

**Projektbericht**

**Vorabzug**

Projektname	Forschungshäuser „Einfach Bauen“
Projektnummer	20EN_125 FHA
Auftraggeber	Technische Universität München Lehrstuhl Entwerfen und Konstruieren, Prof. Florian Nagler
Stand der Planung	Dokumentation (LP 9)
Bearbeiter	Dr. Anja Rosen
Stand der Analyse	28.05.2021



Abb. 1: Forschungshäuser „Einfach Bauen“ in Bad Aibling\_Foto: Sebastian Schels

**Inhalt**

1. Aufgabenstellung .....	4
2. Vorbemerkungen .....	5
3. Berechnungsgrundlagen .....	6
4. Untersuchte Varianten .....	7
5. Auswertung nach Bauteilen.....	8
5.1. Gründung.....	8
5.2. Außenwände.....	11
5.3. Fenster .....	17
5.4. Tragende Innenwände .....	20
5.5. Nicht tragende Innenwände.....	23
5.6. Decken .....	26
5.7. Dächer.....	29
6. Ergebnisse auf Gebäudeebene .....	32
7. Szenarienbetrachtung.....	35
7.1. Szenario 1 .....	35
7.2. Szenario 2 .....	36
8. Urban Mining Indicator .....	39
9. Fazit.....	41

**Abkürzungsverzeichnis**

DC	Downcycling
dc	weiterverwertbare Wertstoffe (engl. downcyclable)
en <sub>r</sub>	energetisch verwertbare Wertstoffe, erneuerbar (energetically usable, renewable)
en <sub>f</sub>	energetisch verwertbare Wertstoffe, fossil (energetically usable, fossile)
EoL	Ende der Nutzungsdauer (engl. End of Life)
MLP	Material Loop Potenzial
MRC	Material Recycling Content
sR	selektiver Rückbau
sA	selektiver Abbruch
RC	Recycling
rc	wiederverwertbare Wertstoffe (engl. recyclables)
RNc	erneuerbare Rohstoffe, zertifiziert (engl. renewables, certified)
RN	erneuerbare Rohstoffe (engl. renewable)
RU	Wiederverwendung (engl. reuse)
ru	wiederverwendbare Wertstoffe (engl. reusables)

## 1. Aufgabenstellung

Baukonstruktionen und Gebäudetechnik sind in den letzten Jahrzehnten zunehmend komplexer geworden. Auf erhöhte Anforderungen an Standsicherheit, Wärme-, Feuchte-, Brand- und Schallschutz haben Planer und Bauindustrie mit hochtechnisierten Gebäuden, mehrschichtigen Baukonstruktionen und dem Einsatz von Kompositbaustoffen reagiert. Die Folge der Komplexität sind nicht nur hohe Fehlerquoten in Planung und Ausführung, sondern auch ein aufwendiger Rückbau und eingeschränkte Nachnutzungsfähigkeit von Baumaterialien.

An der TU München manifestiert sich seit 2012 der Verbund „Einfach Bauen“ von Architekten und Ingenieuren, die über Forschung und Lehre eine neue, gegenläufige Entwicklung anstoßen und so einen wichtigen Impuls in der deutschen Bauwirtschaft setzen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einfach Bauen 2“ wurden auf dem Gelände der B&O Gruppe in Bad Aibling drei Forschungshäuser mit gleicher Kubatur, aber in unterschiedlicher Bauweise errichtet. Alle drei Häuser sind mit monolithischen Außen- und Innenwänden sowie einfacher technischer Ausstattung erstellt worden. Im Folgeprojekt „Einfach Bauen 3 – Auswerten, Validieren, Rückkoppeln“ erfolgt derzeit eine Auswertung von Langzeitmessungen in der Nutzungsphase.

An der Bergischen Universität Wuppertal hat sich um das Team von Prof. Annette Hillebrandt ein Forschungsschwerpunkt zu Kreislaufpotenzialen von Baukonstruktionen etabliert. Im Rahmen einer Promotion wurde von der Verfasserin dieses Berichts eine Systematik zur Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung entwickelt: der Urban Mining Index.

Um die Auswirkungen der einfachen Konstruktionsweisen auf die Rückbau- und Recyclingfähigkeit zu überprüfen, wurde energum beauftragt, für die drei Forschungshäuser aus dem Projekt „Einfach Bauen 2“ eine vergleichende Analyse mit dem Urban Mining Index zu erstellen. Ziel ist, im Rahmen der Dokumentationen in „Einfach Bauen 3“ Erkenntnisse über die zirkulären Eigenschaften der Konstruktionen zu gewinnen.

## 2. Vorbemerkungen

Der Urban Mining Index ist eine neu entwickelte Systematik zur Bewertung der zirkulären Eigenschaften von Baukonstruktionen und Gebäuden. Hierzu werden alle im Lebenszyklus des Bauwerks eingehenden Materialien und alle daraus resultierenden Wertstoffe systematisch erfasst und nach den Qualitätsstufen ihrer Nachnutzung bewertet. Eine besondere Aufmerksamkeit gilt der Rückbaufähigkeit. Die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus – gemessen am Arbeitsaufwand für die sortenreine Rückgewinnung und am Wert der Materialien nach dem Rückbau – bestimmt die Wahrscheinlichkeit der hochwertigen Verwertung.

Die Bewertung der Forschungshäuser aus „Einfach Bauen 2“ wurde mit dem von Anja Rosen entwickelten Exceltool zur systematischen Berechnung der Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen erstellt.

In die Ermittlung wurden weiterhin folgende Grundlagen einbezogen:

- Werkpläne der drei Forschungshäuser in Bad Aibling, Florian Nagler Architekten GmbH, Stand 08.06.2020
- Flächengrößen aus den Nachweisen nach Energieeinsparverordnung, Horstmann + Berger Beratende Ingenieure PartGmbH, Stand 12.05.2020 (Dämmbeton), und 14.10.2020 (Ziegelmauerwerk und Holzbauweise)
- Weitere, von der TU München zur Verfügung gestellte Informationen wie Produktdatenblätter, Zusammensetzung des Dämmbetons, etc.
- Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen“ des Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Stand 24.02.2017
- Material-Cycle-Status It. Atlas Recycling (Hillebrandt/Riegler-Floors/Rosen/Seggewies, Detail Verlag, 2018) für diverse Baumaterialien

### 3. Berechnungsgrundlagen

#### Untersuchungsgegenstand

Gegenstand der Betrachtung sind die Baukonstruktionen der Gebäude (KGR 300 nach DIN 276).

Die Mengenermittlung umfasst folgende Bauteile:

1. Bodenplatte inkl. Unterbau und Fußbodenaufbau
2. Außenwände inkl. Fenster
3. Innenwände, tragend und nicht tragend
4. Geschossdecken inkl. Fußbodenaufbau
5. Geschossdecken gegen unbeheizten Dachraum inkl. Belägen
6. Dach inkl. Deckung

#### Lebenszyklusphasen

In die Analyse wurden folgende Lebenszyklusphasen einbezogen:

- Pre-Use

Die Pre-Use-Phase beschreibt die zirkuläre Materialverwendung in der Erstellungsphase eines Bauwerks, bzw. die Materialherkunft (z.B. aus erneuerbaren oder sekundären Quellen)

- Use

Während der Nutzungsphase eines Gebäudes werden Bauteile und Materialien, die nicht der Nutzungsdauer des Bauwerks entsprechen, teilweise mehrfach ausgetauscht. Auszutauschende Bauteile und Materialien gehen entsprechend ihrer durchschnittlichen Nutzungsdauer mehrfach in die Berechnung ein.

- Post-Use

Die Post-Use-Phase beschreibt die Möglichkeit der zirkulären Materialverwendung am Ende der Nutzungsdauer, d.h. den Materialverbleib nach dem Rückbau.

Die Ergebnisse werden in Prozentwerten über einen Lebenszyklus von 100 Jahren ausgegeben.

#### Massenermittlung

Die Massen der oben genannten Bauteile werden nach Bauteilschichten und Materialien jeweils für einen Quadratmeter Bauteilfläche ermittelt. Die Gesamtmasse der Bauteile ergibt sich durch Multiplikation der Massen pro Quadratmeter mit der jeweiligen Flächengröße.

#### 4. Untersuchte Varianten

Die Varianten unterscheiden sich hauptsächlich in den tragenden Außen- und Innenwänden, wie die nachfolgende Aufstellung zeigt. Die Gründungen, Decken- und Dachkonstruktionen sind weitgehend identisch. Die Decken der Dämmbetonvariante sind im Gegensatz zur Holzbauweise und zur Mauerwerksbauweise mit Stahlfasern statt Stahlmatten bewehrt.

„Holz“  
 Gründung: Stahlbeton  
 Außenwände: **Holz**  
 Innenwände tragend: **Holz**, nicht tragend: Holz und Gipskarton  
 Decken: Stahlbeton  
 Dach: Holz mit Bitumenabdichtung

„Ziegel“  
 Gründung: Stahlbeton  
 Außenwände: Hochlochziegel  
 Innenwände tragend: **Ziegel**, nicht tragend: Holz und Gipskarton  
 Decken: Stahlbeton  
 Dach: Holz mit Bitumenabdichtung

„Dämmbeton“  
 Gründung: Stahlbeton  
 Außenwände: Infralichtbeton  
 Innenwände tragend: **Stahlbeton**, nicht tragend: Holz und Gipskarton  
 Decken: Stahlfaserbeton  
 Dach: Holz mit Bitumenabdichtung

## 5. Auswertung nach Bauteilen

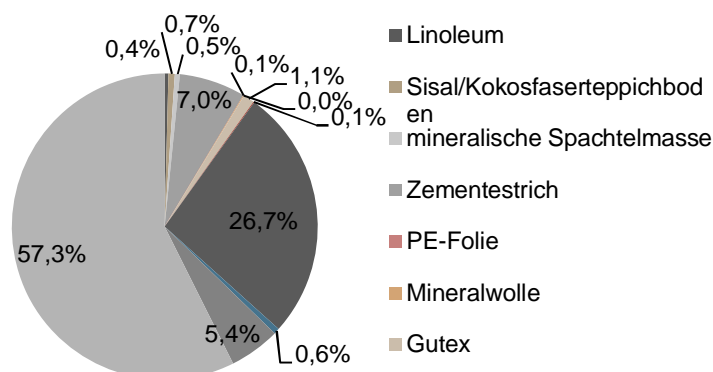
### 5.1. Gründung

#### Material- und Massenermittlung

Die Gründung ist in allen drei Forschungshäusern gleich konstruiert. Die Materialien und Massen wurden wie folgt pro m<sup>2</sup> Gründungsfläche ermittelt:

Bauteilschicht	Material	Austausch- häufigkeit [n]	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]
Fußbodenbelag 1, anteilig	Linoleum	4	8,5
Fußbodenbelag 2, anteilig	Sisal/Kokosfaserteppichboden	9	15,4
Ausgleichsspachtel	mineralische Spachtelmasse	0	12,0
Estrich	Zementestrich	0	156,0
Trennlage	PE-Folie	0	0,2
Trittschalldämmung	Mineralwolle	0	1,9
Wärmedämmung	Holzweichfaserplatten	0	25,2
Abdichtung	Bitumenbahn	0	2,8
Bodenplatte	Beton	0	595,6
	Stahl	0	14,4
Sauberkeitsschicht	Magerbeton	0	120,0
kapillarbrechende Schicht	Recyclingschotter	0	1.280,0
<b>Summe</b>			<b>2.232,0</b>

#### Gründung



Die Massen der Gründung werden bestimmt durch den hohen Anteil mineralischer Baustoffe, allen voran der Schotter für die kapillarbrechende Schicht und der Beton für die Bodenplatte.



Pre-Use-Phase

Die verwendeten Materialien enthalten folgende Anteile an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen:

Material	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]	wieder- verwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe zert. nachhaltig Rnc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiter- verwertete Materialien DC %
Linoleum	8,5	10,0%		62,0%	
Sisal/Kokosfaserteppichboden	15,4			72,9%	
mineralische Spachtelmasse	12,0				
Zementestrich	156,0				
PE-Folie	0,2				
Mineralwolle	1,9	24,6%			
Holzweichfaserplatten	25,2		96,0%		
Bitumenbahn	2,8				
Beton	595,6				
Stahl	14,4	100,0%			
Magerbeton	120,0				
Recyclingschotter	1.280,0				100,0%
	<b>2.232,0</b>	<b>0,71%</b>	<b>1,08%</b>	<b>0,74%</b>	<b>57,35%</b>

Post-Use-Phase

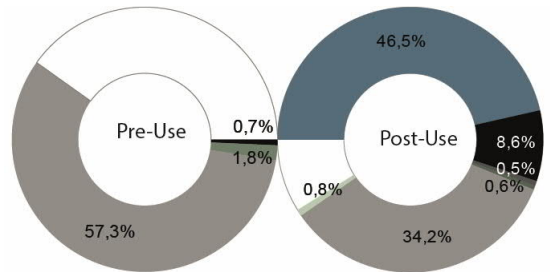
Den Bauteilschichten der Gründung werden folgende Parameter zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials post-use zugewiesen:

Material	Abfallfraktion	Faktor Arbeit	Faktor Wert	EoL sR <sup>1</sup>	EoL sA <sup>2</sup>	Material Loop Potenzial
Linoleum	170203_Kunststoffe /NaWaRo	1,0	0,6	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Sisal/Kokosfaserteppichboden	170203_Kunststoffe /NaWaRo	0,9	0,6	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	nicht relevant
mineralische Spachtelmasse	170107_mineral. Gemische	0,8	0,8	dc	d	nicht relevant
Zementestrich	170107_mineral. Gemische	0,8	0,8	dc	d	nicht relevant
PE-Folie	170203_Kunststoffe	0,8	0,6	en <sub>f</sub>	en <sub>f</sub>	nicht relevant
Mineralwolle	Herstellerrücknahme	0,8	1,0	rc	d	97%
Gutex	170102_Holz A2	0,8	0,7	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Bitumenbahn	170302_Bitumengemische	0,7	0,6	rc	en <sub>f</sub>	30%
Beton	170101_Beton, bewehrt	0,7	0,9	rc	rc	39%
Stahl	170405_Stahl, Scherenschrott	0,7	1,0	rc	rc	100%
Magerbeton	170101_Beton, bewehrt	0,7	0,9	rc	dc	39%
Recyclingschotter	Wiederverwendung	0,9	1,0	ru	dc	nicht relevant

<sup>1</sup> End-of-Life-Szenario selektiver Rückbau (hochwertig)

<sup>2</sup> End-of-Life-Szenario selektiver Abbruch (üblich)

Aus den Parametern der Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich folgende Kreislaufpotenziale für die Gründungsbauteile:



- | Phase    | Qualitätsstufen/Variable   |
|----------|--|
| Pre-Use  | wiederverwendete Materialien (Reuse)   |
|          | wiederverwertete Materialien (Recycling)   |
|          | erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)   |
|          | weiterverwertete Materialien (Downcycling)   |
|          | (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Resources, not renewable))   |
| Post-Use | wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)   |
|          | wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)   |
|          | weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)              |
|          | energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usable, certified renewable) |
|          | weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)   |
|          | energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usable, renewable)                                     |
|          | energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)   |

	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	2,5%	56,1%	58,6%
Loop-Potenzial	59,9%	91,1%	151,0%

Das Kreislaufpotenzial der Gründung wird weitgehend bestimmt durch die schweren mineralischen Baustoffe Beton und Schotter. Es wurde angenommen, dass die kapillarbrechende Schicht aus Recyclingschotter hergestellt wurde. Genaue Informationen zur Herkunft des Schotters liegen nicht vor.

Der Beton enthält keine Sekundärrohstoffe. Da das Material-Loop-Potenzial von Beton sehr eingeschränkt ist (39%) und die Bodenplatte zudem schwer rückbaubar sowie durch die Abklebung mit Bitumenabdichtung leicht verschmutzt ist, ist die Wahrscheinlichkeit des hochwertigen Recyclings eher gering, so dass ein Großteil des Betons den weiterverwertbaren Wertstoffen zugeordnet wird.

Die relativ hohe Quote an wiederverwendbaren Wertstoffen post-use resultiert wiederum aus dem Recyclingschotter, da angenommen werden kann, dass dieser nach einer einfachen Aufbereitung (z.B. sieben) wieder für den gleichen Zweck eingesetzt werden kann.

## 5.2. Außenwände

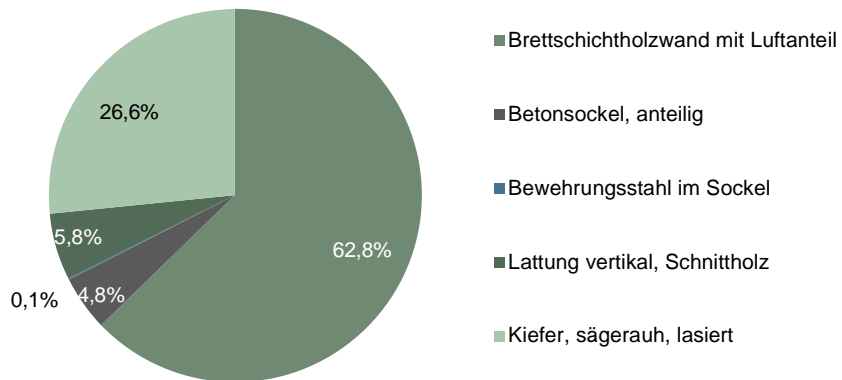
Die Außenwände gehören zu den Bauteilen, in denen sich die drei Forschungshäuser signifikant unterscheiden. Alle Außenwände wurden in weitgehend monolithischer Bauweise erstellt. Im Folgenden werden die eingesetzten Materialien und Massen pro m<sup>2</sup> Wandfläche gegenübergestellt.

### Material- und Massenermittlung

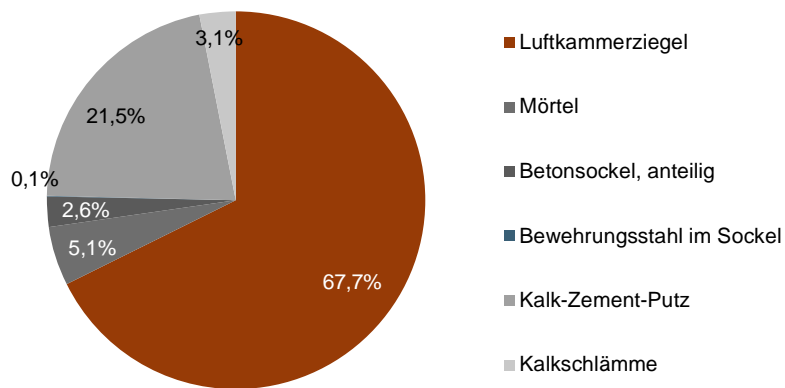
Bauteilschicht	Material	Austausch- häufigkeit [n]	Masse im Lebenszyklus		
			[kg/m <sup>2</sup> ]		
			Holz	Ziegel	Dämmbeton
<b>Holzwand</b>					
tragende Außenwand	Brettschichtholzwand mit Luftanteil	0	130,7		
	Betonsockel, anteilig	0	9,9		
Unterkonstruktion	Bewehrungsstahl im Sockel	0	0,2		
	Lattung vertikal, Schnittholz	3	4,7		
Brettschalung	Lattung horizontal, Schnittholz	3	7,4		
	Kiefer, sägerauh, lasiert	3	55,3		
<b>Ziegelwand</b>					
tragende Außenwand	Luftkammerziegel	0		339,6	
	Mörtel	0		25,5	
	Betonsockel, anteilig	0		12,8	
	Bewehrungsstahl im Sockel	0		0,3	
Putz	Kalk-Zement-Putz	2		108,0	
	Kalkschlämme	2		15,6	
<b>Dämmbetonwand</b>					
tragende Außenwand	Infralichtbeton	0			373,4
	Stahlfasern	0			17,4
	Betonsockel, anteilig	0			9,9
	Bewehrungsstahl im Sockel	0			0,2
<b>Summen</b>			<b>208,2</b>	<b>501,8</b>	<b>400,9</b>

Bei Betrachtung der Summen der Massen fällt auf, dass die Holzwände nahezu halb so viel Masse besitzen wie die Dämmbetonwände und sogar nur 40% der Masse der Ziegelwände. Die Anteile der einzelnen Baustoffe in den jeweiligen Wänden sind in den folgenden Grafiken dargestellt.

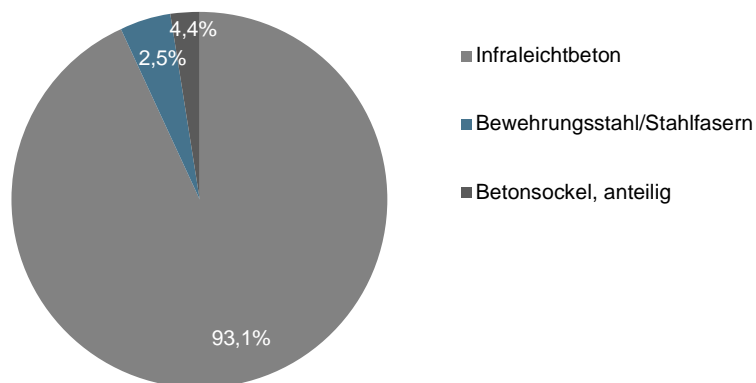
### Holzaußenwand



### Ziegelaußenwand



### Dämmbetonaußenwand



Pre-Use-Phase

Die verwendeten Materialien enthalten folgende Anteile an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen:

Material	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]	wieder- verwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe zert. nachhaltig RNc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiter- verwertete Materialien DC %
<b>Holzaußenwand</b>					
Brettschichtholz wand	130,7		97,0%		
Betonsockel, anteilig	9,9				
Bewehrungsstahl im Sockel	0,2	100,0%			
Lattungen	4,7		100,0%		
Kiefer, sägerauh, lasiert	55,3		100,0%		
	<b>208,2</b>	<b>0,1%</b>	<b>93,2%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>
<b>Ziegelaußenwand</b>					
Luftkammerziegel	339,6				
Mörtel	25,5				
Betonsockel, anteilig	12,8				
Bewehrungsstahl im Sockel	0,3	100,0%			
Kalk-Zement-Putz	108,0				
Kalkschlämme	15,6				
	<b>501,8</b>	<b>0,1%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>
<b>Dämmbetonaußenwand</b>					
Infraleichtbeton	373,4				44,2%
Stahlfasern	17,4	100,0%			
Betonsockel, anteilig	9,9				
Bewehrungsstahl im Sockel	0,2	100,0%			
	<b>400,9</b>	<b>4,39%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,00%</b>	<b>41,16%</b>

Die Holzaußenwand weist einen hohen Anteil zertifiziert nachhaltig nachwachsender Rohstoffe aus. Dagegen besteht die Ziegelwand fast ausschließlich aus nicht erneuerbaren Primärmaterialien. In der Dämmbetonwand fällt der relativ hohe Anteil weiterverwerteter Materialien auf. Dies ist auf das enthaltende Blähglas zurückzuführen, welches aus Altglas hergestellt wird.

Post-Use-Phase

Den Außenwänden werden folgende Parameter zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials post-use zugewiesen:

Material	Abfallfraktion	Faktor Arbeit	Faktor Wert	EoL sR <sup>3</sup>	EoL sA <sup>4</sup>	Material Loop Potenzial
<b>Holzaußenwand</b>						
Brettschichtholz wand	170102_Holz A2	1,0	0,7	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Betonsockel, anteilig	170101_Beton, bewehrt	0,8	0,9	rc	dc	39%
Bewehrungsstahl im Sockel	170405_Stahl, Scherenschrott	0,8	1,0	rc	rc	100%
Lattungen	170102_Holz A1	1,0	0,8	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Kiefer, sägerauh, lasiert	170102_Holz A2	0,9	0,7	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	nicht relevant
<b>Ziegelaußenwand</b>						
Luftkammerziegel	170102_Ziegel	0,9	0,8	rc	dc	40%
Mörtel	170102_Ziegel	0,9	0,8	rc	dc	0%
Betonsockel, anteilig	170101_Beton, bewehrt	0,8	0,9	rc	dc	39%
Bewehrungsstahl im Sockel	170405_Stahl, Scherenschrott	0,8	1,0	rc	rc	100%
Kalk-Zement-Putz	170102_Ziegel	1,0	0,8	rc	dc	0%
Kalkschlämme	170102_Ziegel	1,0	0,8	rc	dc	0%
<b>Dämmbetonaußenwand</b>						
Infralichtbeton	170101_Beton, bewehrt	0,9	0,8	rc	dc	39% <sup>5</sup>
Stahlfasern	170101_Beton, bewehrt	0,9	0,8	rc	dc	39% <sup>6</sup>
Betonsockel, anteilig	170101_Beton, bewehrt	0,8	0,9	rc	dc	39%
Bewehrungsstahl im Sockel	170405_Stahl, Scherenschrott	0,8	1,0	rc	rc	100%

<sup>3</sup> End-of-Life-Szenario selektiver Rückbau (hochwertig)

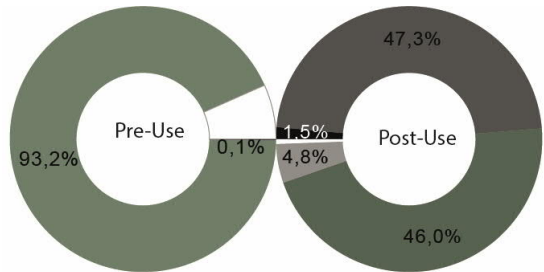
<sup>4</sup> End-of-Life-Szenario selektiver Abbruch (üblich)

<sup>5</sup> analog zu Normalbeton, siehe Erläuterung auf Seite

<sup>6</sup> Die Stahlfasern können voraussichtlich nicht sortenrein zurückgewonnen werden, da konventionelle Brechanlagen nicht darauf ausgerichtet sind. Es wird deshalb angenommen, dass der Kompositbaustoff im Ganzen recycelt wird.

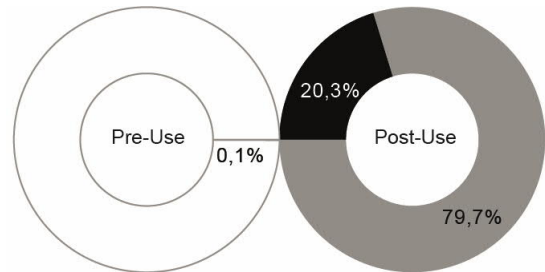
Aus den Parametern der Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich folgende Kreislaufpotenziale für die drei Außenwandtypen:

**Holz**



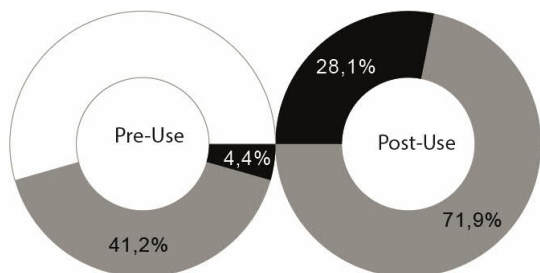
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	93,3%	94,7%	188,0%
Loop-Potenzial	93,3%	99,4%	192,8%

**Ziegel**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	0,1%	20,3%	20,4%
Loop-Potenzial	0,1%	100,0%	100,1%

**Dämmbeton**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	4,4%	28,1%	32,5%
Loop-Potenzial	45,6%	100,0%	145,6%

- | Phase    | Qualitätsstufen/Variable   |
|----------|--|
| Pre-Use  | wiederverwendete Materialien (Reuse)   |
|          | wiederverwertete Materialien (Recycling)   |
|          | erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)   |
|          | weiterverwertete Materialien (Downcycling)   |
|          | (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Resources, not renewable))   |
| Post-Use | wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)   |
|          | wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)   |
|          | weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)              |
|          | energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usable, certified renewable) |
|          | weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)   |
|          | energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usable, renewable)                                     |
|          | energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)   |

Die Außenwände weisen sehr unterschiedliche Kreislaufpotenziale auf. Während die Baustoffe der Holzwände in nahezu geschlossenen Kreisläufen geführt werden können, sind die mineralischen Baustoffe in ihrer Nachnutzungsfähigkeit eingeschränkt, d.h. sie werden unter Qualitätsverlust in offenen Kreisläufen geführt. So weist die Holzbau-Variante mit 188% das höchste Closed-Loop-Potenzial auf, mit weitem Abstand gefolgt von der Dämmbeton-Variante (32,5%) und der Ziegel-Variante (20,4%). Nimmt man die Materialien der offenen Kreisläufe hinzu, liegt die Holzbau-Variante mit einem Loop-Potenzial von 192,8% immer noch vorn, aber die Differenz zur Dämmbeton-Variante (145,6%) und zur Ziegel-Variante (100,1%) verringert sich.

In der **Pre-Use-Phase** fällt bei den Holzwänden der hohe Anteil eingesetzter erneuerbarer Rohstoffe auf, während die Ziegelwände durch den Einsatz von Primärmaterialien gekennzeichnet sind. Bei den

Dämmbetonwänden gehen die Stahlfasern in das Closed-Loop-Potenzial ein. Hier wurde angenommen, dass die Fasern – genau wie konventionelle Bewehrungsstähle – aus 100% Sekundärmaterial bestehen. Außerdem wirkt sich das Blähglas, das als leichte Gesteinskörnung weiterverwertet wurde, auf das Loop-Potenzial pre-use aus.

In der **Post-Use-Phase** werden die Materialien der Holzwände fast vollständig dem Closed-Loop-Potenzial zugeordnet. Die Möglichkeit der Weiterverwertung in einer Kaskadennutzung (z.B. zu Spanplatten) wird hier ebenso wie die energetische Verwertbarkeit den geschlossenen Kreisläufen zugeordnet. Durch den Einsatz PEFC-zertifizierte Hölzer wird sichergestellt, dass das Holz nachwachsen kann und der Kreislauf damit auf natürliche Weise geschlossen wird.

Die Ziegel der Mauerwerkswände weisen post-use ein eingeschränktes Recyclingpotenzial auf, da für die Produktion immer wieder neuer Ton als Bindemittel hinzugefügt werden muss und max. 40% Ziegelmehl aus Altmaterial eingesetzt und damit im geschlossenen Kreislauf gehalten werden kann. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus (der sich am Arbeitsaufwand und dem Wert der Abfallstoffe misst) ergibt sich post-use ein Closed-Loop-Potenzial von gut 20%. Die restlichen Anteile werden den offenen Kreisläufen zugeordnet: Ziegelbruch wird vorwiegend im Straßen- und Erdbau weiterverwertet.

Die Verwertbarkeit des Infralichtbetons der Dämmbetonwände ist schwer einschätzbar. Da für den Baustoff aufgrund der Innovationskraft noch keine Erkenntnisse aus dem Rückbau und der Verwertung vorliegen, ist unklar, ob das Material recycelbar ist. Im Gegensatz zu Normalbeton bestehen für Leichtbeton noch keine Regularien für den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung aus Leichtbeton. Prinzipiell ist denkbar, dass Rezyklat aus Leichtbeton wieder als Zuschlagstoff für neuen Leichtbeton eingesetzt wird. Pragmatisch wird deshalb das Material-Loop-Potenzial von Normalbeton in Höhe von 39% angenommen. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ergibt sich post-use ein Closed-Loop-Potenzial von gut 28%. Die restlichen Anteile werden den offenen Kreisläufen zugeordnet. Der eingegangene Faktor Arbeit für den Rückbau orientiert sich an Porenbetonwänden, der Faktor Wert wurde gegenüber Normalbeton leicht abgewertet und orientiert sich an dem Wert für Gemische von Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik, weil Rezyklat aus Infralichtbeton ggü. Normalbeton geringere Festigkeiten aufweist und damit über ein geringeres Einsatzspektrum verfügt. Es ist im besten Falle anzunehmen, dass er (nur) für den gleichen Zweck wiedereingesetzt werden kann. Da die Stahlfasern sehr fein sind und unklar ist, ob sie bei einem späteren Recycling vom Beton getrennt werden können, wird für die Stahlfasern nicht das Material-Loop-Potenzial von Stahl (100%) angesetzt, sondern der gleiche Wert wie für den Beton. Möglicherweise kann der Kompositbaustoff ohne Trennung anteilig in neuen Infralichtbetonbauteilen verwertet werden.

Die Außenwände der Anbauten weisen nahezu die gleichen Kreislaufpotenziale auf. Sie gehen mit ihrem spezifischen Kreislaufpotenzial in die Gesamtergebnisse ein, werden hier aber nicht extra abgebildet.



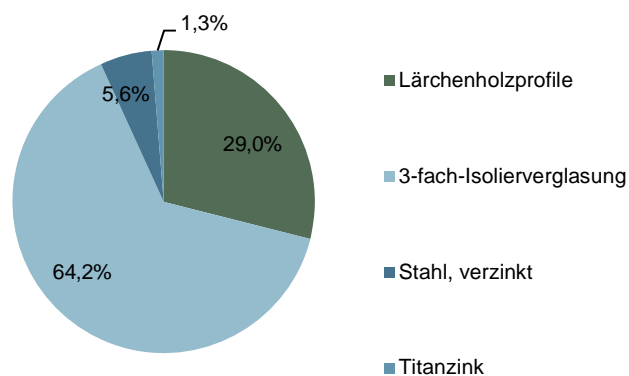
### 5.3. Fenster

Die Fenster sind in allen drei Forschungshäusern gleich konstruiert und unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer Kubatur, angepasst auf den jeweiligen Wandbaustoff und dessen spezifische tragende Eigenschaften im Sturzbereich. Im Folgenden werden die Massen für 1 qm<sup>2</sup> Fensterfläche beispielhaft für die Fenster des Hauses in Holzbauweise dargestellt:

#### Material- und Massenermittlung

Bauteilschicht	Material	Austausch- häufigkeit [n]	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]
Rahmen	Lärchenholzprofile	2	54,1
Verglasung	3-fach-Isolierverglasung	3	120,0
Beschläge	Stahl, verzinkt	3	10,4
Fensterblech	Titanzink	2	2,3
<b>Summe</b>			<b>186,9</b>

Holzfenster



Den größten Masseanteil in den Fenstern hat das Isolierglas, gefolgt von den Lärchenholzprofilen.

Kleinteilige Materialien wie Dichtungsmassen und Kompribänder wurden nicht berechnet.

Aufgrund ihrer spezifischen Nutzungsdauer muss damit gerechnet werden, dass die Verglasung während des Lebenszyklus von 100 Jahren dreimal und die Fensterrahmen und -bleche zweimal ausgetauscht werden muss.

Pre-Use-Phase

Die verwendeten Materialien enthalten folgende Anteile an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen:

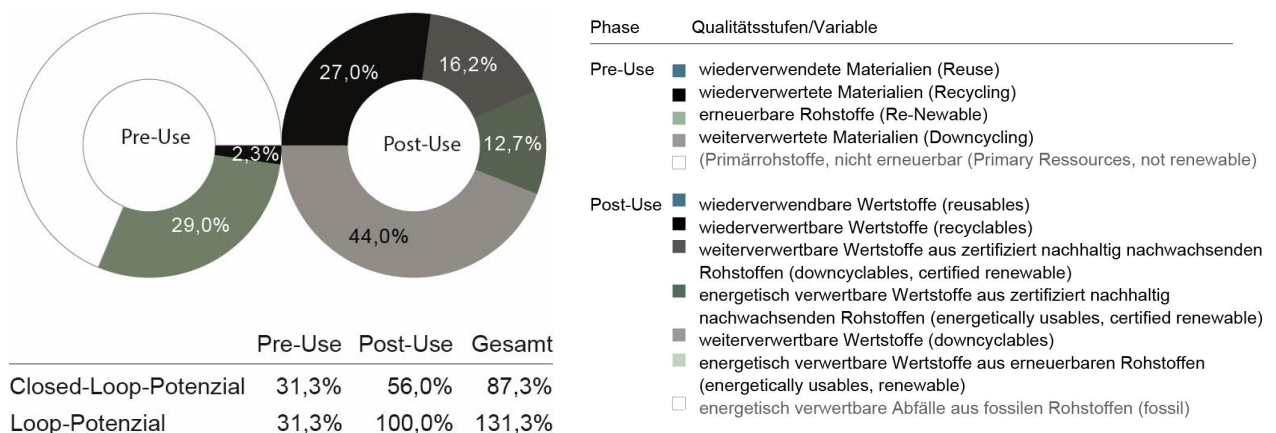
Material	Masse im Lebenszyklus [kg/m²]	wiederverwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe zert. nachhaltig Rnc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiterverwertete Materialien DC %
Lärchenholzprofile	54,1		100%		
3-fach-Isolierverglasung	120,0				
Stahl, verzinkt	10,4	35%			
Titanzink	2,3	30%			
	<b>186,9</b>	<b>2,3%</b>	<b>29,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>

Post-Use-Phase

Den Bauteilschichten der Gründung werden folgende Parameter zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials post-use zugewiesen:

Material	Abfallfraktion	Faktor Arbeit	Faktor Wert	EoL sR	EoL sA	Material Loop Potenzial
Lärchenholzprofile	170102_Holz A1	0,7	0,8	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
3-fach-Isolierverglasung	170202_Glas	0,9	0,7	rc	dc	50%
Stahl, verzinkt	170405_Stahl, Scherenschrott	0,8	1,0	rc	rc	100%
Titanzink	170402_Zink	0,8	1,3	rc	rc	100%

Aus den Parametern der Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich folgende Kreislaufpotenziale für die Gründungsbauteile:



Da die großen Masseanteile der Isolierverglasung aus nicht erneuerbaren Primärmaterialien bestehen, beträgt das Kreislaufpotenzial der Fenster in der Pre-Use-Phase „nur“ 29%, bedingt vorwiegend durch den

Anteil erneuerbarer Rohstoffe für die Holzrahmen und zu einem kleinen Teil durch den Sekundärrohstoffanteil der Metalle.

Da das Material-Loop-Potenzial von Fensterglas eingeschränkt ist (max. 50% im Neuprodukt), wird ein nicht unerheblicher Teil der Massen post-use der Weiterverwertung mit Qualitätsverlust (Downcycling) zugeordnet (44%). Das Glas kann z.B. zu Mineralwolle, Schaumglas oder zu anderen Produkten außerhalb des Bauwesens verwertet werden.

56% der Materialien können post-use in geschlossenen Kreisläufen geführt werden (CLP), entweder durch Recycling (Metalle und Glas) oder durch natürliches Nachwachsen (Holz). Rechnet man die offenen Kreisläufe hinzu, beträgt das Loop-Potenzial der Fenster 131,3% (Summe der Pre- und der Post-Use-Phase).

### 5.4. Tragende Innenwände

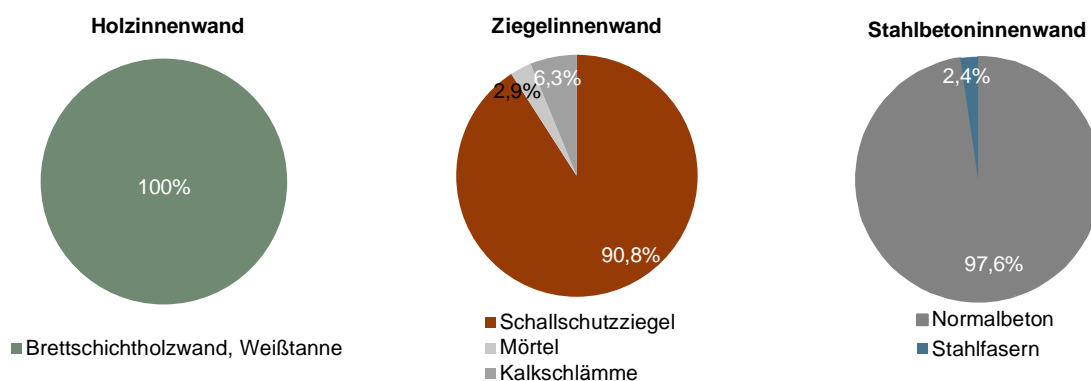
Die tragenden Innenwände gehören ebenfalls zu den Bauteilen, in denen sich die drei Forschungshäuser signifikant unterscheiden. Die Holz- und Ziegelwände wurden in weitgehend monolithischer Bauweise erstellt. Die Betonwände mit Stahlfasern wurden in Sichtbetonbauweise ausgeführt. Im Folgenden werden die eingesetzten Materialien und Massen pro m<sup>2</sup> Innenwandfläche gegenübergestellt.

#### Material- und Massenermittlung

Bauteilschicht	Material	Austauschhäufigkeit [n]	Masse im Lebenszyklus		
			Holz	Ziegel	Dämmbeton
<b>Holzwand</b>					
tragende Innenwand	Brettschichtholzwand, Weißtanne	0	78,3		
<b>Ziegelwand</b>					
tragende Innenwand	Schallschutzziegel	0		451,2	
	Mörtel	0		14,4	
	Kalkschlämme	2		10,4	
<b>Betonwand</b>					
tragende Innenwand	Normalbeton	0			571,8
	Stahlfasern	0			13,8
<b>Summen</b>			<b>78,3</b>	<b>496,8</b>	<b>585,6</b>

Während die Ziegel- und Betoninnenwände sehr massiv sind, fallen die Holzwände durch eine geringe Masse auf – nur ca. 13-15% gegenüber den anderen Wänden. Dies ist zum einen durch die geringe Rohdichte der Brettschichtholzwände von 489 kg/m<sup>3</sup> begründet (ggü. 2.000 kg/m<sup>3</sup> bei der Ziegelwand und 2.400 kg/m<sup>3</sup> bei der Stahlbetonwand), zum anderen sind die Holzwände schlanker: Sie haben eine Stärke von 16cm, während die Ziegel- und Betonwand 24cm stark sind.

Die Holzwand ist monolithisch hergestellt. Die Ziegelwand ist mineralisch-monolithisch (Tonziegel mit Kalkzementmörtel und Kalkputz). Die Betonwand ist ein Komposit aus Normalbeton mit Stahlfasern. Die jeweiligen Anteile stellen sich wie folgt dar:



Pre-Use-Phase

Die Innenwände enthalten folgende Anteile an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen:

Material	Masse im Lebenszyklus [kg/m²]	wieder- verwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe zert. nachhaltig RNc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiter- verwertete Materialien DC %
<b>Holzinnenwand</b>					
Brettschichtholz	78,3		97,0%		
	<b>78,3</b>	<b>0,0%</b>	<b>97,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>
<b>Ziegelinnenwand</b>					
Schallschutzziegel	451,2				
Mörtel	14,4				
Kalkschlämme	31,2				
	<b>496,8</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>
<b>Betoninnenwand</b>					
Normalbeton	571,8				
Stahlfasern	13,8	100,0%			
	<b>585,6</b>	<b>2,36%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>

Die Holzinnenwand ist weitgehend aus erneuerbaren Rohstoffen hergestellt. Das Holz ist PEFC-zertifiziert. Der geringe Anteil Primärmaterial ist auf den Leimanteil des Brettschichtholzes zurückzuführen. Dagegen besteht das Ziegelmauerwerk ausschließlich aus nicht erneuerbaren Primärmaterialien. Bei der Stahlbetonwand wird angenommen, dass die Stahlfasern – wie konventioneller Bewehrungsstahl – vollständig aus Sekundärmaterial bestehen.

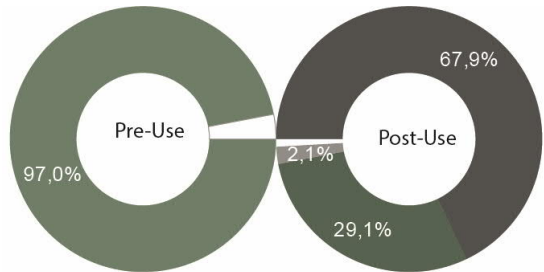
Post-Use-Phase

Den Innenwänden werden folgende Parameter zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials post-use zugewiesen:

Material	Abfallfraktion	Faktor Arbeit	Faktor Wert	EoL sR	EoL sA	Material Loop Potenzial
<b>Holzinnenwand</b>						
Brettschichtholz	170102_Holz A2	1,0	0,7	dc	en r	nicht relevant
<b>Ziegelinnenwand</b>						
Schallschutzziegel	170102_Ziegel	0,9	0,8	rc	dc	40%
Mörtel	170102_Ziegel	0,9	0,8	rc	dc	0%
Kalkschlämme	170102_Ziegel	1,0	0,8	rc	dc	0%
<b>Betoninnenwand</b>						
Normalbeton	170101_Beton, bewehrt	0,9	0,9	rc	dc	39%
Stahlfasern	170101_Beton, bewehrt	0,9	0,9	rc	dc	39%

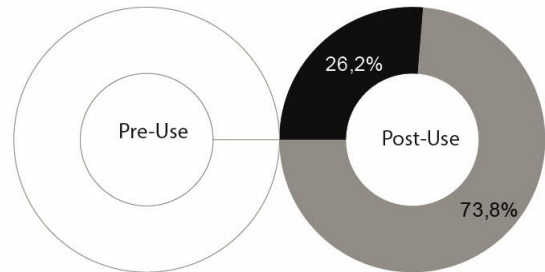
Aus den Parametern der Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich folgende Kreislaufpotenziale für die drei Innenwandtypen:

**Holz**



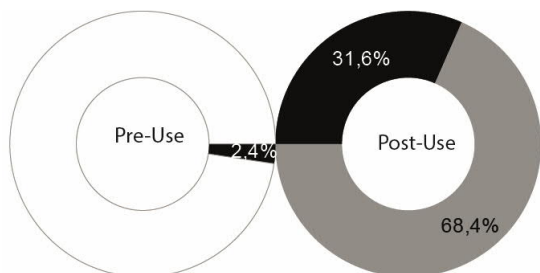
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	97,0%	97,0%	194,0%
Loop-Potenzial	97,0%	99,1%	196,1%

**Ziegel**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	0,0%	26,2%	26,2%
Loop-Potenzial	0,0%	100,0%	100,0%

**Stahlfaserbeton**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	2,4%	31,6%	34,0%
Loop-Potenzial	2,4%	100,0%	102,4%

- | Phase    | Qualitätsstufen/Variable  |
|----------|---|
| Pre-Use  | ■ wiederverwendete Materialien (Reuse)  |
|          | ■ wiederverwertete Materialien (Recycling)  |
|          | ■ erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)  |
|          | ■ weiterverwertete Materialien (Downcycling)  |
|          | □ (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Ressources, not renewable))   |
| Post-Use | ■ wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)  |
|          | ■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)  |
|          | ■ weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)               |
|          | ■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usables, certified renewable) |
|          | ■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)  |
|          | ■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usables, renewable)                                     |
|          | □ energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)  |

Die Innenwände weisen analog zu den Außenwänden sehr unterschiedliche Kreislaufpotenziale auf. Da die Holzinne wand zu 97% aus nachwachsenden Rohstoffen besteht, ist das Kreislaufpotenzial pre-use entsprechend hoch. In der Post-Use-Phase ist die Wahrscheinlichkeit des selektiven Rückbaus unter Berücksichtigung der Faktoren Arbeit und Wert relativ hoch, so dass ca. 68% der stofflichen Verwertung in einer Kaskadennutzung zugeordnet werden. 29% werden der energetischen Verwertung zugeordnet. Sowohl die stoffliche als auch die energetische Verwertbarkeit werden im Closed-Loop-Potenzial angerechnet, da durch die nachhaltige Forstwirtschaft (PEFC-zertifiziert) sichergestellt ist, dass der natürliche Kreislauf geschlossen werden kann.

Die Ziegelinnenwand als auch die Betoninnenwand werden fast ausschließlich aus nicht erneuerbaren Primärmaterialien hergestellt, so dass sie pre-use kein oder kaum Kreislaufpotenzial aufweisen. Im

Gegensatz zur Dämmbetonaußenwand kommt bei der Betoninnenwand aus Gründen der Tragfähigkeit kein Blähglas aus Altglas zum Einsatz. Post-use weisen beide mineralische Innenwände ein ähnliches Kreislaufpotenzial auf: Durch den eingeschränkten Sekundärrohstoffanteil in neuen Produkten (Material Loop Potenzial), kann nur ein geringer Anteil in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. Der Großteil wird deshalb der Weiterverwertung in offenen Kreisläufen zugerechnet.

### 5.5. Nicht tragende Innenwände

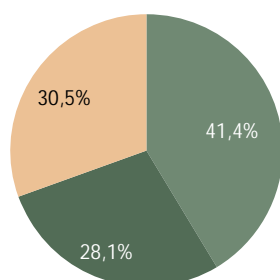
In allen drei Forschungshäusern gibt es nicht tragende Innenwände aus Holz und aus Gipskarton. Diese unterscheiden sich nicht in ihrer Bauart, aufgrund der unterschiedlichen Innenflächen (bedingt durch unterschiedliche Außenwandstärken) aber geringfügig in den Gesamtmassen. Im Folgenden werden beispielhaft die nicht tragenden Innenwände der Holzbauweise dargestellt (jeweils pro m<sup>2</sup> Wandfläche).

#### Material- und Massenermittlung

Bauteilschicht	Material	Austauschhäufigkeit [n]	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]	
			Holz	Gipskarton
<b>Holzinnenwände 1+3, 20cm</b>				
Beplankung	3-Schichtplatte Lärche	0	11,2	
Ständerwerk	Konstruktionsvollholz (Kvh)	0	7,6	
Dämmung	Holzweichfaserdämmung	0	8,3	
<b>Gipskartonwände 5+11, 13cm</b>				
Beplankung	Gipskartonplatten, zweilagig	0		37,2
Ständerwerk	CW/CU-Profile, Stahlblech verzinkt	0		2,0
Dämmung	Mineralwolle	0		2,9
<b>Summen</b>			<b>27,1</b>	<b>42,1</b>

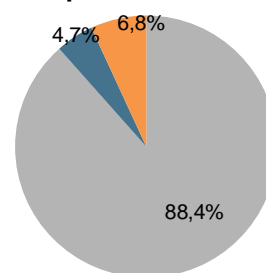
Die Gipskartonwände weisen mehr Masse auf als die Holzwände, obwohl sie über eine geringere Stärke verfügen. Die Anteile der verwendeten Baustoffe sind recht unterschiedlich verteilt, wie die nachfolgenden Diagramme zeigen.

nicht tragende Holzinnenwand



■ Beplankung ■ Ständerwerk ■ Dämmung

Gipskartonwand



■ Gipskartonplatten ■ Stahlblechprofile ■ Mineralwolle

Pre-Use-Phase

Die Innenwände enthalten folgende Anteile an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen:

Material	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]	wiederverwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe zert. nachhaltig RNc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiterverwertete Materialien DC %
<b>Holzinnenwände 1+3, 20cm</b>					
3-Schichtplatte Lärche	11,2		99,0%		
Konstruktionsvollholz (Kvh)	7,6		100,0%		
Holzweichfaserdämmung	8,3		90,0%		
	<b>27,1</b>	<b>0,0%</b>	<b>96,5%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>
<b>Gipskartonwände 5+11, 13cm</b>					
Gipskartonplatten, zweilagig	37,2				2,0%
Stahlblechprofile, verzinkt	2,0	40,0%			
Mineralwolle	2,9	24,6%			
	<b>42,1</b>	<b>3,57%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>1,8%</b>

Die nicht tragenden Holzwände bestehen fast ausschließlich aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen, während die Gipskartonwände fast vollständig aus Primärmaterialien hergestellt werden.

Post-Use-Phase

Den Innenwänden werden folgende Parameter zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials post-use zugewiesen:

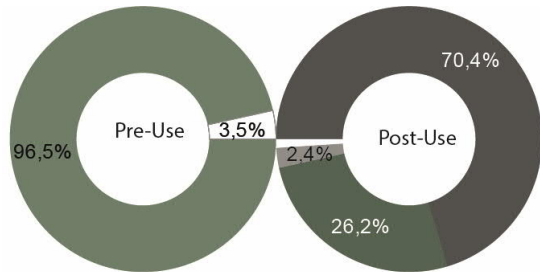
Material	Abfallfraktion	Faktor Arbeit	Faktor Wert	EoL sR	EoL SA	Material Loop Potenzial
<b>Holzinnenwände 1+3, 20cm</b>						
3-Schichtplatte Lärche	170102_Holz A2	1,0	0,7	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Konstruktionsvollholz (Kvh)	170102_Holz A1	1,0	0,8	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Holzweichfaserdämmung	170102_Holz A2	1,0	0,7	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
<b>Gipskartonwände 5+11, 13cm</b>						
Gipskartonplatten, zweilagig	170802_Gips und Gipskarton	1,0	0,7	rc	d	99%
Stahlblechprofile, verzinkt	170405_Stahl, Scherenschrott	1,0	1,0	rc	rc	95%
Mineralwolle	170604_Dämmstoff MiWo	1,0	0,6	rc	d	97%

Beide Typen von leichten Trennwänden sind leicht sortenrein rückbaubar (Faktor Arbeit 1,0), weisen aber unterschiedliche Abfallwerte auf: Der Faktor Wert liegt zwischen 0,6 für Mineralwolle und 1,0 für die Stahlblechprofile. Das MLP spielt nur bei den recycelbaren Materialien der Gipskartonwände eine Rolle. Die Hölzer werden in einer Kaskadennutzung weiterverwertet (downcycelbar).



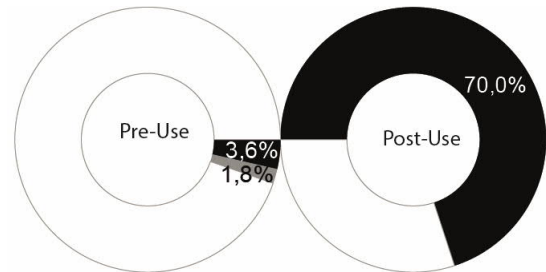
Aus den Parametern der Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich folgende Kreislaufpotenziale für die beiden Typen nicht tragender Innenwände

**Holz**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	96,5%	96,5%	193,1%
Loop-Potenzial	96,5%	99,0%	195,5%

**Gipskarton**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	3,6%	70,0%	73,6%
Loop-Potenzial	5,3%	70,0%	75,3%

- | Phase    | Qualitätsstufen/Variable  |
|----------|---|
| Pre-Use  | wiederverwendete Materialien (Reuse)  |
|          | wiederverwertete Materialien (Recycling)  |
|          | erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)  |
|          | weiterverwertete Materialien (Downcycling)  |
|          | (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Ressources, not renewable))   |
| Post-Use | wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)  |
|          | wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)  |
|          | weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)               |
|          | energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usables, certified renewable) |
|          | weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)  |
|          | energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usables, renewable)                                     |
|          | energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)  |

Die Kreislaufpotenziale der beiden Typen nicht tragender Innenwände unterscheiden sich stark. Während die Holzwände auf ein fast vollständiges Closed-Loop-Potenzial kommen (bedingt durch erneuerbare Rohstoffe und stofflich bzw. energetisch weiterverwertbare Materialien am Ende der Nutzungsdauer), beträgt das Closed-Loop-Potenzial der Gipswände nur knapp 74% und das Loop-Potenzial gut 75%. Pre-use werden für die Gipswände fast ausschließlich Primärmaterialien eingesetzt, ausgenommen für die Stahlblechprofile, die Steinwolle und den Karton der Gipsplatten. Allerdings machen diese Materialien ggü. dem Gipsanteil nur einen kleinen Anteil aus. Am Ende der Nutzungsdauer sind die Gipsplatten recyclingfähig, was heute erst selten praktiziert wird, aber die Technologie ist vorhanden. Mit zunehmender Verknappung von Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (begründet durch den geplanten Kohleausstieg) wird das Gipsrecycling sich voraussichtlich etablieren. Für die Mineralwolle wird ein Recycling angenommen, da der größte deutsche Hersteller (genaue Angaben lagen nicht vor), ein Rücknahmesystem etabliert hat und sauber ausgebaute Materialien zurücknimmt. Dennoch bleibt unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ein Anteil von 30% in der Post-Use-Phase, der voraussichtlich deponiert wird.

### 5.6. Decken

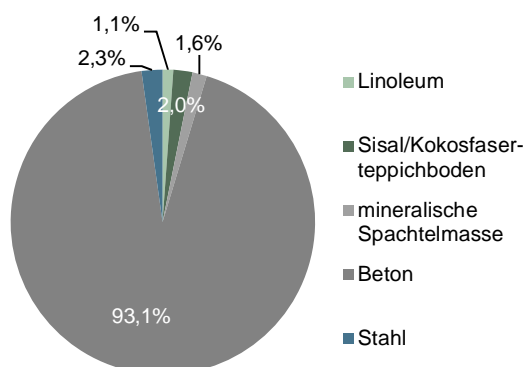
Alle drei Forschungshäuser wurden mit massiven Decken aus Beton hergestellt. Sie unterscheiden sich lediglich in der Bewehrung: Während die Decken des Holzhauses und des Ziegelhauses mit konventionellen Stahlmatten bewehrt wurden, kamen in den Decken des Dämmbetonhauses Stahlfasern zum Einsatz. Die Materialien und Massen wurden wie folgt pro m<sup>2</sup> Deckenfläche (anteilig) ermittelt:

#### Material- und Massenermittlung

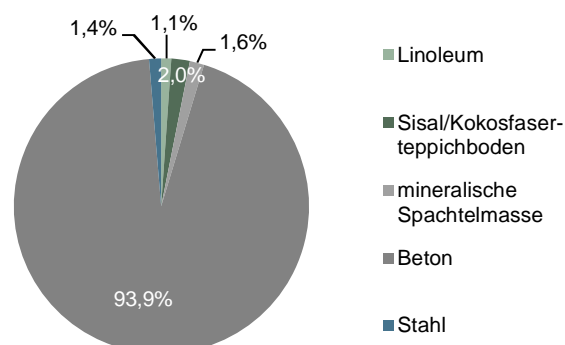
Bauteilschicht	Material	Austauschhäufigkeit [n]	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]	
			Holz + Ziegel	Beton
<b>Decken im Holz- u. Ziegelhaus</b>				
Fußbodenbelag 1	Linoleum	4	8,5	
Fußbodenbelag 2	Sisal/Kokosfaserteppichboden	9	15,4	
Ausgleichsspachtel	mineralische Spachtelmasse	0	12,0	
Filigrandecke mit Aufbeton	Beton	0	714,7	
	Bewehrungsstahl	0	17,3	
<b>Decken im Betonhaus</b>				
Fußbodenbelag 1	Linoleum	4		8,5
Fußbodenbelag 2	Sisal/Kokosfaserteppichboden	9		15,4
Ausgleichsspachtel	mineralische Spachtelmasse	0		12,0
Stahlfaserbeton	Beton	0		716,8
	Stahlfasern	0		10,4
<b>Summen</b>			<b>767,9</b>	<b>763,1</b>

Die beiden Deckentypen weisen nahezu gleiche Massen auf. Der Anteil der Stahlfasern ist in den Decken des Betonhauses etwas geringer als der Anteil der Stahlmatten in den Decken des Holzhauses und Ziegelhauses.

**Decken im Holzhaus + Ziegelhaus**



**Decken im Betonhaus**



Pre-Use-Phase

Die Decken enthalten folgende Anteile an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen:

Material	Masse im Lebenszyklus [kg/m²]	wieder- verwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe zert. nachhaltig RNc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiter- verwertete Materialien DC %
<b>Decken im Holz- u. Ziegelhaus</b>		10,0%		62,0%	
Linoleum	8,5			72,9%	
Sisal/Kokosfaserteppichboden	15,4				
mineralische Spachtelmasse	12,0				
Beton	714,7				
Bewehrungsstahl	17,3	100,0%			
	<b>767,9</b>	<b>2,4%</b>	<b>0,0%</b>	<b>2,1%</b>	<b>0,0%</b>
<b>Decken im Betonhaus</b>					
Linoleum	8,5	10,0%		62,0%	
Sisal/Kokosfaserteppichboden	15,4			72,9%	
mineralische Spachtelmasse	12,0				
Beton	716,8				
Stahlfasern	10,4	100,0%			
	<b>763,1</b>	<b>1,5%</b>	<b>0,0%</b>	<b>2,2%</b>	<b>0,0%</b>

Die Decken bestehen fast ausschließlich aus Primärmaterialien. Die erneuerbaren Rohstoffe in den Bodenbelägen fallen kaum ins Gewicht.

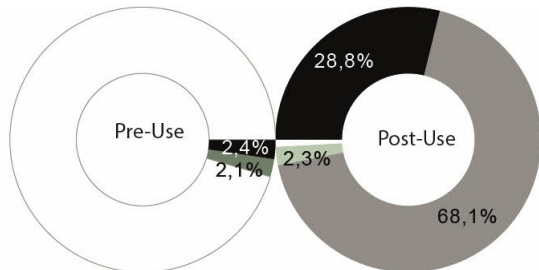
Post-Use-Phase

Den Decken werden folgende Parameter zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials post-use zugewiesen:

Material	Abfallfraktion	Faktor Arbeit	Faktor Wert	EoL sR	EoL sA	Material Loop Potenzial
<b>Decken im Holz- u. Ziegelhaus</b>						
Linoleum	170203_Kunststoffe, zur energetischen Vewertung	1,0	0,6	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Sisal/Kokosfaserteppichboden		0,9	0,6	en <sub>r</sub>	en <sub>r</sub>	nicht relevant
mineralische Spachtelmasse	170101_Beton, bewehrt	0,8	0,9	rc	dc	39%
Beton	170101_Beton, bewehrt	0,8	0,9	rc	dc	39%
Bewehrungsstahl	170405_Stahlschrott	0,8	1,0	rc	rc	100%
<b>Decken im Betonhaus</b>						
w.o.						
Stahlfasern	170405_Stahlschrott	1,0	1,0	rc	rc	95%

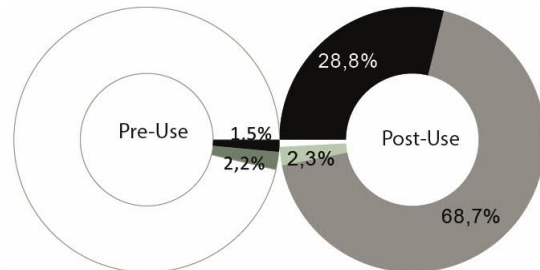
Aus den Parametern der Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich folgende Kreislaufpotenziale für die beiden Deckentypen:

**Decken im Holz und Ziegelhaus**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	4,5%	28,8%	33,3%
Loop-Potenzial	4,5%	99,1%	103,7%

**Decken im Betonhaus**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	3,6%	28,2%	31,8%
Loop-Potenzial	3,6%	99,1%	102,8%

- | Phase    | Qualitätsstufen/Variable  |
|----------|---|
| Pre-Use  | ■ wiederverwendete Materialien (Reuse)  |
|          | ■ wiederverwertete Materialien (Recycling)  |
|          | ■ erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)  |
|          | ■ weiterverwertete Materialien (Downcycling)  |
|          | □ (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Resources, not renewable))  |
| Post-Use | ■ wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)  |
|          | ■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)  |
|          | ■ weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)               |
|          | ■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usables, certified renewable) |
|          | ■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)  |
|          | ■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usables, renewable)                                     |
|          | □ energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)  |

Die beiden Decken weisen aufgrund der nur geringen Unterschiede der Baustoffe ein fast identisches Kreislaufpotenzial auf. Pre-use wird im Verhältnis zur Gesamtmasse nur ein kleiner Teil sekundärer oder erneuerbarer Rohstoffe eingesetzt (Bodenbeläge).

Post-use kann nach heutigem Stand nur ca. 1/3 der Materialien in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. Dies ist vorwiegend auf die eingeschränkte Recyclingfähigkeit des Betons zurückzuführen (MLP 39%). Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus – auf der vorherigen Seite dargestellt in Form der Faktoren Arbeit und Wert – ergibt sich post-use ein Closed-Loop-Potenzial von ca. 28 bis 29%. Rechnet man die Materialien hinzu, die unter Qualitätsverlust recycelt werden, steigt die Zirkularitätsrate auf ca. 103 bis 104% (Loop-Potenzial).

Die Decken zum unbeheizten Dachraum unterscheiden sich von den übrigen Decken nur durch die Auflage aus Holzweichfaserdämmung und weisen deshalb ein sehr ähnliches Kreislaufpotenzial auf. Sie gehen mit ihrem spezifischen Kreislaufpotenzial in das Gesamtergebnis – den Urban Mining Indicator – ein, werden hier aber nicht gesondert dargestellt.

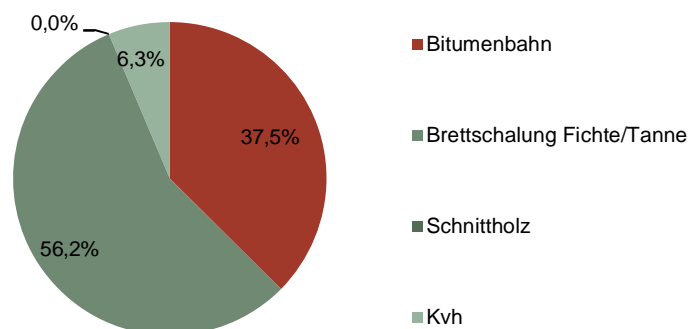
## 5.7. Dächer

Die Dächer sind in allen drei Forschungshäusern gleich konstruiert. Im Folgenden werden die Massen für 1 qm<sup>2</sup> Dachfläche beispielhaft für das Dach des Hauses in Holzbauweise dargestellt:

### Material- und Massenermittlung

Bauteilschicht	Material	Austausch- häufigkeit [n]	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]
Abdichtung	Bitumenbahnen	4	31,0
Schalung	Brettschalung Fichte/Tanne	3	46,5
Unterfütterung	Massivholzbretter	0	0,0
Pfetten	Brettschichtholz	0	5,3
Sparren	Konstruktionsvollholz (Kvh)	0	10,7
<b>Summe</b>			<b>93,5</b>

### Dächer



Die Bitumenbahnen haben einen relativ großen Anteil an den Massen, da sie während des Lebenszyklus von 100 Jahren viermal ausgetauscht werden müssen.

Pre-Use-Phase

Die verwendeten Materialien enthalten folgende Anteile an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen:

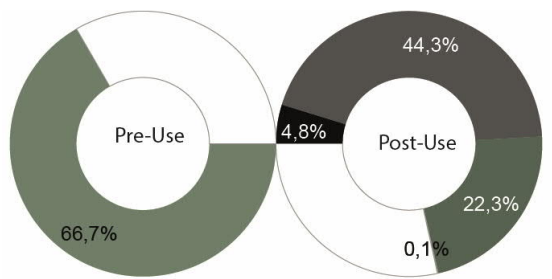
Material	Masse im Lebenszyklus [kg/m <sup>2</sup> ]	wiederverwertete Materialien RC %	erneuerbare Primärrohstoffe zert. nachhaltig Rnc %	erneuerbare Primärrohstoffe RN %	weiterverwertete Materialien DC %
Bitumenbahnen	31,0				
Brettschalung Fichte/Tanne	46,5		100,0%		
Massivholzbretter	0,0		100,0%		
Brettschichtholz	5,3		97,0%		
Konstruktionsvollholz (Kvh)	10,7		100,0%		
	<b>93,5</b>	<b>0,0%</b>	<b>66,7%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>

Post-Use-Phase

Den Bauteilschichten der Gründung werden folgende Parameter zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials post-use zugewiesen:

Material	Abfallfraktion	Faktor Arbeit	Faktor Wert	EoL sR	EoL sA	Material Loop Potenzial
Bitumenbahnen	170302_Bitumengemische	0,8	0,6	rc	en <sub>f</sub>	30%
Brettschalung Fichte/Tanne	170102_Holz A2	0,9	0,7	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Massivholzbretter	170102_Holz A2	0,9	0,7	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Brettschichtholz	170102_Holz A2	1,0	0,7	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant
Konstruktionsvollholz (Kvh)	170102_Holz A1	1,0	0,8	dc	en <sub>r</sub>	nicht relevant

Aus den Parametern der Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich folgende Kreislaufpotenziale für die Dächer:



Phase	Qualitätsstufen/Variable
Pre-Use	■ wiederverwendete Materialien (Reuse)
	■ wiederverwertete Materialien (Recycling)
	■ erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)
	■ weiterverwertete Materialien (Downcycling)
	□ (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Ressources, not renewable))
Post-Use	■ wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)
	■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)
	■ weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usables, certified renewable)
	■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usables, renewable)
□ energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)	

	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	66,7%	71,5%	138,1%
Loop-Potenzial	66,7%	71,6%	138,3%

Die Dächer weisen insgesamt recht hohe Kreislaufpotenziale auf. Nur die Bitumenbahnen werden aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen hergestellt und gehen deshalb nicht in das Kreislaufpotenzial pre-use ein. Nach der Nutzung können sortenrein zurückgebaute Altbitumenbahnen recycelt werden (was z.B. in Belgien bereits praktiziert wird), jedoch ist nach heutigem Stand der Technik nur ein Anteil von 30% im Neuprodukt ersetzbar und somit im geschlossenen Kreislauf zu führen. Zu den Kreislaufpotenzialen der Holzbaustoffe siehe Außen- und Innenwände.

Das Closed-Loop-Potenzial der Dächer ist annähernd so hoch wie das Loop-Potenzial, da keine Materialien vor oder nach der Nutzung unter Qualitätsverlust stofflich verwertet werden. Der Anteil der Bitumenbahnen, der unter Berücksichtigung des Rückbauaufwands und des Werts nicht recycelt, sondern der energetischen Verwertung zugeführt wird, geht (im Gegensatz zu Baustoffen aus erneuerbaren Rohstoffen) nicht in das Loop-Potenzial ein, da Bitumen aus fossilen Quellen gewonnen wird und das Material bei der Verbrennung unwiederbringlich verloren geht (zumindest in menschlichen Zeiträumen betrachtet).

## 6. Ergebnisse auf Gebäudeebene

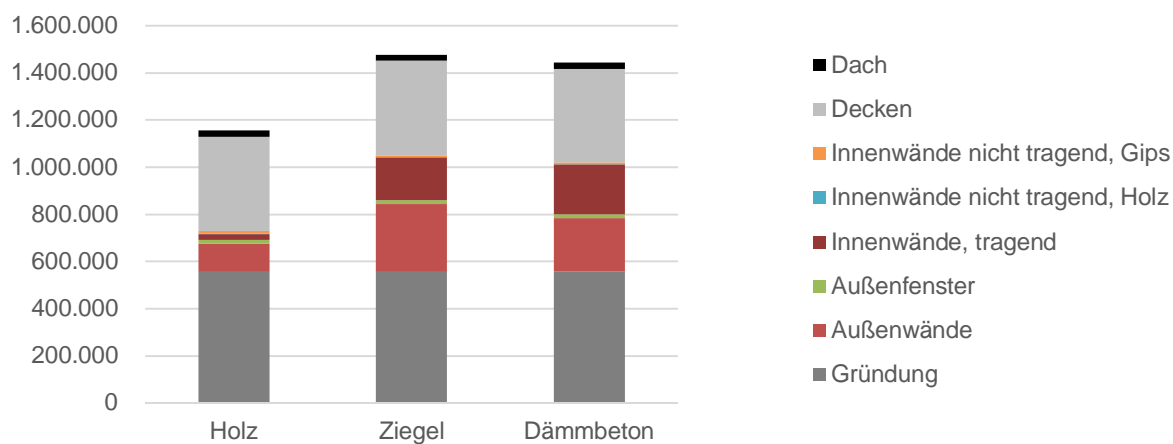
Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei Forschungshäuser auf Gebäudeebene dargestellt.

Die Gesamtmassen wurden anhand der Flächenanteile der Bauteile und den in Kapitel 5 berechneten Massen pro Quadratmeter Baueinfläche ermittelt. Die Flächen der Bauteile unterscheiden sich – bedingt durch unterschiedlich starke Außenwände – geringfügig. In der nachfolgenden Tabelle sind beispielhaft die Flächen des Holzhauses beziffert. Die Massen der drei Häuser ergeben sich auf Gebäudeebene wie folgt:

Massen auf Gebäudeebene [t.]

	Flächen	Holz	Ziegel	Dämmbeton
Gründung	239,1	554,1	555,2	557,0
Außenwände	583,9	119,0	286,2	225,8
Außenfenster	86,1	16,1	16,1	17,4
Innenwände, tragend	343,6	26,9	178,6	210,4
Innenwände nicht tragend, Holz	23,8	0,7	0,5	0,7
Innenwände nicht tragend, Gips	399,1	10,3	6,7	6,7
Decken	590,0	400,9	400,9	398,4
Dach	271,0	26,3	26,3	26,2
	<b>2536,5</b>	<b>1.154,3</b>	<b>1.470,4</b>	<b>1.442,5</b>

Massen auf Gebäudeebene [t.]

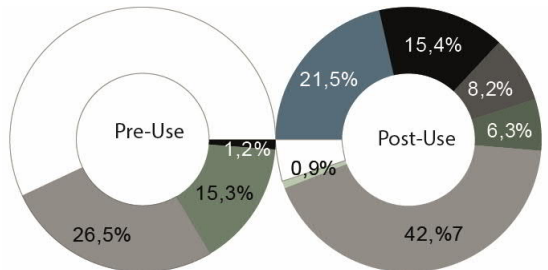


Die vorstehende Grafik zeigt, dass die größten Massen in der Gründung und den Decken liegen. Signifikante Unterschiede zeigen sich zwischen dem Haus mit Holzwänden und den beiden anderen Häusern mit mineralischen Wänden. In der Holzbauweise wirken sich die leichten Außen- und Innenwände stark auf das Gesamtergebnis der Massen aus.



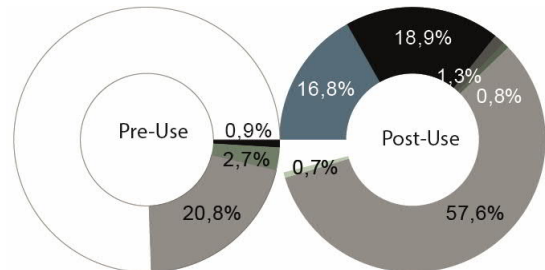
Nachfolgend werden die Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene dargestellt:

**Holz**



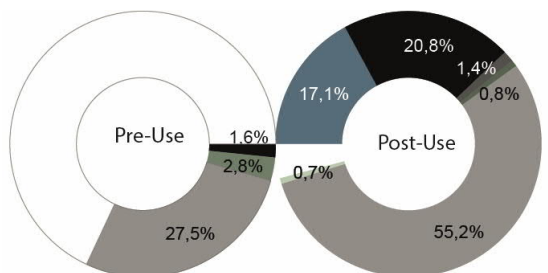
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	16,5%	51,3%	67,8%
Loop-Potenzial	43,0%	94,9%	137,9%

**Ziegel**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	3,6%	37,8%	41,4%
Loop-Potenzial	24,5%	96,1%	120,6%

**Dämmbeton**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	4,4%	40,1%	44,5%
Loop-Potenzial	31,9%	96,0%	127,9%

- | Phase    | Qualitätsstufen/Variable   |
|----------|--|
| Pre-Use  | ■ wiederverwendete Materialien (Reuse)   |
|          | ■ wiederverwertete Materialien (Recycling)   |
|          | ■ erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)   |
|          | ■ weiterverwertete Materialien (Downcycling)   |
|          | □ (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Resources, not renewable))   |
| Post-Use | ■ wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)   |
|          | ■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)   |
|          | ■ weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)              |
|          | ■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usable, certified renewable) |
|          | ■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)   |
|          | ■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usable, renewable)                                     |
|          | □ energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)   |

In den Grafiken ist deutlich erkennbar, dass der Anteil weiterverwerteter Materialien und weiterverwertbarer Wertstoffe in allen drei Forschungshäusern dominiert. Dies ist hauptsächlich auf den verwendeten Beton zurückzuführen, dessen Masse in den Gründungsbauteilen und den Decken ebenfalls dominiert.

In der **Pre-Use-Phase** wird das größte Closed-Loop-Potenzial mit der Holzbau-Variante erzielt (16,5%), resultierend aus dem Einsatz erneuerbarer Rohstoffe. Das Closed-Loop-Potenzial des Mauerwerksbaus und des Dämmbetonhauses ist ähnlich gering (3,6 bzw. 4,4%). Es resultiert hauptsächlich aus den verwendeten Sekundärstählen für die Bewehrung und den Einsatz von erneuerbaren Rohstoffen im Dach, und in leichten Trennwänden aus Holz. Die absoluten Mengen der weiterverwerteten Materialien in der Pre-Use-Phase sind bei allen Häusern gleich, denn sie resultieren zum Großteil aus dem Einsatz von Recyclingschotter für die kapillarbrechenden Schichten unterhalb der Bodenplatten. Prozentual gesehen,

ergeben sich jedoch Unterschiede, da die Masse des Schotters bei der Holzbauweise aufgrund geringerer Gesamtmasse mehr zu Buche schlägt. Beim Dämmbetonhaus ist der Anteil weiterverwerteter Materialien am höchsten, resultierend aus der Kaskadennutzung des Blähglases als leichten Zuschlagstoff im Infraleichtbeton.

In der **Post-Use-Phase** fallen in allen drei Häusern die Anteile wiederverwendbarer Wertstoffe auf, was auf die relativ großen Massen des Schotters unterhalb der Bodenplatten zurückzuführen ist, die am Ende der Nutzungsdauer für den gleichen Zweck wiedereingesetzt werden können.

## 7. Szenarienbetrachtung

Die Gründung und die Betondecken nehmen aufgrund ihrer hohen Masse den größten Einfluss auf die Ergebnisse. Um diesen Einfluss darzustellen, wurden zwei Szenarien mit dem Urban Mining Index berechnet.

### Szenario 1: „ohne Schotter“

Der Schotter unterhalb der Bodenplatte wird in allen drei Häusern nicht mitgerechnet

### Szenario 2: „ohne Schotter und mit Holzdecken im Holzhaus“

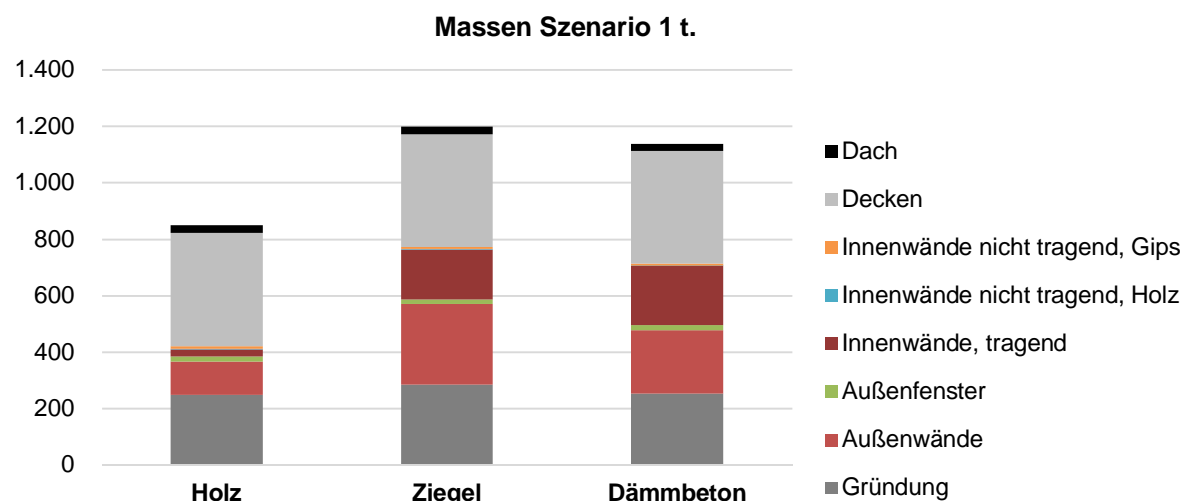
Das Szenario 2 entspricht dem Szenario 1, zusätzlich werden die Stahlbetondecken in der Holzbauweise gegen Holzdecken mit 10cm Masseschüttung und 8cm Estrich ausgetauscht.

#### 7.1. Szenario 1

Massen auf Gebäudeebene [t.]

	Flächen	Holz	Ziegel	Dämmbeton
Gründung	239,1	248	283	252
Außenwände	583,9	119	286	226
Außenfenster	86,1	16	16	17
Innenwände, tragend	343,6	27	179	210
Innenwände nicht tragend, Holz	23,8	1	0	1
Innenwände nicht tragend, Gips	399,1	10	7	7
Decken	590,0	401	401	398
Dach	271,0	26	26	26
	<b>2536,5</b>	<b>848</b>	<b>1.198</b>	<b>1.138</b>

Lässt man den Schotter außen vor, reduzieren sich die Massen gegenüber der umgesetzten Variante erheblich. Das Szenario ist zwar so nicht umsetzbar, da die frostfreie Gründung fehlen würde und statt der Schotterschicht Fundamente ausgeführt werden müssten, es dient lediglich dazu, den Einfluss der großen, in jedem Haus identischen Massen, zu relativieren.



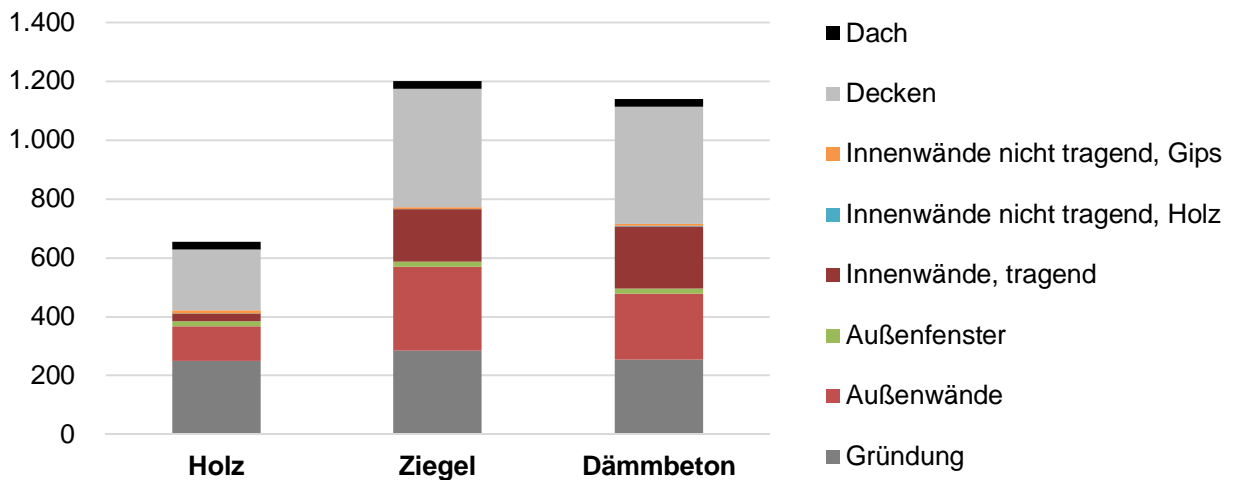
7.2. Szenario 2

Massen auf Gebäudeebene **Szenario 2** [t.]

	Flächen	Holz	Ziegel	Dämmbeton
Gründung	239,1	248	283	252
Außenwände	583,9	119	286	226
Außenfenster	86,1	16	16	17
Innenwände, tragend	343,6	27	179	210
Innenwände nicht tragend, Holz	23,8	1	0	1
Innenwände nicht tragend, Gips	399,1	10	7	7
Decken	590,0	206	401	398
Dach	271,0	26	26	26
	<b>2536,5</b>	<b>654</b>	<b>1.198</b>	<b>1.138</b>

Bei Betrachtung der Zahlen und der nachfolgenden Grafik zeigt sich, dass sich die absoluten Massen der Holzbauweise im Szenario 2 durch den Einsatz von Brettschichtholz\_wänden mit Masseschüttung und Estrich anstatt von Stahlbetondecken stark reduzieren lassen. In der Folge würden sich die Baustoffe mit Closed-Loop-Potenzial stärker auf das Ergebnis auswirken.

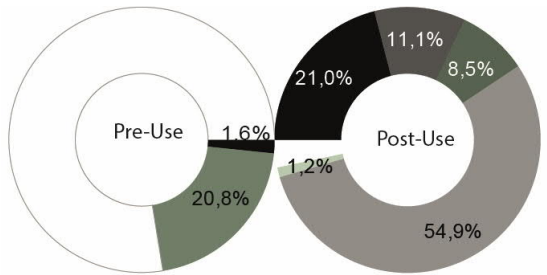
Massen Szenario 2 [t].



**Kreislaufpotenziale Szenarien**

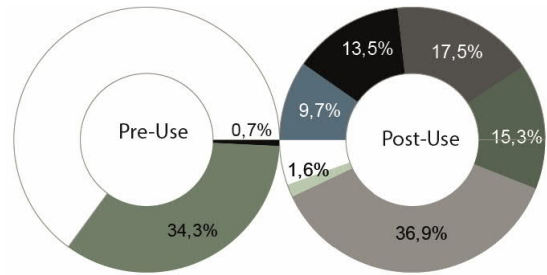
Nachfolgend werden die Kreislaufpotenziale auf Gebäudeebene für die Szenarien dargestellt. Das Ziegel- und das Dämmbetonhaus sind in den Szenarien identisch, nur das Holzhaus ist unterschiedlich ausgeführt.

**Holz Szenario 1**



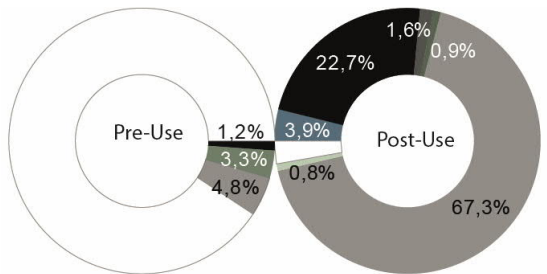
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	22,4%	40,6%	63,0%
Loop-Potenzial	22,4%	96,7%	119,1%

**Holz Szenario 2**



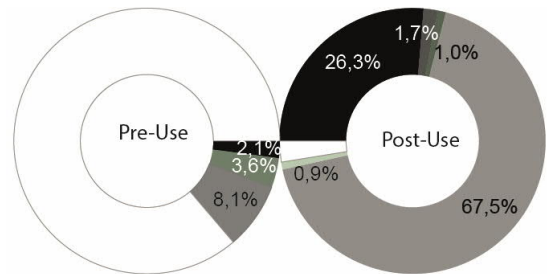
	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	35,0%	56,0%	91,0%
Loop-Potenzial	35,0%	94,5%	129,5%

**Ziegel Szenario 1 + 2**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	4,5%	29,0%	33,5%
Loop-Potenzial	9,3%	97,2%	106,5%

**Dämmbeton Szenario 1 + 2**



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	5,7%	29,0%	34,7%
Loop-Potenzial	13,8%	97,4%	111,2%

Phase	Qualitätsstufen/Variable
Pre-Use	■ wiederverwendete Materialien (Reuse)
	■ wiederverwertete Materialien (Recycling)
	■ erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)
	■ weiterverwertete Materialien (Downcycling)
	□ (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Ressources, not renewable))
Post-Use	■ wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)
	■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)
	■ weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usables, certified renewable)
	■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usables, renewable)
	□ energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)

Vergleicht man die Kreislaufpotenziale des Szenarios 1 mit denen der tatsächlich umgesetzten Häuser, fällt auf, dass die Kreislaufpotenziale aller Häuser sinken würden. Dies liegt am Entfall des Recyclingschotters, der wiederum am Ende der Nutzungsdauer wiederverwendbar ist.

Betrachtet man das Szenario 2, ist erkennbar, dass die Holzbauweise nicht nur ein wesentlich höheres Closed-Loop-Potenzial aufweist als die Häuser in mineralischer Bauweise, sondern dass auch ggü. den ausgeführten Häusern Vorteile bestehen. In der Pre-Use-Phase ist ein Anteil weiterverwerteter Materialien ausgewiesen, der auf die Masseschüttung (Sand) zurückzuführen ist. Post-Use fließt die Schüttung in das Closed-Loop-Potenzial ein. Im Gegensatz zu einer gebundenen Körnung (wie im Beton), ist eine lose Schüttung gut wiederverwendbar (und verursacht darüber hinaus wegen des Verzichts auf das energieintensive Bindemittel Zement auch geringere Treibhausgasemissionen).

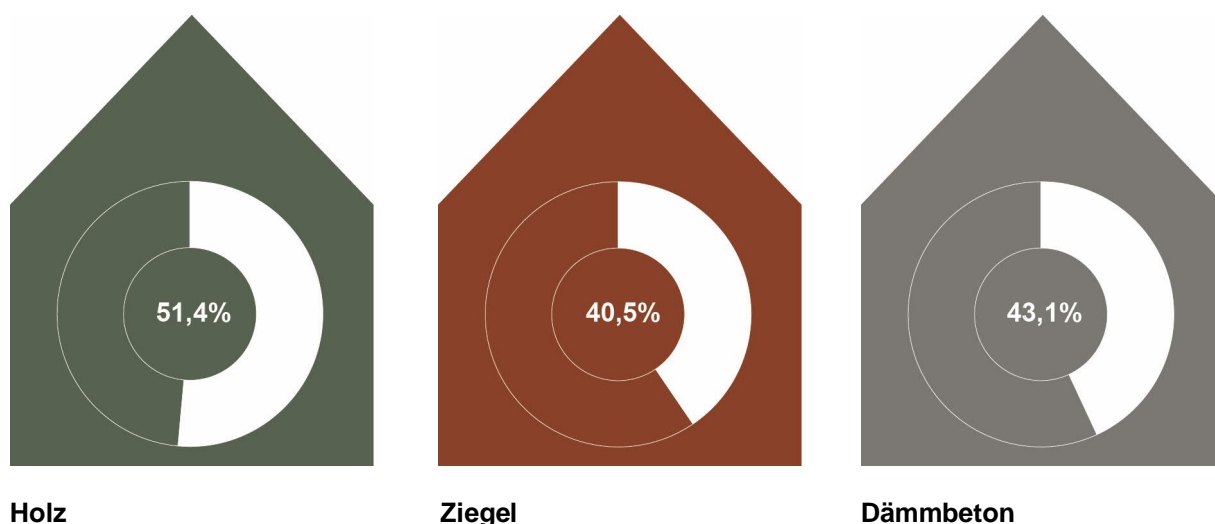
Das Szenario 2 der Holzbauweise weist mit einem Closed-Loop-Potenzial von 91% von allen untersuchten Konstruktionen das höchste Potenzial für geschlossene Kreisläufe auf. Das Loop-Potenzial wäre jedoch mit 129,5% ggü. der umgesetzten Holzbauvariante mit 137,9% um 8,4 Prozentpunkte geringer. In den offenen Kreisläufen hat also der Entfall des Recyclingschotters in der Gründung (Szenario 1) eine größere Wirkung als die Einbringung einer losen Schüttung in den Decken im Szenario 2.

## 8. Urban Mining Indicator

Der Urban Mining Indicator ist der gewichtete Maßstab auf Gebäudeebene. Hier bekommen die Qualitäten der geschlossenen und offenen Kreisläufe eine unterschiedliche Bewertung. Außerdem werden die Pre-Use und die Post-Use-Phase zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt. Der gewichtete Anteil der zirkulären Baustoffe an der Gesamtmasse aller Baustoffe bestimmt das Gesamtergebnis: den Urban Mining Indicator.

Um den Qualitätsverlust der in offenen Kreisläufen geführten Materialien abzubilden, geht deren Anteil nur zur Hälfte in den urban Mining Indicator ein. Die Pre-Use und die Post-Use-Phase werden gleich gewichtet, d.h. deren Ergebnis bestimmt jeweils zur Hälfte das Gesamtergebnis.

Nachfolgend werden die Urban Mining Indicator der drei Forschungshäuser abgebildet:

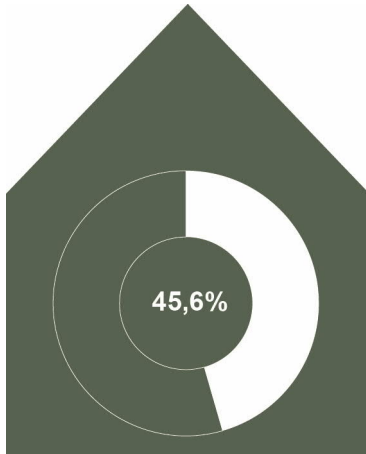


Das Haus mit Holzwänden weist den höchsten Urban Mining Indicator auf – gut 51%, gefolgt von dem Haus mit Dämmbetonwänden mit 43,1%. Das Haus mit Ziegelwänden liegt knapp darunter mit 40,5%.

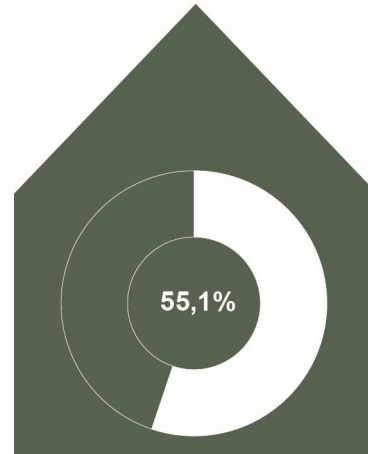
Insgesamt lässt sich sagen, dass die mineralischen Bauweisen trotz des geringeren Urban Mining Indicators in ihrer jeweiligen Bauart optimiert sind. Erfahrungen aus dem Modellprojekt Rathaus Korbach<sup>7</sup> zeigen, dass ein Gebäude in konventioneller Stahlbetonbauweise ohne Optimierung ein Kreislaufpotenzial von 30 bis 35% aufweist. Im Projekt „einfach Bauen“ wirken sich die monolithischen Wände positiv auf das Kreislaufpotenzial aus, da z.B. eine „Verunreinigung“ grundsätzlich kreislauffähiger Materialien mit Putz o.ä. vermieden wurde und der Rückbauaufwand geringer ggü. komplexen Wandkonstruktionen ist.

<sup>7</sup> Rosen, Anja, Dissertation: Urban Mining Index – Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung, Kapitel 9, Fraunhofer IRB Verlag, 2021

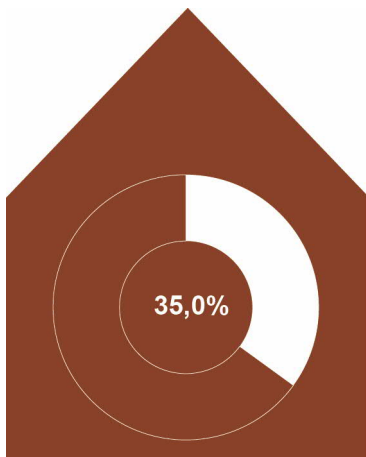
Die **Ergebnisse der Szenarienbetrachtung** stellen sich wie folgt dar:



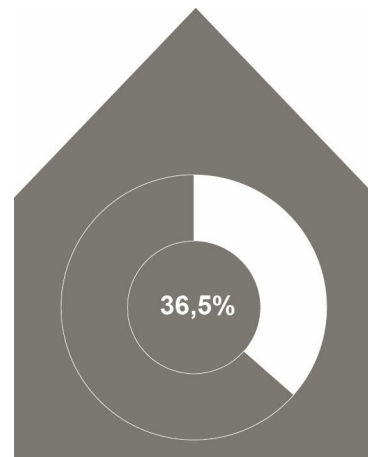
**Holz Szenario 1**



**Holz Szenario 2**



**Ziegel Szenario 1**



**Dämmbeton Szenario 1**

Im Szenario 1 sinken die Urban Mining Indicator aller drei Bauweisen gegenüber den umgesetzten Häusern. Hierdurch wird deutlich, dass der Schotter aufgrund seiner großen Masse eine hohe Auswirkung auf das Ergebnis hat. Weil der Anteil rezyklierter Baustoffe in der Pre-Use-Phase geringer wäre und zudem der Anteil wiederverwendbarer Wertstoffe stark fällt, sinkt der Urban Mining Indicator um bis zu 6,6 Prozentpunkte.

Im Szenario 2 steigt der Urban Mining Indicator des Holzhauses auf gut 55% und gewinnt damit 3,7 Prozentpunkte ggü. der umgesetzten Variante. Dies ist begründet durch die anteilige Erhöhung des Closed-Loop-Materials Holz und den Anteil der wiederverwendbaren Schüttung für die Decken.



## 9. Fazit

Die Bewertung mit dem Urban Mining Index hat gezeigt, dass das Forschungshaus mit den Holzwänden die Ziele des zirkulären Bauens am besten verfolgt. Der Baustoff Holz ist ein (in menschlichen Zeiträumen) erneuerbarer Rohstoff und kann im natürlichen Kreislauf zirkulieren. In einer Gebäudenutzungszeit von 100 Jahren kann der Rohstoff nachwachsen: Die durchschnittliche Umtriebszeit, d.h. der Zeitraum von der Pflanzung bis zur Ernte, beträgt bei Fichte- und Tannenhölzern 80 Jahre. Die Verwendung PEFC-zertifizierter Hölzer stellt die nachhaltige Forstwirtschaft und damit die langfristige Erhaltung des Waldes sicher.

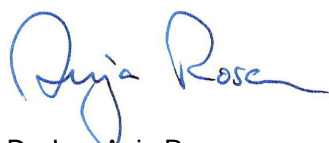
Das Forschungshaus aus Dämmbeton punktet durch die Verwendung sekundärer Gesteinskörnung aus Blähglas. Allerdings ist die Recyclingfähigkeit am Ende der Nutzungsdauer, genau wie bei dem Haus in Ziegelmauerwerk, eingeschränkt: Bei beiden Baustoffen kann nur ein Anteil von 39 bis 40% in geschlossenen Kreisläufen gehalten werden, da bei der Neuproduktion stets neues Bindemittel aus primären Quellen hinzugegeben werden muss.

Das Haus in Ziegelbauweise weist die geringsten zirkulären Eigenschaften aus, da die Ziegel, abgesehen von der eingeschränkten Recyclingfähigkeit, aus 100% Primärmaterial hergestellt werden.

Insgesamt kann der Schluss gezogen werden, dass die Konstruktionsweise aller Forschungshäuser durch die monolithische Bauart ggü. einer heute üblichen Ausführung mit komplexen Bauteilschichten optimiert ist. Da die Materialien nicht mit fremden Werkstoffen verunreinigt sind, ist eine sortenreine Trennung der Wertstoffe beim Rückbau problemlos möglich. Aufgrund dessen konnten allen drei Wandbaustoffen saubere Abfallfraktionen zugeordnet werden, wodurch der Faktor Wert positiv beeinflusst wird. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit einer späteren hochwertigen Verwertung (Recycling) und damit auch der Urban Mining Indicator.

Die Szenarienbetrachtung hat das Optimierungspotenzial für zukünftige Projekte aufgezeigt: Die Ausführung der Decken in Brettschichtholz mit loser mineralischer Schüttung und Estrich (ggf. auch Trockenestrich) kann die zirkulären Eigenschaften der Forschungshäuser noch verbessern. Die Optimierung der zirkulären Eigenschaften sollte immer in enger Abstimmung mit den Fachplanern, insbesondere Tragwerksplanung und Bauphysik, abgestimmt werden.

aufgestellt, 28.05.2021



Dr.-Ing. Anja Rosen

Architektin  
Sachverständige für nachhaltiges Bauen  
DGNB-Auditorin