Badzellen Zerlegen

Seminar: Rezyklierbarkeit von Badzellenkonstruktionen

Lehrstuhl Entwerfen und Konstruieren, Prof. Florian Nagler
Tilmann Jarmer, Johannes Sack
WiSe 2022/23

INHALT

INTRO 4

BETON 8

LEICHTBAU 18

HOLZ 28

FAZIT 44

INTRO

Einfach Bauen + Forschungshäuser Bad Aibling

Die Komplexität der Konstruktionen und Gebäudetechnik steigt seit Jahrzehnten stetig. Dies betrifft die Anforderungen an Standsicherheit, Wärme-, Feuchte-, Brand- und Schallschutz, Hygiene und Gesundheit wie auch den allgemeinen Nutzerkomfort. Das äußert sich in einer fast unüberblickbaren und weiter steigenden Zahl an Normen und Baugesetzen. Das damit anvisierte Ziel der Qualitätssicherung wird oft nicht erreicht: Die Folge der Komplexität ist eine hohe Fehlerquote in Planung und Ausführung sowie eine Überforderung von Bauherren und Nutzern.

Die Forschungshäuser in Bad Aibling basieren auf den Ergebnissen einer Grundlagenforschung, die von der Forschungsgruppe „Einfach Bauen" an der TU München durchgeführt wurde. Mit Hilfe von mehreren tausend unterschiedlichen Raummodellen wurde untersucht, wie ein einfaches Haus aussehen muss, das von sich aus im Winter wenig Energie benötigt und sich im Sommer nicht unnötig aufheizt. Dabei wurde das robuste Optimum gesucht, also eine Variante, welche gut funktioniert, unabhängig vom Zutun der Nutzer. Dadurch, dass die Gebäude auf das Wesentliche und Notwendige reduziert sind, ist es möglich, langlebige und umweltverträgliche Häuser zu schaffen – als Kontrapunkt zur aktuellen Entwicklung hin zu immer komplexeren, kurzlebigeren Gebäuden.

www.einfach-bauen.net | @einfachbauen_tum

Forschungsprojekt: Einfach Bauen - TUM Campus Garching

Gegenstand dieses Forschungsprojektes ist der geplante Neubau dreier 4-geschossiger Studentenwohnhäuser auf dem Campus Garching der TU München.

Das Forschungsprojekt will anhand der drei Studentenwohnheime das Einfach Bauen mit dem Anspruch an einen Nullenergiestandard kombinieren – inklusive konstruktiver und gestalterischer Herausforderungen: Die Maßnahmen zur hervorragenden Energiebilanz sollen integraler Bestandteil der Architektur in Zusammenspiel mit einer reduzierten und robusten Gebäudetechnik sein, sodass auf wirtschaftliche und ressourcenschonende Weise ein Nullenergiestandard erreicht werden kann.

Ein Teil des Projektes behandelt die industrielle Vorfertigung im Einfach Bauen. Aufgrund der Vielzahl an Badzellen wurde hier ein hohes Optimierungspotential identifiziert und drei unterschiedliche Typenmuster aus Beton, Holz und Leichtbau hergestellt und mit dem Studentenwerk München diskutiert. In Rahmen von „Badzellen Zerlegen" wurden diese Muster demontiert und auf Reparaturfähigkeit und Recyclingpotential untersucht.

Am 20. April 2023 werden Ergebnisse und Erfahrungen im Rahmen eines Symposiums im Kreativquartier München diskutiert.

Begriffe

CLP CLOSED LOOP POTENTIAL

Das Closed-Loop-Potenzial einer Konstruktion ist der prozentuale Anteil an Materialien und Baustoffen, der unter Berücksichtigung definierter Kriterien ohne Qualitätsverlust in geschlossenen Kreisläufen geführt werden kann.

LP LOOP POTENTIAL

Zum Loop-Potenzial einer Konstruktion zählen über den Closed-Loop-Anteil hinaus auch Anteile an Materialien und Baustoffen, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien eine stoffliche Verwertung mit Qualitätsverlust (Down-cycling) ermöglichen oder einer energetischen Verwertung zugeführt werden können.

Material Recycling Content – Pre-Use

Ressourcenschonende Konstruktionen sollen ein Maximum an erneuerbaren oder sekundären Rohstoffen enthalten, während nicht erneuerbare Primärrohstoffe möglichst zu minimieren sind. Zum Kreislaufpotenzial (Pre-Use) zählen deshalb der Anteil rezyklierter Materialien (Material Recycling Content – MRC) und der Anteil nachgewachsener Rohstoffe (bereits im Naturkreislauf rezykliert).

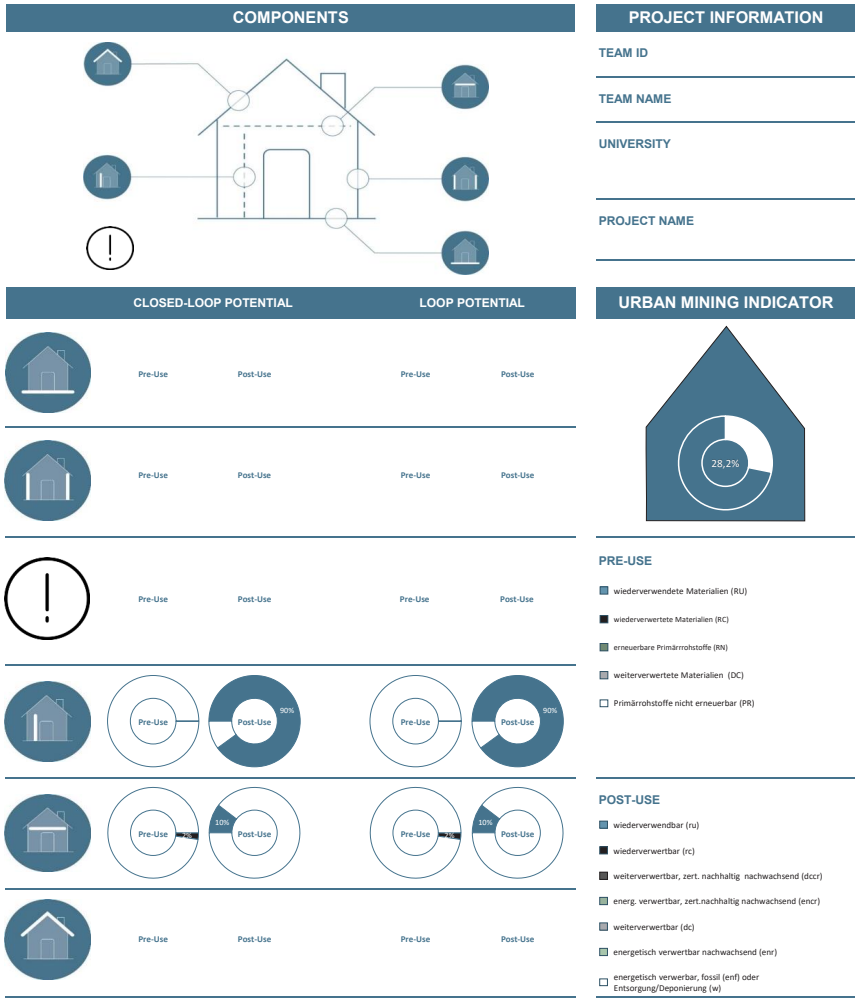
End-of-Life-Szenarien – Post-Use

Anhand einer Massenermittlung werden die beim Rückbau zu erwartenden Wertstoffe ermittelt. Die Wertstofffraktionen, die in die Zukunft gerichtet über den aktuellen Stand nach Gewerbeabfallverordnung hinausgehen und keine Abfälle zur Deponierung enthalten, lassen sich nach Art des Rückbaus und der dadurch erzielten Sortenreinheit End-of-Life-Szenarien zuordnen.

siehe Atlas Recycling, 2021

UMI – URBAN MINING INDICATOR

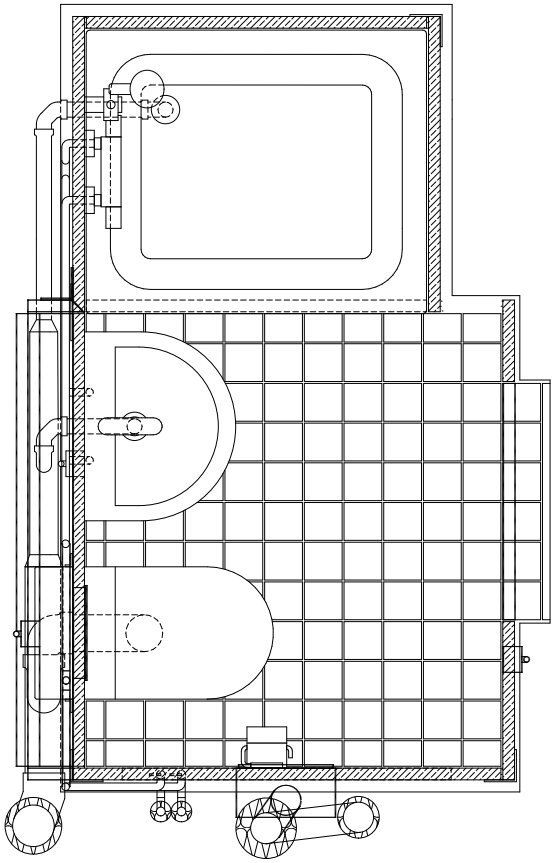
Der Urban Mining Indicator bildet einen zusammenfassenden Wert aus Closed-Loop-Potential und Loop-Potential von Pre- und Post-Use-Phase. Dabei wird das Closed-Loop-Potential voll berücksichtigt, während die anderen Kreislaufpotentiale mit dem Faktor 0,5 gewichtetet werden. Abschließend wird der daraus entstehende Wert auf 100% bezogen.



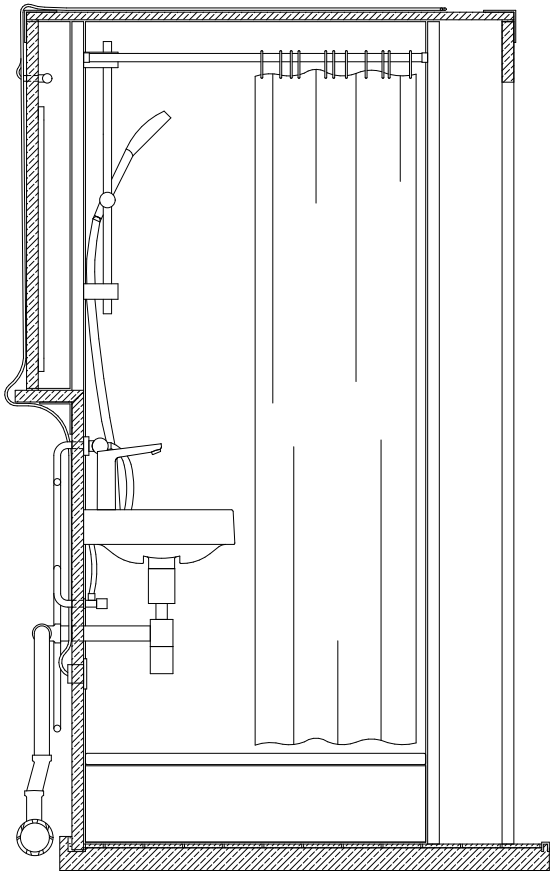
Beispiel Ergebnis-Sheet UMI Tool

BETON

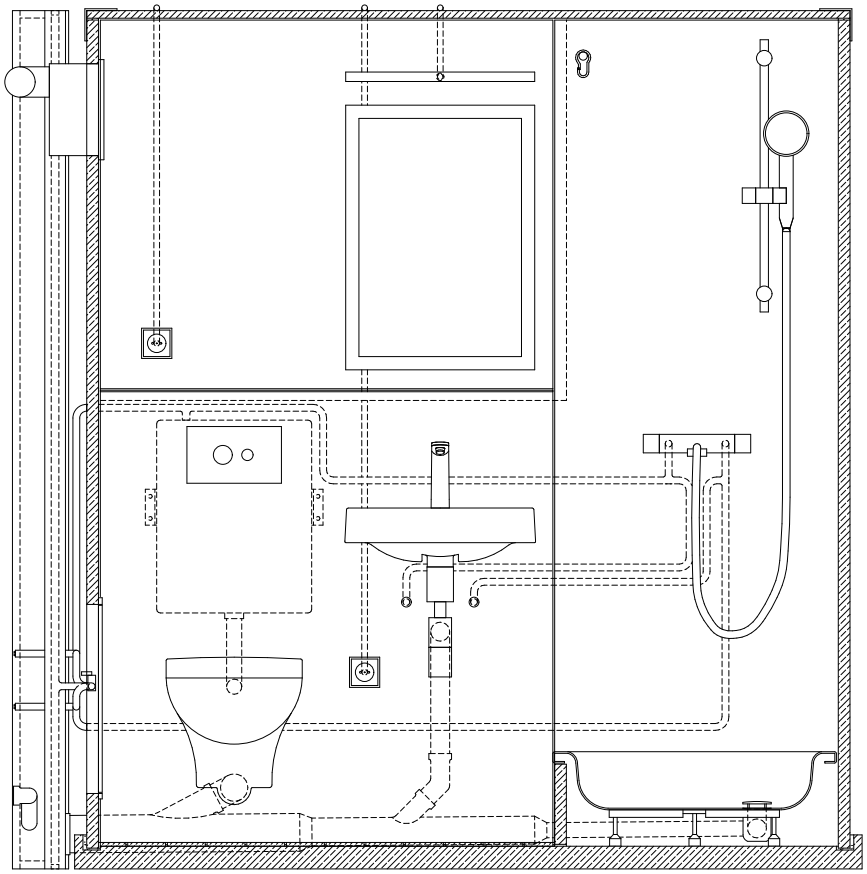
Die Betonzelle ermöglicht durch ihre selbsttragenden Wandelemente eine fugenlose Betonwerkstein-Oberfläche.



Grundriss



Schnitt A-A



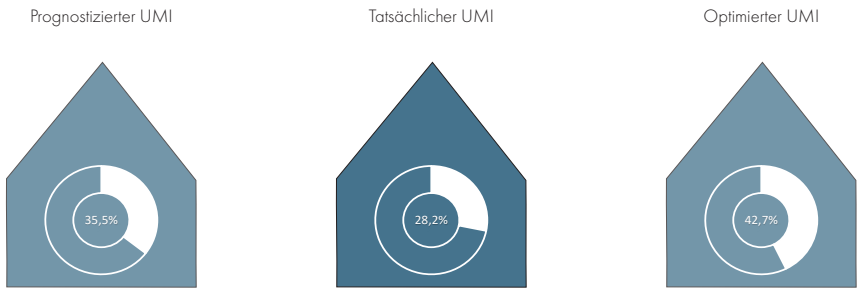
Schnitt B-B

Recycling

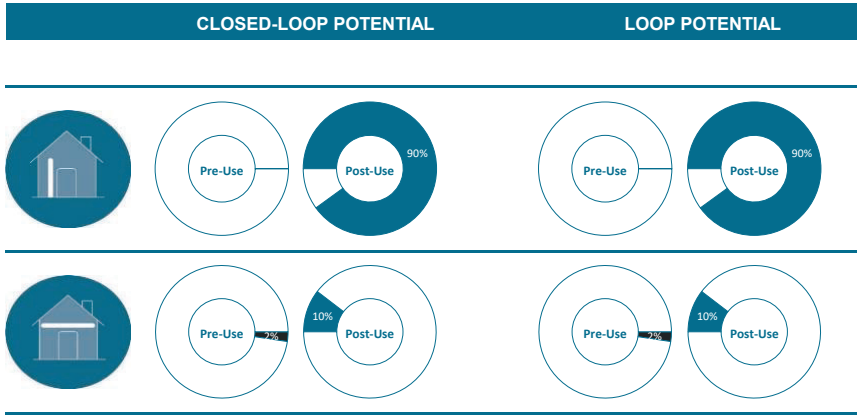
Prognostiziert 35,5 %: Resultat unter der Annahme, dass sämtliche Betonteile mit Bewehrungsstahl erstellt wurden und sich anschließend in Beton und Stahl trennen lassen, die dann dem Recycling zugeführt werden können. Die Art der Abdichtungslage war noch nicht bekannt, daher ließ sich keine Aussage zur Trennbarkeit des Bodenaufbaus machen. Ebenso waren die Fliesen auf der Unterseite der Bodenplatte nicht bekannt.

Tatsächlich 28,2 %: Durch die Vielzahl an Abdichtungslagen in der Bodenplatte lässt sich diese nur als gesamtes als Baumischabfall entsorgen. Gleiches gilt für die Deckenplatte, aufgrund des Kunststoffgewebes, welches als Bewehrung eingelegt war und daher keine Verwendung für Recycling-Beton zulässt. Die Seitenwände ließen sich im Ganzen, Großteils zerstörungsfrei auseinanderbauen und können z.B. als Arbeitsplatte etc. weiterverwendet werden. Die Fliesen lassen sich unter Berücksichtigung des Arbeitsaufwandes und ca. 20% Verlust ebenfalls weiterverwenden.

Optimierung 42,7 %: Für die Optimierung wurde davon ausgegangen, dass sich der Bodenaufbau besser in seine einzelnen Schichten trennen lässt und teilweise dem Recycling zugeführt werden kann. Außerdem kann für die Betonbauteile ein Zuschlag von 10% an rezyklierten Gesteinsmaterial angenommen werden, um das Kreislaufpotential in der Pre-Use-Phase zu verbessern. Des Weiteren kann das Kunststoffgewebe durch Stahlbewehrung ersetzt werden um eine bessere Trennung zu ermöglichen.



Übersicht Urban Mining Indicators – Beton



Tatsächlicher Urban Mining Indicator – Beton

PRE-USE

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Primärrohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärrohstoffe nicht erneuerbar (PR)

POST-USE

- wiederverwendbar (ru)
- wiederverwertbar (rc)
- weiterverwertbar, zert. nachhaltig nachwasend (dccr)
- energ. verwertbar, zert. nachhaltig nachwasend (encr)
- weiterverwertbar (dc)
- energ. verwertbar nachwasend (enr)
- energ. verwertbar, fossil (enf) oder Entsorgung (w)

Zerlegung

Die Badzelle funktioniert in ihrer jetzigen Ausbauweise gut. Es ist nach der Zerlegung festzustellen, dass die einzelnen Platten gut getrennt werden konnten und eine Weiterverwendung des Materials möglich ist. Optimierungen sind vorzunehmen an der Installationswand im Innenraum der Zelle. So sind Revisionen leichter umsetzbar und Wasser kann nur schwer den Innenbereich der Zelle verlassen.

Der Rückbau wurde auch durch die komplexe Zusammensetzung des Fußbodenaufbaus erschwert. Daher könnte über die Reduktion und Optimierung des Abdichtungskonzeptes ein einfacherer und einfacher zu lösender Bodenaufbau umgesetzt werden.

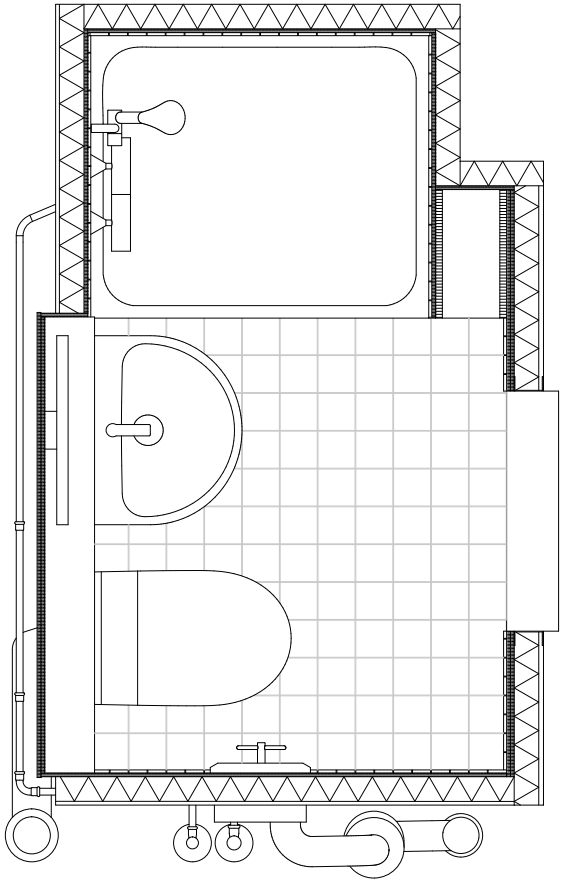
Die Mörtelverbindung erschwerte den Rückbau erheblich. Deshalb wäre es von Vorteil, die Wandelemente mit einer Art Gummidichtung zu verbinden. Das Gummiband könnte ähnlich eines Kompribandes ausgeführt werden.

Auch unter der Duschtasse waren Fliesen vorzufinden. Hier stellt sich die Frage, ob es nicht insgesamt vorteilhaft wäre, ebenso den Boden mit der Kerapid-Oberfläche auszuführen. Dabei ist zu prüfen, ob die Rutschfestigkeit eingehalten werden kann.

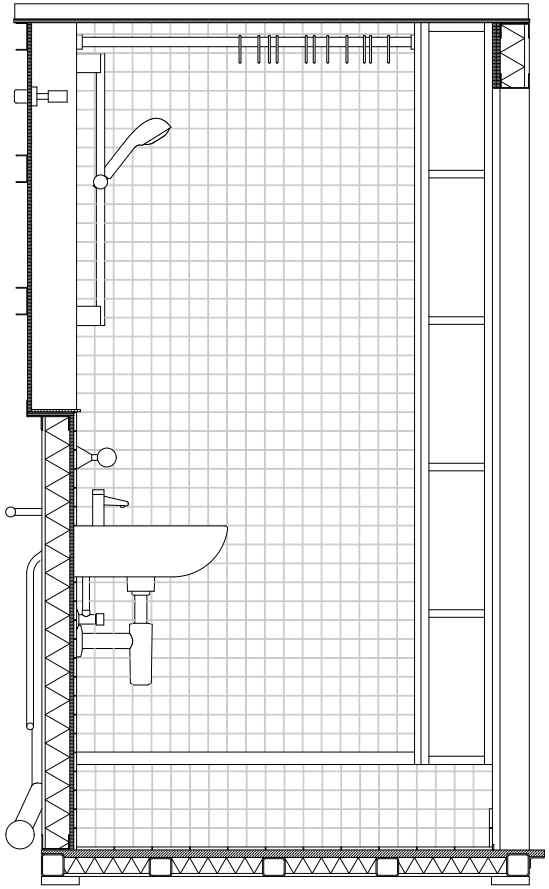
Zusätzlich kann darüber reflektiert werden, ob unterhalb der Duschwanne eine Revisionsklappe, ähnlich der Revisionsklappe in der Holzzelle, eingebaut werden sollte. Der Vorteil durch die Möglichkeit zur Revisionierung ist von großer Bedeutung.

LEICHTBAU

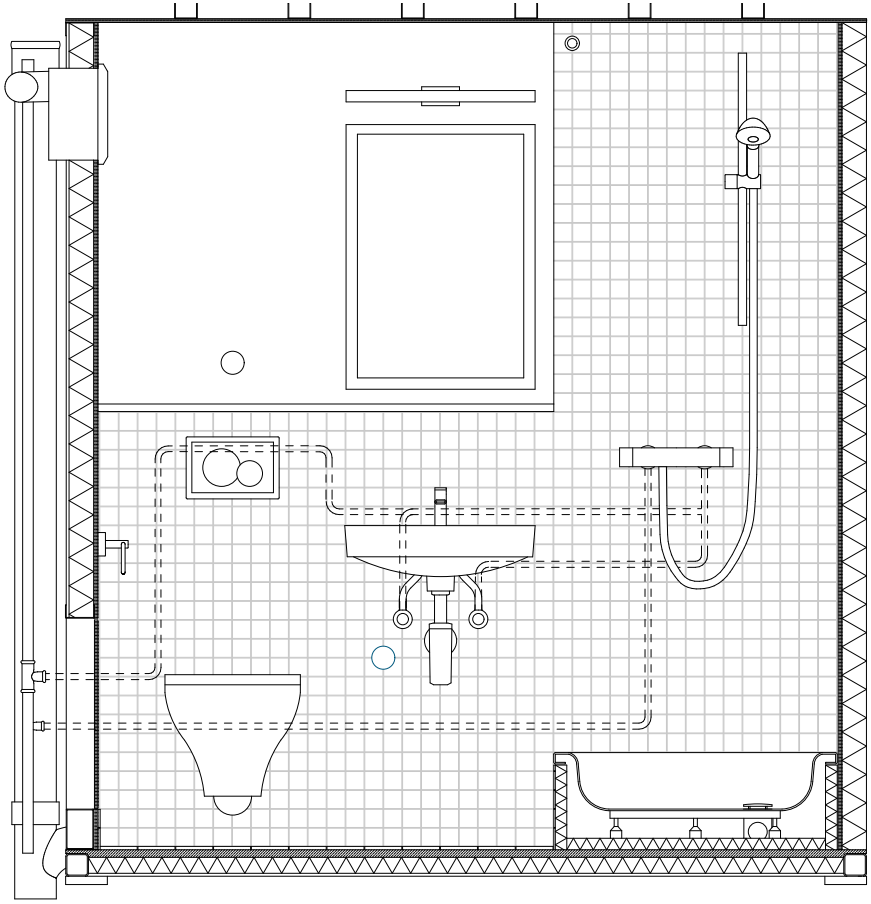
Die Leichtbauzelle entspricht den klassischen Konstruktionsprinzipien des Trockenbaus mit Metallständern. Im Innenraum bilden auf Gipskarton verklebte Fliesen den Abschluss.



Grundriss



Schnitt A-A



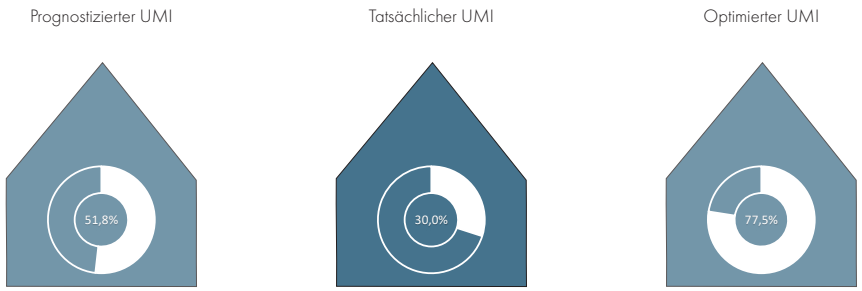
Schnitt B-B

Recycling

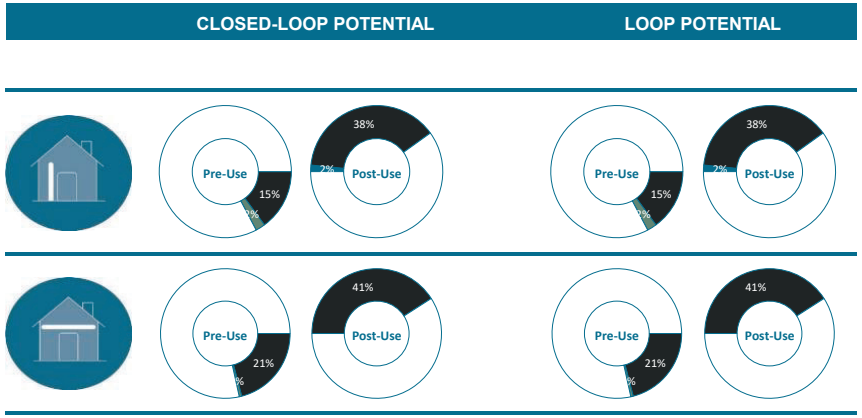
Prognostiziert 51,8 %: Vor Rückbau treffen wir die Annahme, dass die C-Profile leicht getrennt und somit wiederverwendet werden können. Die Trockenbauplatten führen wir wie auch bei der Holzzelle einer Verwertung zu, da eine Zerstörung bei Rückbau wahrscheinlich ist. Die Fliesen können getrennt entsorgt werden, bei der Steinwolle sehen wir eine Wiederverwendung vor.

Tatsächlich 36,6 %: Während des Rückbaus kamen einige unerwartete Aufbauten zum Vorschein. So wurde unter der Duschwanne Styropor als Auflager verwendet. Die C-Profile waren vernietet und mussten aufgebohrt werden, eine Wiederverwendung wurde dadurch ausgeschlossen und eine Verwertung angenommen. Die Steinwolle war nicht wie angenommen nur zwischen die Profile geklemmt, sondern teilweise verklebt, wodurch Rückstände auf den Trockenbauplatten entstanden und das Wiederverwenden der Dämmung ausgeschlossen wird. Die Trockenbauplatten wurden beim Rückbau zerstört und werden somit, wenn nicht verschmutzt, der Wiederverwertung zugeführt. Die Fliesen waren aufgrund ihrer geringen Dimensionen mit einem Gewebe angebracht, von welchem sie mit ökonomisch gerechtfertigtem Aufwand nicht zu lösen waren und somit im Baumischabfall landen.

Optimiert 77,5 %: Statt dem Styropor unter der Duschwanne schlagen wir wie bei der Holzzelle jenes Wannenkonstruktionsgestell vor, welches lediglich eingestellt wird. Für die C-Profile sollte eine lösbare Verbindung statt vernieten eingesetzt werden, womit sie für eine Wiederverwendung in Frage kommen. Die Trockenbauplatten ersetzen wir, wie bei der Holzzelle, durch Lehmbauplatten, die Steinwolle durch Holzfaserdämmplatten, zwischen die Ständer geklemmt statt geklebt. Anstelle der Fliesen an den Wänden schlagen wir eine Verwendung der Alu-Verbundplatten vor, welche durch die Herstellerrücknahme wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden können.



Übersicht Urban Mining Indicators – Leichtbau



Tatsächlicher Urban Mining Indicator – Leichtbau

PRE-USE

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Primärrohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärrohstoffe nicht erneuerbar (PR)

POST-USE

- wiederverwendbar (ru)
- wiederverwertbar (rc)
- weiterverwertbar, zert. nachhaltig nachwasend (dccr)
- energ. verwertbar, zert. nachhaltig nachwasend (encr)
- weiterverwertbar (dc)
- energ. verwertbar nachwasend (enr)
- energ. verwertbar, fossil (enf) oder Entsorgung (w)

Zerlegung

Die Zelle ließ sich schnell und sortenrein trennen. Die Materialien lassen sich gut in den Recycling-Kreislauf zurückführen. Eine Um- oder Weiternutzung der verschiedenen Materialien erscheint nach der Zerlegung unwahrscheinlich.

Die Duschtasse in einem Styroporbett erschwert Revisionen sowie einen zerstörungsfreien Ausbau erheblich und sollte optimiert werden. Daher wäre hier eine Revisionsklappe unter der Duschtasse sinnvoll, um die Leitungen besser zugänglich zu machen.

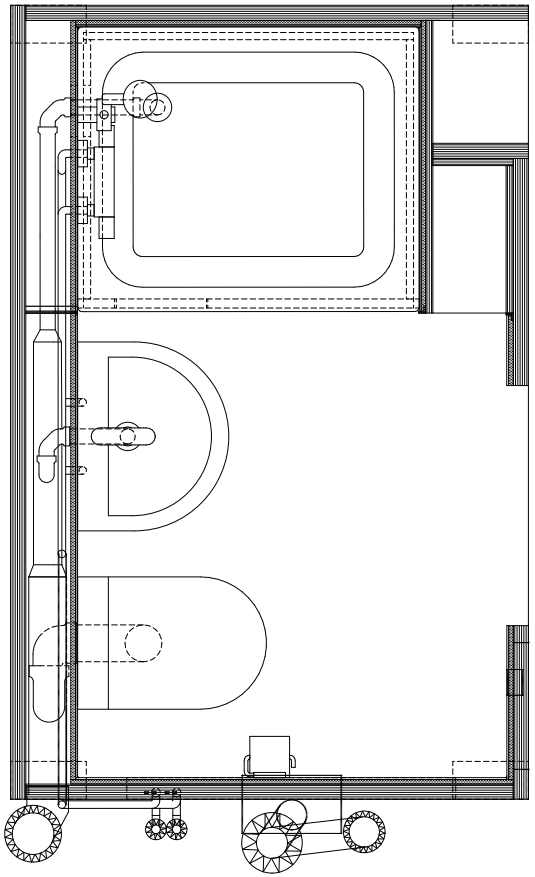
Eine weitere Überlegung ist, die Glasscheibe der Ablage über dem Waschtisch durch ein anderes Material zu ersetzen. Hier besteht die Gefahr, dass die Glasplatte schnell brechen kann. Ein Austausch ist sehr schwierig und kostenintensiv.

Was sich bei der Demontage als schwierig herausgestellt hat, ist die Dämmung zwischen den Metallständern. Diese war teilweise mit PU-Schaum befestigt. Das Lösen der Dämmung war an diesen Stellen daher mit großem Aufwand verbunden.

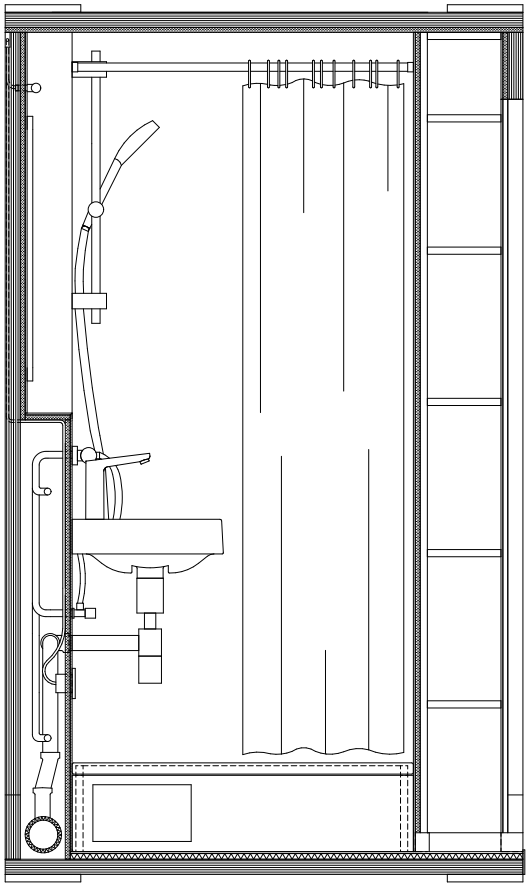
Auch die Demontage der Raumluftsteuerung erwies sich als problematisch. Der Lüfter konnte nur durch Aufbohren des Rahmens ausgetauscht werden. Auch hier besteht Optimierungspotential.

HOLZ

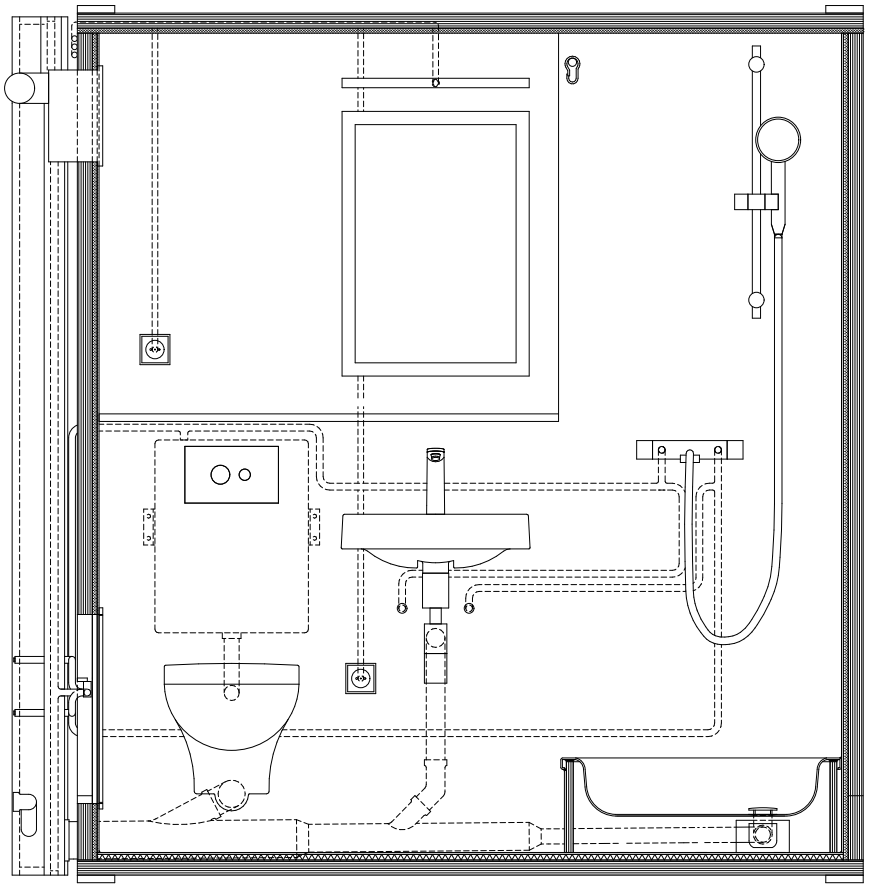
Die aus Holz bzw. Kertoplatten konstruierte Badzelle erhält im Innenraum einen Abschluss durch eine auf Gipskarton verklebte Dibond Aluminium-Verbundplatte.



Grundriss



Schnitt A-A



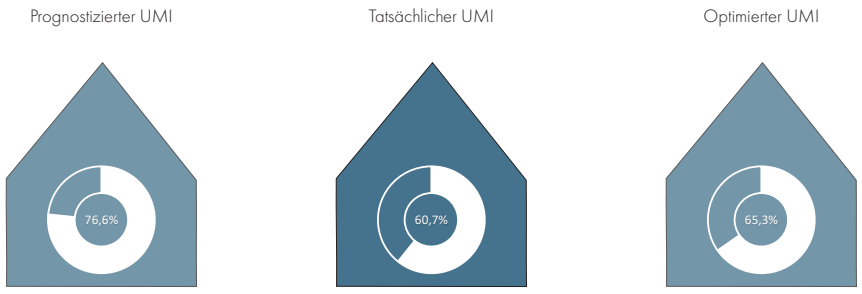
Schnitt B-B

Recycling

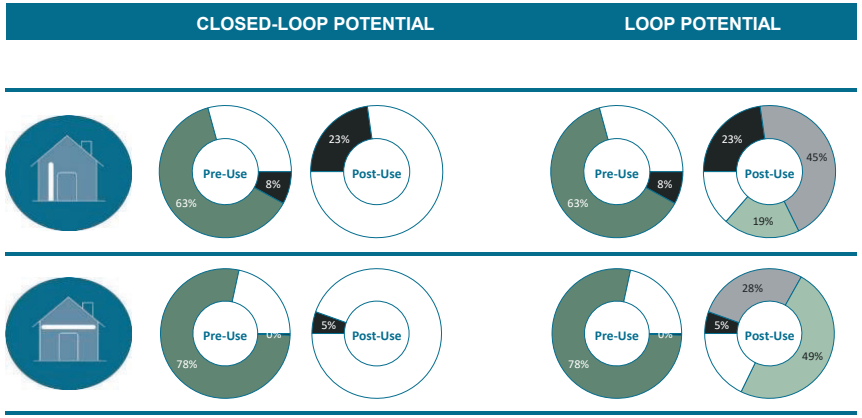
Prognostiziert 76,6 %: Auf Grundlage des Planstands treffen wir die Annahme, dass die Holz-Kertoplatten nach Rückbau wiederverwendet werden können. Der Bodenaufbau lässt sich sortenrein trennen, sodass die Kerto-Bodenplatte und das XPS wiederverwendet werden können. Bei den Trockenbauplatten gehen wir davon aus, dass kein zerstörungsfreier Rückbau möglich sein wird und diese deshalb der Verwertung zugeführt wird. Die alukaschierte Verbundplatte wiederum sollte wiederverwendet werden können.

Tatsächlich 60,7 %: Beim Rückbau stellten wir fest, dass sämtliche Schichten des Bodenaufbaus miteinander verklebt und nur mit großem Aufwand und nicht sortenrein trennbar waren, somit kommt von der Kertoplatte bis zum Kautschuk-Bodenbelag alles in den Baumischabfall. Durch das Lösen der verklebten Trockenbauplatten, die weiterhin (zerstört) der Verwertung zugeführt werden, blieben Rückstände auf den Kertoplatten, wodurch diese in die Altholzklasse A2 rutschen, aber dennoch verwertet werden können. Die alukaschierten Verbundplatten ließen sich mit mittlerem Aufwand relativ gut lösen und können mittels einer Rücknahme durch den Hersteller rezykliert werden. Die Trockenbauplatten im Duschbereich landen durch den kaum lösbaren Verbund mit dem Abdichtungsvlies im Baumischabfall.

Optimiert 65,3 %: Unter Einbeziehen der Vorschläge der Optimierungsgruppe haben wir folgende Annahmen in das Tool eingegeben. Der Bodenaufbau wird lösbar ausgeführt statt verklebt, statt der verklebten, bituminösen Abdichtungsbahn im Bodenaufbau wird eine lösbar eingelegte EPDM Wanne verwendet. Da Kautschuk und EPDM beide derselben Kunststoff-Abfallklasse zugeordnet werden, ist eine Trennung dieser beiden Materialien demnach nicht zwingend notwendig. Die Trockenbauplatten werden durch Lehmbauplatten ersetzt. Statt dem Holzrahmen, auf welchen die Duschwanne geklebt war, macht der Einsatz einer demontierbaren Duschwannenhalterung Sinn.



Übersicht Urban Mining Indicators – Holz



Tatsächlicher Urban Mining Indicator – Holz

PRE-USE

- wiederverwendete Materialien (RU)
- wiederverwertete Materialien (RC)
- erneuerbare Primärrohstoffe (RN)
- weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärrohstoffe nicht erneuerbar (PR)

POST-USE

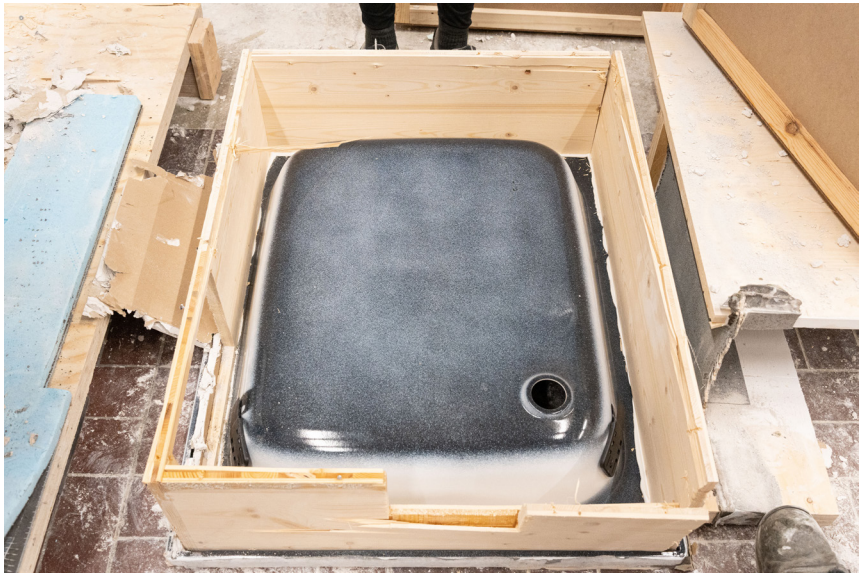
- wiederverwendbar (ru)
- wiederverwertbar (rc)
- weiterverwertbar, zert. nachhaltig nachwasend (dccr)
- energ. verwertbar, zert. nachhaltig nachwasend (encr)
- weiterverwertbar (dc)
- energ. verwertbar nachwasend (enr)
- energ. verwertbar, fossil (enf) oder Entsorgung (w)

Zerlegung

Der verschraubte und verklebte Aufbau macht eine vorsichtige Zerlegung an einigen Stellen unmöglich. Auch einige Verbauten sind in ihrer jetzigen Ausführung nicht reversibel. Eine Vereinfachung im Schichtaufbau und stärkere Ausprägung von lösbaren Verbindungen könnten die einzelnen Materialien nach der Zerlegung deutlich besser zum Recycling übergeben lassen.

Vor allem die Konstruktion der Installationswand hinter dem WC und dem Waschtisch erschwerten das Zerlegen. Eine lösbares Rückwand-Element wäre hier zielführend, um während des Zerlegens schneller Leitungen und den Spülkasten zu erreichen.

Während des Zerlegens der Zelle ist der Bodenaufbau negativ aufgefallen. Viele miteinander verklebte Bauteile haben das sortenreine Trennen erheblich erschwert. Hier ist eine Reduzierung der Komplexität des Bodenaufbaus anzustreben.

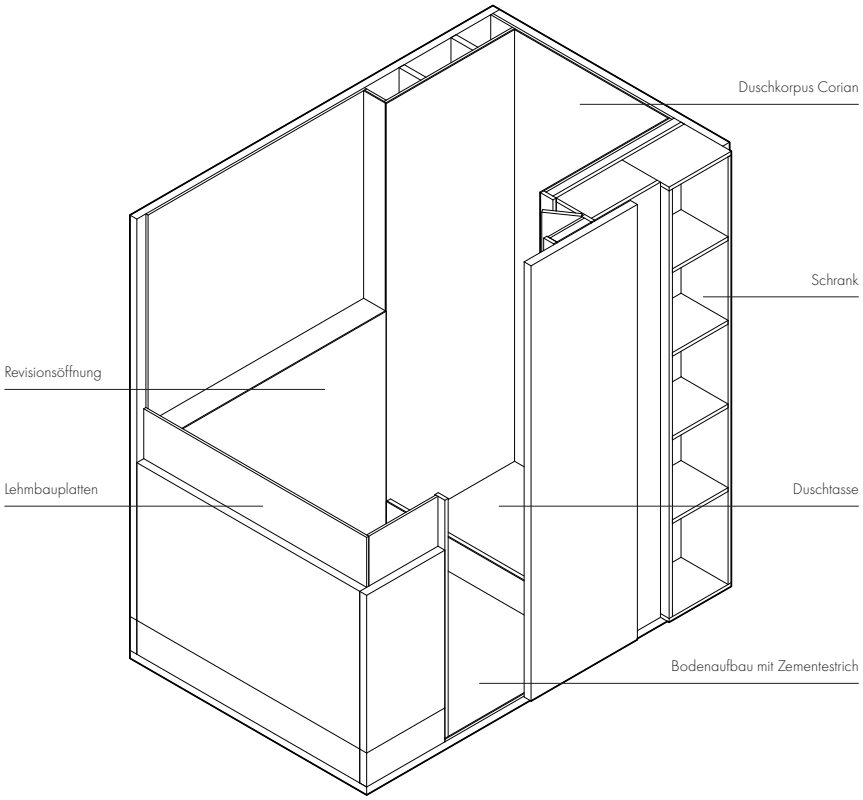


Die Duschtasse war das mit Abstand am schwersten zu entfernende Element. Nur durch das Entfernen der Seitenwände und das komplette Herausnehmen der Duschtasse mit Sockel war es erst möglich, die eigentliche Duschtasse zu lösen.

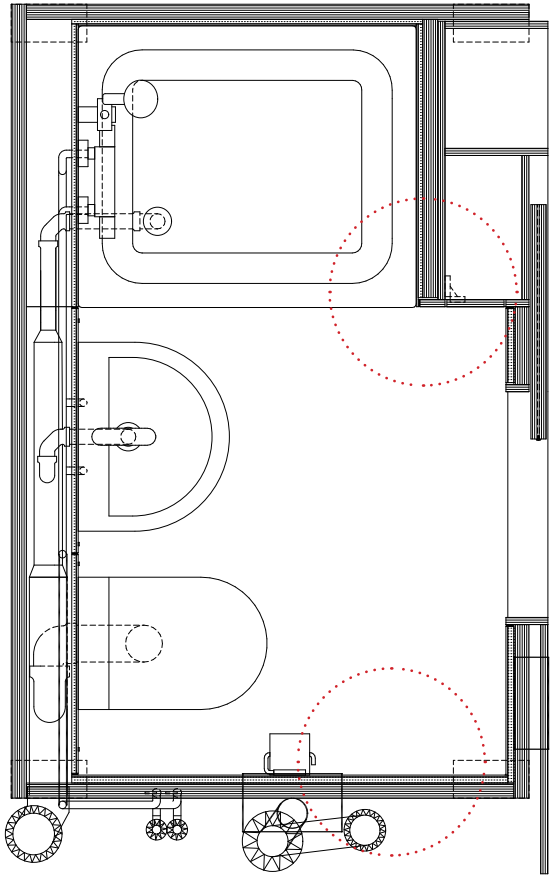
Die Gipsfaserplatten waren nicht sauber vom Holz zu trennen. Eine Wiederverwendung ist daher nicht möglich. Fraglich ist, ob ein Verzicht auf die Gipsfaserplatte denkbar ist. Die Aluminiumverbund-Platte könnte alternativ direkt auf dem Holz befestigt werden.

Optimierung

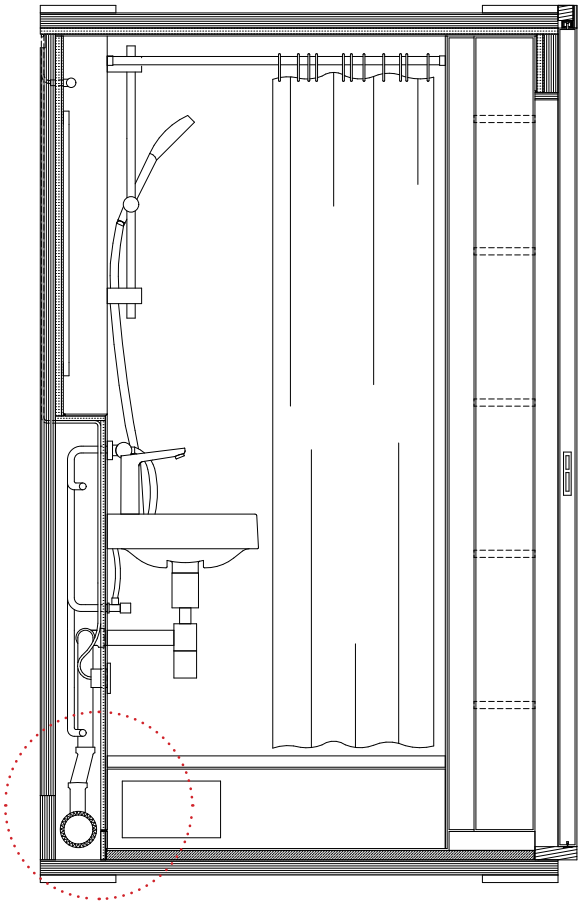
Das größte Optimierungspotenzial zeigt nach der Zerlegung die Holzzelle. Sie sticht im LCA-Vergleich hervor, da das Holz durch seine speichernde Wirkung einen hohen Effekt in der Berechnung hat. Eine sortenreine Trennung war möglich, die Weiterverwendung vieler Materialien ist jedoch nur in geringem Maße realistisch.



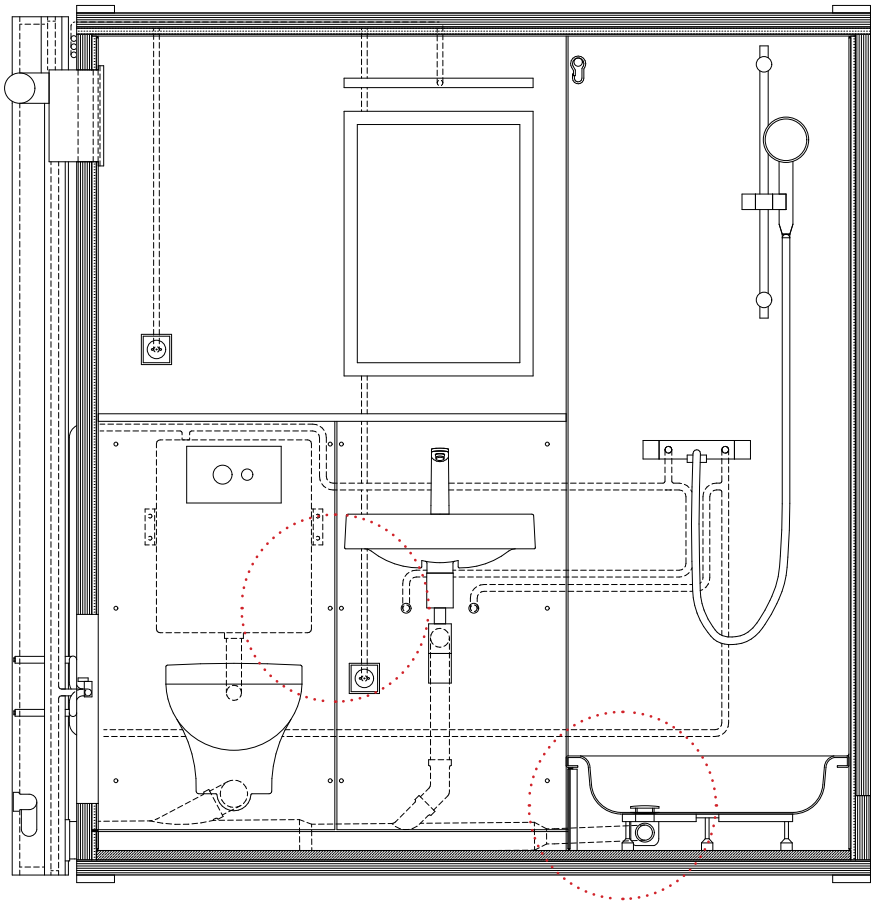
Axonometrie Holzzelle mit Optimierungen



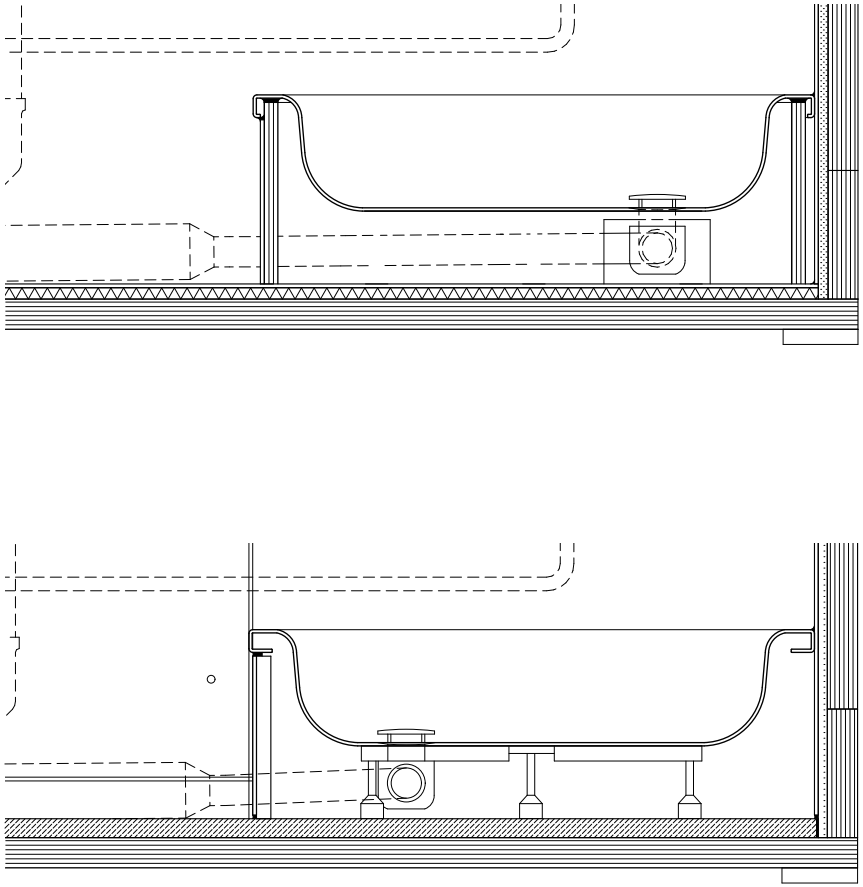
Grundriss mit Optimierungen



Schnitt A-A mit Optimierungen



Schnitt B-B mit Optimierungen



Entwicklung Detailpunkt mit Optimierungen

Visualisierung Holzzelle mit Optimierungen

FAZIT

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die Verwendung einfacher Verbindungen die Komplexität reduziert werden kann, was Wartungen und den Rückbau erleichtert. Dies gilt für Wandelemente, Leitungen und viele weitere verbaute Elemente. Es ist wichtig, Gedanken an den Rückbau bereits in den Planungsprozess zu integrieren.

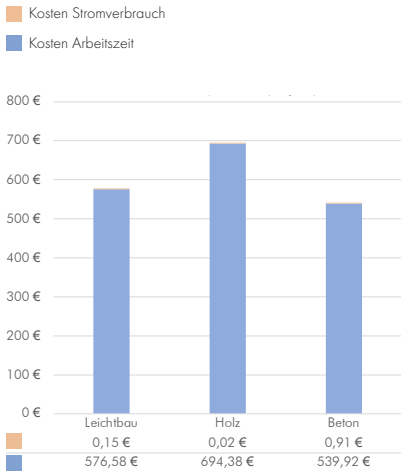
Darüber hinaus ist es wichtig, die einzelnen Bauteile als Sekundärbaustoffe zu betrachten und von einer linearen zu einer Kreislaufwirtschaft überzugehen. Gebäude und Gebäudeteile können als Rohstoffzwischenlager betrachtet werden, wodurch Ressourcen effizienter genutzt und Abfälle reduziert werden können. Insgesamt sollte also nicht nur auf technische Anforderungen, sondern auch auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung geachtet werden.

Eine weitere Erkenntnis aus dem Rückbau ist, dass die Art des Fertigungsprozesses (beidseitige Zugänglichkeit der Konstruktion) teilweise zu komplizierten Einbausituationen führt, da im eingebauten Zustand nur von innen revisioniert, repariert und zurückgebaut werden kann.

Zerlegung

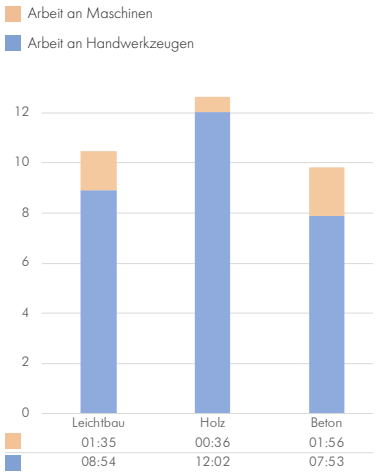
Für die Zerlegung der drei Badzellen wurde die Arbeitszeit, die Verwendung der benötigten Werkzeuge sowie die aufgewendete Energie erfasst. Um vergleichbare Werte zu generieren, wurde für die Zeit der Handarbeit einen Stundenpreis und für den Betriebsstrom der Maschinen einen kWh-Preis angenommen. Zur Vorbereitung der Zerlegung wurde – in Zusammenarbeit mit Materialbörse Treibgut – festgelegt, welche Bauteile potenziell wiederzuverwenden sind und inwieweit eine Materialtrennung wirtschaftlich ist. Im Prozess der Zerlegung konnten wir Erkenntnisse über die Sortenreinheit und Rückbaufähigkeit der Konstruktionen erlangen und diese an die Optimierungsgruppe weitergeben.

Eine Variable bleibt die handwerkliche Erfahrung der Zerlegungsteams sowie die in der Praxis vorhandene Bereitschaft zur Materialtrennung.



55€/h Arbeit | 0,40€/kWh Strom

Kosten für die Zerlegung [€]



Zeiteinsatz für die Zerlegung [h]

Recycling

Für die drei Badzellen wurde jeweils der Urban Ming Index für drei Szenarien ermittelt. Das erste Szenario stellt die Prognose dar. Ausschließlich die Herstellerangaben und technischen Zeichnungen werden hierfür berücksichtigt. Das zweite Szenario baut auf den Erkenntnissen, die während der Zerlegung gewonnen wurden, auf. Es beurteilt den tatsächlichen Zustand der Badzellen. Das letzte Szenario zeigt den Urban Mining Indikator nach der Implementierung möglicher Optimierungen, die es mit den Herstellern abzustimmen gilt.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass alle drei Badzellen das Potenzial zur Optimierung haben und wichtige Erkenntnisse während der Zerlegung gewonnen wurden, die den Urban Mining Indikator im Vergleich zu unserer Prognose verschlechtert haben.

BADZELLE	PROGNOSTIZIERTER URBAN MINING INDICATOR	TATSÄCHLICHR URBAN MINING INDICATOR	OPTIMIERTER URBAN MINING INDICATOR
HOLZ	76,6 %	60,7 %	65,3 %
BETON	35,5 %	28,2 %	42,7 %
LEICHTBAU	51,8 %	30,0 %	77,5 %

Übersicht UMIs

Optimierung

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Badzellen in ihrem jetzigen Zustand gut funktionieren. Trotzdem haben sich im Zuge des Zerlegens einige Schwachstellen herauskristallisiert, die optimiert werden könnten. Optimierungsvorschläge für die drei Badzellen fließen auf Basis der Erfahrungen aus dem Zerlegungsprozess ein. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Holzzelle, die unter anderem durch ihr Ergebnis im LCA-Vergleich ihr großes Potential aufzeigt.

Visualisierung Holzzelle mit Optimierungen

Seminar	Zerlegung	Recycling	Optimierung	Doku
Tilmann Jarmer	Julia Gralka	Anne Ambrosy	Ben Klages	Lukas Stöckle
Johannes Sack	Matthis Gericke	Leoni Lichtblau	Mehmet Yolcu	Fabian Schneider
	Daniel Kledtke	Martina Gruzlewski		Raphael Großmann
	David Meister	Philipp Konrad		
		Zsofia Varga		

Danke!

Ein besonderer Dank gilt:

dem Studentenwerk München
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
Prof. Dr. Anja Rosen
Nora Singer

für die Unterstützung des Forschungsprojekts
„Einfach Bauen - Studentenwohnhäuser am Campus Garching“

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

Lehrstuhl Entwerfen und Konstruieren, Prof. Florian Nagler

Arcisstraße 21
80333 München

@einfachbauen_tum | www.arc.ed.tum.de/lek/