräte für Heizung, WW, Lüftung, PV, Batterie,	Großgeräte für Heizung, WW, Lüftung, PV, Batterie,
Sanitär, Elektro, Leitungssysteme		Malus 10 %– 20% bei Reduzierung der Erfassung	Malus 10 % bei Reduzierung der Erfassung	Sockelbetrag nach m ² NRF
F-Gase bei Wärmepumpen und Klimageräte	Nein	Nein	Nein	Ja
Zusätzlicher Nutzenergiebedarf	Nein	Nein	Nein	20 kWh/m ² NRF a
Berechnung Eigenstrom	Nach DIN 18599, Teil 9	Simulation	Simulation	Nach DIN 18599, Teil 9
Anrechnung Eigenbedarf	Begrenzt auf Hilfsstrom, bzw. Heizung und WW wenn Strombasis	100 % Anrechnung erzeugter Strom	100 % Anrechnung erzeugter Strom	Anrechnung der möglichen Deckung des Eigenbedarfs
Berücksichtigte Module	Nur B6.1	Gebäude A bis D Betrieb B6.1	Gebäude A bis C Betrieb B6.1	Gebäude A – C, Betrieb B6.1 und B6.3
Datenbank für Ökodaten	keine	Ökobaudat, diverse Versionen	Ökobaudat, diverse Versionen	Rechenwertedatenbank
Betrachtungszeitraum	1 Jahr	50 Jahre	50 Jahre	50 Jahre
Wertebildung	Methode des Referenzgebäudes	Kennwerte für Gebäude, Methode des Referenzgebäudes für Energiebedarf	Kennwerte für Gebäude und Betrieb	Kennwerte für Gebäude und Betrieb
Indikatoren	Primärenergiebedarf	7 Indikatoren	7 Indikatoren	2 Indikatoren

Anhang 7.2 Gebäudegröße, Nettoräumfläche und Energiebezugsfläche

Für die Wohnflächen wurde von dem Projektentwickler eine Berechnung vorgelegt. Dabei wurden mögliche Hausgrößen mit den Außenmaßen

- 12 x 9 m
- 13 x 9 m
- 13 x 10 m
- 14 x 10 m

unterschieden.

Zusätzlich wurden folgende Varianten berechnet

- ohne Galerie
- mit Galerie.

Die Kubatur wurde der Dokumentation der Energiebedarfsberechnung entnommen. Aus diesen Angaben war geplant die NRF = korrigierte Wohnfläche (ohne Terrasse) und die BGF (mit ermittelter Konstruktionsfläche) zu berechnen. Dies war wegen der unterschiedlichen Haustypenwahl und der damit verbundenen Konstruktionen nicht möglich. Eine Angabe zu den benötigten Flächen nach DIN 277 mit BGF und NRF wurden von keinem Hersteller gemacht (DIN 277:2021-08). Die notwendigen Berechnungen wurden durch den Verfasser nachträglich durchgeführt.

Für alle Gebäude wurde eine zusätzliche differenzierte Berechnung der NRF nach BGF minus KGF, je nach Wandstärke der Außen- und Innenwände durchgeführt, da diese Werte je nach Konstruktion erheblich unterschiedlich ausfallen können. Es ergaben sich dadurch bei sonst gleichen Außenmaßen der Gebäude, jeweils unterschiedliche Werte für die NRF. Die Bedeutung dieser Kennwertfläche für die Ökobilanz in den Zertifizierungs- und Bewertungssystemen ist den Herstellern erst durch die Projektbeteiligung bewusst geworden.

Einen wesentlichen Einfluss auf die BGF und NRF hat die zusätzliche Galerie, die bei 4 Gebäuden ausgeführt wurde. Diese zusätzliche Nettoraumfläche führte bei ansonsten gleicher Kubatur und beheizter Fläche zu einer höheren NRF, dem Kennwert für die Ökobilanz. Es ergeben sich folgende Flächenverhältnisse:

Tabelle - Anhang 3.2-2 Flächen- und Kubaturaufstellung der Gebäudetypen

Flächenmaße	Haus	Bebaute Fläche	BRI	Brutto-grundfläche	Netto-raum-fläche
a x b m		m ²	m ³	m ²	m ²
12x9	D, K	108	499,8	108	88,2
12x9 + Galerie	C	108	499,8	150,4	120,5
13x9	A, B, E, F	117	541	117	97,3 - 98,9
13x9 + Galerie	H, G	117	541	162,9	138,1 -140,3
13x10+Galerie	G	130	630,5	175,9	150,3

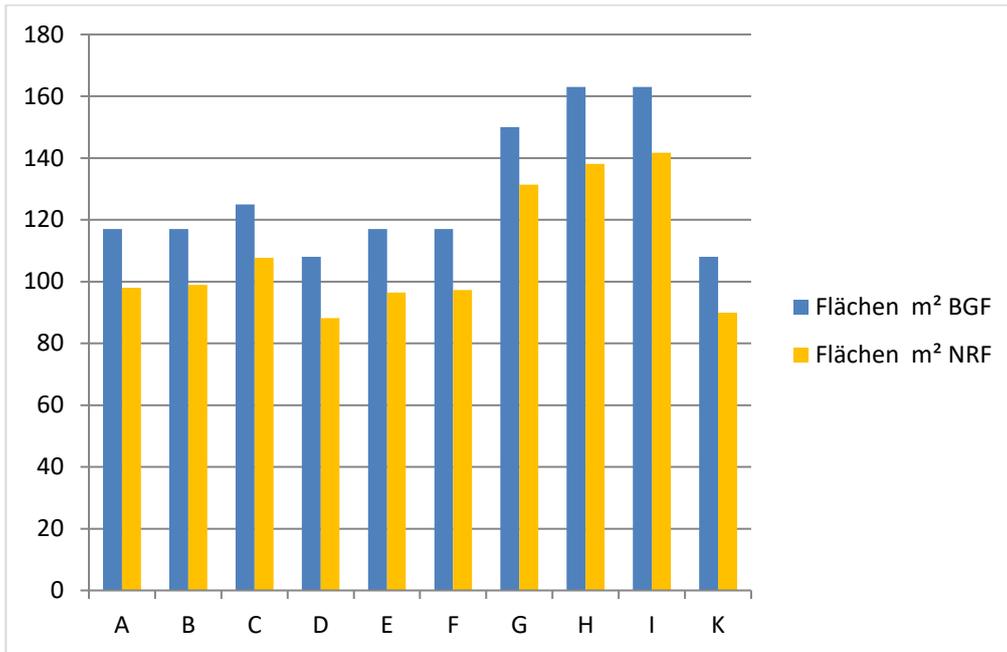


Abbildung - Anhang 3.2-13 Auswertung der Flächen BGF und NRF

Im äußeren Erscheinungsbild nahezu gleiche Gebäude unterscheiden sich in der Grundfläche und zusätzlich durch den Einbau eines Galeriegeschosses. Der Unterschied bei der NRF (orange Säule) beträgt bei gleich großen Gebäuden ca. 40 %. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kennwertbildung in der Ökobilanz.

Da die Energiebezugsfläche An des Energiebedarfsausweises sich aus der Kubatur des Gebäudes berechnet, haben die oben beschriebenen Unterschiede zwischen den Gebäuden keinen Einfluss auf diesen Kennwert.

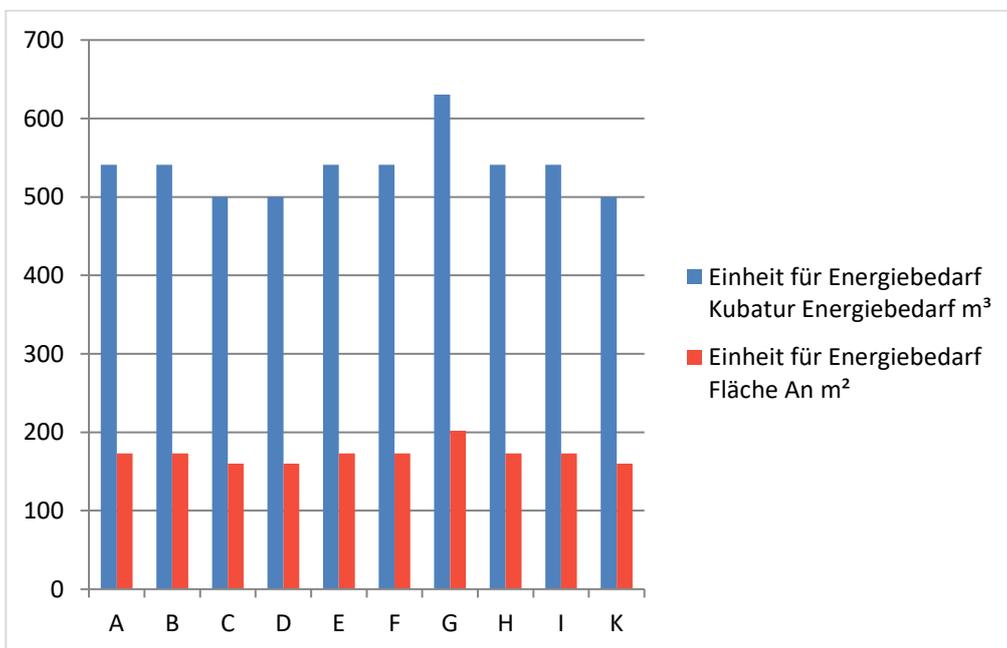


Abbildung - Anhang 3.2-14 Auswertung Kubatur und An-Wert des Energiebedarfsausweises

Anhang 7.3 Informationen zu den betrachteten Lebenszyklusmodulen

Die Angaben zu den Systemgrenzen der Lebenszyklusmodule in den folgenden Abschnitten beziehen sich auf die Angaben der DIN EN 15804:2014-07 (DIN EN 15804:2014-07).

Herstellungsphase (A1 – A3)

Die Module A1-A3 decken die Prozesse *von der Wiege bis zum Werkstor des Herstellers des konkreten Produkts* für die beim Bau verwendeten Materialien, Bauteile, Systeme und Dienstleistungen ab. Dies umfasst die Rohstoffgewinnung und –verarbeitung der benötigten Materialien (A1), den Transport der in Modul A1 erfassten Materialien bis zum Werkstor (A2) sowie die direkten und indirekten Prozesse der Herstellung im produzierenden Unternehmen (A3) (DIN EN 15804:2014-07). Somit werden in Modul A2 z.B. die Transportwege vom Gewinnungsort des Rohstoffs (z. B. Holzimport aus Finnland oder Rohstoffe für Zement aus nahegelegenen Steinbrüchen) bis zum jeweils verarbeitenden Werk berücksichtigt. Anfallender Verschnitt im Werk ist in den ÖKOBAUDAT-Datensätzen integriert (BMWSB 2024a). Die Aspekte der Transporte vom Werk zur Baustelle (A4) und der Baustellenmontage werden nicht berücksichtigt (siehe folgenden Abschnitt).

Nutzungsphase – baulicher Teil (B2, B4)

Modul B2 beinhaltet nach EN 15804 die Inspektion, Wartung und Reinigung eines in ein Gebäude, Bauwerk oder Bauteil eingebauten Produktes (DIN EN 15804:2014-07). Phase B2 *Instandhaltung* wird bisher in den verfügbaren Datenbanken nicht mit Daten ausgestattet (BMWSB 2024a). B2 betrifft ebenfalls *Reinigung*. Davon sind üblicherweise Fenster, Türen, Bodenflächen und Sanitärgegenstände betroffen. Diese sind in den Gebäuden nahezu identisch. Ökobilanzen von Reinigungsmitteln sind nicht in der ÖKOBAUDAT enthalten (BMWSB 2024a). Ebenso fehlen Ökobilanzmodule für Frisch- und Abwasser (BMWSB 2024a). Instandhaltungsarbeiten in Form von Schutzanstrichen werden gemäß den Instandsetzungszyklen der Nutzungsdauern Tabelle des BBSR berücksichtigt (BMU 2011).

Es werden aus dem Modul B2 die Beschichtung der Innenwandflächen, vornehmlich von Holzbauteilen und Gipskartonbekleidungen, berücksichtigt und im Modul B4 (eigentlich Modul B2+B4) mit ausgewiesen. In Modul B4 wird der gleichwertige Austausch/Ersatz eines Bauteils erfasst (DIN EN 15804:2014-07). Die Nutzungsdauern bzw. Nutzungszyklen der Bauteile werden gemäß der Nutzungsdauern-Tabelle des BBSR Version 2017 [BBSR 2017] berücksichtigt. Muss ein Bauteil erst im 47. Jahr oder später ausgetauscht werden, wird dies nicht mehr berücksichtigt. Dies umfasst die Herstellung der Austauschprodukte und Hilfsprodukte sowie die Entsorgungsprozesse der ausgetauschten Produkte und Hilfsprodukte. Modul B2 und B4 wird gemeinsam erfasst, da nicht eindeutig zwischen den Begriffen Instandhaltung, Instandsetzung und Ersatz unterschieden werden kann. Mit der Vorgabe, dass ein Bauteil in den letzten Jahren des Betrachtungszeitraums rechnerisch nicht mehr ausgetauscht wird, unterscheidet sich die Festlegung in diesem Projekt von den Regeln im DGNB und QNG-System. Dort wird nur im Jahr 50 ein Austausch nicht mehr in Ansatz gebracht. Die Einflüsse auf das Gesamtergebnis durch einen zusätzlichen Austauschzyklus sind gering, wie aus der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen ist.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse einer 2012 durchgeführten Studie des Auftragnehmers zur Sensitivität des Betrachtungszeitraums in Bezug auf die Phasenentwicklung bei veränderten Betrachtungszeiträumen für den Indikator Treibhausgaspotenzial. Bezogen auf den m² NRF und Jahr verringern sich die Anteile der Module A und C, während das Modul B2/B4 Ersatzinvestition (in der Abbildung „Instandsetzung“) zunimmt. Der Effekt des Moduls B6 (in der Abbildung „Betrieb“) bleibt pro Jahr gleich. In der prozentualen Darstellung ist erkennbar, dass bei längeren Betrachtungszeiträumen der Anteil des Moduls B6 erheblich zunimmt (König 2012).

Tabelle - Anhang 3.2-3 Erneuerungszyklen und Abschneideregeln

Berücksichtigung von Erneuerungs-/Ersatzmaßnahmen bis einschließlich	Jahr 49	Jahr 47	Jahr 45	Jahr 40
Nutzungsdauer in Jahren bei ausgewählten Komponenten	Durchgeführte vollständige Erneuerungszyklen bei Annahme des Endes von Maßnahmen im genannten Jahr des Betrachtungszeitraums			
4	12	12	11	10
5	9	9	9	8
6	8	8	8	7
7	7	7	6	6
8	6	6	6	5
9	5	5	5	4
10	5	5	5	4
13	4	4	3	3
15	3	3	3	3
18	3	3	3	2
20	2	2	2	2
22	2	2	2	2
25	2	2	2	2
28	2	2	2	1
30	2	2	2	1
33	1	1	1	1
35	1	1	1	1
37	1	1	1	1
40	1	1	1	1

End of Life (EoL) -Phase (C3 – C4)

In der Entsorgungsphase (Modul C) werden die Abfallbehandlung zur Wiederverwendung, Rückgewinnung und/oder zum Recycling (C3) sowie die Abfallbeseitigung (C4) berücksichtigt (DIN EN 15804:2014-07). Ausgangspunkt ist das Szenario eines selektiven Rückbaus. Es wird davon ausgegangen, dass alle Baukonstruktionen beim Rückbau in ihre Einzelbestandteile zerlegt und entsprechend den Verwertungsvorschriften getrennt werden. Die Zertifizierungssysteme enthalten für die Gestaltung der EoL-Phase folgende Regeln (BBSR 2012):

„In die Berechnung der Ökobilanzergebnisse des End-of-Life-Szenarios (EoL) des Gebäudes sind Verwertung und Entsorgung für alle in der Herstellungsphase gelisteten Materialien/Baustoffe einzubeziehen. Folgende Materialgruppen sind in den Berechnungen und Auswertungen zu unterscheiden:

1. Metalle zur Verwertung

2. Mineralische Baustoffe zur Verwertung (z. B. Beton)

3. Materialien mit einem Heizwert zur thermischen Verwertung (z. B. Holz, Kunststoffe etc.)

4. Materialien, die nur auf Deponien abgelagert werden (Glas, Mineralwolle, Gipskartonplatten, Bitumenpappen)“.

Materialien mit Risikostoffen z. B. Holz und Holzwerkstoffe mit biozider Ausrüstung werden innerhalb dieser Systeme nicht erfasst. Es wird davon ausgegangen, dass entsprechend der DIN 68800 grundsätzlich biozidfreie Konstruktionen eingesetzt werden, entweder durch den Konstruktionsaufbau oder die Wahl von Holz einer höheren Resistenzklasse (DIN 68800-1:2019-06).

Das Modul „D“ (D1 und D2)

Die Systemgrenze nach der Entsorgung wird dort gezogen, wo die Outputs, d.h. Sekundärstoffe oder –brennstoffe, das Ende ihrer Abfalleigenschaft erreichen. Die aus den Sekundärstoffen und –brennstoffen durch Wiederverwendung, Recycling (stofflich oder thermisch) und Energierückgewinnung entstehenden Umweltvorteile oder –belastungen werden dem Modul „D1“ außerhalb der Systemgrenze des betrachteten Gebäudes zugeordnet. Neu hinzugefügt wird das Modul „D2“ für Effekte einer Lieferung von Energie an Dritte. Die potenziell bei Dritten vermiedenen Emissionen sind in dem Modul D2 auszuweisen. Diese Regelung konnte in den Darstellungen dieser Untersuchung nicht mehr berücksichtigt werden, D2 wurde nicht ermittelt. Für künftige Berechnungen müssen spezifische Faktoren für vermiedene Emissionen definiert werden. DN V 18599-1 enthält entsprechende Angaben. (DIN EN 15978-1:2021-09)

Nutzungsphase – Betrieb (B6.1)

Der betriebliche Energieeinsatz (Modul B6.1) wird in die Berechnung einbezogen (DIN EN 15804:2014-07; DIN EN 15978:2012-10). Die auf Basis einer Berechnung ermittelten Endenergiebedarfswerte werden bei den Berechnungen der Ökobilanz zugrunde gelegt. Diskutiert wird die Einbeziehung des Energieaufwandes für Energieverbraucher, die einen gebäudebedingten Energieaufwand verursachen, jedoch nicht im Gebäudeenergiegesetz (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2020) erfasst werden, darunter Aufzüge (B6.2 – derzeit nicht berücksichtigt). Diesen Ansatz gilt es weiter zu prüfen.

Nutzungsphase – Nutzung (B6.3)

Die Einbeziehung des nutzer- und nutzungsbedingten Energieaufwands (B6.3) soll erprobt werden. Grund ist die Vorgabe, für ein anspruchsvolles Anforderungsniveau einen energetischen Standard EH40 PLUS zu Grunde zu legen. Es erfolgt eine Anlehnung an die Rechenregeln für ein Effizienzhaus PLUS (BBSR 2018). Hier wird der Haushaltsstromverbrauch der Nutzer über eine Pauschale berücksichtigt. Dies war auch beim ursprünglichen Passivhauskriterium der Fall. In den 120 kWh/m²a an Primärenergie, nicht erneuerbar war der Haushaltsstrom enthalten (Passivhaus Institut).

Anhang 7.4 Datenerhebung und verwendete Daten

Folgende Unterlagen wurden für die Bearbeitung verwendet:

- Werkpläne
- Bauteilaufbauten (Außenwände, Innenwände, Decke/Galerie, Dach, Fenster)
- Bauproduktunterlagen.
- Flächen- und Kubaturberechnung
- Energiebedarfsberechnung.

- Lagepläne der Objekte.

Alle Daten und Ergebnisse werden im Projekt anonymisiert, so dass kein unmittelbarer Rückschluss auf bestimmte Hersteller ermöglicht wird. Die Gebäude erhalten zur Identifizierung eine alphabetische Kennzeichnung von A-K.

Anhang 7.5 Sachbilanz

Nutzerstrombedarf

Im GEG ist kein Nutzerstrombedarf vorgesehen (Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz 2020). Der Einsatz einer PV-Anlage kann nur dann in der Berechnung berücksichtigt werden, wenn eine Berechnung für den Energiebedarf einen Nutzerstrom veranschlagt. Bei der DGNB-Zertifizierung ist dies noch nicht vorgesehen. Bei der QNG-Berechnung werden 20 kWh/m²NRF* a angesetzt (BMWSB 2024b). Aus diesem Grunde weisen die Ergebniswerte der Gebäude je nach Rechenregel erhebliche Unterschiede auf.

PV-Anlage

Die PV-Berechnung nach GEG ist in der Berechnung nach DIN 4108 nicht vorgesehen (DIN 4108-2:2013-02). Erst in der Berechnung nach DIN V 18599 Teil 9 wird ein Rechenweg berücksichtigt (DIN V 18599-9:2018-09). Diese Berechnungsnorm wurde aber bei keinem Gebäude eingesetzt, da zu dem Zeitpunkt des Projektes alle Gebäude durch den Gebäudeersteller mit der DIN 4108 berechnet wurden. Deshalb wurden die Werte der standortbezogenen Simulationsberechnung eines externen Berechnungswerkzeugs übernommen. Weiterhin wurden für die Berechnung der Indikatoren nach den Zertifizierungsregeln der DGNB ein Ansatz von 100 % Anrechnung des erzeugten Stroms (Eigenbedarf + Netzeinspeisung) zugrunde gelegt (DGNB GmbH 2018). Für die Berechnung nach QNG wurde auf die Rechenregeln des QNG Bezug genommen (BMWSB 2024b). Da keine Speichermedien vorgesehen waren, wurde eine Eigenbedarfsquote von 25 % angesetzt. Die Netzeinspeisung mit 75 % wird entsprechend der QNG-Regel **nicht** dem Projekt angerechnet (BMWSB 2024b).

Bauelemente

Jeder Hersteller weist eine spezielle Ausführung bei sämtlichen Bauelementen auf. Die möglichst genaue Modellierung jeder Bauteilschicht war in diesem Projekt entscheidend, da eine wesentliche Fragestellung des Forschungsprojekts, sich auf die Unterschiede der Ökobilanzergebnisse bezüglich der „Grauen Emissionen“ bezieht. Basis der Bauteilmodellierung waren die Angaben der Hersteller mit den Detailplänen.

Bauteilflächen

Für jedes der vier Gebäudemodelle und zwei Galerievarianten wurden die Bauteilflächen ermittelt. Der Bauteilaufbau wurde entsprechend den Herstellerangaben für jedes Gebäude separat erfasst.

Bodenplatte

Die Bodenplatte wurde durch einen Rohbauunternehmer für alle Gebäude in derselben Weise (Betonplatte gedämmt) gefertigt. Die Größe passt sich der Gebäudedimension an. Es wurde berücksichtigt, dass die betonierte Fläche wegen der Randdämmung und des Gebäudeüberstands kleiner ausfällt. Dies bedeutet ca. 20 cm allseitige Verschmälerung der Bodenplatte und damit ca. 10% Flächenminderung.

Außenwände

Jeder Hersteller hat bezüglich der Wahl der Bauprodukte, in der Schichtenanordnung und der Schichtstärke individuelle Regeln. Diese führen zu stark differenzierten Lösungen und damit zu Wandstärken zwischen 33 bis 41 cm. Bei gleichen Außenmaßen eines Gebäudes haben dickere Wände eine kleinere Nettogrundfläche zur Folge.

Innenwände

Die Innenwände sind ähnlich der Außenwände im Aufbau sehr unterschiedlich. Wände im Trockenbauverfahren mit Gipsbeplankung überwiegen.

Fenster, Türen, Treppen

Die Ausstattung mit Fenstern, Außen- und Innentüren war bei allen Gebäuden gleich. Es wurden Holzfenster mit Aluaußenschale und Dreifachverglasung eingesetzt. Die Innentüren waren bei allen Gebäuden identisch als furnierte Spanplattentüren. Die vier Gebäude mit Galerie erhielten als Ausstattung jeweils eine zusätzliche Treppe.

Dachflächen

Die Dachflächen unterschieden sich im Aufbau wesentlich nach beheizter Hüllfläche und unbeheiztem Dachüberstand. Alle Gebäude wiesen große Dachüberstände auf. Die Berechnung der unterschiedlichen Flächen wurde mit einer Tabellenkalkulation je nach Hausgröße durchgeführt. Die Dachüberstände wurden für alle Gebäude gleich angenommen, um Einflüsse der unterschiedlichen individuellen Hersteller Ausführungen bezüglich des Dachüberstands auszuschließen. Der Dachüberstand hat auf den Nutzen der funktionalen Einheit „Gebäude“ keinen Einfluss.

Innenausbau KG 300

Der Innenausbau wurde durch den Projektentwickler für alle Häuser in der gleichen Bauart konzipiert. Es wurden Dreischichtholzböden eingesetzt und alle mineralischen Oberflächen mit einem Silikatanstrich ausgeführt. Die geringen Unterschiede bei der Menge der Fliesenflächen wurden nicht berücksichtigt.

Plausibilitätsprüfung

Zum Abschluss der Bauteilmodellierung wurden alle U-Werte der in der eingesetzten Software LEGEP modellierten Konstruktionen mit den Werten des Energiebedarfsausweises verglichen. Abweichungen wurden nur toleriert, wenn der Energiebedarfsausweis sich auf nicht aktualisierte Konstruktionen bezog.

Anhang 7.6 Auswertung - PreCheck

Precheck-Programm in der LEGEP-Software

Das Programm-Modul „PreCheck“ berechnet für die Zertifizierung nach DGNB/BNB/NaWoh/BNK/QNG ein Projekt nach wenigen Flächen- und Energiebedarfseingaben und erlaubt eine Frühabschätzung der mindestens erreichbaren Punkte für die entsprechenden Steckbriefe Lebenszykluskosten und Ökobilanz. Im Menüpunkt <Ökologie Grunddaten1> wird der Betrachtungszeitraum angezeigt und der Ökodaten-Katalog ausgewählt. Der eingesetzte Ökodatenkatalog muss ausgewählt werden. Die Anzeige der Primärenergie kann statt in MJ auch in kWh erfolgen und ein möglicher Malus von 10 % oder 20 % kann ausgewählt werden. Da die Bauweise einen wesentlichen Einfluss auf den Gebäudewert hat, muss die vorgesehene Bauweise ausgewählt werden. Es kann zwischen drei Bauweisen gewählt werden:

- Mineralisch Beton, Kalksandstein, Porenbeton
- Mineralisch Ziegel
- NAWARO Holz.

Je nach Bauweise werden andere Defaultwerte geladen.

Bewertungsergebnis PreCheck

Durch die Anwendung des Prechecks in diesem Forschungsprojekt soll die Belastbarkeit des von ASCONA entwickelten Prechecksystems erprobt werden. Der Vorhersagewert des PRECHECK-Programms wurde mit dem Ergebnis der vollständigen Modellierung in der Ökobilanz verglichen. Dazu wurden die Flächendaten, die Kubatur, der An-Wert und der Energiebedarf der Energiebedarfsausweise verwendet. Die jeweilige Bauweise wird den Herstellerangaben entnommen. Der Precheck rechnet auf der Basis von Defaultwerten, abgeleitet von der Bauart-einstufung und nicht mit einer konkreten bauteilmengenbezogenen Gebäudebeschreibung. Die Defaultwerte werden aus dem Gebäudekatalog des LEGEP-Programms abgeleitet.

Der Precheck wurde für alle Gebäude durchgeführt (10 Stück) und zwar in zwei Varianten:

- Precheck für die Zertifizierung (DGNB) und
- Precheck für das QNG.

Die Werte wurden numerisch dokumentiert und ausgewertet.

Precheck für Zertifizierung nach DGNB

Die ersten beiden Darstellungen beziehen sich auf den Vergleich des ermittelten **Precheck-Wertes** mit dem Wert der **vollständigen Bilanzierung (VoBi)** des Objekts. Angewendet wurden die Rechenregeln der DGNB-Zertifizierung für kleine Wohnbauten. Dargestellt werden die Werte für zwei Indikatoren:

- Primärenergie nicht erneuerbar in MJ/m² NRF und a
- Treibhauspotenzial in kg CO₂/m² NRF und a.

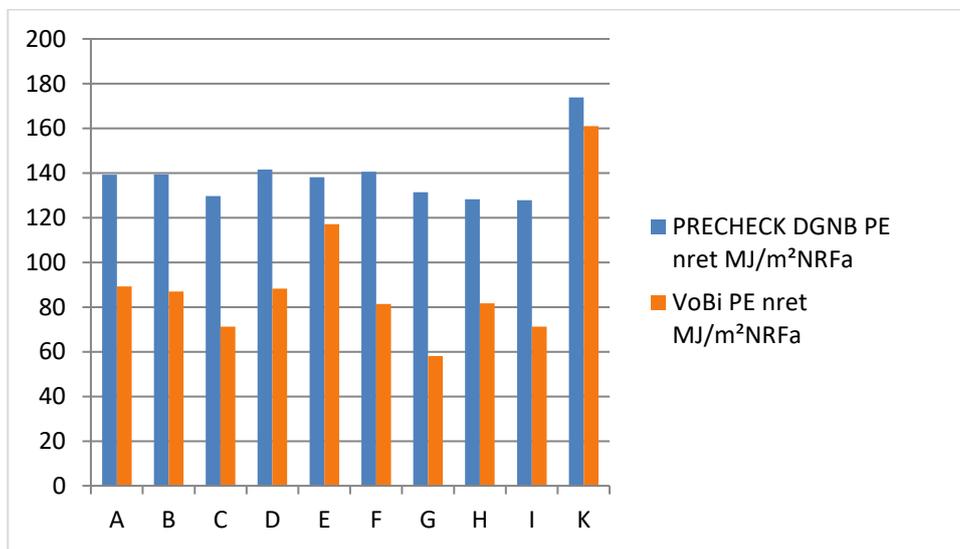


Abbildung - Anhang 3.2-15 Vergleich PRECHECK DGNB und Vollständige Bilanzierung Indikator PE_{re} in MJ/m²NRFa

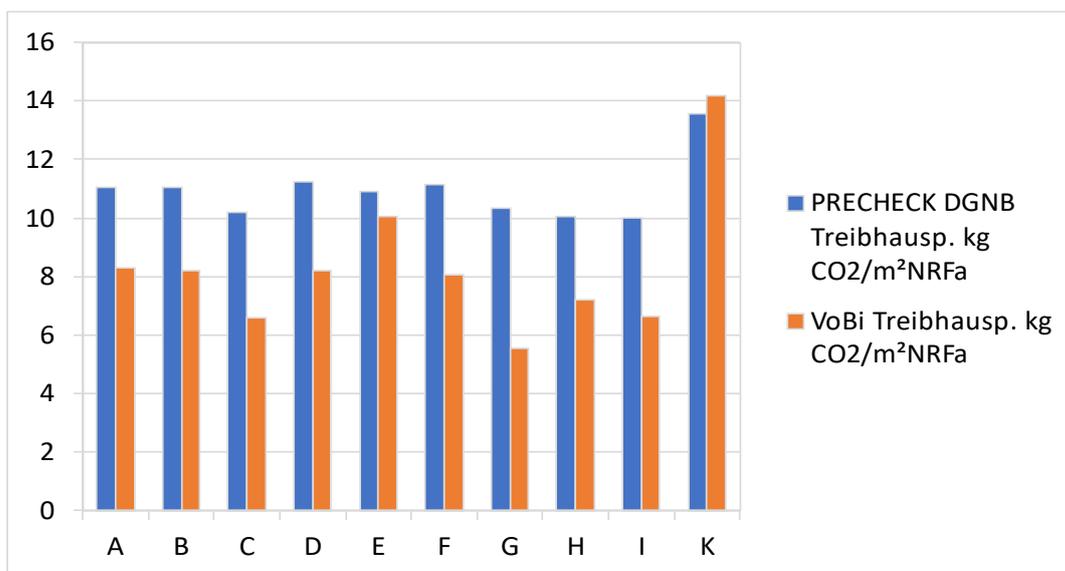


Abbildung - Anhang 3.2-16 Vergleich PRECHECK DGNB und Vollständige Bilanzierung Indikator GWP kgCO₂/m²NRFa

Der Precheck weist für die DGNB-Zertifizierung erhebliche Unterschiede bei beiden Indikatoren auf, die beim Indikator Primärenergie nicht erneuerbar im Schnitt bei einem 30 % bis 40 % höheren Vorhersagewert liegen. Für den Indikator Treibhauspotenzial liegt der Unterschied bei 20 % – 30 %. Bei der vollständigen Bilanzierung erreicht das Gebäude niedrigere Werte. Ursache dafür ist der relativ hohe Defaultwert für den Holzbau im Prechecksystem, der das Modul D nicht im tatsächlichen Umfang berücksichtigt. Dies entspricht den normativen Regeln (DIN EN 15804:2014-07; DIN EN 15978:2012-10). Das Modul D wird nur im DGNB – Zertifizierungssystem vollständig in die Gesamtbewertung einbezogen (DGNB GmbH 2018). Dies führt zu erheblich reduzierten Indikatorwerten bei Gebäuden mit einem hohen Anteil nachwachsender Rohstoffe. Das weitgehend mineralische Gebäude K zeigt eine deutliche Übereinstimmung zwischen den Precheck-Werten und den Werten der vollständigen Bilanzierung (VoBi), weil bei einem mineralischen Gebäude das Modul D keinen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Anzumerken ist, dass die Verrechnung der Ergebnisse für Modul D mit den Ergebnissen der Anderen Lebenszyklusmodule nach Norm nicht zulässig ist und dies, wie bereits bei der vollständigen Bilanzierung genauer erläutert, zu verzerrten und nicht vergleichbaren Ergebnissen führen kann (DIN EN 15978:2012-10; DIN EN 15804:2014-07).

PRECHECK für Berechnung nach QNG

Die Berechnung nach den Regeln des QNG orientiert sich an den normativen Festsetzungen und berücksichtigt bei der LCA-Berechnung die Module A – C (DIN EN 15804:2014-07; DIN EN 15978:2012-10).

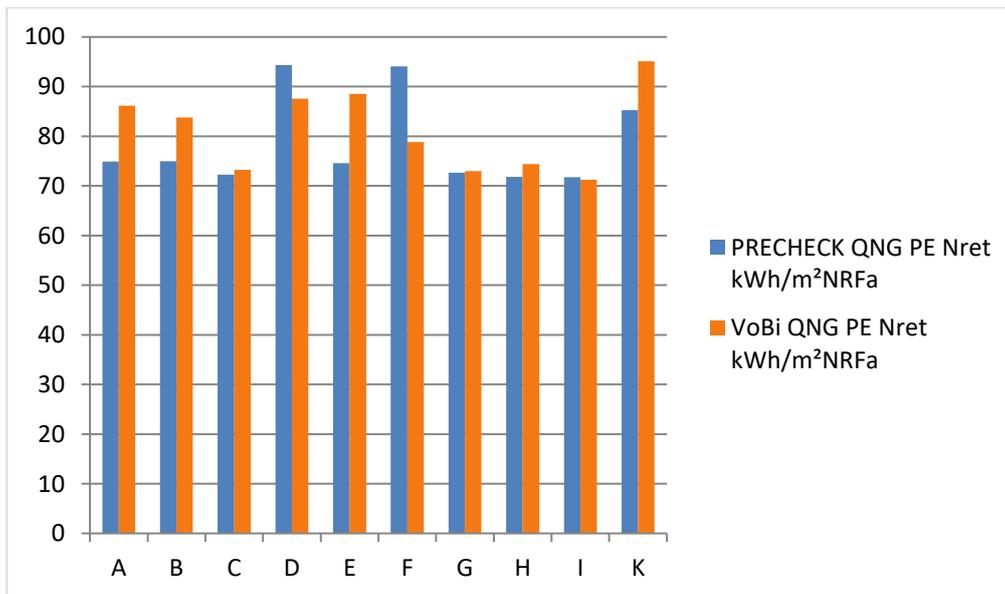


Abbildung - Anhang 3.2-17 Vergleich PRECHECK QNG und Vollständige Bilanzierung Indikator PE_{enre} in kWh/m²NRFa

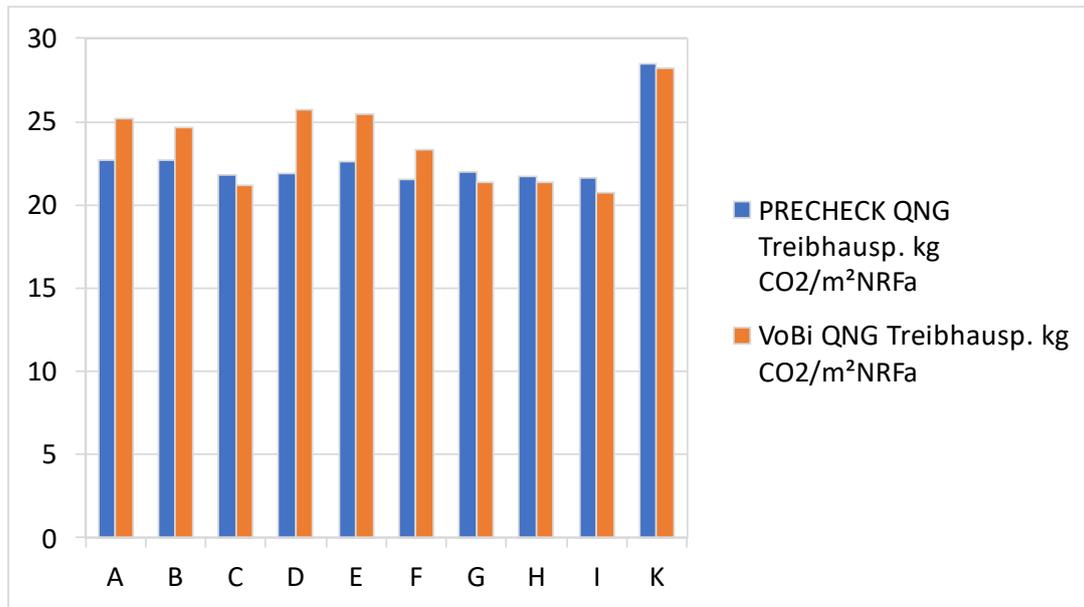


Abbildung - Anhang 3.2-18 Vergleich PRECHECK QNG und Vollständige Bilanzierung Indikator GWP kgCO2/m²NRFa

Der Precheck für die QNG-Berechnung weist für beide Indikatoren eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten der vollständigen Bilanzierung (VoBi) auf. Der Precheck-Wert der beiden dargestellten Indikatoren ist in einigen Fällen etwas niedriger als die Werte der vollständigen Bilanzierung, in einigen Fällen etwas höher. Der Unterschied beträgt ca. 5 - 13 %.

Der Unterschied in den erreichten Werten für den Indikator Primärenergie nicht erneuerbar der einzelnen Gebäude bei der DGNB-Zertifizierung (Einheit MJ in Abbildung - Anhang 3.2-15) und der QNG-Zertifizierung (Einheit kWh Abbildung - Anhang 3.2-17) ist, wie bereits für die Vollständige Bilanzierung erläutert, auf den Einfluss der unterschiedlichen Rechenregeln zurückzuführen (Anrechnung Modul D und zusätzliche Berücksichtigung der Nutzerenergie bei QNG).

Fazit und Ausblick zur PreCheck-Methode

Die angewandte Precheckmethode bietet bei richtiger Anwendung aller spezifischen Rechenregeln eines Zertifizierungssystems und belastbaren Defaultwerten eine gute Methode in frühen Planungsphasen zielführende Werte für die Entscheidungsfindung mit geringem Aufwand zu liefern.

Anhang 7.7 Auswertung – QNG unter Berücksichtigung des Einsatzes von Photovoltaik

Zusätzlich zur Berechnung der realisierten Gebäude wurde eine weitere Berechnung mit der installierten PV-Anlage durchgeführt. Die dabei angesetzten Rechenregeln nach QNG führen zu erheblichen Reduzierungen des Gesamtergebnisses bei allen Gebäuden. Auf jedem Gebäude wurde eine PV-Anlage installiert und entsprechend der QNG-Regeln bilanziert. Diese ermöglichen denjenigen Teil der PV-Erzeugung, der in dem Gebäude verbraucht wird, vom Gesamtbedarf abzuziehen. Die PV-Anlage wird zu diesem Prozentsatz dem Gebäude bei den grauen Emissionen angerechnet. Die Anlage hat 30 m², 5 kWp und erzeugt 5380 kWh/a.

Ohne Batterieeinsatz werden davon ca. 25 % = 1345 kWh/a als Eigenbedarf selbst genutzt. Die grauen Emissionen der PV-Anlage werden ebenfalls dem Gebäude zu 25 % angerechnet. Die PV-Anlage wird nach 25 Jahren ersetzt.

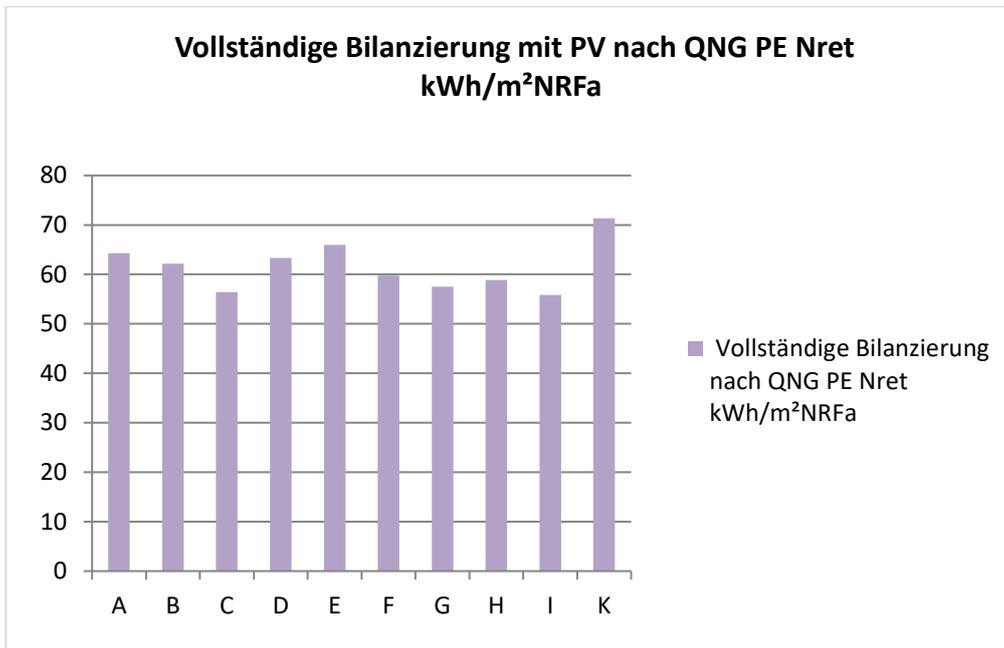


Abbildung - Anhang 3.2-19 QNG-Werte Indikator Primärenergie nicht erneuerbar kWh/m²NRFa mit PV

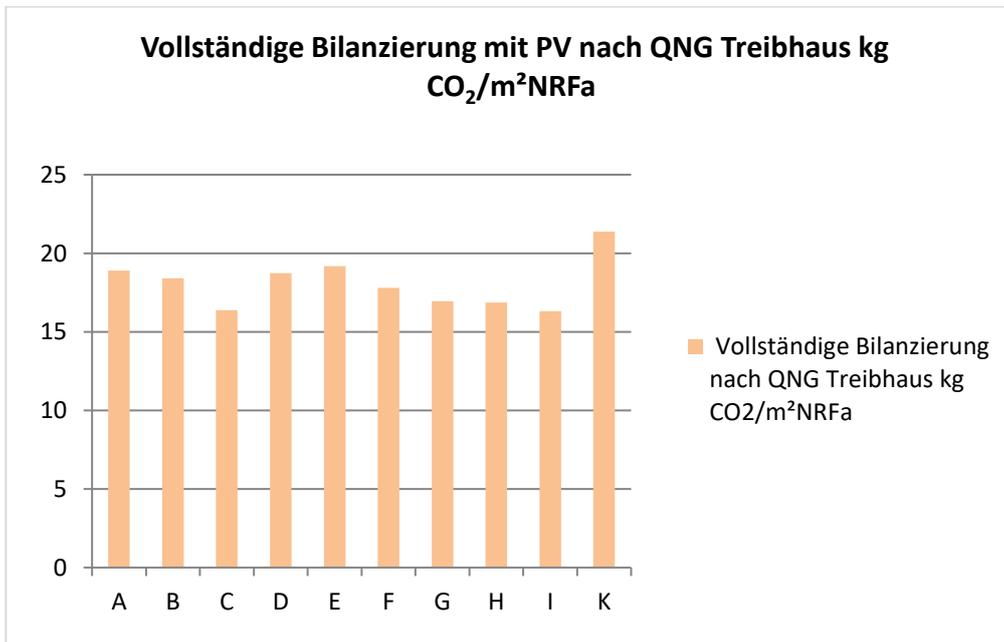


Abbildung - Anhang 3.2-20 QNG-Werte Indikator Treibhausgaspotenzial in kg CO2/m²a mit PV

Beim Gebäude mit PV-Anlage wird der Grenzwert QNG-Premium für das QNG-System für den Indikator Primärenergie nicht erneuerbar (kWh/m²NRF*a) von allen Holzgebäuden erreicht. Dasselbe gilt für den Indikator Treibhauspotenzial (kgCO₂/m²NRF*a). Das mineralische Gebäude (K) erreicht in beiden Fällen nicht den Grenzwert für Premium, aber für QNG Plus (BMWSB 2024b).

Anhang 7.8 Auswertung – Menge an nachwachsenden Rohstoffen

Dazu wird aus der Gebäudemodellierung eine Liste aller nachwachsenden Rohstoffe (NAWARO) in den Bauprodukten erstellt. Dabei wird durch die Materialdatenbank der LEGEP-Software sichergestellt, dass ausschließlich nachwachsende Rohstoffe bilanziert werden. Entscheidend für die korrekte Ermittlung des Kohlenstoffgehalts eines Projekts ist die Erfassung der Menge an nachwachsenden Rohstoffen. Es wird die Masse des darrockenen Holzes (atro – absolut trocken) in den Baustoffen unter Ausschluss der in Holzwerkstoffen oder Dämmstoffen enthaltenen Neben- und Hilfsstoffe (Kleber, Brandschutzmittel usw.), ermittelt. Die dokumentierten Projekte erreichen folgende Werte:

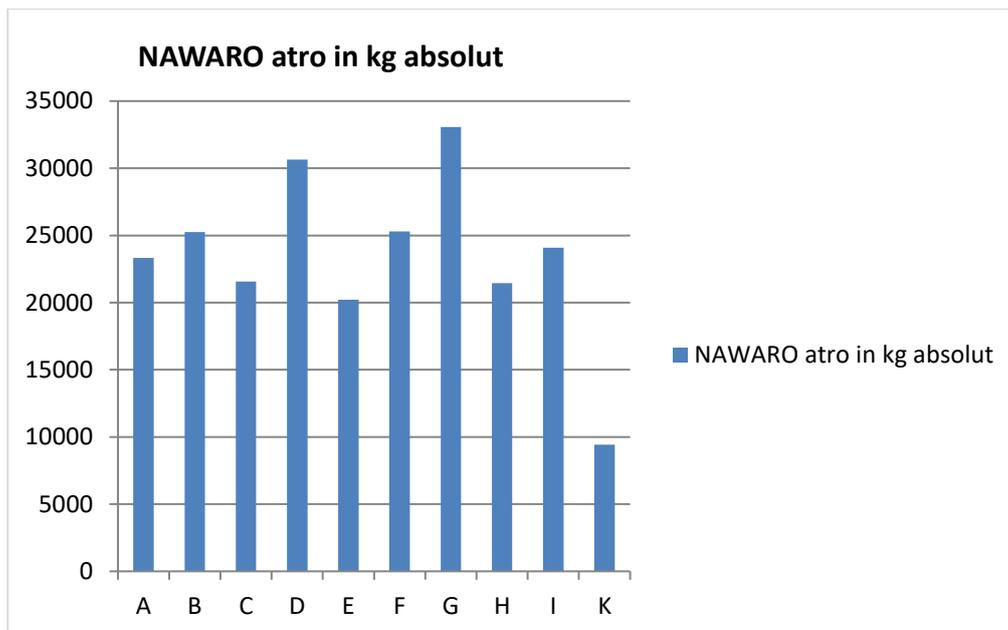


Abbildung - Anhang 3.2-21 Vergleich der Nawaro-atro-Werte in kg absolut je Gebäude

Die absoluten Massenwerte von verbauten nachwachsenden Rohstoffen auf der Basis von atro-Werten erreichen für die Gebäude A – I Werte von 20 – 33 t. Das mineralische Gebäude K weist knapp 10 t auf. Dies ist auf den großen Dachstuhl des Gebäudes bei ebenerdiger Bauweise zurückzuführen.

Die folgende Auswertung bezieht die Menge des verbauten Holzes auf den m² Nettoraumfläche und berücksichtigt damit die unterschiedliche Größe der Gebäude.

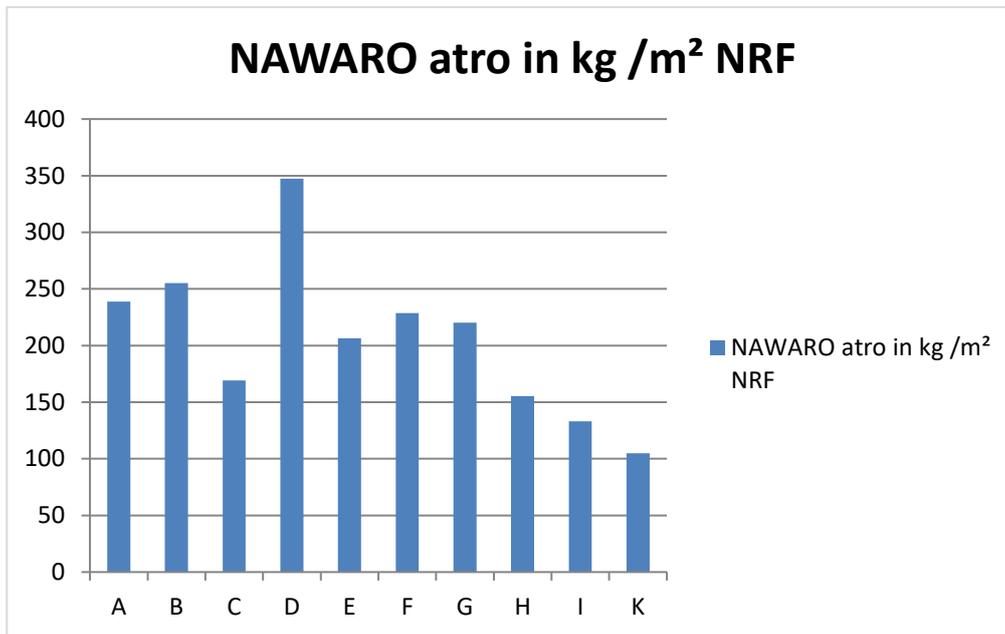


Abbildung - Anhang 3.2-22 Vergleich der Nawaro atro-Werte in kg pro m² Nettoraumfläche