

Rebekka Volk (Hrsg.)

ENTWICKLUNG EINES MOBILEN SYSTEMS ZUR
ERFASSUNG UND ERSCHLIESSUNG VON RESSOURCEN-
EFFIZIENZPOTENZIALEN BEIM RÜCKBAU VON
INFRASTRUKTUR UND PRODUKTEN („RESOURCEAPP“)

SCHLUSSBERICHT DES FORSCHUNGSVORHABENS



Scientific
Publishing

Rebekka Volk (Hrsg.)

**Entwicklung eines mobilen Systems zur
Erfassung und Erschließung von Ressourcen-
effizienzpotenzialen beim Rückbau von
Infrastruktur und Produkten („ResourceApp“)**

Schlussbericht des Forschungsvorhabens

PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

Band 22

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buches.

Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur und Produkten („ResourceApp“)

Schlussbericht des Forschungsvorhabens

Herausgegeben von
Rebekka Volk

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2017 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2194-2404

ISBN 978-3-7315-0653-9

DOI 10.5445/KSP/1000068354

Schlussbericht des Forschungsvorhabens Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur und Produkten

„ResourceApp“

Dezember 2016

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen	
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT (Pfinztal) (Projektkoordination): Christian Stier, Ansilla Bayha	033R092A	
Fraunhofer Institut für Grafische Datenverarbeitung IGD (Darmstadt): Neyir Sevilimis, Johannes Mueller-Roemer, Mathias Bein	033R092B	
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion IIP (Karlsruhe): Dr.-Ing. Rebekka Volk, Prof. Dr. Frank Schultmann	033R092C	
COSAWA Sanierung GmbH (Peine): Jörg Jäger, Michael Ewler	033R092D	
Werner Otto GmbH (Hameln): Uwe Panneke	033R092E	
GPB-Arke, Geotechnisches Planungs- und Beratungsbüro Arke (UA ICT): Thomas Arke		

Projektlaufzeit: 15.04.2013 – 30.06.2016

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung	1
1.1 Aufgabenstellung	1
1.2 Voraussetzungen des Forschungsvorhabens.....	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	23
2 Eingehende Darstellung	25
2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse	25
2.1.1 Gebäudetypologie und Bauinformation (AP1) (IIP/KIT – Rebekka Volk)	25
2.1.2 Software zur Erfassung der Gebäudekubatur (AP2) (IGD – Neyir Sevilmis)	47
2.1.3 Methodenentwicklung, Erschließung des Ressourceneffizienzpotentials und Ergebnistransfer (IIP – Rebekka Volk).....	55
2.1.4 Hardwaredemonstrator (AP4) (IGD – Neyir Sevilmis)....	122
2.1.5 Praxisverifikation (ICT – Ansilla Bayha/Christian Stier)..	126
2.1.6 Projektmanagement (ICT – Ansilla Bayha/Christian Stier)	168
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	170
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	170
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertung der Ergebnisse	171
2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen.....	174
2.6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen.....	175

Abbildungsverzeichnis	179
Tabellenverzeichnis	185
Literaturverzeichnis	189

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das abgeschlossene Forschungsvorhaben „ResourceApp“ wurde im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme r³ umgesetzt, in deren Kontext Forschungsprojekte zum Thema „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ gefördert wurden. Das Vorhaben adressierte in erster Linie den in der r³-Ausschreibung genannten F&E-Bedarf zur „Entwicklung eines Altdeponie- bzw. Hüttenhalden-Ressourcenkatasters, differenziert nach Inhaltsstoffen, Infrastruktur und Prioritätensetzung für den Rückbau“. Urban Mining nutzt die bestehenden, wiederverwendbaren Bauelemente der technischen Gebäudeausstattung sowie die anthropogenen Lager von Metallen und anderen Wertstoffen, deren Umfang, d. h. deren Wertstoffangebot nicht erhöht werden kann. Daher bildet die gezielte und effiziente Erfassung, Rückgewinnung und Steuerung der Wertstoffe den Vorhabenschwerpunkt.

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur. Die dem Vorhaben zugrundeliegende Vision ist eine Smart-Phone-Applikation, mit der der Anwender bei einer Gebäudebegehung mit minimalen Zusatzinformationen eine belastbare und reproduzierbare Aussage über das Rohstoffpotenzial eines Gebäudes treffen kann (siehe Abbildung 1).

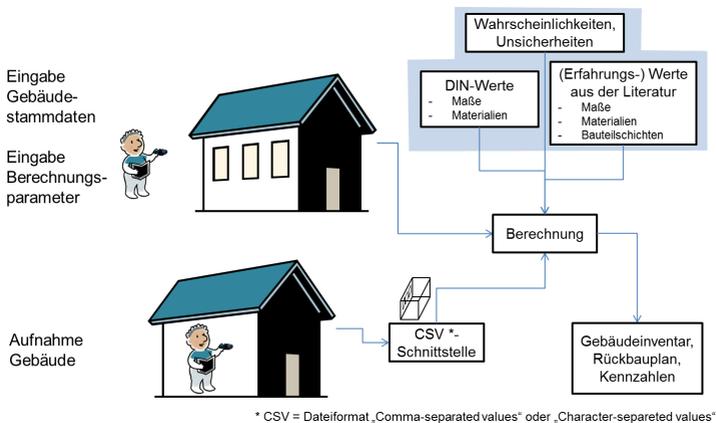


Abbildung 1: ResourceApp - Allgemeines Vorgehen (Quelle: Volk, KIT/IIP)

Die heute übliche Potentialerfassung durch Begehung kann dies in der notwendigen Genauigkeit vor allem in komplexeren Gebäuden nicht leisten: Derzeit kommt es leicht zu Abweichungen bei der Schätzung des umbauten Raumes von über 25%. Selbst bei sehr erfahrenen Mitarbeitern kommen Abweichungen insbesondere bei der Schätzung von Metallen von bis zu 90% vor. Für eine gezielte Steuerung der Stoffströme fehlt derzeit gerade wegen des Verfahrens der Begehung und der erfahrungsbasierten Potentialabschätzung eine belastbare Datenbasis völlig.

Das Vorhaben adressiert damit in erster Linie den F&E-Bedarf zur „Entwicklung von Informationssystemen im Sinne eines rohstoffbezogenen Gebäudepasses (Rohstoffkataster), welche die Wertstoffe in der Infrastruktur dokumentieren“ sowie der geplanten Rohstoffrückgewinnung und des rohstofforientierten Rückbaus des Gebäudes. Es weist aber gleichzeitig durch grundlegende Arbeiten zur Bilderkennung und -rekonstruktion sowie zur Projektplanung das Potential zur Erschließung von Ressourceneffizienzpotentialen in einer Vielzahl von Branchen und für verschiedene Produkte (z. B. Sonderbauten, Flugzeuge, weitere Verkehrsmittel) auf. Beispielhaft wurde der Ansatz für Rückbauvorhaben angewandt und in Fallstudien getestet.

Folgende Teilschritte (Arbeitspakete) waren dabei vorgesehen, die auf zwei Projektphasen aufgeteilt sind:

1. Systematisierung von Gebäuden (Gebäudetypologie) und vorhabensgerechte Aufbereitung von Bauinformationen unter Nutzung von Bau-normen und anderen Veröffentlichungen (Phase 1).
2. Softwareentwicklung zur Erfassung von Gebäudekubaturen (Bild-basierte Erkennung und 3D-Rekonstruktion mit einfacher Benutzungsoberfläche) (Phase 1).
3. Erschließung des Ressourceneffizienzpotentials durch Integration der Bauinformationen in die Software-Auswertung der Sensorinformation (Phase 1) sowie durch eine Modellentwicklung zur Rückbauplanung (Phase 1 und 2).
4. Entwicklung eines Hardware-Demonstrators und Kombination mit der im Rahmen des Vorhabens entwickelten Software (Phase 1 und 2).
5. Praxisverifikation des ResourceApp-Ansatzes durch modellhaften Rückbau von Gebäuden mit einer Massenbilanz sowie Optimierung des Rückbaus und der Aufbereitungsprozesse (Phase 1 und 2).
6. Projektmanagement sowie Vorbereitungen zur Übertragung der Ergebnisse auf andere Produkte und Branchen (Phase 1 und 2).

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur. Die dem Vorhaben zugrundeliegende Vision war eine Smart-Phone-Applikation, mit der der Anwender bei einer Gebäudebegehung mit minimalen Zusatzinformationen eine belastbare und reproduzierbare Aussage über das Rohstoffpotenzial eines Gebäudes treffen kann. Gebäude sind heterogene Produkte, welche eine Vielzahl an Stoffen enthalten. Folgende Tabelle 1 führt die Zielwertstoffe im Vorhaben auf.

Tabelle 1: Zielwertstoffe im r³ Projekt ResourceApp

Zielwertstoffe im r ³ Projekt ResourceApp								
Al	Cu	Fe	Zn	Glas	Metalllegierungen	Kunststoffe	Mineralische Rohstoffe	Holz

Konkret sollte ein Verfahren einschließlich einer Demonstrator-Hardware in den Phasen 1 und 2 entwickelt werden, dass durch eine Kombination aus Bilderkennung, einer allgemeinen Baunormen-, Bauteil- und Baustoffdatenbank und mit Hilfe von zusätzlichen, gebäudespezifischen Informationen in Verbindung mit intelligenten Auswerteverfahren während der Begehung eines Abbruchgebäudes „per Knopfdruck“ Angaben über Volumina, Massen und Art der im Gebäude enthaltenen Rohstoffe erstellt.

Dabei wurde insbesondere die jeweilige technische Gebäudeausrüstung (TGA) berücksichtigt. Zum Beispiel konnten aufgrund der Lage und Anzahl von Steckdosen und Wasser-Zapfstellen in Verbindung mit Baunormen belastbare Aussagen zum Leitungsverlauf, zur Leitungslänge und -dicke und damit zum gebäudespezifischen Rohstoffpotenzial gemacht werden. Darüber hinaus wurde ein optimierendes Rückbauplanungsmodell entwickelt, das basierend auf der für das Abbruchgebäude erstellten Rohstoffbilanz situationsspezifisch die Bestimmung der optimalen Rückbaustrategie unterstützt, und zukünftig in ein mobiles Gerät integriert werden kann.

1.2 Voraussetzungen des Forschungsvorhabens

Der Anteil an Bau- und Abbruchabfällen beträgt mit rund 200 Mio. t mehr als 50% der jährlich anfallenden Abfälle in Deutschland [Statistik Portal 2016]. Dabei sind Rückbau- und Abbruchprojekte durch einen großen Zeit- und Kostendruck gekennzeichnet. Bei der heute üblichen Erfassung von Rückbauobjekten durch Begehung werden die verbauten, oft werthaltigen Materialien, grob geschätzt, was zu einer großen Abweichung zur

tatsächlichen Materialzusammensetzung führen kann. Dennoch dienen diese Schätzwerte zurzeit als Grundlage für das Angebot und die Projekt- und Verwertungsplanung der Rückbauunternehmer. Die Partner im Forschungsvorhaben wurden entsprechend der geforderten Kompetenzen ausgewählt.

Das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) forscht und entwickelt seit 1959 mit heute über 500 Mitarbeitern in den Bereichen Umwelt-Engineering, Polymer-Engineering, Angewandte Elektrochemie, Energetische Materialien und Energetische Systeme. Kernkompetenzen des ICT sind Umwelt- und Verfahrenstechnik, Materialforschung, Kreislaufwirtschaft, Umweltsimulation sowie Nachhaltigkeit. Die Erfahrungen aus diesen Bereichen wurden im inhaltlichen Arbeitspaket AP5 eingebracht sowie in der Gesamtprojektleitung AP6 eingebracht.

Das Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) weist eine jahrelange Erfahrung und umfangreiche Vorarbeiten im Bereich der Gebäudeauditierung¹ und der optimierenden Planung des selektiven Rückbaus und der Sanierung von Gebäuden und Infrastrukturen auf. Diese Erfahrungen und Vorarbeiten wurden im Rahmen der AP1 und AP3 in das Projekt ResourceApp eingebracht und im Rahmen des Projektes wissenschaftlich weiterentwickelt.

Das Fraunhofer-Institut für Grafische Datenverarbeitung (IGD) ist seit seiner Gründung 1992 die weltweit führende Einrichtung für angewandte Forschung im Bereich Visual Computing. Es bearbeitet unter anderem Graphische Datenverarbeitung, Computer Vision sowie Virtuelle und Erweiterte Realität, die bis zu Prototypen und Komplettlösungen anforderungsspezifisch entwickelt werden. Das Fraunhofer IGD arbeitet seit den 1990er Jahren im Bereich der 3D-Rekonstruktion, der Bildverarbeitung im Kontext von Virtueller und Erweiterter Realität (Tracking-Algorithmen) sowie an mobilen Anwendungen. Die Erfahrungen und Vorarbeiten konnten

¹ Gebäudeauditierung: Gebäudeanalyse

im ResourceApp-Vorhaben in den AP2 und AP4 eingebracht und weiterentwickelt werden.

Die COSAWA Sanierung GmbH in Peine hat sich auf den Umgang und die Sanierung von Gefahrstoffen spezialisiert. Bundesweit agiert das Unternehmen auch bei Entkernung und Rückbau von Bauobjekten. Sowohl für private, gewerbliche oder öffentliche Auftraggeber löst das Unternehmen die unterschiedlichsten Sanierungsaufgaben, wie Asbestsanierung, Rückbau von künstlichen Mineralfasern oder PCB/PAK-belastetem Material sowie die Schimmelentfernung. Abbruchgebäude werden nach den geltenden gesetzlichen Vorgaben systematisch und fachgerecht zunächst entkernt bevor die Gebäudehülle durch Abbruchunternehmen rückgebaut wird. Die Erfahrungen aus dem Tagesgeschäft waren im ResourceApp-Vorhaben essentieller Bestandteil im AP5.

Das 1951 gegründete Unternehmen Werner Otto GmbH verfügt über Referenzen im Abbruch/Rückbau, Bauentkernung und Tiefbau/Erddarbeiten. Weitere Kompetenzen besitzt das Unternehmen bei der Gefahrstoffsanierung und dem Bauschuttrecycling. Das Unternehmen besitzt eine eigene stationäre Bauschuttsortier- und Zerkleinerungsanlage. Das so gewonnene Recyclingmaterial kann wieder direkt in die Bauwirtschaft fließen, was Steinbrüche und Kiesgruben schont. Mit einer mobilen Bauschuttrecycling- und Siebanlage kann bei größeren Projekten direkt vor Ort der Bauschutt zur Wiederverwertung aufbereitet werden. Diese Kompetenzen und Ressourcen konnten im Anwendungsteil des Vorhabens im AP5 eingebracht werden.

Thomas Arke ist mit seinem Unternehmen GPB Arke als beratendes Ingenieurbüro im Bereich des Gebäuderückbaus, der Schadstoff- und Asbestsanierung tätig. Im Vorhaben ResourceApp unterstütze er aus der Praxis kommend die Einschätzung der relevanten Schadstoffe in Gebäuden in den AP1 und AP5.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde für eine Laufzeit von 3 Jahren geplant. Zunächst wurden zwei Jahre (Phase 1) seitens des Projektträgers bewilligt. Nach Ablauf dieser Phase 1 wurde ein drittes Jahr (Phase 2) beantragt und bewilligt. Während der Projektdurchführung erfolgte eine Abstimmung mit dem Projekt PRRIG (Koordination Prof. Lieselotte Schebek, TU Darmstadt) im Rahmen des dafür gebildeten Miniclusters (siehe Abschnitt 1.5).

Das Projekt startete als letztes Projekt im Forschungsverbund r³ am 15.04.2013. Im Forschungsvorhaben gab es einige kleinere zeitliche und finanzielle Verschiebungen, die jedoch im Großen und Ganzen der ursprünglichen Planung entsprechen. Aufgrund dieser Verschiebungen und der deutlich verschlechterten Auftragslage und Verfügbarkeit von Praxisobjekten für den Test im ersten Halbjahr 2016 wurde eine kostenneutrale Verlängerung um drei Monate beantragt und bewilligt. Das Projekt wurde am 30.06.2016 abgeschlossen.

Im Zuge der Recherchen in AP1 wurde klar, dass zunächst eine Entwicklung der ResourceApp für einfache Gebäude sinnvoll ist, bevor größere Gebäude mit umfassenderer technischer Gebäudeausstattung, zahlreicheren Bauteilen und komplexerer Gebäudegeometrie in Angriff genommen werden können. Dies ist insbesondere im Rahmen des Projektes vor einer Übertragung auf andere Branchen sinnvoll, da die Anwendung der ResourceApp in komplexeren Gebäuden wie Mehrfamilienhäusern, Krankenhäusern, Einkaufszentren etc. für die Praxispartner und ähnliche Unternehmen einen großen Mehrwert schafft. Daher verschob sich die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 und 3 zeitlich etwas, d.h. die Recherche zu einigen technischen Gebäudeausrüstungen und Bauteilen komplexerer Gebäude erfolgte erst sukzessive im Laufe der Implementierung und Test des Prototypen für einfache Gebäude und die daran anschließende Weiterentwicklung für komplexere Gebäude und eine größere Anzahl unterschiedlicher Bauteilen. Die Auswahl der Systemkomponenten (Tiefen-

sensor der MS Kinect kombiniert mit einem Laptop) für den Hardware-demonstrator (AP4) geschah auf der Grundlage der Anforderungen der Praxispartner und konnte unabhängig von den anderen APs durchgeführt werden. Die Implementierung der Softwarekomponenten in AP2 (3D-Raumrekonstruktion und Bilderkennung) konnte erfolgreich auf der Hardwareplattform entwickelt und getestet werden. Die Begehungen von realen Abbruchgebäuden im Rahmen von AP5 fanden folglich in Phase 2 statt. Dabei wurden eine Etage eines Krankenhauses und ein Einfamilienhaus aufgenommen und anschließend rückgebaut. AP6 beinhaltete die Projektleitung des Vorhabens.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Ausgangssituation

Die größte Menge des in Deutschland anfallenden Abfallstroms stammt aus Bauabfällen. So fallen jährlich rund 200 Mio. t mineralische Bauabfälle zur Entsorgung an (vgl. Abbildung 2). Ungefähr ein Viertel davon (50,5 Mio. t) hat seinen Ursprung im Bauschutt aus rückgebauter Infrastruktur (Gebäude, Tiefbauwerke wie Brücken, etc.). Der Rest verteilt sich auf Bodenaushub (128,3 Mio. t) und Straßenaufbruch (19,7 Mio. t) [Faulstich 2011, S. 36]. Angesichts der Endlichkeit mineralischer Ressourcen und steigender Rohstoffpreise aufgrund von Verknappung auf dem Markt und Spekulation erfordert eine Strategie zur Sicherung der Ressourcenversorgung einen Überblick über die vorhandenen Ressourcenpotenziale in anthropogenen Lagerstätten. In Deutschland stellt der Gebäude- und Infrastrukturbestand eine umfangreiche Senke bzw. ein umfangreiches Lager für Metalle und Industriematerialien dar [Schiller et al. 2010]. Die demographische Entwicklung, der strukturelle Wandel und energetische Erfordernisse führen zu einer steigenden Um- und Abbaurate dieser anthropogenen Lagerstätte, so dass die Bedeutung recycelter Metalle und Industriematerialien kontinuierlich ansteigt [Maas 2010].

Gleichzeitig werden viele Rückbauten durch einen Ersatzneubau ersetzt. Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling sind Kenntnisse über Mengen, Anfall, Reinheit, Qualität, Kosten für die Bergung und die fachgerechte Wiedergewinnung [Brunner 2009] sowie über mögliche Schadstoffe und Gefährdungen. Hinzu kommt der starke Raumbezug der Recyclingwirtschaft durch verhältnismäßig hohe Transportkosten der Recyclingmaterialien im Verhältnis zu ihrem Wert, der eine möglichst regionale Verknüpfung von Ressourcenlagerstätten und Nachfrageorten.

Das vorliegende Vorhaben stellt einen neuen Ansatz zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen im Baubereich vor und schließt so die Lücke zwischen den abstrakt-modellbasierten, top-down/bundesweit ermittelten Mengenprognosen für Wertstoffe aus dem Baubereich basierend auf Gebäudetypen (beispielhaft [Schiller et al. 2010] S. 71) und den derzeit in der Praxis durchgeführten, weder reproduzierbaren noch datenmäßig verfügbaren und ausgewerteten qualitativen Schätzverfahren und Feldergebnissen von Abbruchvorhaben. Es stellt eine Alternative zu statischen Lösungen wie z. B. Gebäudepässen oder anderer (meist veralteter) Gebäudedokumentation in Papierform dar. Das Vorhaben verbindet damit erstmalig Methoden der computergestützten Bilderkennung, 3D-Rekonstruktion mit Ansätzen zum Projektmanagement und zur Ressourceneffizienz im Baubereich.

Ressourceneffizienzpotenzial

Die Bauwirtschaft benötigt 40% des weltweiten Ressourcenverbrauchs [DBU 2013]. Allein in Wohnbauten existiert in Deutschland derzeit ein Materiallager von etwa 11 Mrd. t [Schiller et al. 2010, S.35, 184ff]. Hinzu kommen die noch nicht erfassten weiteren Gebäudearten wie Büro-, Industrie- oder Gewerbebauten und Ingenieurbauwerke. Die Hauptmasse des Lagers in Wohnbauten machen mit 10,5 Mrd. t die mineralischen Anteile aus. Metallische Werkstoffe sind vor allem Stahl (ca. 103 Mio. t, etwa 1% der Gesamtmasse) und Kupfer (ca. 2,6 Mio. t). Daneben sind Aluminium und Zink massenrelevante Metalle im Baubereich. Derzeit wird für Stahl

ein Abgang aus Wohngebäuden von 350.000 t/a prognostiziert, für Kupfer von 13.000 t/a aus allen Gebäudetypen [Schiller et al. 2010]. Belastbare statistische Werte sind hier kaum verfügbar, da in der Bauabgangsstatistik² nur die Nutz-/Wohnfläche, die Anzahl der Wohneinheiten, das Baujahr (Jahr der Bezugfertigung), die jeweilige Nutzung sowie Gründe für den Abgang erfasst wird, nicht aber die rohstoffliche Zusammensetzung.

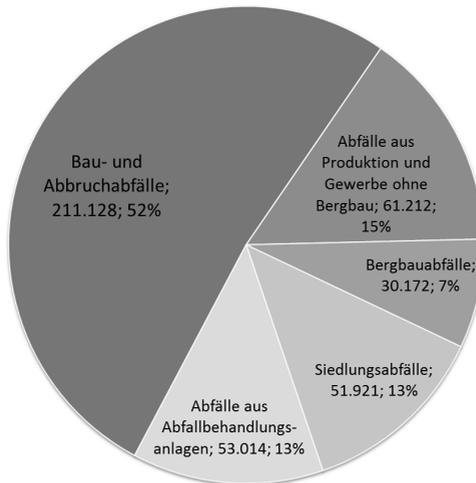


Abbildung 2: Abfallaufkommen in 10³ t für Deutschland 2014
(Quelle: Eigene Darstellung nach [Statistik Portal 2016])

Zukünftig werden Abgänge aus dem Baubereich aufgrund zunehmender Funktionalitäten von Bauwerken (Beispiele sind Wärmeschutzverglasung z. B. mit ITO/Indium-Zinn-Oxid; Photovoltaikanlagen mit verschiedenen Halbleitersystemen; Wärmedämmsysteme aus Mineralwolle, PS, PUR) hinsichtlich ihrer rohstoffspezifischen Eigenschaften zunehmend

² "Die Bauabgangsstatistik erfasst alle Gebäude und Gebäudeteile, die durch Abbruch, Schadensfälle oder bauaufsichtlichen Maßnahmen der Nutzung entzogen werden oder deren Nutzung geändert wird." Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2007): „Erläuterungen zur Bauabgangsstatistik“, [http://www.letschin.de/cms/upload/pdf/neues/BB Erl_Abgang.pdf](http://www.letschin.de/cms/upload/pdf/neues/BB_Erl_Abgang.pdf) (Abruf: 01.12.2016)

komplexer und (teilweise aufgrund zunehmender staatlicher Regulierung) hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit schwieriger, so dass mit den heutigen Methoden der Erfassung und Verwertung den zukünftigen Herausforderungen nicht mehr adäquat ressourceneffizient begegnet werden kann. Das Forschungsprojekt soll für ressourceneffiziente Rückbau- und Abbruchmaßnahmen eine gebäudescharfe, aktuelle, kurzfristig verfügbare und vor allem verlässliche Datenbasis liefern, auf der optimale Rückbau- und Verwertungsstrategien für Wertstoffe aus dem Baubereich aufsetzen. Dies ist insbesondere für schlecht dokumentierte Gebäude relevant, für die große Unsicherheiten vorliegen da derzeit keine Schätzwerte (z. B. Stahl aus Nichtwohngebäuden) oder nur große Schätz-Intervalle (z. B. Kupfer im Gebäudebestand) existieren [Schiller et al. 2010, S.35, 184ff]. Die im Projekt begonnene Entwicklung legt die Grundlage um mittelfristig funktionierende Methoden, Geräte und Dienstleistungen anbieten zu können.

Anteil von Metallen an Gebäuden

Die Anzahl der Rückbauprojekte, bei denen das gemessene/gewogene Rohstoffinventar veröffentlicht wurde, ist gering. Die Auswertung ausgewählter Projekte, dargestellt in Tabelle 2, lässt auf einen Anteil von Metallen am gesamten Abbruchmaterial zwischen 0,5% und 5% schließen. Auf Grund der beträchtlichen Stoffströme im Abbruchbereich stellt dieser vergleichsweise geringe Anteil mengenmäßig ein erhebliches Rohstoffvorkommen dar.

Zusätzlich zu den im Rahmen von Pilotprojekten erhobenen Kennwerten von einzelnen Gebäuden liegen für einige Gebäudetypen auch typische Materialkennzahlen vor [LfU 2001]; [Lippok 2007] S. 120; [Buchert et al. 2004]; [Schiller et al. 2010], die allerdings stark vom Einzelfall abweichen können [Schiller et al. 2010], S. 68, Abbildung 3-1.

Tabelle 2: Anteil und Gewicht von Metallen in Rückbauprojekten

Gebäude	Gebäude- typ	BRI [m ²]	Metall [t]	Metall- Anteil am Bauschutt	Quelle	Bem.
„Hotel Post“ in Dobel	Fachwerk- haus, Bau- jahr 1910	4.950	14,85	1,41 %	[Rentz et al. 1994]: Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden, dargestellt am Beispiel des Hotel Post in Dobel, 146 S., Ecomed, Landsberg.	unter Beteiligung der Antragsteller (IP)
Reihen- hauskom- plex in Mul- house	Baujahre 1856 und 1876	8.400	5,50	0,4%	[Rentz et al. 1998]: Selektiver Gebäuderückbau und konventioneller Abbruch – Technisch-wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes. Ecomed. Landsberg. S. 108	unter Beteiligung der Antragsteller (IP)
Staatliches Aufbau- gymnasium Rottweil	Baujahr 1910 - 1912	50.000	640,3	4%	[Rentz 1998: Rückbau des staatlichen Aufbaugymnasiums Rottweil – Gebäudeaudiotierung, Rückbau- und Verwertungsplanung. Auftraggeber: Staatliches Vermögens- und Bauamt Rottweil.	unter Beteiligung der Antragsteller (IP)
17-Famili- en-Haus	Baujahr 1972	6.000	42	1,21%	[Lippok 2007]: Abbrucharbeiten – Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller. Köln. 2. Auflage, S. 432	
Sternbrau- erei Essen		210.000	4200	3,56%		
Industrie- gebäude Dresden		57.000	684	3,32%		
Ehemalige Eisengie- ßerei			257,8	2%	[Goemann 1997]: Rückbau des Eisenwerkes Homberg (Efze)-Holzhäuser. In Koch/Schneider (Hrsg.) Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau. Springer. Berlin.	
Gymna- sium von Nantua	Baujahr 1964	18.000		0,96 %	[Rentz 1998]: Chantier de déconstruction sélective Lycée Xavier Bichat, Nantua. Rapport final, juillet 1999. S. 24	unter Beteiligung der Antragsteller (IP)

Bei Gebäuden jüngeren Baualters ist zudem auf Grund der gestiegenen Anzahl elektrischer Verbraucher mit einem Anstieg der Verkabelung (Kupfer) [Erdmann 2004], S.28 zu rechnen. Außerdem kommen in diesen Baualtersklassen in Leichtbau- und Fassadenkonstruktionen verstärkt Stahl-

und Aluminiumstützen und -verstreben zum Einsatz, so dass bei abnehmendem Gebäudealter insgesamt mit einem Anstieg des prozentualen Metallgehalts zu rechnen ist.

Stand der Technik – Gebäuderückbau

Bei einem konventionellen Abbruch steht die schnelle und kostengünstige Beseitigung des Gebäudes im Vordergrund, ohne besonderen Fokus auf möglicherweise recycelbare Materialien. Das führt häufig zu einer Mischung von verschiedenen Baustoffen zum Beispiel durch Anhaftungen, Fehlwürfe bei der Sortierung oder baustellenbedingter Verunreinigung und zum Teil zu einer Kontamination mit Schad- oder Störstoffen von bislang unbelasteten Materialien aus dem Abbruchprozess.

Dieser Aspekt gewinnt insbesondere mit Blick auf die sich verschärfenden Anforderungen für den Einsatz von Recycling-Baustoffen (derzeit vor allem die LAGA-Zuordnungswerte; ErsatzbaustoffV in Vorbereitung) erheblich an Relevanz. Zwar können Stoffe wie Metall, Glas, Mineralien und Kunststoff aus Abbruchmaterialien auch durch Sortierverfahren in Recyclinganlagen wiedergewonnen werden, aber die beste Voraussetzung für die Produktion von monofraktionellen Materialströmen ist die selektive Demontage (der Rückbau) des Gebäudes. Ein ökologisch und ökonomisch effizienter Rückbauplan ist daher Voraussetzung für die Minimierung von Umweltauswirkungen und Deponierungskosten [Schultmann 2005]. Um ein hochwertiges Recycling sicherzustellen, muss bereits beim Rückbau darauf geachtet werden, dass Vorkehrungen zur späteren Verwertbarkeit getroffen werden [Schultmann 1998]. So lassen sich z.B. durch Maßnahmen des selektiven Rückbaus und der Getrennthaltung Baustoffe mit geringen Anforderungen an den Einbau (LAGA Z1.1 und Z1.2) herstellen, die ansonsten als Z2-Stoffe nur mit technischen Sicherheitsmaßnahmen verwendbar wären oder sogar als Z3-Stoffe deponiert werden müssen³.

³ Z0 bis Z5 bezeichnet Bodenmaterial mit verschiedenen Qualitäten je nach Belastungsgrad durch Schadstoffe.

In Gebäuden sind Eisenmetalle z.B. in Rohren aus (verzinktem/veredeltem) Stahl und Gusseisen, Armierungen/Betonstahl, Stahlträgern und Heizkörpern enthalten. Nichteisenmetalle wie Kupfer, Aluminium, Blei und Zink kommen zudem in der Verkabelung, in Leichtbaukonstruktionen, alten Rohrleitungen und bei Dachrinnen und Dachverkleidungen vor. Das Einschmelzen von Eisenmetall und NE-Metall-Schrott und der Einsatz von recyceltem Metall in der Sekundärmetallurgie wird seit langem praktiziert und führt zu einer erheblichen Reduzierung des Energiebedarfs [Nießen 1997]. Beim mineralischen Abbruchmaterial fallen zudem Beton, Mauersteine (Kalksandstein, Ziegel, Porenbeton, Leichtbeton), Fliesen, Keramik, Gips und Schlacke an, die sich zum Teil stark in der Materialqualität, der Recyclingfähigkeit und den Recyclingvoraussetzungen unterscheiden. Eine Voraussetzung ist z.B. die Einhaltung von Grenzwerten bei Sulfat oder Fremd- und Störstoffen. Für Recyclingbeton müssen z.B. Frostwiderstand und Chloridanteile nachgewiesen werden (DIN4226-100:2002-02). Selbst für hochwertige Fraktionen wie Betonbruch gibt es derzeit nur wenige hochwertige Recycling-Optionen, die in der Praxis umgesetzt werden. Häufig werden nur Downcycling-Optionen wie der Einsatz als Füllmaterial im Straßenbau umgesetzt, so dass gleichermaßen Bedarf nach der Herstellung hochwertiger Stoffströme aus dem Abbruch und dem Ausbau hochwertiger Verwertungsoptionen besteht, von denen die Bereitstellung hochwertiger Stoffströme durch das vorgeschlagene Vorhaben geleistet wird.

Rückbauplanung und operativer Rückbau

Rund 620 Akteure (Abbruchunternehmen, Ingenieurbüros und Berater) sind derzeit beim Deutschen Abbruchverband e.V. angemeldet. Hinzu kommen noch zahlreiche unter anderen Dachverbänden organisierte Unternehmen im Bereich des Gebäuderückbaus, der Verwertung und Entsorgung [Deutscher Abbruchverband 2016]. Abbruch- und Rückbauvorhaben sind gekennzeichnet durch einen großen wirtschaftlichen und zeitlichen Druck. Dies unterbindet meist die detaillierte Bilanzierung des

Sekundärrohstoffaufkommens eines Bauobjektes [Faulstich 2010, S.55]. So stehen z. B. für die Angebotsabgabe für den Industriebauabbruch von 10.000-20.000 m³ umbautem Raum Zeitfenster von vier Stunden zur Verfügung. Innerhalb dieser vier Stunden muss ein Vor-Ort-Termin mit Aufmaß, die Kostenkalkulation und die Angebotsabgabe geleistet werden. Für die Kostenermittlung von Rückbauprojekten gibt es zwar Arbeitshilfen [Landesanstalt für Umweltschutz 2001], diese erfordern jedoch eine detaillierte Eingabe von Längen/Volumina aller Geschosse und Bauteile und damit ein möglichst genaues, manuelles Gebäudeaufmaß oder die Auswertung von Plänen.

Während im Neubau stark planbasiert gearbeitet wird, ist die Basis der Rückbauarbeiten die Objektbegehung, die aus Zeitgründen meist nur oberflächlich oder bei Standardobjekten wie kleinen Wohngebäuden oft nicht erfolgt. Die Beschaffung und Auswertung von Plänen, deren Abgleich mit dem tatsächlichen Gebäudebestand oder gar deren Fortschreibung zu Rückbauzwecken bleiben die Ausnahme. Insbesondere bei Industriegebäuden werden während der Nutzungsdauer zahlreiche Änderungen, Um- und Anbauten oder Änderungen der technischen Gebäudeausstattung vorgenommen. Hier stoßen Ansätze mit analogen, (semi-)strukturieren und nicht objekt-orientierten Datenspeichern („Gebäudepass“) an ihre Grenzen, denn sie müssen, genauso wie Pläne, fortgeschrieben, nach Jahrzehnten der Gebäudenutzung in lesbarer Form bereitgestellt und anschließend für den Rückbau ausgewertet werden. Dies funktioniert nach Erfahrungen von Fachleuten heute im Baubereich selbst für ständig genutzte, einfache Informationsquellen wie Kabelpläne bestenfalls ansatzweise. Für Gesamtgebäude einschließlich der gesamten technischen Ausstattung ist ein solcher Gebäudepass aus Sicht der Rückbauunternehmen nicht praxisingerecht. Folglich stehen die für eine detaillierte Kostenermittlung benötigten Werte in der Regel nicht zur Verfügung [Rentz et al. 2001].

Im Gebäuderückbau kann es bei einer Begehung vor allem bei großen Rückbauvorhaben nach Aussage der Unternehmenspartner leicht zu Abweichungen bei der Schätzung des umbauten Raumes von über 25% kommen, Abweichungen von 10% sind die Regel [Rentz 1998a], S.100. Je nach Vertragsart kann dies ein erhebliches Risiko von Kostensteigerungen (VOB/B §2, Abs.3) für den Auftragnehmer oder den Auftraggeber bedeuten, was eine erhebliche Belastung für die Volkswirtschaft darstellt. Für eine gezielte Nutzung der Stoffströme, seien es Metalle oder mineralische Baustoffe bzw. deren Entsorgung im Fall von Schadstoffen, fehlt derzeit gerade wegen des Verfahrens der Begehung und der erfahrungsbasierten Potentialabschätzung eine belastbare Datenbasis völlig.

Für die praktischen Rückbauarbeiten ist ein Projekt- und Stoffstrommanagement zur Optimierung der Ressourceneffizienz erforderlich. Konkret geht es hier um die Minimierung der Personal- und Maschinenstunden pro rückgebauter Einheit, die damit verbundenen Projektkosten und die Werthaltigkeit der Rückbaufractionen. Durch ein genaues Aufmaß in Verbindung mit Materialinformationen sowie Informationen zu verfügbaren Ressourcen (Maschinen, Personal, Zeitrahmen, Kostenrahmen) kann eine optimale Bauablaufplanung berechnet werden, die einen getrennten Rückbau der Bauteile und Materialfractionen bei der minimal erforderlichen Anzahl an Maschinen- und Personalstunden sicherstellt. Ein solches Modell wurde bereits theoretisch entwickelt [Schultmann 1998] und im Rahmen von ResourceApp erweitert und implementiert. Insbesondere die Kopplung der automatisierten Datenverarbeitung von Sensordaten und der Ableitung notwendiger Abbruchaktivitäten und Ressourcenbedarfen (Maschinen, Personal) mit dem Projektplanungsmodell ist neu. Ebenso gab es bisher kein Rückbauplanungsmodell, welches ein an DIN276 strukturiertes Bauteil- und Baustoffinventar ausgibt, die Projektplanung unter verschiedenen Szenarien betrachtet, sowie eine optimale Projektdauer und die minimalen Projektkosten (und damit die minimalen Rückgewinnungskosten der im Gebäude vorhandenen Materialien ausgibt).

Rückbaustrategie

Bei einem Rückbau werden im Gegensatz zu einem konventionellen Abbruch Bau-, Konstruktions- und Ausbauteile nach ihrer Funktion oder nach ihrer Materialzusammensetzung mit dem Ziel der Wieder- und Weiterverwertung demontiert [Landesanstalt für Umweltschutz 2001]. Die Separierung, der Rückbau und die Trennung der Materialien erfolgt meist an der Quelle, also dem Ort im Gebäude an dem das Bauteil beim Rückbau bzw. auf der Baustelle anfällt. Dem möglicherweise realisierbaren Erlös durch das Recycling von Materialien bzw. den reduzierten Kosten für Entsorgung stehen erhöhte Planungs- und Personalkosten gegenüber. Diese Entscheidung ist vom Rückbauunternehmer zu treffen, der damit die Projektdauer, die Projektkosten und die eingesetzten Ressourcen determiniert.

Der Rückbau von Gebäuden findet in der Regel in einer bestimmten Reihenfolge statt. Beim Rückbau kann zwischen vier Demontagestufen (D) vor dem vollständigen Abbruch und der anschließenden Aufbereitung des Gebäudes unterschieden werden [Petzschmann 1987] und [Umweltzentrum Dortmund 1995]. Die folgende Abbildung 3 stellt den Ablauf eines Rückbaus grafisch dar.

Zunächst werden die technische Gebäudeausstattung, die Innenausbauten, die Dacheindeckung, die Dachkonstruktion etc. sukzessive entfernt, bevor der Abbruch des Rohbaus und der Tragkonstruktion (Mauerwerk, Beton und Stahlbeton, Fertigelemente) und der Fundamente erfolgt. Dieser kann jedoch je nach äußeren Rahmenbedingungen auch bereits nach ein, zwei oder drei Demontagestufen erfolgen.

Im Rahmen der Entscheidungsunterstützung und Projektplanung können verschiedene Rückbaustrategien gewählt werden, die entweder die Kostenminimierung, die Zeitminimierung, die Robustheit der Projektplanung oder auch die Maximierung der Sortenreinheit der entstehenden Materialfraktionen im Rahmen des Projektes zum Ziel haben.

Bei einem selektiven Rückbau entstehen möglichst sortenreine Abfallfraktionen, die hochwertig verwertet werden können. Schad- und Störstoffe

können gezielt ausgeschleust werden; dies ist jedoch mit erhöhtem Ressourceneinsatz (Maschinen, Personal) verbunden. Für die Planung eines Rückbaus ist es im Gegensatz zu einem konventionellen Abbruch jedoch nicht ausreichend, gebäudebezogene Gesamtmassen abzuschätzen, sondern es ist erforderlich, die im Gebäude befindlichen Bauteile eindeutig zu lokalisieren sowie deren stoffliche Zusammensetzung und Zustand festzuhalten. Nur so können beispielsweise schadstoffbelastete oder hoch wertstoffhaltige Gebäudebereiche eingegrenzt und Demontagetechniken bestimmt werden [Schultmann 1998], S. 68. Auch aus Sicht der Standsicherheit von Gebäuden sowie zur Planung der Aktivitäten in den betroffenen Räumen (Arbeitssicherheit) ist dies sinnvoll bzw. erforderlich, aber derzeit noch kein Stand der Technik.

Rückbaueffizienz

Bisheriger Stand der Wissenschaft ist ein (Rohstoff-)Gebäudepass, der entwickelt wurde um Auskunft über die enthaltenen Rohstoffe eines Gebäudes zu geben. Die Erstellung bzw. die Pflege eines solchen Gebäudepasses insbesondere für bestehende Gebäude ist sehr zeitintensiv und aufwändig.

An dieser Stelle setzt das vorgeschlagene Vorhaben an, indem eine Alternative zum statischen Gebäudepass entwickelt wurde. Ressourceneffizientes Arbeiten im Rückbaubereich fokussiert auf die Effizienz, d. h. auf die Minimierung des Aufwandes im Planungs-, Rückbau- und Aufbereitungsbereich. Urban Mining⁴ nutzt die bestehenden, wiederverwendbaren Bauelemente der technischen Gebäudeausstattung sowie die anthropogenen Lager von Metallen und anderen Wertstoffen, deren Umfang, d. h. deren Wertstoffdargebot nicht erhöht werden kann. Bereits heute werden die Metalle beim Rückbau mehrstufig zurückgewonnen:

⁴ Urban Mining: Die Identifikation und Gewinnung von Rohstoffen aus anthropogenen Lagern.

- Baustelle: Abtrennung von Stahlträgern und Armierungseisen sowie weiterer Metalle (Kabel, Aluminium) nach visueller Identifizierung durch Baggreifer,
- Baustelle und Betriebshof: Sammlung von Nicht-Fe-Metallen in Containern (oft gemischt), manuelle Nachsortierung in Kabel, Al, Zn, Edelstahl
- Bauschuttzubereitung: Abtrennung magnetischer Metalle durch Magnetabscheider.

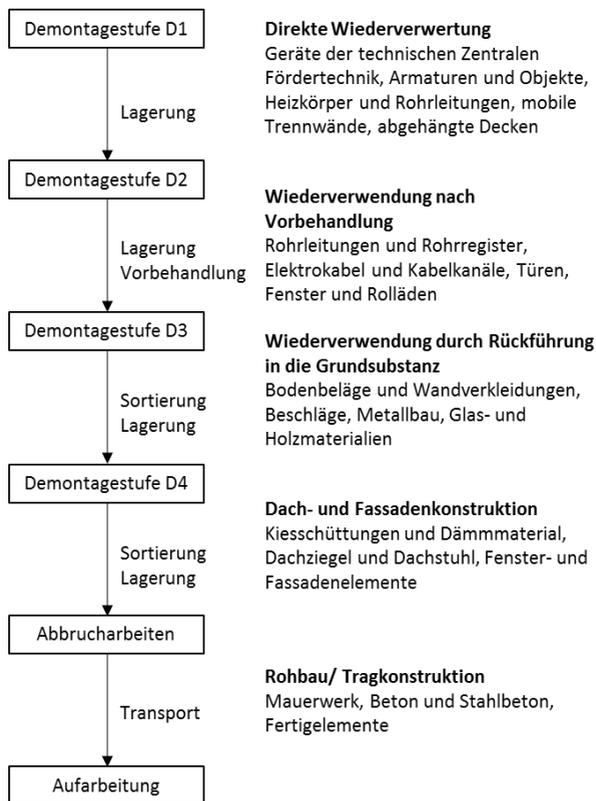


Abbildung 3: Demontagestufen beim Gebäuderückbau
Quelle: [Petzschmann 1987]; [Umweltzentrum Dortmund 1995]

Eine Erhöhung der Metallmenge zum Recycling kann daher nicht erwartet werden, jedoch deren gezielte Steuerung. Ressourceneffizienter Rückbau muss daher auf die Verkürzung und weitgehende Automatisierung der Angebots- und Planungsphase durch den Einsatz neuer, einfach und schnell anwendbarer Aufmaß- und Bewertungsverfahren in Verbindung mit dem gezielten Projekt- und Stoffstrom-Management abzielen. Durch den ResourceApp-Ansatz kann hier erstmals durch eine Verkürzung der Aufnahme- und Planungsphase mit gleichzeitiger Sicherstellung hochwertig verwertbarer Stoffströme aus dem Rückbau ein erhebliches Potential zur Effizienzsteigerung erschlossen werden.

Auch existieren bis heute neben der gängigen Angabe des (geschätzten) Bruttorauminhaltes (m^3) keine Leistungsmesszahlen für den Rückbau. Eine sinnvolle Basis wären Volumina (m^3) oder besser Massen je Rohstoff/Material (t) des Bauwerks bzw. Mauerwerks. Jedoch ist diese Basiszahl heute nicht mit vertretbarem Aufwand erfassbar, so dass mit m^3 umbautem Raum oder m^3 Bauschutt als Hilfsgrößen gerechnet werden muss. Gleiches gilt für die Masse der Metalle (Fe, Cu, Zn, Al) aus Rückbauprojekten, deren Wertstoffdargebot im Gebäude nur aufgrund der „ex post“-Berechnung u. a. aus Wiegescheinen nach dem Rückbau geschlossen werden kann. Dabei können jedoch Verluste durch Beraubung von Containern durch Dritte oder auch illegaler Metallverkauf durch Betriebsangehörige nicht erfasst werden, deren Entdeckung dem Zufall überlassen bleibt.

Diese Unsicherheiten führen zu Risiken sowohl für den Immobilieneigentümer, der keine Klarheit über den Rohstoffgehalt seiner Immobilie hat, als auch für den Rückbauunternehmer, dem belastbare Kalkulationsgrundlagen fehlen. Detaillierte Rückbaugutachten werden unter großem Aufwand nur für schadstoffbelastete Objekte oder von wenigen institutionellen Immobilieneigentümern angefertigt (und meist nur im Hinblick auf die kontaminierten Bauteile) und sind keinesfalls die Regel in der Branche. Die üblichen Objektbegehungen und Abschätzungen durch erfahrene Mitarbeiter sind stark fehlerbehaftet, da sie unter Zeitdruck und ohne detaillierte

Kenntnisse des Wertstoffgehaltes von Gebäuden erfolgen. Auch bei erfahrenen Mitarbeitern von Rückbauunternehmen sind Fehlschätzungen von 30% bis 50% des Metallgehalts (v. a. Eisen (Fe)) an der Tagesordnung, in Einzelfällen können sie 90% erreichen. Für die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Rückbauten und die Rückgewinnung einzelner Rohstoffe ist jedoch der Metallgehalt der zentrale, ökonomische Parameter, der aber bei sehr großen oder Sonderobjekten wie z. B. Umspannwerken immer völlig unklar ist und nur durch tagelange, detaillierte und arbeitsintensive Untersuchungskampagnen (visuelle und magnetische Prüfung, Entschichtung, Verwiegung) annähernd abgeschätzt werden kann. Für sehr große Objekte wie z. B. Krankenhäuser oder Einkaufszentren ist dies mit vertretbarem Aufwand nicht leistbar.

Es sind im Rahmen der Recherche in AP1.1 zahlreiche Quellen untersucht worden, die für die Durchführung des Vorhabens von Relevanz sind. Im Rahmen bereits durchgeführter deutscher Forschungsprojekte ist hier insbesondere das nuBAU-Projekt des BBR zu nennen mit der wichtigen Publikation von [Donath et al. 2010]. Dieses Forschungsprojekt weist einige methodische Parallelen auf, da es sich mit der Bild- bzw. Mustererkennung von Gebäudeteilen befasst, jedoch dies zur Abschätzung von Sanierungskosten im Rahmen von Baumaßnahmen im Bestand nutzt. Im Rahmen des Projektes ResourceApp wurden bei der Methodenentwicklung die Ergebnisse der genannten Arbeit berücksichtigt. International gibt es insbesondere von den Arbeitsgruppen um [Huber et al. 2011, Akbarnezhad et al. 2012/2014, Cheng und Ma 2012] interessante Beiträge, die für die Durchführung des Projektes relevant waren.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden diese und weitere Rechercheergebnisse in einem Review-Paper zusammengefasst und in der Zeitschrift „Automation in Construction“ veröffentlicht. Der Fokus lag dabei auf dem Einsatz von neuen Technologien wie Building Information Models (BIM), Laserscanning, Photogrammetrie, RFID oder Barcodes zur Erfassung und Speicherung bauproduktbezogener Informationen zur Bestimmung von Rohstoffinventaren, der Rückbauplanung und der Ressourceneffizienz der eingebauten Bauteile.

Stand der Technik – Bildauswertung für 3D-Rekonstruktion

Die 3D-Rekonstruktion aus Bildern bzw. Bildfolgen hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Dies ist einem Durchbruch auf dem Gebiet der robusten Merkmalsextraktion aus Bildern aus dem Jahre 2004 zu verdanken. Arbeiten von David Lowe [Lowe 2004] zur Extraktion skalierungs-invarianter Bildmerkmale (SIFT) sowie die affin-invarianten und höchst diskriminativen Merkmale von Kadir und Brady [Kadir et al. 2001] liefern wertvolle Werkzeuge zum Bildvergleich. Darauf aufbauend haben Leibe und Schiele [Leibe et al. 2004] sowie Fergus, Perona und Zisserman [Fergus 2003] Lernverfahren entwickelt, die es ermöglichen, Objekte in Bildern zu erkennen. Auf Basis dieser Merkmalsextraktoren ist es möglich, skalen- und rotationsinvariant beliebige, auch teilverdeckte Objekte in Bildern zu entdecken. Eine der Herausforderungen dieser Technologie auf mobilen Geräten sind extrem leistungsfähige Tracking-Algorithmen, die mit den beschränkten Ressourcen der mobilen Hardware hinreichend schnell arbeiten [Santos et al. 2009].

In der 3D-Rekonstruktion muss die 3-dimensionale Gestalt (Form) des aufgenommenen Objektes virtuell nachgebildet werden. Durch die Verfügbarkeit von Millionen von Bildern im Internet auf Web-Seiten wie Google Maps, Microsoft Bing Maps, Flickr oder Photobucket sowie die Entwicklung robuster Merkmalsextraktoren (z. B. SIFT) wurden entsprechende 3D-Entwicklungen vorangetrieben. Aus Bildern 3D-Modelle zu generieren war bislang nur unter Laborbedingungen (u. a. kontrollierte Beleuchtung, definierte Skalierung der Bilder) möglich. Für Bilder aus dem Internet gelten diese problemvereinfachenden Bedingungen nicht. Sie stellen Objekte (meist Sehenswürdigkeiten) aus verschiedenen Winkeln, bei unterschiedlicher Beleuchtung, mit variierenden Kameras aufgenommen dar. Neuerliche Erfolge auf dem Gebiet Computer Vision erlauben es heute, 3D-Modelle (Punktwolken) aus Bildern mit ganz unterschiedlichen Aufnahmeparametern zu erstellen. Einer der führenden Forscher auf diesem Gebiet ist Prof. Gösele (TU Darmstadt) mit dem das Fraunhofer IGD kooperiert. [Goesele et al. 2007] haben 2007 einen neuen Ansatz für Multi-

View-Stereo (MVS) präsentiert, der die Tatsache nutzt, dass in großen Mengen von Bildern Teilmengen existieren, die unter hinreichend ähnlichen Bedingungen aufgenommen wurden, so dass das Finden von Passpunkten mit Hilfe von SIFT erfolgreich gelingen kann. Diese Teilmengen werden automatisch identifiziert und ermöglichen die Rekonstruktion einer ‚dichten‘ Oberfläche. Die Arbeiten zu MVS werden derzeit in Kooperation mit dem Fraunhofer IGD fortgeführt und erweitert [Goesele et al. 2010] [Ritz et al. 2010], z.B. durch Kombination mit Photometric Stereo (PS) [Ackermann et al. 2010].

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Bei dem abgeschlossenen Projekt ResourceApp handelt es sich um ein Verbundvorhaben bestehend aus mehreren Partnern. Projektkoordinator war das Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT mit Sitz in Pfinztal bei Karlsruhe. Ein weiteres Fraunhofer-Institut (Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD), sowie das Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion IIP des Karlsruher Instituts für Technologie KIT als Teil des Projektkonsortiums vervollständigten den wissenschaftlichen Anteil der Partner. Seitens der Praxis ergänzten die beiden Abbruch- bzw. Sanierungsunternehmen Werner Otto GmbH und COSAWA Sanierung GmbH das Projektkonsortium. Für spezielle Fragestellungen im Gebäudeschadstoffbereich, wurde vom Fraunhofer ICT das Geotechnische Planungs- und Beratungsbüro Arke unterbeauftragt. Im Rahmen des Austauschs mit dem Verbundprojekt PRRIG fand am 13.07.2013 in Darmstadt wie geplant ein erster Workshop statt (Meilenstein 17: Workshop 1 zusammen mit PRRIG). Seitens des Projektes ResourceApp nahmen Fraunhofer IGD, Fraunhofer ICT und KIT/IIP teil und stellten den derzeitigen Stand des Projektes und insbesondere des AP1 vor. Bei den Workshops wurde eine Präsentation mit bisherigen Rechercheergebnissen des Projektes ResourceApp präsentiert und allen Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Ergebnisse des Workshops bestanden im näheren Kennenlernen der Projektziele und -vorgehensweisen, sowie

im Austausch und in der Einigung auf eine kompatible Bauteilstruktur (DIN 276). Außerdem wurden mögliche Schnittmengen für Testgebäude identifiziert, wie Anstaltsgebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude, Hotel und Unterkünfte, Kindergärten und (Hoch-)Schulen. Beim Treffen der beiden Verbundvorhaben PRRIG und ResourceApp konnte erfolgreich eine gemeinsame Bauteilhierarchie festgelegt werden. Im Anschluss an den Workshop fand ein weiteres Abstimmungstelefonat zwischen IIP und PRRIG statt, bei dem die festgelegte Bauteilhierarchie (TOP 2.2) weiter verfeinert und abgestimmt wurde. Die Tagesordnungspunkte 2.3, 2.4 und 2.5 sowie TOP3 wurden einvernehmlich auf den nächsten gemeinsamen Workshop Mitte 2014 verschoben.

Im Rahmen des Austauschs mit dem Verbundprojekt PRRIG fanden am 21.07.2014 und am 04.09.2014 zwei weitere Workshops in Pfinztal bei Karlsruhe und Darmstadt zusammen mit dem Verbundvorhaben PRRIG statt. Dort stellten zunächst die Projektpartner Fraunhofer IGD, Fraunhofer ICT und KIT/IIP ihren bisherigen Projektstand vor. Ergebnisse des Workshops bestanden in der Diskussion und Einigung auf eine Bauteilhierarchie (DIN 276) sowie in der Identifikation möglicher gemeinsamer Testgebäude insbesondere in Darmstadt und dem Rhein-Main-Gebiet, wie Parkhäuser, Anstaltsgebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude, Hotels und Unterkünfte, (Hoch-) Schulen und Kindergärten. Zudem wurden derzeitige Rahmenbedingungen und Kennzahlen im Rückbau präsentiert, diskutiert und ausgetauscht sowie verschobene Tagesordnungspunkte besprochen.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse

Im Folgenden werden die Arbeitspakete sowie die erarbeiteten Recherche- und Projekt-Ergebnisse zusammengefasst und übersichtlich dargestellt. Das Forschungsvorhaben war in sechs Arbeitspakete gegliedert. Das Projekt wurde in zwei Phasen aufgeteilt, da zunächst zwei Jahre und am Ende dieser Laufzeit ein drittes Jahr beantragt wurden. Tabelle 3 stellt die Zeit- und Meilensteinplanung dar. Die Arbeits- und Rechercheergebnisse der fünf Arbeitspakete sind im Folgenden nach den Outputs gegliedert und im Detail dargestellt:

2.1.1 Gebäudetypologie und Bauinformation (AP1) (IIP/KIT – Rebekka Volk)

Die folgende Tabelle 4 zeigt die Untergliederung des ersten Arbeitspaketes in die Teilschritte AP1.1 (Aufbereitung der für die Bestimmung des Wertstoffgehalts von Gebäuden und die Definition einer rohstoffbezogenen Gebäudetypologie relevanten Normen, technischen Regeln, Gesetze, Standards und Veröffentlichungen) und AP1.2 (Definition einer rohstoffbezogenen Gebäudetypologie), die im Folgenden detailliert beschrieben werden.

2 Eingehende Darstellung

Tabelle 3: Zeit- und Meilensteinplanung

Projektbeginn 15.04.13		Phase 1												Phase 2																							
		Jahr 1						Jahr 2						Jahr 3																							
Arbeitspakete		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Gebäudetypologie und Bauinformation																																				
1.1	Recherche, Normen u. Veröff.					M1																															
1.2	Definition Gebäudetypologie						M2																														
2	Software zur Erfassung der Gebäudekubatur																																				
2.1	Bild-basierte Erkennung									M3																											
2.2	Bild-basierte 3D-Rekonstruktion																																				
2.3	Intuitive Benutzungsoberfläche																																				
3	Erschließung des Ressourceneffizienzpotenzials																																				
3.1	Methodenentwicklung für AP2																																				
3.2	Modell Rückbauplanung																																				
3.3	Begleitung Praxisverifikation																																				
3.4	Gebäudeinventarkataster																																				
4	Hardwaredemonstrator																																				
4.1	Auswahl Hardware-Plattform					M9																															
4.2	Komponenten- und Integr.-test																																				
4.3	Abstimmung Soft-/Hardware																																				
5	Praxisverifikation																																				
5.1	Schnittstellen, Anforderungen																																				
5.2	Verifikationsphase I																																				
5.3	Verifikationsphase II																																				
5.4	Übertragung a. a. Branchen																																				
5.5	Dienstleistungsansatz																																				
6	Projektmanagement																																				
6.1	Projektleitung																																				

Meilensteindefinitionen:

- M1: Literaturübersicht
- M2: Gebäudetypologie
- M3: Erster Prototyp Objektrekonstruktion- und Klassifizierung
- M4: Zweiter Prototyp Objektrekonstruktion- und Klassifizierung
- M5: Finaler Prototyp Objektrekonstruktion- und Klassifizierung
- M6: Methoden für AP2
- M7.1: Rückbauplanungsmodellkonzept
- M7.2: Rückbauplanungsmodell
- M8: Hochrechnung Gebäudeinventar
- M9: ResourceApp-Hardware ausgewählt

- M10: Erste Version Software fertig für Test
- M11: Erster Prototyp Hardware Demonstrator
- M12: ResourceApp erster Prototyp fertig für Praxisevaluierung
- M13: Finaler Prototyp Hardware Demonstrator
- M14: ResourceApp finaler Prototyp fertig für Praxisevaluierung
- M15: Finale Version Software fertig für Test
- M16: Fachgespräche mit potentiellen Anwendern aus an deren Branchen sind geführt und deren Auswertung liegt vor
- M17: Workshop 1 zusammen mit PRRIG
- M18: Workshop 2 zusammen mit PRRIG

Tabelle 4: Untergliederung des Arbeitspakets 1

AP1.1: Aufbereitung der für die Bestimmung des Wertstoffgehalts von Gebäuden und die Definition einer rohstoffbezogenen Gebäudetypologie relevanten Normen, technischen Regeln, Gesetze, Standards und Veröffentlichungen		
	<ul style="list-style-type: none"> Meilenstein M1: Abschluss von AP1.1 mit Übersicht über die Ergebnisse der Recherche 	15.09.2013 (Monat 5)
AP1.2: Definition einer rohstoffbezogenen Gebäudetypologie		
	<ul style="list-style-type: none"> Meilenstein M2: Abschluss von AP1.2 mit der rohstoffbezogenen Gebäudetypologie 	15.12.2013 (Monat 8)
Outputs		
	Rohstoffbezogene Gebäudetypologie mit <ul style="list-style-type: none"> Vorschlagsliste für die Stoffidentifikation Liste von zu erhebenden Zusatzinformationen Exemplarische Rohstoffinventare von Gebäuden und Bauteilen Gefahrstoffliste 	

2.1.1.1 Aufbereitung der für die Bestimmung des Wertstoffgehalts von Gebäuden und die Definition einer rohstoffbezogenen Gebäudetypologie relevanten Normen, technischen Regeln, Gesetze, Standards und Veröffentlichungen (AP1.1)

Zur Erarbeitung einer rohstoffbezogenen Gebäudetypologie und aufgrund der Vielfalt der verwendeten Bauteile und Baustoffe, wurde zunächst eine qualitative Befragung der Praxispartner durchgeführt, in der Bauteil- und Baustoffkategorien im Hinblick auf die Gewinnung sekundärer Rohstoffe und den Rückbau priorisiert wurden. Im Rahmen der Priorisierung wurden vier Entscheidungskriterien herangezogen, die zur Ermittlung und Bewertung der Sekundärrohstoffe und Ressourcen wichtig sind:

- Relevanz für die Erfassung des Gebäudes (Massenschätzung)
- Relevanz für die Abbruchplanung (Abfall-, Schutzkonzepte) und Abbruchvorbereitung (Rückbaureihenfolge, Maschineneinsatz)
- Relevanz für erwartete Zielwertstoffe
- Werthaltigkeit (Gebühren/Erlöse der Abbruchmassen)

Die Priorisierung der Bauteile erfolgte durch die gleichgewichtete Zusammenfassung der Prioritäten je Entscheidungskriterium. Die im Projekt prioritär betrachteten Bauteile können Tabelle 5 entnommen werden. Die dadurch möglichen Einschränkungen der potenziell im Gebäude vorhandenen Bauteile und Baustoffe können in zukünftigen Projekten aufgegriffen und behoben werden¹ Im Rahmen dieser Priorisierung wurden außerdem Kennwerte wie Bruttogrundfläche (BGF), Bruttorauminhalt (BRI) oder Materialintensität [$\text{kg}/\text{m}^2\text{BRI}$] als wichtige Größen zur Beurteilung der zu erwartenden Sekundärrohstoffe eines Gebäudes festgelegt.

Exemplarische Rohstoffinventare von Gebäuden und Bauteilen

Im Rahmen des Projektes ResourceApp sollte der zu entwickelnde Demonstrator ein Rohstoffinventar eines existierenden und aufgenommenen Gebäudes zur Verfügung stellen, das Aufschluss über die Menge und Verteilung der Rohstoffe im Gebäude gibt. Ein exemplarisches Rohstoffinventar enthält folgende Elemente:

- Allgemeine Gebäudeinformationen wie Bruttogrundfläche (BGF), Bruttorauminhalt (BRI), Anzahl der Geschosse,
- Rohstoffmassenbilanz [t, €] nach Baustoffen der Tabelle 7 (Bauteilstücklisten je Gebäude, Geschoss und Raum nach den priorisierten Bauteilen der Tabelle 5)
- Schadstoffmassenbilanz [t, €] (Raumweise Lokalisierung schadstoffbehafteter Bauteile)
- Recycling- und Entsorgungsraten.

Exemplarische Rohstoffinventare wurde im Rahmen der Methodikentwicklung in AP3 für zwei Beispielgaragen, sowie im Rahmen der Fallstudien und Praxisverifikation für ein Apartment und ein Krankenhausteil erstellt

¹ Dabei bieten sich bspw. Erweiterungen des ResourceApp-Demonstrators um bislang unberücksichtigte Bauteil- und Baustoffkategorien aus Wohngebäuden sowie die Integration von Nicht-Wohngebäuden, Infrastrukturen oder Produkten in den Demonstrator an.

(vgl. Abbildung 38). Die Kategorien der Massenbilanzen orientieren sich dabei an den tatsächlichen, stofflichen Abfallfraktionen, als an den Kategorien des Europäischen Abfallverzeichnisses oder ähnlichem (LAGA Mitteilung 20, AVV). Tabelle 7 listet die hier berechneten Stofffraktionen.

Für die Erstellung einer Bauteildatenbank, die z.T. die „Erfahrungswerte“ bezüglich der Bauteilprägungen speichern und in die Methodik (AP3) einfließen lassen soll, wurden verschiedene Quellen recherchiert. Grundlage der Bauteildaten bildet die Datenbank DEMAKOalt [Klauß et al. 2009], die Gebäudetypologien von insgesamt 11 Städten und 7 Bundesländern berücksichtigt² sowie relevante Normen (vgl. Tabelle 5). Der räumliche Fokus für die Bauteilprägung und insbesondere die Rückbaukosten konzentriert sich zunächst auf die Region Niedersachsen, da die Praxispartner vornehmlich in dieser Region (Hameln und Peine: PLZ-Gebiet 31xxx) aktiv sind und die Fallstudien in dieser Region durchgeführt wurden (vgl. Abschnitt 2.1.3.3 und 2.1.5.3). Im Rahmen zukünftiger Projekte kann dieser Betrachtungsraum ausgeweitet werden. Da die Abdeckung der DEMAKOalt-Datenbank in der Region Niedersachsen relativ gering ist, wurden zum einen die Informationen aus den benachbarten PLZ-Gebieten 22xxx, 25xxx und 34xxx genutzt, sowie andererseits eine Ergänzung der schlecht bzw. nicht abgedeckten Regionen durch Informationen aus Datenbanken (MASEA [Künzel et al. 2016], TABULA [IWU 2012a]), Rückbau-Projekten [Rentz et al. 1994], [Rentz et al. 1998a,b], [Rentz 1998a,b], [Lippok 2007], [Goemann 1997] und semantischen Informationen aus der Literatur durchgeführt.

Tabelle 5 beschreibt die wesentlichen Bauteile in Gebäuden sowie deren Klassifizierung nach DIN276, ihre Zugehörigkeit zur Tragstruktur oder

² Berücksichtigte Städte: Essen, Dortmund, Duisburg, Düsseldorf, Hagen, Hannover, Heidelberg, Mannheim, Münster, Remscheid, Solingen. Berücksichtigte Bundesländer: Bayern, Bremen, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Schleswig-Holstein. Bspw. sind noch nicht einbezogene, „jedoch existente lokale Typologien sind die der Städte Bielefeld, [Bochum], Lübeck, Rostock, Erfurt, und Wiesbaden sowie die Erhebungen der Landkreise Nienburg/Weser und Schwalm-Eder-Kreis“ [Donath et al. (2010)].

dem Ausbau, die im folgenden verwendete Einheit in ResourceApp sowie relevante Normen, die die Bauteilausprägung regeln. Diese umfassen sowohl Information zur Abmessung der Bauteile als auch zu den verwendeten Bauteilmaterialien und den dann zugrunde zulegenden Bemessungswerten. Bauteilkategorien, die in Tabelle 5 mit Priorität 1 gekennzeichnet sind, wurden im Rahmen der Softwareentwicklung in AP3 implementiert. Bauteilkategorien, die in Tabelle 5 mit Priorität 2 versehen sind wurden zunächst nicht implementiert, da diese von den Praxispartner als weniger relevant eingestuft wurden, bzw. diese zum Teil nicht erkannt werden können (Treppen) oder nicht in Innenräumen liegen (Dach, Sonnenschutz) und vom Sensor erfasst werden.

In zukünftigen Forschungsvorhaben kann die Liste der inventarisierten Bauteilkategorien erweitert werden. Insbesondere im Bereich der Dächer wäre dies sinnvoll und vergleichsweise einfach mittels in der Literatur vorhandener Kennwerte durchführbar. Falls die Grundfläche des Gebäudes und die Dachneigung bekannt ist sowie eine Nutzereingabe den prinzipiellen Dachaufbau anzeigt, können die Bauteilmassen des Daches berechnet werden. Treppen werden derzeit noch nicht berücksichtigt, da diese von ein in AP2 eingesetzten Sensoren nicht erkannt werden können. Im Bereich der technischen Gebäudeausstattung können Lüftungstechnische Anlagen, Fernmelde- und IT-Anlagen sowie Förderanlagen in zukünftigen Forschungsprojekten ergänzt werden, die im bisher implementierten ResourceApp-Prototyp noch nicht integriert sind. Tabelle 6 zeigt eine Übersicht über die in AP1.1. durchgeführte Normenrecherche zur technischen Gebäudeausstattung und insbesondere der Rohrleitungen. Diese sind in Tabelle 6 nach ihrem Bauteilmaterial gegliedert und die relevanten Normen, die die Rohrgeometrie für unterschiedliche Anwendungsbereiche festlegen sind aufgelistet. Dabei ist aus der Tabelle ersichtlich, welche geometrische Information in der Norm enthalten ist und welchen Anwendungsbereich sie regelt (AW: Abwasser, RW: Regenwasser, TW: Trinkwasser, GAS: Gas, HEIZ: Heizung).

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse

Tabelle 5: Strukturierung der Bauteile in ResourceApp, Priorisierung der Bauteile (nach der Priorität: 1: hoch, 2: mittel, 3: niedrig) sowie identifizierte, relevante Normen

Bauteilgruppe	DIN - Nr	Bauteilkategorien	Priorität	Einheit in Resource-App	Relevante Normen
Tragstruktur	320	Fundament	1	m³, t	DIN 488; DIN EN 1992-1-1; DIN 14991
	331, 332, 333, 343, 337, 341, 342, 346	Wand (1a), Stütze (1b), Pfeiler (1b)	1	m³, t	DIN 488; DIN 4172:1955-07; DIN 4103; DIN 18202; DIN 18203; DIN EN 1992-1-1
	351	Decke	1	m³, t	DIN 488 (Betonstahl)
	360	Dach	2	m³, t	-
	351	Sonstige, z.B. Treppen	2	m³, t	-
Ausbau	334, 344	Türen (1b)	1	m², Stk, t	DIN 18100 Maße entspr. DIN 4172; DIN 18101
	334, 344	Fenster (1b)	1	m², Stk, t	DIN 16830; DIN 18057
	335, 336, 345, 353, 364	Verkleidung, Putz (1b)	1	m³, t	DIN V 18550
	338	Sonnenschutz	2	m², Stk, t	DIN V 18073
Technische Gebäudeausstattung (TGA)	410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	1	m, Stk, t	DIN 1986-100; DIN EN 12056-2; DIN EN 806-1, 3, 4; DIN 1988-300; DIN EN 1775; VDI 3805 Blatt 1
	420	Wärmeversorgungsanlagen	1	m, Stk, t	DIN 1986-100, DIN EN 12056-2, DIN EN 806-3, DIN 1988-300; VDI 3805 Blatt 1
	430	Lüftungstechnische Anlagen	2	m, Stk, t	EN 13180:2001 (D)
	440	Starkstromanlagen	1	m, Stk, t	DIN 18015-1 bis 3; DIN EN 50441-1
	450	Fernmelde- und IT Anlagen	2	m, Stk, t	-
	460	Förderanlagen	2	m, Stk, t	DIN 18090; DIN 15306: 2002-06

2 Eingehende Darstellung

Tabelle 6: Übersicht Normenrecherche zu Rohrleitungen in Gebäuden im Hinblick auf den Werkstoff, Rohrgeometrien und Eignung für verschiedene Technische Gebäudeausrüstungen (TGA)

Werkstoff	Norm	Außen-durch-messer da [mm]	Innen-durch-messer di [mm]	Rohr-wand-dicke e [mm]	Längen-bezogene Masse [kg/m]					
						AW	RW	TW	GAS	HEIZ
Stahl	DIN EN 1123-2:2007-12 (feuerverzinkt)		X	X		X				
	DIN EN 1124:2012-09*	X	X	X		X				
	DIN EN ISO 1127:1996-03*	X		X	X	X	X	X	X	X
	DIN EN 10255:2004 (unlegiert) mit DIN 10240	X		X	X	X	X	X	X	X
	DIN 10220: 2003-03	X			X		X	X	X	X
	DIN 2460:2006-06	X			X	X	X			
	DIN 2470-1:1987-12	X			X				X	
	DIN 1988-300:2012-05* (schmelztauchverzinkt)	X	X					X		
	DIN EN 10312:2005-12*	X			X		X	X	X	X
DIN 30690-1:2006-04				X			X			
Blech (Zn, Cu, Al, etc.)	DIN EN 1057:2010 (Cu)	X		X				X		
	DIN EN 612 (Cu)	X					X			
	DIN 1988-300:2012-05	X	X					X		
Guss-eisen	DIN EN 877	X		X		X	X	O		
	DIN 19522					X		O		
	DIN EN 598					X		O		
	DIN EN 969:2009-07 (inkl. Umhüllung/ Beschichtung)	X	X	X					X	
PVC-U (Poly-vinyl-chlorid)	DIN 19534-3 (PVC-U)	X		X		X				
	DIN EN 1329-1 (PVC-U)	X		X		X				
	DIN 1566-1 (PVC-C)	X		X		X				
	EN ISO 15877-2 (PVC-C)	X		(X)		X	X		X	
	DIN EN 12200-1 (PVC-U)	X	X	X			X			
	DIN 8062 (PVC-U)	X		X	X	X				
	DIN 8079 (PVC-C)	X		X	X			X		
	DIN 1988-300:2012-05 (PVC-C)	X	X					X		
PE (Poly-ethylen)	DIN EN 1519-1 (PE-HD)	X		X		X	X			
	DIN EN 1555-2 (PE)	X		X					X	
	EN ISO 15875-2 (PE-X)	X		X		X	X	X	X	
	DIN 16834 (PE-RT)	X		X	X	X	X	X	X	
	DIN 16893 (PE-X)	X		X	X	X	X	X	X	
	DIN 16895 (PE-MDX)	X		X	X	X	X	X	X	
	DIN 1988-300:2012-05 (PE-X)	X	X					X		
	DIN 4724 (PE-MDX)	X		X					X	
	DIN EN ISO 22391-2 (PE-RT)	X		X			X	X	X	
Kunst-stoffver-bund	DIN 16837					X	X	X	X	
	DIN EN ISO 21003-2					X	X	X	X	
	DIN 4726								X	
Legende:		AW: Abwasser			RT: temperaturbeständig					
X: tritt auf		RW: Regenwasser			HD: Hohe Dichte					
O: tritt nicht auf		GAS: Gas			MD: Mittlere Dichte					
*: nicht-rostend		HEIZ: Heizung			X: Vernetzt					
					U: unplasticized/hart					
					C: chloriert/weich					

Vorschlagsliste mit Stoffidentifikation

Mittels einer Angabe zum Gebäudetyp sowie zur Nutzungsart (vgl. die Gebäudetypologie in AP1.2) steht eine Material-Vorschlagsliste je Bauteil zur Verfügung. Dazu wurden im Rahmen von AP1.1 Quellen identifiziert, die als Grundlage für die Identifikation von Baustoffen dienen können, wie bspw. DIN276 für die Strukturierung der Bauteile (vgl. auch Tabelle 5), sowie die jeweiligen DIN-Normen der Bauteile (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7).

Da zunächst die Methodik anhand einer Beispielgarage des Projektpartners Fraunhofer ICT getestet werden sollte, wurde auch die Vorschlagsliste mit Stoffidentifikation, dargestellt in Tabelle 7, zunächst an den Erfordernissen einer Garage des Gebäudetyps V ausgerichtet und dann im Projektverlauf sukzessive um die Erfordernisse von Wohn- und Nicht-Wohngebäude erweitert. Tabelle 7 zeigt die Stoffvorschlagsliste exemplarisch anhand der möglicherweise im Gebäude enthaltenen Bauteile (nach DIN276-Klassifikation) und der möglichen baustofflichen Ausprägung des Bauteils.

Da hier zunächst für das Beispielgebäude von einer einfachen Fertigteilgarage ausgegangen wurde, wurden in der Tabelle aus Gründen der Komplexität nicht alle möglichen Bauteile und Ausprägungen aufgeführt, sondern lediglich die für diesen Fall relevanten. Erweiterungen, die bei der Betrachtung von Wohngebäuden (EFH/ZFH) hinzukamen sind bspw. Bauteile des Ausbaus und der technischen Gebäudeausrüstung wie beispielsweise Trag- und Dränschichten unter dem Fundament, Innenwände und elementierte Wände, weitere TGA und gebäudetypabhängige Bauteile. Die gesamte Tabelle ist in der Datenhaltung der ResourceApp gespeichert und kann aber über Microsoft Excel geändert und importiert werden.

2 Eingehende Darstellung

Tabelle 7: Vorschlagsliste mit Stoffidentifikation für Garagen des Gebäudetyps V
(1: möglicherweise enthaltene Bauteil-Baustoff-Kombination)

Baustoffe		Beton (unbewehrt)	Beton (bewehrt), Ortbeton	Beton (bewehrt), Fertigteil	Mauerwerk Ziegel	Mauerwerk Kalksandstein	Natur-/Kunststein	Mörtel/Putz/Estrich	Gips, Gipskarton	Dachziegel	Fliesen, Sanitärkeramik	Stahl	Aluminium	Kupfer	Bronze, Messing	Guss Eisen	Glas	Holz (unbehandelt)	Holz (behandelt)	Asphalt und Bitumen	Papier, Pappe	Kunststoffe (PVC, PE, PP)	Dämmstoffe	Elektronikschrott, Kabel	Verbundrohre (PE-X etc.)	Teppich und Textilien
DIN-Nr	Bauteil																									
322	Flachgründungen	1	1	1	1																					
32210																										
/32220	Fundament(platten)																									
324	Unterböden und Bodenplatten		1	1								1						1	1							
325	Bodenbeläge																									
32510	Anstrich																									
32520	Estrich						1	1			1									1		1				
32530	Fliesen und Platten																									
32550	Betonwerkstein																									
331/332	Tragende/Nicht-tragende Außenwände																									
33120																										
/33220	Betonwand			1																						
334	Außentüren und -fenster																									
33410	Türen											1	1					1				1				
33450	Tore																									
33460	Fenster																									
335	Außenwandbekleidungen, außen																									
33510	Unterkonstruktion																									
33520	Oberflächenbehandlung							1	1				1					1	1							
33530	Putz																									
33540	Bekleid. auf Unterkonstruktion																									
336	Außenwand bekleidungen, innen																									
33620	Oberflächenbehandlung							1	1																	
33630	Putz																									
361	Dachkonstruktionen																									
36120	Stahlbeton, Fertigteil			1																						
363	Dachbeläge																									
36310	Abdichtung																									
36320	Abdichtung, Wärmedämmung																									
36370	Dachentwässerung																									
36390	Sonstige Dachbeläge																									
364	Dachbekleidungen																									
36420	Oberflächenbehandlung							1	1																	
36430	Putz																									

Da der in AP2 eingesetzten Sensor nicht in der Lage ist, Schadstoffe zu identifizieren (bspw. mittels Infrarot-Spektroskopie oder anderer analytischer Verfahren), können sekundäre Schadstoffe in der ResourceApp nicht berücksichtigt werden.

Neben den in Abbildung 4 genannten Schadstoffen gibt es zahllose weitere Verunreinigungen, Stör- und Gefahrstoffe, die in Bauteilen und Baustoffen vorhanden sein können. Diese sind beispielweise in [Rötzel 2009], [Berg et al. 2010], [Ee concept 2013], [AGÖF 2013], [BG Bau 2013] aufgeführt.

Das Fraunhofer ICT unterstützte den Projektpartner IIP/KIT bei der Recherche zu bestehenden Gebäudetypologien und Bauinformationssystemen. Der Projektpartner ARKE (Im Unterauftrag des Fraunhofer ICT) unterstützte als Experte die Forschungspartner bei der Bestimmung häufig anfallender und relevanter Schadstoffe und deren üblicher Behandlung. Im Rahmen des Projekttreffens am 10.12.2014 gab ARKE in einer Präsentation einen umfangreichen Überblick über Bauschadstoffe.

Liste von zu erhebenden Zusatzinformationen

Informationen, die neben geometrischen Daten zu erheben sind, lassen sich in Gebäude-, Geschoss- und Bauteilebene gliedern. Im Rahmen der Recherche wurden zunächst allgemeine Gebäudeattribute zusammengetragen, deren Informationsgehalt für die Ermittlung der potenziellen Sekundärrohstoffe eines Gebäudes relevant ist. Auf Gebäudeebene sind sog. Stammdaten (vgl. Tabelle 8) eines Gebäudes zu ermitteln, wie Baujahr, Bauart (Gebäudetyp) und Nutzungsart. Abbildung 8 zeigt die Implementierung der Nutzereingabe als Eingabemaske.

Die in Tabelle 8 aufgelisteten Informationen sollten, soweit für das Einzelgebäude vorhanden, angegeben werden, um einerseits eine möglichst genaue Massenbilanzierung (siehe AP3 im Abschnitt 2.1.3) und andererseits eine Hochrechnung anhand amtlicher Statistiken (siehe AP3.4 im Ab-

schnitt 2.1.3.4) zu ermöglichen. Die Liste ist ggf. erweiterbar um Informationen zu Nutzungen, An- und Umbauten, Sanierungen und Kriegs-, Feuer- oder Wasserschäden.

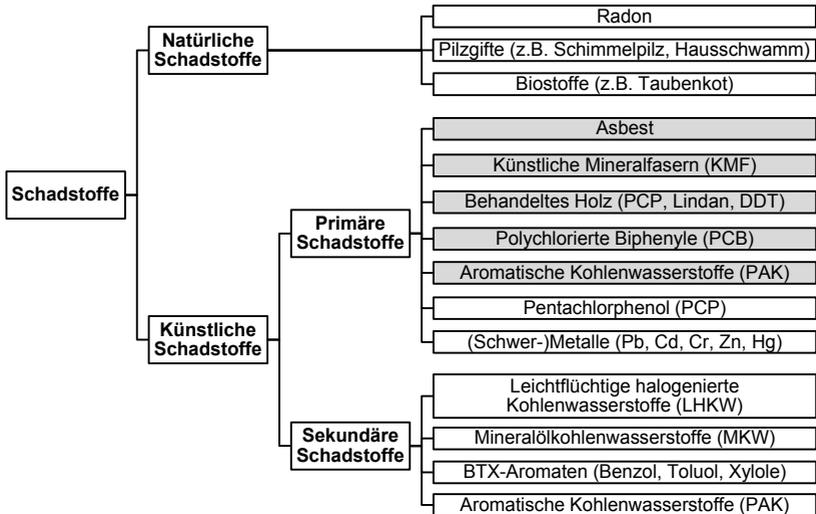


Abbildung 4: Schadstoff-Typologie mit einer Auswahl an auftretenden Schadstoffen in Gebäuden und den ResourceApp betrachteten Typen (grau)

Die bauteilspezifischen, zu erhebenden Zusatzinformationen bzw. Modellparameter sind in AP3 dargestellt. Diese Modellparameter werden in ResourceApp dem Nutzer in Abhängigkeit vom Gebäudetyp und der Bauwerkskonstruktionsart vorgeschlagen. Dabei bewegen sich die vorgeschlagenen Werte innerhalb der durch Normen definierten Werte (vgl. Tabelle 5 und Tabelle 6).

Eine weitere Detaillierung von Informationen auf Geschoss- und Bauteilebene im Sinne der genauen Abbildung von modernisierten Einzelbauteilen ist derzeit noch nicht implementiert (vgl. AP3 im Abschnitt 2.1.3), kann im ResourceApp-Prototyp aber ergänzt werden. Informationen auf Geschossebene können insbesondere Angaben zur veränderten Bauart des

Geschosses (bspw. ein nachträglich aufgesetztes Geschoss in Leichtbauweise) oder zum letzten Sanierungsjahr umfassen.

Es wurde außerdem deutlich, dass aufgrund einer Vielzahl an Bauteil- und Materialausprägungen eine Eingrenzung notwendig ist. Daher liegt der Fokus im Folgenden zunächst auf Bauteil- und Baustoffkategorien, die in Tabelle 5 (siehe Abschnitt 2.1.1.1) mit Priorität 1 dargestellt sind. Ebenfalls aufgeführt sind die Erfassungseinheiten der Bauteile sowie die identifizierten, relevanten Normen. Da eine Einschätzung der verdeckten Bauteile besonders schwierig ist, lag ein Schwerpunkt der Recherche auf den in Tabelle 6 (siehe Abschnitt 2.1.1.1) aufgeführten Rohrleitungsnormen.

2.1.1.2 Definition einer rohstoffbezogenen Gebäudetypologie (AP1.2)

Zum Schließen auf bestimmte Bauteilausprägungen und potenzielle Sekundärrohstoffe in Gebäuden und Infrastrukturen kann eine Einteilung in Gebäudetypen hilfreich sein. Daher wurden im Rahmen des AP1.2 in der Literatur vorhandene Gebäudetypen recherchiert und für ResourceApp eine rohstoffbezogene Gebäudetypologie definiert.

Abbildung 5 zeigt die Hauptnutzungsarten von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach der Einteilung des Statistischen Bundesamtes [Kohlhammer 1978] sowie die Mengenrelevanz der Nutzungsarten. Die Materialmassen verteilen sich unterschiedlich auf die verschiedenen Gebäudenutzungsarten; die Quantifizierung der Nicht-Wohngebäude ist nur sehr grob. Man sieht, dass von der Anzahl die Einfamilienhäuser überwiegen, dass aber Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser circa je zwei Fünftel der Wohnfläche konstituieren und sich hinsichtlich der Wohnfläche kaum unterscheiden. Circa ein Fünftel der Wohnfläche in Deutschland ist in Zweifamilienhäusern anzutreffen.

Tabelle 8: Auflistung der Gebäude-Stammdaten, die Nutzer eingeben können, falls Information vorhanden/bekannt, z.B. aus Gebäudeunterlagen, vorherigen Begehungen. Kategorien für erforderliche Gebäudestammdaten basieren zum Teil auf [Görg 1997; Kohlhammer 1978]

Gebäude-Stammdaten		Mögliche Ausprägungen
Standortinformationen	ID	-
	Gebäude-Name	-
	Straße, Hausnr.	-
	PLZ	-
	Gemeinde	-
	Bundesland	-
Gebäudetyp & -gliederung	Bauwerksuntergruppe	711 Wohngebäude
		713 Unterkünfte
		715 Nichtwohngebäude
		719 Freistehende Konstruktionen
	Bauwerksklasse	7111 Wohngebäude ohne Wohnheime
		7117 Wohnheime
	Bauwerksunterklasse (= Art der Nutzung)	71111 Einfamilienhaus (EFH)
		71114 Zweifamilienhaus (ZFH)
		71117 Mehrfamilienhaus (MFH)
		71171 Wohnheim für Schüler/Studenten (WH)
	Gebäudetyp und Konstruktionsweise	Gebäudetyp I, II, III, IV oder (V)
	Baujahr	-
	Baualtersklasse	-
	Geschosszahl	-
Anzahl Wohneinheiten (WE)	-	
Technische Ausrüstung (je TGA)	AW W GAS HEIZ LÜFT STROM IT FÖRD	
Siedlungstyp (für Hochrechnung, etc.)	Freistehendes Haus	
	Doppelhaushälfte	
	Gereihtes Haus Anderer Gebäudetyp	
Hauptmaße und Geometrien	Grundfläche [m ²]	-
	Höhe (des Giebels bzw. oberer Gebäudeabschluss) [m]	-
	Bruttorauminhalt (BRI) [m ³]	-
	Bruttogrundfläche (BGF) [m ²]	-
	Nettorauminhalt (NRI) [m ³]	-
	Nettogrundfläche (NGF) [m ²]	-
	Dachform	{Flachdach, Steildach}
	Dachneigung [°]	{ 0°; >0° und <45°}
	Fundamentart	32212 Flachgründung - Einzelfundament
		32214 Flachgründung - Streifenfundament
		32220 Flachgründung - Fundamentplatten
32400 Unterböden/Bodenplatten		
Fundamenthöhe [m]	Abhängig von Fundamentart	

2 Eingehende Darstellung

Hausanschlüsse (je TGA)	Anschlusspunkte	AW W GAS HEIZ LÜFT STROM IT FÖRD							
		AW	W	GAS	HEIZ	LÜFT	STROM	IT	FÖRD
AW: Abwasseranlagen						LÜFT: Lüftungsanlagen			
W: Trinkwasseranlagen						STROM: Niederspannungsinstallationen			
GAS: Gasanlagen						IT: Fernmelde- und Informationstechnische Anlagen			
HEIZ: Heizung-/Wärmeversorgungsanlagen						FÖRD: Förderanlagen			

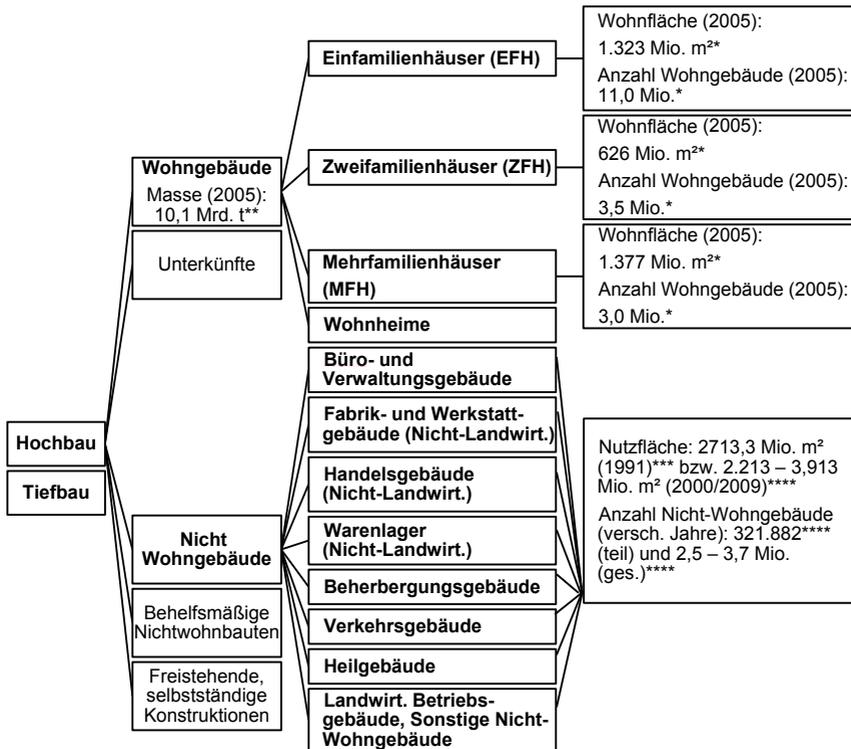


Abbildung 5: Mengenrelevanz des deutschen Gebäudebestands nach Nutzungsarten (Quellen: [Kohlhammer 1978], S. 15-19, *: [Destatis 2011], **: [Schiller et al. 2010, S.72], ***: [Kohler et al. 1999, S. 24] ****: [Dirlich et al. 2011, S.94ff.]

Tabelle 9: Bauwerksunterklassen und Nutzungsarten, die Projektdeckung von ResourceApp und PRRIG sowie mögliche Schnittstellen und Testgebäude

Bauwerksunterklassen und ihre Nutzungsart	Projektdeckung
Wohngebäude <u>Ein- und Zweifamilienhäuser</u> EFH/ZFH <u>Mehrfamilienhäuser</u> MFH <u>Wohnheime</u> WH	ResourceApp (Wohngebäude) <u>Schnittmenge und potenzielle Testgebäude:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Anstalts-, Büro- und Verwaltungsgebäude • Hotels/Unterkünfte • Kindergärten/(Hoch-)Schulen
Nicht-Wohngebäude <u>Büro- und Verwaltungsgebäude</u> <u>Fabrik-/ Werkstattgebäude</u> <u>Handelsgebäude</u> <u>Warenlager</u> (Warenlagerung aller Art, Garagen) <u>Beherbergungsgebäude</u> (Hotels/ Pensionen, Restaurants, Kantinen) <u>Bildungsgebäude</u> (Kitas, Hoch-/Schulgebäude) <u>Verkehrsgebäude</u> (Flughäfen, Bahnhöfe) <u>Heilgebäude</u> (Kranken-/Pflegehäuser, Medizinische Behandlungsinstitute) <u>Landwirtschaftliche Betriebsgebäude, Sonstige Nicht-Wohngebäude</u> (Museen/ Theater/ Opernhäuser/ Bibliotheken, Kirchen, Sportgebäude, etc.)	
	PRRIG (Nicht-Wohngebäude)
	Bislang nicht in r ³ -Vorhaben berücksichtigt

Eine Einteilung der Gebäude nach Nutzungsart wurde in Zusammenarbeit mit dem Verbundprojekt PRRIG im Rahmen eines Workshops erarbeitet (vgl. Tabelle 9). Daraus wird deutlich, dass sich beide Projekte unterschiedlichen Gebäudetypen widmen, aber trotzdem mögliche Schnittmengen und gemeinsame Testgebäude mit wohngebäude-ähnlichem Charakter haben. Mögliche Testgebäude für die PRRIG- und ResourceApp-Ansätze wären Anstalts-, Büro- und Verwaltungsgebäude, sowie Hotels, Unterkünfte, Kindergärten und (Hoch-)Schulen. Im Rahmen von ResourceApp wurden Tests an Garagen, Wohngebäuden und Bürogebäuden, sowie an einem Krankenhaus durchgeführt.

Ausgehend von der Art der Nutzung wurden in AP1.2 vorhandene Gebäudetypologien recherchiert (vgl. Abbildung 6) und eine geeignete, rohstoffbezogene Gebäudetypologie für Wohngebäude für ResourceApp definiert (vgl. Tabelle 10). Diese spiegelt die Konstruktionsweise eines Gebäudes und die Baustoffe der Tragstruktur wider. Abbildung 6 zeigt grau markiert

die für Wohngebäude wichtigsten Konstruktionsweisen mit ihren zugehörigen Baustoffen der vertikalen und horizontalen Tragstruktur. In dieser Typologie wurden einige mögliche Ausprägungen aufgrund ihres seltenen Auftretens in Wohngebäuden vernachlässigt wie

- Massivbau aus Holz,
- Skelettbau aus Stahl und Stein (Strebewerk),
- Fertigteilbau aus Mauerwerk.

Die Kombination „Massivbau - unbewehrter Beton-Stahlbeton-Bodenplatte“ (grau schraffiert) bildet dabei einen Sonderfall, der lediglich in Kellergeschossen von Wohngebäuden anzutreffen ist, aber keinen eigenen Gebäudetyp stellt. Der Typ „Stahlbeton Fertigteilbau“ (grau schraffiert) zeigt einen weiteren Sonderfall auf, da dieser Typ für Wohngebäude (EFH/ZFH) zwar weniger relevant ist, jedoch zum Testen des Resource-App-Prototyps für einfache Beispielgebäude wie Fertigteilgaragen herangezogen werden kann.

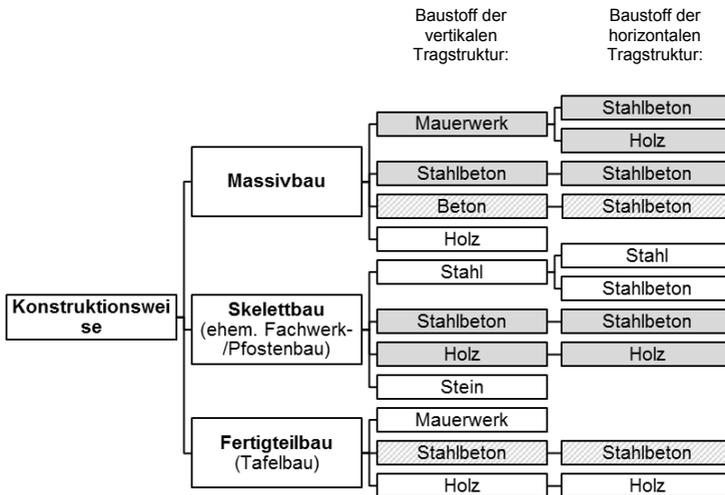


Abbildung 6: Typologie zur Konstruktionsweise der Wohngebäude und der in ResourceApp betrachtete Typen (grau hinterlegt), z.T. in Anlehnung an [DBU 2014]. Sonderfälle grau schraffiert.

Der ResourceApp-Demonstrator wurde zunächst für einfache Gebäude wie Garagen und dann in Gebäuden mit zunehmender Komplexität wie Ein- und Zweifamilienhäuser getestet. Dabei lag der Fokus insbesondere auf den Gebäudetypen I und II, da diese rund 92% der bis 1978 errichteten Gebäude in Deutschland betragen [IWU 2012a,b]. Die Gebäudetypen III und IV liegen mit Anteilen von 1,3% bzw. 4,4% weit darunter [IWU 2012a,b] und bleiben daher zunächst unberücksichtigt. Exemplarisch wird der Gebäudetyp V für einfache Gebäude angewendet. Weitere Nutzungsarten (z.B. Mehrfamilienhäuser, Wohnheime oder Nicht-Wohngebäude) wurden ebenfalls betrachtet. Weitere Gebäudetypen wie z.B. Mischbauarten und -konstruktionsweisen könnten in zukünftige Forschungsprojekten einbezogen werden.

Tabelle 10: Rohstoffbezogene, baualtersklassen-unabhängige Gebäudetypen die für Wohngebäude relevant sind (in Anlehnung an [DBU 2014])

Gebäude- typ	Konstruktions- weise	Vertikal		Horizontal		Art der Nutzung
		Bauteil	Baustoff	Bauteil	Baustoff	
I	Massivbau	Wand	Mauerwerk	Platte	Stahlbeton	EFH/ZFH, MFH
II	Massivbau	Wand	Mauerwerk	Träger	Holz	EFH/ZFH, MFH
III	Massivbau	Wand	Stahlbeton	Platte	Stahlbeton	EFH/ZFH, MFH
IV	Skelettbau	Stütze	Holz	Träger	Holz	EFH/ZFH
(V)	(Fertigteilbau)	(Wand)	(Stahlbeton)	(Platte)	(Stahlbeton)	(Garage, EFH/ZFH, MFH)

Tabelle 11 zeigt die derzeitige praktizierte grobe Abschätzung der Abbruchmaterialien je Baustoffkategorie und Gebäudetypen nach Kennwerten. Diese Werte dienen im weiteren Projektverlauf als Richtwerte und Verifikation für die Massenbilanzierung von AP3. Hinsichtlich des Auftretens der genannten Ausprägungen lassen sich zudem Unterschiede nach Region und Baujahr (Baualtersklasse) feststellen [Klauß et al. 2009, Görg 1997] (siehe Tabelle 12). Baualtersklassen orientieren sich an einschneidenden politischen, wirtschaftlichen und geschichtlichen Ereignissen, die in der Vergangenheit die Bauart und Konstruktionsweise von Gebäuden maßgeblich beeinflusst haben, z.B. Inkrafttretens der Verordnungen zum Wärmeschutz oder zur Energieeinsparung in Deutschland [Klauß et al.

2009]. Je nach zitierter Quelle sind unterschiedliche Einteilungen von Baualtersklassen zu finden. Tabelle 12 zeigt stoffliche, energetische und erhebungsbezogene (-) Einteilungen in Baualtersklassen im Vergleich. Im energetischen Bereich orientieren sich die jüngsten Arbeiten an der Deutschen Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU), die auch mit der europäischen Gebäudetypologie harmoniert [IWU 2012a]³.

Im stofflichen Bereich gibt es derzeit keine einheitlichen Baualtersklassen. Der Rückschluss von energetischer Bauteilqualität auf ihre stoffliche Ausprägung und damit eine Orientierung an energetischen Gebäudetypologien für die stoffliche Zusammensetzung von Bauteilen und Gebäuden ist zu prüfen. Die erhebungsbezogenen Baualtersklassen sind hier mit aufgeführt, da sie für eine Hochrechnung auf regionale und überregionale Gebäudebestände relevant werden könnten.

Im Rahmen des Projektes zunächst die Konstruktionsweise typisiert und Baualtersklassen festgelegt. Aufgrund von zahlreichen, möglichen Sanierungen und Nutzungsänderungen seit Bauwerkserstellung wird die einfache Einteilung von [Lippok 2007; LfU 2001] zunächst die Grundlage bilden, muss jedoch in zukünftigen Arbeiten um technische Lebensdauern, lange/mittlere/kürzere Sanierungszyklen, niedrig/mittlere/hohe Sanierungspräferenzen der Eigentümer, Auftreten von Schadstoffen etc. ergänzt werden. Die einfache Einteilung der Baualtersklassen ist kompatibel mit den amtlichen Erhebungen und ermöglicht die angedachte Hochrechnung auf den deutschen Gebäudebestand (AP3.4) mittels der Zensus-Daten (2011) sowie der Bauabgangstatistik (2011).

Die hier definierte Typologie liefert lediglich ein grobes Raster zur Einordnung von deutschen Wohngebäuden und muss durch zusätzliche gebäude- und bauteilspezifische Informationsabfragen ergänzt werden

³ Beispielgebäude (Referenzgebäude) der deutschen und regionalen Gebäudetypologien des IWU werden außerdem bereits in einer Reihe von Software-Applikationen verwendet um ohne aufwändige Dateneingabe energetische Bewertungen exemplarisch durchzuführen [IWU 2011].

(s.o.). Aber eine eindeutige Zuordnung von Gebäude zu einzelnen Gebäudetypen ist aufgrund regionaler und zeitlicher Besonderheiten sowie fließender Übergänge ggf. nicht immer möglich [Loga et al. 2012].

Tabelle 11: Derzeitige Abbruchmaterialschätzungen je Bauart und Baualtersklasse in [t/m³ BRI] in der Literatur [Lippok 2007, LfU 2001]

Gebäudetyp (Bauart)	Art der Nutzung			Abbruchmaterialschätzungen in [t/m ³ BRI]		
	EFH/ZFH	MFH	WH	Vor 1918	1919-1948	1949-heute
Gebäudetyp I, II (Massivbau)	X	X	X	Beton: 0,125	Beton: 0,116	Beton: 0,137
				Ziegel: 0,214	Ziegel: 0,224	Ziegel: 0,206
				Holz: 0,008	Holz: 0,009	Holz: 0,008
				Metall: 0,007	Metall: 0,006	Metall: 0,003
				Restabfälle: 0,002	Restabfälle: 0,004	Restabfälle: 0,015
				Sonstiges: 0,001	Sonstiges: 0,002	Sonstiges: 0,003
Gebäudetyp III (Massivbau)	X	X	X	Beton: 0,369	Ziegel: 0,050	Holz: 0,002
				Metall: 0,006	Restabfälle: 0,002	Sonstiges: 0,002
				Beton: 0,036	Ziegel: 0,238	Holz: 0,028
				Metall: 0,003	Restabfälle: 0,004	Sonstiges: 0,001
				X	(X)	(X)
Gebäudetyp IV (Skelettbau-Holz)	X	(X)	(X)			

X: Auftretende Kombination (X): Selten auftretende Kombination
 EFH/ZFH: Ein-/ Zweifamilienhäuser MFH: Mehrfamilienhäuser WH: Wohnheime

Im Rahmen der Recherche wurden neben verschiedenen Gebäudetypen und -nutzungsarten verschiedene Bauteilhierarchien untersucht. Im deutschen Bauwesen dominieren die Bauteil-Kategorien der DIN276, während in internationalem Kontext und im Hinblick auf 3D-Gebäudemodelle das Format „Industry Foundation Classes (IFC)“ (ISO/PAS 16739:2005) sich zunehmend verbreitet. Die detaillierte Datenstruktur der Bauteile orientiert sich – in Absprache mit dem Verbundvorhaben PRRIG – an der Bauteilhierarchie der DIN 276. Aufgrund neuerer Trends in der Gebäuderekonstruktion wird versucht, die Bauteilhierarchie auch mit dem internationalen Standard IFC kompatibel zu gestalten. Im Hinblick auf zukünftige Projekte,

ermöglicht dies Erweiterbarkeit sowohl innerhalb als auch Übertragbarkeit in andere Branchen.

Tabelle 12: Einteilungen verschiedener Baualtersklassen von Wohngebäuden in Deutschland

Quelle	[Görg 1997; Kohlhammer 1978]	[Kohler et al. 1999]	[Lippok 2007, LfU 2001]	[Klauß et al. 2009]	[Schiller et al. 2010]	[May 2011]	[IWU 2005; IWU 2011**; 2012a,b; Loga et al. 2012]
Fokus	-	stofflich	stofflich	stofflich	stofflich	-	energetisch
Baualtersklassen	vor 1918	vor 1870	vor 1918	vor 1918*	vor 1918	vor 1900	vor 1859
	1918-1945	1871-1918				1901-1918	1860-1918
	1918-1945	1919-1949	1918-1948	1919-1948	1919-1948	1919-1948	1919-1948
	1946-1955	1950-1964	ab 1949	1949-1957	1949-1968	1949-1962	1949-1957
	1956-1970	1965-1976		1958-1968		1963-1970	1958-1968
	1971-heute	1977-1991		1969-1978	1969-1990	1971-1980	1969-1978
				1979-1983		nach 1980	1979-1983
				1984-1990			1984-1994
					1990-2005		1995-2001
							2002-2009
						2010-heute	

*: Unterteilung in Fachwerk und Massivbau

** : ohne Sonderfälle (in den neuen Bundesländern, Fertighäuser)

-: erhebungsbezogener Fokus

Fazit AP1

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurden zunächst die betrachteten Bauteile und Baustoffe aufgelistet, zusammen mit den Praxispartnern priorisiert und zahlreiche relevante Literaturquellen und (Bau)Normen recherchiert und geeignet aufbereitet. Außerdem wurde eine rohstoffbezogene Gebäudetypologie definiert, die Gebäude nach ihrer Tragstruktur-Konstruktionsweise einteilt. Darauf aufbauend wurde eine Vorschlagsliste für die Stoffidentifikation von Bauteilen erarbeitet, die im Rahmen der Methodikentwicklung in AP3 genutzt wurde, um die automatisierte Gebäudeinventarisierung und Massenbilanzierung zu unterstützen.

Außerdem wurden die zu erhebenden Zusatzinformationen auf Gebäudeebene strukturiert und zusammengestellt sowie exemplarische Rohstoffinventare erarbeitet. Mögliche Gefahrstoffe in Wohngebäuden wurden recherchiert und eine Gefahrstoffliste mit den wichtigsten Schadstoffen wurde erstellt. Weiterhin wurden rohstoffspezifische Kennwerte für verschiedenen Gebäudetypen recherchiert und zusammengestellt, die im Rahmen der Verifikation der ResourceApp im Rahmen der Fallstudien genutzt wurden (vgl. Tabelle 11). Außerdem wurden unterschiedliche Baualterklassen in der Literatur zusammengetragen und gegenübergestellt. Es stellte sich jedoch heraus, dass sich lediglich basierend auf dem Baualter kein Baustoffinventar (bspw. anhand einer geeigneten (regionalisierten) Gebäudetypologie) ableiten lässt. Dies wird darüber hinaus dadurch erschwert, dass oft bei älteren Gebäuden die Sanierungszyklen nicht den in der Literatur genannten technischen Lebensdauern entsprechen und zudem Teil- und Komplett-sanierungen kaum dokumentiert sind. Dies erschwert die Herleitung und Bestimmung der Baustoffzusammensetzung anhand des Baualters, sodass hier keine verlässlichen Aussagen getroffen werden können und daher das Baualter auch nicht im Projektverlauf für die Bestimmung der Materialzusammensetzung genutzt wurde.

Mit den dargestellten Recherchen und Ergebnissen wurden die definierten Ergebnisse für AP1 erreicht. Parallel zur Methodikentwicklung und zum Demonstratorfortschritt wurde weiterhin eine das AP3 begleitende Recherche durchgeführt, da die Komplexität d.h. die Anzahl der Bauteile und ggf. auch der Baustoffe sukzessive im Projektverlauf erhöht wurden.

2.1.2 Software zur Erfassung der Gebäudekubatur (AP2) (IGD – Neyir Sevilmis)

Die folgende Tabelle 13 zeigt die Untergliederung des zweiten Arbeitspaketes in die Teilschritte AP2.1 (Bild-basierte Erkennung von für die Ressourcenschätzung relevanten Objekten), AP2.2 (Bild-basierte 3D-Rekonstruktion) und AP2.3 (Anwendung mit intuitiver Benutzungsoberfläche),

die im Folgenden detailliert beschrieben werden. Das Ziel von AP2 ist es, die Software zur Erfassung der Gebäudetstruktur zu implementieren. Diese Implementierungsarbeiten umfassen:

- Bilderkennung: Erkennung der für die Ressourcen-schätzung relevanten Objekte (z. B. Heizkörper, Lichtschalter und Steckdosen) in aufgenommenen Bildern von Räumen in Gebäuden
- 3D-Rekonstruktion: Erzeugung eines 3D-Modells zur Volumenbestimmung-/schätzung

Tabelle 13: Untergliederung des Arbeitspakets 2

AP2.1: Bild-basierte Erkennung von für die Ressourcen-schätzung relevanten Objekten	
• Meilenstein M3: Erster Prototyp Objekt-rekonstruktion- und Klassifizierung	15.04.2014 (Monat 12)
AP2.2: Bild-basierte 3D-Rekonstruktion	
• Meilenstein M4: Zweiter Prototyp Objekt-rekonstruktion- und Klassifizierung	15.04.2015 (Monat 24)
AP2.3: Anwendung mit intuitiver Benutzungsoberfläche	
• Meilenstein M5: Finaler Prototyp Objekt-rekonstruktion- und Klassifizierung	15.10.2015 (Monat 30)
Outputs	
Software für ein mobiles Gerät zur Anreicherung der Gebäudetypologie aus AP1 mit Einzelgebäudedaten, insbesondere	
<ul style="list-style-type: none"> • Software für ein mobiles Gerät zur Anreicherung der Gebäudetypologie aus AP1 mit Einzelgebäudedaten, insbesondere • zur visuellen Erkennung von Volumina und Längen, • zur visuellen Erkennung von Volumina und Längen, • zur Auswahl von Stoffen aus der Vorschlagsliste und • mit integriertem Gefahrstofffrühwarnsystem 	
als Input für AP3 und AP4	
Verfahren zur Erkennung relevanter Objekte in Bildern	
Verfahren zur 3D-Rekonstruktion	
Interaktive Anwendung mit intuitiver Benutzungsoberfläche	

2.1.2.1 Bild-basierte Erkennung von für die Ressourcenschätzung relevanten Objekten

Eine besondere Anforderung an die Bilderkennung in ResourceApp ist, dass vor allem schwach texturierte und kontrastarme Objekte (z.b. Steckdosen oder Heizkörper) zuverlässig erkannt werden müssen. Es wurden zunächst verschiedene Bilderkennungsverfahren ausprobiert, die Bestandteil der OpenCV Programmierbibliothek sind. Einige Beispiele sollen hier genannt werden:

- Scaline-variant feature transformation (SIFT)
- Speeded Up Robust Features (SURF)
- Binary Robust Invariant Scalable Keypoints (BRISK)

Alle drei Ansätze (SIFT, SURF und BRISK) haben gemeinsam, dass zunächst lokale Bildmerkmale aus Bildern extrahiert werden. Markante Objekte, deren Merkmale von ihrem Hintergrund abweichen, werden ganz gut erkannt. Der Nachteil dieser Ansätze besteht jedoch darin, dass sie bei texturschwachen und kontrastarmen Objekten versagen.

Diese Erkenntnis führte dazu, dass bei der Bilderkennung zusätzlich Tiefeninformationen berücksichtigt werden müssten, um geometrische Eigenschaften in die Bilderkennung mit einzubeziehen. In diesem Zusammenhang wurde als Beispiel eine Steckdose im CAD-System TopSolid⁴ modelliert. Auf Basis des CAD-Modells der Steckdose wurde ein 3D-Template erstellt, welches für die Objektdetektion benötigt wird. Dann wurde die modellierte Steckdose in einen virtuellen Raum gelegt. Anschließend wurde das zuvor erstellte 3D-Template dafür verwendet, um die Steckdose in dem virtuellen Raum zu detektieren. Die Steckdose in dem virtuellen Raum konnte zuverlässig erkannt werden. Allerdings blieb die Performanz unter den ResourceApp Anforderungen. Die Steckdosenerkennung hat 70 Sekunden gedauert. Es ist keinem

⁴ <http://www.topsolid.de/>

Praxispartner zuzumuten, dass er die Kinect-Kamera 70 Sekunden lang auf eine bestimmte Stelle im Raum richtet.

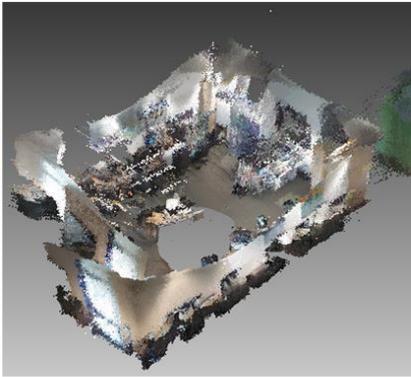
Weitere Recherchen haben ergeben, dass der Ansatz der Dominant Orientation Templates (DOT) hinsichtlich der Performanzsteigerung bei der Bilderkennung einen signifikanten Beitrag leisten kann. DOT ist ein 2D-Template-Matching Verfahren, welches auch bei schwach texturierten Objekten funktioniert. Der Performanzgewinn wird insbesondere durch einen binären Deskriptor und Farbuntertastung bewerkstelligt. Darüber hinaus wird bei DOT eine kleinere Bilddatenbank benötigt als bei herkömmlichen Verfahren des maschinellen Lernens. Eine Umsetzung des DOT-Ansatzes in der ResourceApp konnte erfolgreich umgesetzt werden. Beispielsweise liegt die Erkennung von Steckdosen nun im Millisekundenbereich.

2.1.2.2 Bild-basierte 3D-Rekonstruktion

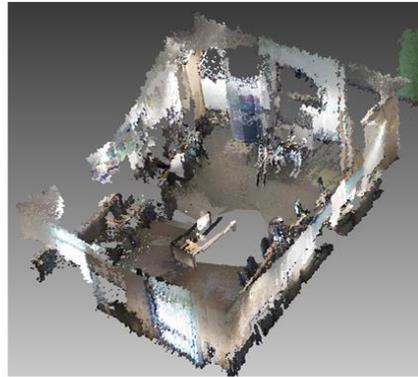
Die in ResourceApp verwendete Kinect Kamera ist mit einem RGB-D Sensor ausgestattet, der gleichzeitig Farb- und Tiefenbilder in VGA-Auflösung (640x480 Bildpunkte) bei 30Hz liefert. Für jedes Frame (bestehend aus Farb- und Tiefenbild) lässt sich daraus eine 3D-Punktvolke berechnen. Die Herausforderung bei der 3D-Rekonstruktion liegt nun darin, die aus den einzelnen Frames stammenden Punktwolken nahtlos zu registrieren, so dass ein lückenloses 3D-Abbild der real aufgenommenen Szene erstellt werden kann. Erschwerend kommt in ResourceApp hinzu, dass die Kinect-Kamera manuell geführt wird und die Kameraposition während der Begehung stark variiert und simultan geschätzt werden muss. Dieses Phänomen bezeichnet man als Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Um dieser Herausforderung mit einer robusten Lösung zu begegnen, wurde ein Algorithmus implementiert, der an das Iterative Closest Point Verfahren (ICP) angelehnt ist. Um die Punktwolken so genau wie möglich zu registrieren, werden zunächst in zwei aufeinanderfolgenden Farbbildern gemeinsame Merkmale (Features) erkannt, die miteinander korres-

pondieren. Bereiche des Farbbilds, in denen sich die Merkmale befinden, werden als signifikant klassifiziert. Andere Bereiche im Farbbild, die keine Merkmale enthalten, werden als irrelevant betrachtet und können vernachlässigt werden. Das Wissen über die signifikanten und irrelevanten Bereiche im Farbbild wird nun genutzt, um die entsprechende Punktwolke zu vereinfachen. Bei der Vereinfachung der Punktwolke werden die Punkte in den irrelevanten Bereichen ausgedünnt, während bei den signifikanten Bereichen ausschließlich die Punkte beinhalten, die genau einem Feature-Punkt entsprechen und eine gültige und kantenfreie Tiefe haben. Diese Vereinfachung bildet die Grundlage für eine sehr effiziente und genauere Punktwolkenregistrierung. Der implementierte Algorithmus braucht somit weniger Iterationen für die Transformationsberechnung als der klassische ICP-Algorithmus, um die Punktwolken aneinander auszurichten. Um eine optimale Rekonstruktionsqualität zu gewährleisten, wird in einem Nachbearbeitungsschritt als Ergänzung für die paarweise Punktwolkenregistrierung eine globale Registrierung der Punktwolken (auch Multi-View-Registrierung genannt) vorgenommen. Die globale Registrierung nutzt mehrere Views (Ansichten, Scans) auf einmal, um eine Punktwolkenregistrierung zu berechnen. Der Vorteil gegenüber der paarweisen Registrierung besteht darin, dass durch die Nutzung mehrerer Frames auch mehr Informationen und Daten zur Verfügung stehen, um eine genauere Transformation zu berechnen und somit den akkumulativen Fehler weiter zu minimieren. Dies wirkt sich positiv auf die Rekonstruktionsqualität aus (vgl. Abbildung 7).

Abbildung 7 veranschaulicht, dass bei der paarweisen Registrierung die vordere Wand etwas versetzt und daher nicht durchgängig ist. Dies ist auf den akkumulativen Fehler zurückzuführen. Bei der globalen Rekonstruktion hingegen ist die gleiche Wand durchgängig und es ist kein Versatz zu sehen. Mit Hilfe der globalen Registrierung konnten wir die Rekonstruktionsqualität erheblich verbessern.



Paarweise Registrierung



Globale Registrierung

Abbildung 7: Vergleich der paarweisen und globalen Registrierung

Mit diesem Vorgehen kann unmittelbar nach dem Begehen eines Raumes das 3D-Abbild des gesamten Raumes einer visuellen Inspektion unterzogen werden, welches eines der Kernanforderung der Praxispartner darstellt.

2.1.2.3 Anwendung mit intuitiver Benutzungsoberfläche

Die Integration der 3D-Rekonstruktion mit der Bilderkennung ermöglicht beide Funktionalitäten in der ResourceApp parallel aufzurufen. Abbildung 8 veranschaulicht die graphische Oberfläche der ResourceApp.

Nachdem die begangenen Räume in 3D rekonstruiert wurden, werden die Raum-spezifischen Öffnungen (z. B. Fenster und Türen) erkannt (vgl. Abbildung 9). Verdeckte Bereiche können im Nachgang interaktiv in das 3D-Modell hinzugefügt werden. Diese werden dann in den Räumen visuell dargestellt und deren Positionsdaten werden in ein Austauschformat geschrieben, welches dann an das Auswertungsmodul übergeben wird.

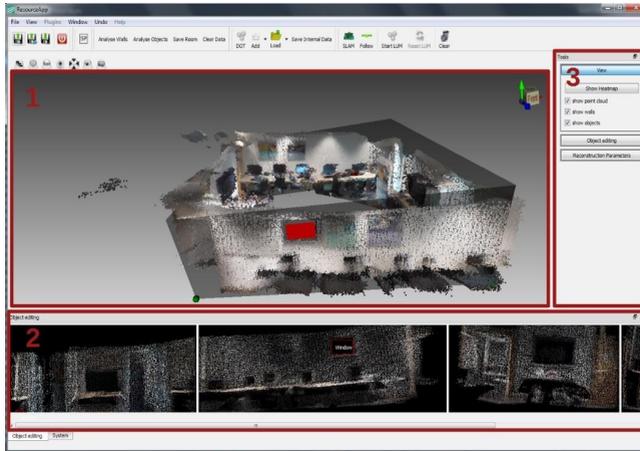


Abbildung 8: Benutzungsoberfläche der ResourceApp: 3D-Ansicht (oben), 2D-Ansicht (unten) und Werkzeugleiste (rechts)

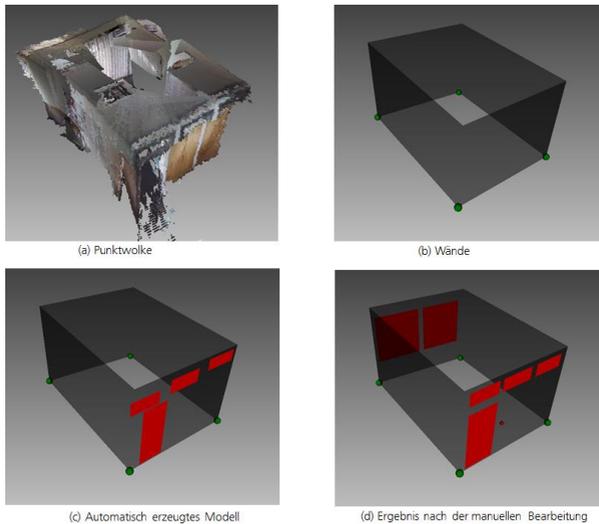


Abbildung 9: Schritte der 3D-Rekonstruktion: Aus einer Punktwolke (a) gewinnt die Wanderkennung ein Grundriss und daraus die Wände (b). Dann sucht die Objektanalyse nach Türen und Fenstern (c) und anschließend wird das Model manuell nachbearbeitet (d)

Da die durch die optischen Sensoren erfassten Daten nach dem Interpretations- und Erkennungsschritt an die Auswertung in AP3 weitergegeben werden, ist es notwendig, dass die Daten in einem passenden Austauschformat repräsentiert werden, das u. a. die Positionsdaten der Geometrien und der erkannten Bauteile umfasst. Das Austauschformat bietet die Grundlage für die Erschließung des Ressourceneffizienzpotenzials.

Fazit AP2:

Die 3D-Rekonstruktion konnte verbessert werden, indem der Algorithmus für die paarweise Punktwolkenregistrierung zusätzlich um eine globale Punktwolkenregistrierung erweitert wurde. Die globale Registrierung nutzt mehrere Views (Ansichten, Scans) auf einmal, um eine Punktwolkenregistrierung zu berechnen. Der Vorteil gegenüber der paarweisen Registrierung besteht darin, dass durch die Nutzung mehrere Frames auch mehr Informationen und Daten zur Verfügung stehen, um eine genauere Transformation zu berechnen und somit den akkumulativen Fehler weiter zu minimieren.

Eine besondere Anforderung an die Bilderkennung in ResourceApp ist, dass vor allem schwach texturierte und kontrastarme Objekte (z.B. Steckdosen oder Heizkörper) zuverlässig erkannt werden müssen. Der Ansatz der Dominant Orientation Templates hat sich in diversen Tests bewährt und zeigt, dass insbesondere schwach texturierte und kontrastarme Objekte gut erkannt werden können.

2.1.3 Methodenentwicklung, Erschließung des Ressourceneffizienzpotentials und Ergebnistransfer (IIP – Rebekka Volk)

Die folgende Tabelle 14 zeigt die Untergliederung des dritten Arbeitspaketes in die Teilschritte AP3.1 (Methodenentwicklung für AP2), AP3.2 (Erschließung des Ressourceneffizienzpotenzials) und AP3.3 (Wissenschaftliche Begleitung des Abriss/selektiven Rückbaus in AP5), die im Folgenden detailliert beschrieben werden. Das anfangs eingeplante AP3.4. (Ergebnistransfer: Deutsches Rohstoffgebäudeinventarkataster), das ursprünglich für die zweite Projektphase 2 vorgesehen war, wurde aufgrund von Mittelkürzung nicht erarbeitet.

Tabelle 14: Untergliederung des Arbeitspakets 3

AP3.1: Methodenentwicklung für AP2		
	<ul style="list-style-type: none"> • Meilenstein M6: Methoden für AP2 	15.12.2014 (Monat 21)
AP3.2: Erschließung des Ressourceneffizienzpotenzials		
	<ul style="list-style-type: none"> • Meilenstein M7.1: Rückbauplanungsmodellkonzept • Meilenstein M7.2: Rückbauplanungsmodell (Phase 2) 	15.04.2015 (Monat 24)
AP3.3: Wissenschaftliche Begleitung des Abriss/selektiven Rückbaus in AP5		
AP3.4: Ergebnistransfer: Deutsches Rohstoffgebäudeinventarkataster (Phase 2)		
	<ul style="list-style-type: none"> • Meilenstein M8: Hochrechnung Gebäudeinventar (Phase 2) 	
Outputs		
	<ul style="list-style-type: none"> • Methode zur Abschätzung verborgener Volumina auf Basis von sichtbaren Merkmalen wie Steckdosen und Wänden als Input für AP2 • Methode zur Identifizierung kritischer Gebäude-/Bauteil-(Schad)Stoff-Kombinationen zur Integration eines Gefahrstofffrühwarnsystems • Auf konventionellen PCs implementiertes Modell zur ökonomischen und ökologischen Optimierung der Planung des selektiven Rückbaus • Validierte ökonomische, ökologische und Rohstoffkennwerte für die in AP5 abgerissenen Gebäude • Methode zur Erstellung eines deutschlandweiten Gebäuderohstoffinventarkatasters (Phase 2) • Exemplarische Hochrechnung für das Rohstoffinventar von Gebäuden (Phase 2) 	

2.1.3.1 Methodenentwicklung für AP2 (AP3.1)

Zur Erstellung des ResourceApp-Demonstrators wurde eine Systemarchitektur für das Gesamtsystem entwickelt, die die Aufnahme eines Gebäudes, die Bestimmung des Rohstoffgehaltes, die Planung des Rückbaus und je nach Verwertungsoption die Ermittlung der Ressourceneffizienz ermöglicht.

Abbildung 10 zeigt, dass zum einen Nutzereingaben und Sensor-Informationen und zum anderen hinterlegte Datenbank-Informationen in die Berechnungen für die Gebäudeinventarisierung und Massenbilanzierung einfließen. Hauptmodule des ResourceApp-Systems sind die eingesetzte Hardware sowie die Software-Module ‚A: Punkt- und Oberflächenmodell‘, ‚B: Objekt-orientiertes Raum- und Bauteilmodell‘ und ‚C: Optimierende Rückbau-Projektplanung‘ (vgl. Abbildung 10) die im Folgenden näher beschrieben werden. Sowohl für die Hardware als auch für die Software wurden die entwickelten Module auf die Anforderungen der potenziellen Anwender wie z.B. robustes System, Kompatibilität mit vorhandener Software der Unternehmer oder Ausgabeparameter mit den Praxispartnern abgestimmt. Die Nutzerausgabe beinhaltet eine graphische Ausgabe (A) und insbesondere die Informationen aus (B) und (C). Im Folgenden werden die vier Teilkomponenten näher erläutert:

- (A) Das Punkt- und Oberflächen-Modell erzeugt zunächst anhand der eingespeisten Punkte des Sensors MS Kinect eine zusammenhängende Punktwolke eines Raums (siehe AP2 im Abschnitt 2.1.2). Aus den aufgenommenen Punkten werden mittels 3D-Deskriptoren und Bilderkennungsalgorithmen Bauteile erkannt und deren räumliche Lage und Abmessungen gespeichert. Für die Erfassung von Gebäuden werden mehrere Räume des Gebäudes einzeln erfasst und interaktiv miteinander zu einem Gebäudegeschoss gekoppelt.
- (B) Das objektorientierte Raum- und Bauteil-Modell erzeugt aus den Informationen des Punkt- und Oberflächen-Modells eine Bauteilliste mit Abmessungen und Lageinformation. Daraus sowie aus hinter-

legten Informationen der allgemeinen Bauaufnahme, der Gebäudetypologie und der Bauteildatenbank wird auf die Ausprägung der Bauteile geschlossen. Ausgabe dieses Teilmodells ist eine detaillierte Bauteilliste mit den erkannten und den angenommenen, da verdeckten Bauteilen des Raums bzw. Gebäudes (Bauteilinventar) (vgl. Bauteilgliederung in AP1 im Abschnitt 2.1.1). Daraus werden die für die Abschätzung des Ressourcen- und Sekundärrohstoffpotenzials relevanten Kennwerte ermittelt. Dabei werden die derzeit in der Rückbaubranche verwendeten Kennwerte wie Bruttorauminhalt (BRI), Bruttogrundfläche (BGF), Materialgehalte in t/BRI sowie Rohstoff- und Schadstoffmassenbilanzen in t ausgewiesen. Darüber hinaus sind Konstruktionsrauminhalt (KRI), Anzahl der Geschosse, Bauteilstücklisten je Gebäude, Geschoss oder Raum, Unregelmäßigkeiten der Gebäudegeometrie oder die Baualtersklasse als Ausgabe interessante Kenngrößen, die jedoch derzeit nur teilweise dem Nutzer ausgegeben werden.

- (C) Das Rückbau-Modell leitet anhand der in (A) und (B) ermittelten Informationen notwendige Projektaktivitäten ab, ermittelt die ökonomisch und ökologisch günstigste Rückbau-Alternative und erstellt eine Projektplanung unter Berücksichtigung knapper Ressourcen (Platzdargebot, Maschinen, Personal), regionaler Verwertungsoptionen und Rohstoffannahmepreise der Schrotthändler und Entsorger. Dazu werden aus den einzelnen Bauteilen Demontagegruppen gebildet und deren unterschiedliche Ausführungsmodi und Ressourcenbedarfe bestimmt. Dann wird die optimale Ressourcenplanung (Zeit-, Maschinen-, Container- und Personalplanung) bezüglich Reihenfolge, Zeit und/oder Kosten für diese Gruppierung berechnet und ausgegeben. Weitere Modellausgaben sind außerdem Verwertungsquote und -qualität sowie die Verwertungsplanung (hinsichtlich der Verwertungshierarchie im Kreislauf-Wirtschafts-Gesetz KrWG) und eine Aussage zur Planungsrobustheit des generierten Projektplans.

Die genaue Beschreibung der entwickelten Methodik findet sich in [Volk 2017].

Methode zur Abschätzung verborgener Volumina auf Basis von sichtbaren Merkmalen wie Steckdosen und Wänden als Input für AP2

Für die Berechnung sichtbarer und die Abschätzung verborgener Volumina von Bauteilen werden einerseits Gebäude-Stammdaten erhoben (vgl. Tabelle 15, Tabelle 19). Diese Information kann der Nutzer, soweit vorhanden, mittels einer Benutzeroberfläche in den ResourceApp-Demonstrator eingeben (vgl. Abbildung 11). Außerdem fließen die erfassten Sensor-Informationen der MS Kinect und die darauf erkannten Bauteile via CSV/OBJ-Datenschnittstelle in die Berechnungen ein. Die Methode zur Abschätzung sichtbarer und verborgener Volumina auf Basis von sichtbaren Merkmalen wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

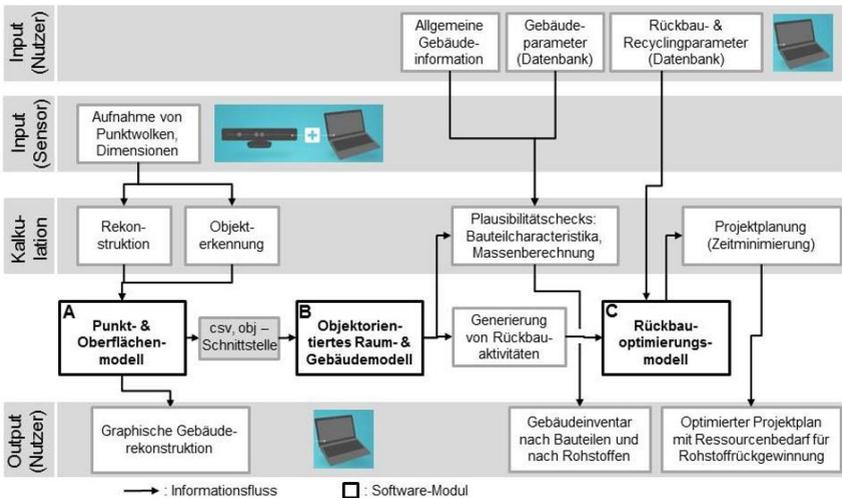


Abbildung 10: Vereinfachte Systemarchitektur von ResourceApp, (Stand: 28.06.2016)

Software-Modul – A: Punkt- und Oberflächenmodell: Dieses Modell wurde in AP2 entwickelt und wird dort detailliert beschrieben (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Für die Aufnahme und Datenweitergabe zwischen den Software-Modulen wurde ein Datenformat entwickelt und in einer CSV/OBJ-Schnittstelle zwischen Erfassungs- und Erkennungssystem (A) und dem Inventarisierungs- und Rückbauplanungsmodell (B+C) umgesetzt, welches die vom Sensor erzeugten Daten so speichert, dass die nachfolgende Datenauswertung die Daten weiterverarbeiten kann. Die Schnittstelle umfasst dabei Punkt- und Flächeninformationen, sowie Information zu ihrer Lage auf anderen Bauteilen (im Fall von Fenstern, Türen, technischer Gebäudeaustattung) sowie Materialinformation je Bauteil (vgl. Tabelle 23, Tabelle 24).

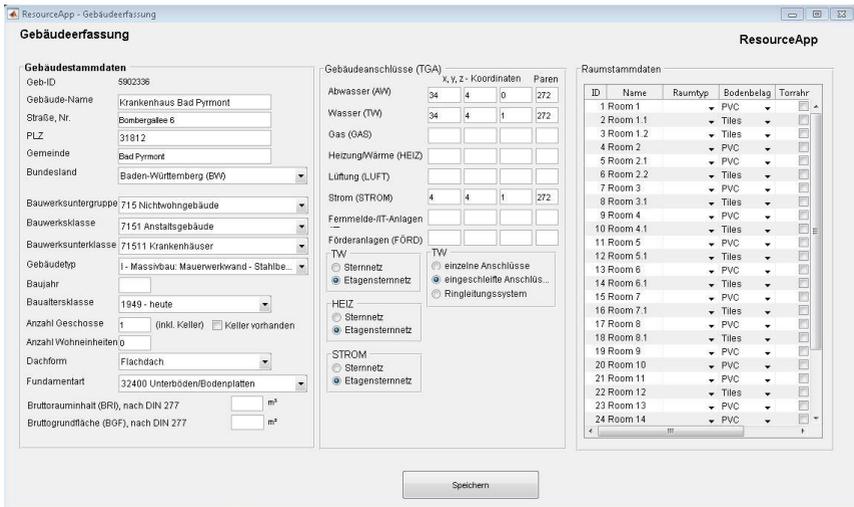


Abbildung 11: Eingabemaske 1 – Gebäudestammdaten, Gebäudeanschlüsse der TGA und detaillierte, importierte Raumstammdatenliste

Software-Modul – B: Objekt-orientiertes Raum- und Bauteilmodell:

Im Modul B werden die erkannten Sensor-Informationen aus Modul A weiterverarbeitet. Basierend auf den eingegebenen Nutzerinformationen (vgl. Abbildung 11, Abbildung 13) wird das Bauteilinventar in verschiedenem Detaillierungsgrad (nach Bauteilen, nach Materialien) errechnet und ausgegeben. Abbildung 12 stellt die Berechnungslogik anschaulich dar, die im Folgenden detailliert erläutert wird.

Bei der Berechnung der Bauteilvolumina und -massen wird zwischen sichtbaren und unsichtbaren Bauteilen unterschieden. Die Volumina und Massen sichtbarer Bauteile werden je nach Typ berechnet. Dazu werden bei flächigen Bauteilen anhand der sensorbasierten Bauteilkoordinaten die Bauteiloberflächen bestimmt und mit der Bauteildicke und der Materialdichte multipliziert. Bei punktförmigen oder punktuellen Bauteilen ist eine Bandbreite typischer Werte basierend auf Baunormen für Bauteilvolumina und Bauteilmassen (in Abhängigkeit des Bauteilmaterials) hinterlegt. Bei Wänden werden vorhandene Öffnungsflächen (Fenster- und Türflächen) automatisch abgezogen. Bei Fenstern, Türen und Toren werden die Volumina und Massen von Flügel und Rahmen gesondert berechnet und gespeichert. Bei bestimmten Baustoffangaben wird ein Unterbau angenommen, bspw. wird Fliesenbelag auf Wänden oder Böden mit einer zugrundeliegenden Putzschicht berechnet. Im Fall des Fliesenbelags auf dem Boden wird zusätzlich eine Estrichschicht angenommen, da dies dem üblichen Bodenaufbau entspricht. Bei der Baustoffangabe „Stahlbeton“ wird die Masse der Matrix (Beton) und der Bewehrung (Stahl) ebenfalls gesondert berechnet. In der Logik in Abbildung 12 ist daher die Stahlbewehrung als verdecktes Bauteil aufgeführt, das gesondert berechnet wird. Die typischen Bauteildicken werden den Angaben aus der Eingabemaske 2 übernommen (vgl. Abbildung 13). Die typischen Materialdichten werden ebenfalls aus Eingabemaske 2 übernommen, können dort aber vom Benutzer während der Laufzeit geändert werden.

Die Volumina und Massen nicht-sichtbarer, verdeckter Bauteile werden einerseits direkt berechnet (Anschlüsse: Steckdose, Duschwanne etc.)

und andererseits rekonstruiert (Leitungs- und Rohrverläufe). Für die Rekonstruktion der Leitungen und Rohre werden die Verläufe zum jeweils nächsten Verteiler im Raum, im Geschoss und im Gebäude zurückgerechnet. Dabei werden je nach Typ der technischen Gebäudeausstattung auch teilweise mögliche Leitungsführungen eingeschränkt (bspw. dürfen in Bädern elektrische Leitungen nur entlang der Wände in der obersten Leitungsführungsebene ca. 30cm unter der Decke oder in der Decke verlegt werden). Die Bauteilausprägungen für die Berechnung von Volumina und Massen für Leitungen (Anzahl der Leiter, bzw. typische prozentuale Kupfergehalte) und Rohre (Rohrdurchmesser, Rohrwanddicke) sind im Modell ebenfalls mit typischen Werten aus Baunormen hinterlegt. Der prozentuale Kupfergehalt von Stromleitungen kann zur Modellaufzeit vom Benutzer geändert werden (vgl. Eingabemaske 2, Abbildung 13).

Insgesamt werden für die Bauteilvolumina und -massen drei verschiedene Werte berechnet. Der minimale Wert wird durch einen minimalen Wert in den jeweiligen Baunormen berechnet, z.B. ist laut DIN 4172:2015-09 eine minimale Wanddicke von Mauerwerk mit 0,115 m erforderlich. Für die Berechnung des minimalen Wandvolumens und der minimalen Masse würde daher die Berechnung mit dieser minimalen Dicke zugrunde gelegt. Die maximale Wanddicke von Mauerwerk ist laut DIN 4172:2015-09 0,36 m. Die Volumina der Innen- und Außenwände werden jedoch gesondert berechnet. Eine Innenwand wird dadurch identifiziert, dass in einem Abstand von maximal 0,5 m eine parallele Fläche (flächiges Bauteil) von Sensoren erkannt wurde. Hier wurde der Wert 0,5 m gewählt, da eine Mauerwerksdicke von 0,36 m meist mit einem Wandaufbau⁵ versehen ist, der in der Berechnung berücksichtigt wird. Decken und Böden werden zwischen Bauteildicken von 0,07 m und 0,3 m variiert, entsprechend der Angaben in Baunormen für Stahlbetondecken DIN 1992-1-1/NA:2013-04, NA Zu 9.3.1.1 (S. 73).

⁵ Wand- und Bodenbeläge werden zwischen typischen Dicken variiert (z.B. für Fliesen zwischen 0,01 m und 0,06 m)

2 Eingehende Darstellung

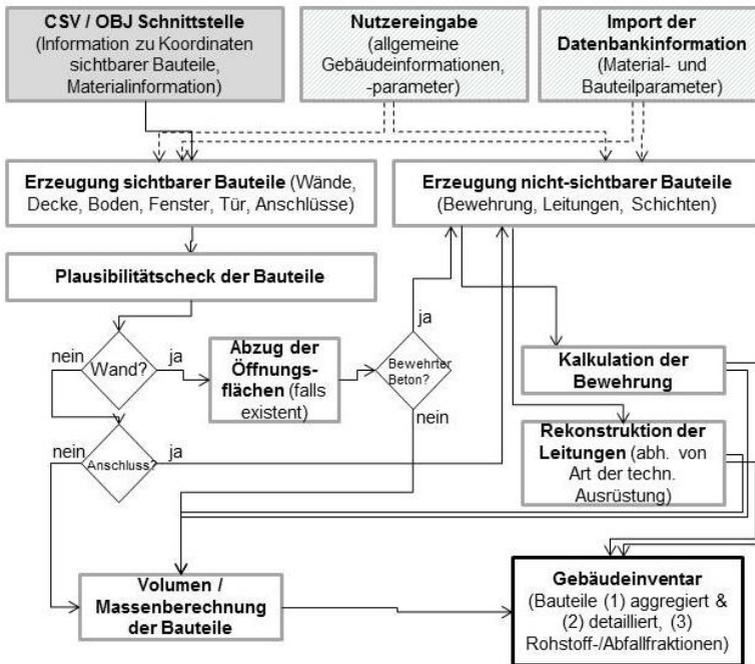


Abbildung 12: Übersicht über die Bauteilinventarisierung in ResourceApp

Als erwarteter Wert wird im Modell eine Bauteildicke für Stahlbetondecken und -böden 0,2 m verwendet (DIN 1992-1-1,9.3.2(1), S.169). Volumina und Massen von Fundamenten werden variiert wie bei Decken und Böden, jedoch wird zusätzlich die Wanddicke der darauf stehenden Außenwand sowie die Auskrägung des Fundamentes nach außen (in Abhängigkeit der Wanddicke) bei der Berechnung und der Variation berücksichtigt. Weiterhin wird die sichtbare Boden- und Deckenoberfläche sowie die Fläche von

Decken- und Bodenbelägen um die halbe Wanddicke korrigiert, da ein Teil der Decken und Böden durch Wände aus Sicht der Innenraumperspektive verdeckt ist⁶.

Die Volumenvariation von Fenster- und Türbauteilen erfolgt derzeit über die Rahmendicke. Der Anteil der Fensterfläche an der Wandöffnung oder die Glasdicke wird im Modell derzeit nicht variiert. Bei technischer Gebäudeausstattung werden das Volumen der Anschlussbauteile und der leitungsführenden Bauteile unterschieden. Das Volumen von Anschlussbauteilen wird variiert, sofern eine Variation der Bauteile gegeben ist (z.B. Waschbecken unterschiedlicher Größe/Volumens und unterschiedlicher Masse). Bei sanitären Anschlussbauteilen, bei denen die Variation sehr hoch sein kann, werden vom Modell entsprechende, materialabhängige Werte vorgeschlagen. Ist eine Variation der Bauteilvolumina und -massen nicht gegeben (z.B. Steckdosen, Schalter oder Verteilerboxen), wird der gleiche Default-Wert in allen Fällen angenommen. Dieser kann bei Bedarf vom Nutzer verändert werden.

Das Volumen der Leitung oder der Rohre wird über die Rekonstruktionsrechnung zum nächsten Anschlusspunkt (Raumverteiler, Geschossverteiler, Gebäudeverteiler) variiert. Die unterschiedlichen Leitungs- und Rohrlängen resultieren aus den drei verschiedenen Leitungsführungszonen (Strom, DIN 18015-03:2007-09, vgl. Abbildung 14), wobei für den minimalen Wert das Minimum der drei berechneten Werte angenommen wird. Der maximale Wert entspricht dem Maximum der drei Werte. Der Kabeldurchmesser oder die Anzahl der Leiterstränge wird im Modell derzeit nicht verändert. Da bei Rohren meist nur eine Leitungsführungsvariante sinnvoll rekonstruierbar ist, wird hier statt der unterschiedlich rekonstruierten Rohrleitungsführung der Rohrdurchmesser und die Rohrwanddicke variiert, um minimale und maximale Volumina und Bauteilmassen zu berechnen. Das Modell schlägt dabei dem Nutzer typische Default-Werte für die gängigsten Rohrbaustoffe vor (Stahl, Kupfer, PE, PVC).

⁶ Details zur Berechnung finden sich in [Volk 2016].

Wenn eine begründete Variation des Bauteilvolumens und der Bauteilmasse nicht möglich ist, wird keine Variation vorgenommen und die minimalen, erwarteten und maximalen Werte sind die Gleichen. Dann kann der Wert als sicher angenommen werden, wie bspw. bei dem Volumen und der Masse von Steckdosen. Die erwarteten Werte für Bauteilvolumina und -massen werden basierend auf den Sensordaten und den Eingaben in Eingabemaske 2 (vgl. Abbildung 13) berechnet. Die erwarteten Bauteildicken unterliegen ebenfalls Unsicherheiten, die aber im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden.

Das berechnete Bauteilinventar umfasst die Klassifizierung der Bauteile nach DIN 276-1:2008-12, Abs. 4 (vgl. auch AP1 im Abschnitt 2.1.1), das Bauteilvolumen [m^3], die (sichtbare) Bauteiloberfläche [m^2] und die Bauteilmasse [kg] sowie den Einbauort (Raum) und das Bauteilmaterial. Das Materialinventar hingegen aggregiert die Bauteilmassen [kg] nach einer vordefinierten Materialliste. Basierend auf den erfassten Bauteilen werden auch solche Bauteile bei der Inventarisierung berücksichtigt, die nicht erfasst wurden, aber trotzdem verbaut sind (wie Leitungen und Bewehrungen). Die Inventarisierung basiert auf den erfassten Sensor-Daten, aber auch auf DIN-Informationen und Nutzerangaben, da nicht alle notwendigen Informationen für die Inventarisierung über den gewählten Sensor erhoben werden können. Fehlende Informationen sind bspw. die Bauteildicke von Wänden, Decken und Böden sowie die Informationen zum Bauteilmaterial. Eine genaue Beschreibung der Inventarisierung findet sich auch in [Volk et al. 2015, Volk 2017].

Zudem ermöglicht das Modul die automatische Berechnung der Bruttogeschossfläche [m^2] und des Bruttorauminhaltes [m^3] der aufgenommenen Räume mittels Einhüllung bzw. Delaunay-Triangulierung⁷ sowie deren graphische Darstellung in Form eines Grundrisses und einer 3D - Ansicht (Drahtmodell).

⁷ Delaunay-Triangulierung ist ein Verfahren, um aus einer Punktemenge ein Dreiecksnetz zu erstellen, die hier den Bruttorauminhalt approximiert.

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse

Parameter für die Inventarisierung

Materialdichten in kg/m³

Mineralische Fraktion

Beton	2400
Kies, Splittbeton	1850
Mauerwerk- Ziegel	1375
Mauerwerk- Kalksandstein	1200
Mauerwerk- Betonstein	1300
Mörtel, Putz, Estrich	1300
Gips, Gipskarton	925
Dachziegel	1300
Fliesen, Sanitärkeramik	2000

Anorganische Fraktion

Stahl	7800
Kupfer	8900
Aluminium	2700
Glas	2550

Organische Fraktion

Holz, Spanplatten	800
Asphalt, Bitumen	1825
Papier, Pappe	1200
Kunststoff (PE, PP)	955
Kunststoff (PVC)	1575

Verbundfraktion

Dämmstoffe	240
Kabel [30% Cu, 70% PE/PVC]	3524
Teppich, Textilien	300

Allg. Gebäudeberechnungen

Bewehrungsrechnung: 3: mit kg/m³-Angabe

Öffnungsrechnung: 1: mit %-Angabe

Vorwiegend tragende Bauteile

Wandparameter (331, 332, 341, 342)

Wanddicke Außenwand [m]*	0.24	[m]
Wanddicke Innenwand [m]*	0.115	[m]
Bewehrung [kg/m ²]	1	[kg/m ²]
Bewehrung StB-Wand [‰]	1	[‰]
Anteil Holzstützen (mit Ausfachung) [‰]	0	[‰]
Anteil Putz [m]	0.015	[m]
Dicke Fliesen [m]	0.01	[m]

Deckenparameter (351)

Deckendicke [m]*	0.2	[m]
Bewehrung [kg/m ²]	1	[kg/m ²]
Bewehrung StB-Decke [‰]	0.7	[‰]
Dicke Putz [m]	0.015	[m]

Bodenparameter (324)

Bodendicke [m]*	0.2	[m]
Bewehrung [kg/m ²]	1	[kg/m ²]
Bewehrung StB-Boden [‰]	1	[‰]
Dicke Betonstein [m]	0.08	[m]
Dicke Fliesen [m]	0.01	[m]

Fundamentparameter (322, 324)

Punkt-/Streifenfundamentdicke	0.8	[m]
Bodenplattendicke [m]*	0.2	[m]
Bewehrung [kg/m ²]	1	[kg/m ²]

Öffnungen

Fensterparameter

Fensterarranddicke [m]	0.04	[m]
Fensterflügelstärke [m]	0.04	[m]
Fensterarrandanteil an Öffnungsfläche	20	[Fäche%]
Fensterglasdicke [m]	0.01	[m]

Türparameter

Türarranddicke [m]	0.08	[m]
Türflügelstärke [m]	0.04	[m]
Türarrandanteil an Öffnungsfläche	20	[Fäche%]

Torparameter

Torranddicke [m]	0.04	[m]
Tortlügelstärke [m]	0.0004	[m]
Torrandanteil an Öffnungsfläche	20	[Fäche%]

TGA-Parameter

Kupferanteil in Stromkabeln [‰]	30	[‰]
---------------------------------	----	-----

* Angaben ohne Verkleidungen, Dämmungen, Bette etc.

Speichern

Abbildung 13: Eingabemaske 2 - Nutzereingabe der Modellparameter für die Inventarisierung des vorliegenden Einzelgebäudes

Weiterhin werden neben den bauteilbezogenen Modellparametern Rückbauparameter aus einer Datenbank importiert wie z.B. die Aktivitätsdauern je Rückbauaktivität je Einheit (bauteilabhängig), die Kosten je Rückbauaktivität und rückgebauter Einheit (bauteilabhängig), erforderliche Ressourcen von Maschinen und Personal (Modi), Anwendbarkeit von Maschinen bei bestimmten Bauteilen und Baustoffen. Diese Matrizen sind in ResourceApp hinterlegt und können vom Nutzer in Microsoft Excel verändert und erneut in das Modell importiert werden. Ein Teil dieser Matrizen wird dem Nutzer in Eingabemaske 3 zur Laufzeit zur Bestätigung angezeigt (vgl. Abbildung 15).

Informationen zu Aktivitätsdauern sind im Model mit einer minimalen, erwarteten und maximalen Dauer je Bauteil und je Einheit angegeben. Diese Werte basieren auf der in AP1 durchgeführten Recherche und stammen aus der Literatur [DBU 2014, Lippok 2007 und Deutscher Abbruchverband

2015] und sind von den Praxispartnern im Projekt in 2014 gegengeprüft worden⁸. Diese Daten werden dem Nutzer in einer dritten Eingabemaske gezeigt (vgl. Abbildung 15) und er kann, falls erforderlich Änderungen vornehmen. Die angezeigten Daten stammen aus einer Microsoft Excel-Tabelle und können ebenfalls leicht (dauerhaft) modifiziert werden.

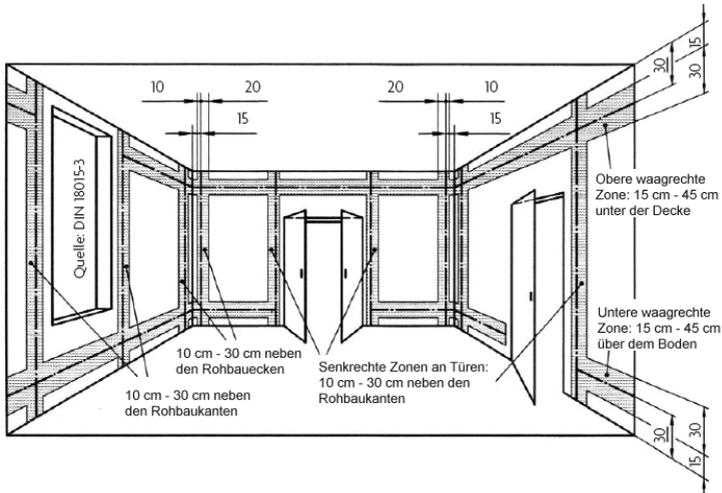


Abbildung 14: Vertikale und horizontale Leitungsführung in Wohngebäuden (nach DIN18015-03:2007-09)

In der linken Tabelle von Abbildung 15 kann der Nutzer die minimalen, erwarteten und maximalen Rückbaukostensätze je Bauteil(kategorie) sehen. Im implementierten Modell werden bei mehreren Einträgen der gleichen Bauteilkategorie (mit der gleichen DIN276-Klassifizierung in Level 3) die durchschnittlich minimalen, durchschnittlich erwarteten und durchschnittlich maximalen Kosten zur Ermittlung der Projektgesamtkosten ver-

⁸ Weitere Verifikation der Aktivitätsdauern kann mit der REFA-Methode durchgeführt werden.

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse

wendet. Die Kostensätze hängen von der Bauteilkategorie und der jeweiligen Bezugseinheit ab. Zum Beispiel wird der Rückbau von Leitungen in EUR/m kalkuliert, während Bodenbelag mit EUR/m² abgerechnet wird.

Eingabe Rückbauparameter

Rückbauparameter Kosten [Einr. €/m², €/m, €/Stk] und Dauern [h/m³]
Kostensätze (inkl. MwSt) aus BK1 2013 für Abbrucharbeiten.

DIN 276	Bauzel	Material	min Kosten	max	ID	Modus (Abbruchverfahren)	min. Dauer [h/m³]	max
322	Einzel- und Stufenfundamente	Beton	150		1	Trennverfahren Scherschneiden	0	
322	Einzel- und Stufenfundamente	Stahlbeton	480		2	Trennverfahren Spalten	0	
32415	Bodenplatte	Stahlbeton	22		3	Trennverfahren Lockerungssprengung	0	
32415	Bodenplatte	Stahlbeton...	44		4	Trennverfahren Kreis-/Wandsägen	0	
325	Bodenbelag	Zermenter...	19		5	Trennverfahren Diamantsägen	0	
325	Bodenbelag	Zermenter...	10		6	Trennverfahren Brennschneiden	0	
32531	Bodenbelag	Fliesen	13		7	Trennverfahren Hochdruckwasserstrahlabsch.	0	
32531	Bodenbelag	Fliesen, Möb.	20		8	Demontageverfahren Abgreifen	0	
325	Bodenbelag	Mauerwerk...	37		9	Demontageverfahren Einstreuen	0	
32551	Bodenbelag	Betonwerk...	10		10	Demontageverfahren Eindrücken	0	
325	Bodenbelag	Tafel/Teppi.	4.8000		11	Demontageverfahren Einziehen	0	
325	Bodenbelag	Tafel/Teppi.	90		12	Demontageverfahren Reissen	0	
32571	Bodenbelag	Holzwerk...	88		13	Demontageverfahren Stören	0,0200	
325	Bodenbelag	Holz, Dielen	15		14	Demontageverfahren Demontieren	0,0714	
325	Bodenbelag	Holz, Parkett	0,2000		15	Demontageverfahren Handabbruch mit Ha...	0,0633	
325	Bodenbelag	PVC	4.3000		16	Zerkleinerungsverfahren Pressschneiden...	0	
325	Bodenbelag	Linoleum	4.3000		17	Zerkleinerungsverfahren Scherschneiden	0	
32592	Bodenbelag	Flach- oder...	19		18	Sortierverfahren Abgreifen	0	
331	Vand	Mauerwerk...	51		19	Sortierverfahren Sortieren, manuell	0	
331	Vand	Mauerwerk...	37		20	Verladeverfahren Verladen, Transportieren	0	
331	Vand	Mauerwerk...	60		21	Verladeverfahren Heben	0	
331	Vand	Stahlbeton...	230		22	Sonstige Verfahren: Niederlegungsspreng.	0	
331	Vand	Stahlbeton	100		23	Sonstige Verfahren Kombibohren	0	
332	Vand	Mauerwerk...	65		24	Sonstige Verfahren Fräsen	0	
332	Vand	Mauerwerk...	30		25	Sonstige Verfahren Schließen, manuell	0	
333	Stahlwerk...	Stahlwerk...	75					

Verfügbare Ressourcen [#, €/h]

ID	Ressource	Anzahl	min. Kosten	€/h	währsch. Ko
1	Hydrolöslager, 220kW mit Auslö...	2		125	
2	Seilbagger, 220kW ohne Ausleger	1		132	
3	Kran, Hebezeug	1		35	
4	Anbaugerät Sortiergreifer	1		1	
5	Anbaugerät Abbruchstiel	1		54	
6	Anbaugerät Stahlseil mit Lasthaken	1		2	
7	Anbaugerät Hydraulikkammer	1		4	
8	Anbaugerät Korb-/Abrutschschere	1		5	
9	Anbaugerät Führersteuer	1		0	
10	Anbaugerät Fallleine	1		0	
11	Handwenzelwerk Elektrohämmer, M.	1		1	
12	Metallbohrzappe, weilsäge, handg.	1		4	
13	Kernbohrer, handgeführt	1		7	
14	Brennschneider, handgeführt	1		1	
15	Anbaugerät Fräskopf	1		64	
16	Fräs- und Schleifmaschine, hand...	1		4	
17	Fugenschneider, autom. Vortrieb	0		18	
18	Quehlmittel, Sprengsatz	1		0	
19	Abraumstapel/Container	0		1	
20	Mitarbeiter - Baggerführer	2		95	
21	Mitarbeiter - Normal	4		34	
22	Room 1	1		1	
23	Room 2	1		1	
24	Room 3	1		1	
25	Room 4	1		1	

Speichern

Abbildung 15: Eingabemaske 3 - Nutzereingabe der Modellparameter für die Rückbauplanung des vorliegenden Einzelgebäudes

In der mittleren Tabelle von Abbildung 15 werden alle 25 im Modell möglichen Rückbauverfahren mit den minimalen, erwarteten und maximalen Koeffizienten für die Aktivitätsdauer [h/m³] aufgelistet. Da in dem ResourceApp-Demonstrator zur Vereinfachung zunächst nur Rückbauaktivitäten berücksichtigt werden, reduziert sich diese Anzahl auf neun mögliche Modi. Die Multiplikation der Dauerkoeffizienten [h/m³] mit dem Bauteilvolumen [m³] aus dem Gebäudeinventar ergibt so die für die weitere Planung verwendete Aktivitätsdauer [h].

Die rechte Tabelle in Abbildung 15 zeigt die einplanbaren Ressourcen, bei denen der Nutzer angeben kann, wie hoch die verfügbare Kapazität der jeweiligen Ressource für das geplante Rückbauprojekt ist. Weiterhin sind dort die minimalen, die erwarteten und die maximalen Kosten für die je-

weilige Ressource pro Stunde angegeben [EUR/h]. Die einplanbaren Ressourcen können je nach Maschinenpark und Geräteausstattung des Modellanwenders individuell angepasst werden.

Neben den Maschinen und dem Personal sind auch die verfügbaren Räume als erneuerbare Ressourcen modelliert und eingetragen, mittels derer der Platzbedarf und die Platznutzung auf Baustelle in der Projektplanung berücksichtigt wird. Die Raumnutzung wird in dem Modell jedoch nicht monetär bewertet. Die Kapazität der Räume im Gebäude ist automatisch mit 1 vorgegeben, d.h. dass nur maximal eine Aktivität in einem Raum ausgeführt werden kann. Sind die Räume größer und erlauben mehrere parallel Aktivitäten, kann dieser Wert vom Nutzer entsprechend manuell angepasst werden. In der Projektplanung wird die Ressourcenverfügbarkeit als konstant angenommen. Wenn Ressourcen unerwartet ausfallen (bspw. durch Krankheit von Mitarbeitern), muss evtl. eine Neuplanung durchgeführt werden.

Software-Modul – C: Optimierende Rückbau-Projektplanung: Basierend auf dem Gebäudeinventar (Module A, B) werden in Modul C die im Rahmen des Gebäuderückbaus und der Wiedergewinnung von Rohstoffen notwendige Aktivitäten erzeugt. Da diese Aktivitäten mit verschiedenen Ressourcen (Personal, Maschinen, Gerät) und unterschiedlichem Ressourcenbedarf (Zeit, Kosten) durchgeführt werden können, wird für die Projektplanung eine multi-modale, ressourcen-beschränkte Projektplanung zur Minimierung der Projektdauer eingesetzt. Dabei werden die Aktivitäten so geplant, dass das Projekt schnellstmöglich beendet ist und dabei möglichst wenige Ressourcen möglichst kurzzeitig zum Einsatz kommen.

Standardaktivitäten im Gebäuderückbau umfassen dabei Trennung, Rückbau, Zerkleinerung, Sortierung und Verladung, die hier je Bauteil erzeugt und eingeplant werden. Ebenso wird in der Planung der Ort des Bauteils im Raum berücksichtigt, so dass die eingeplanten Teams sich beim Rückbau der Bauteile nicht gegenseitig blockieren. Die einzuplanen-

den Ressourcen können vom Nutzer über eine graphische Nutzeroberfläche oder über MS Excel erweitert und angepasst werden (vgl. Abbildung 15). Die Modellausgabe umfasst die Projektdauer, einen Projektplan (inkl. Gantt-Diagramm) mit allen Aktivitäten inklusive ihrer Vorrangbeziehungen, die Ressourcenauslastung, die Rückgewinnungskosten je Material sowie die resultierenden Projektkosten (vgl. Abbildung 16, unten rechts). Die Module B und C sind in MATLAB 2015a implementiert und das Projektplanungsproblem (MRCPPSP) wird mit dem CPLEX-Solver des IBM ILOG Optimization Studio 12.5.1 (IBM 2016) gelöst. Details zur Inventarisierung und robusten Projektplanung können [Volk et al. 2015a,b] entnommen werden.

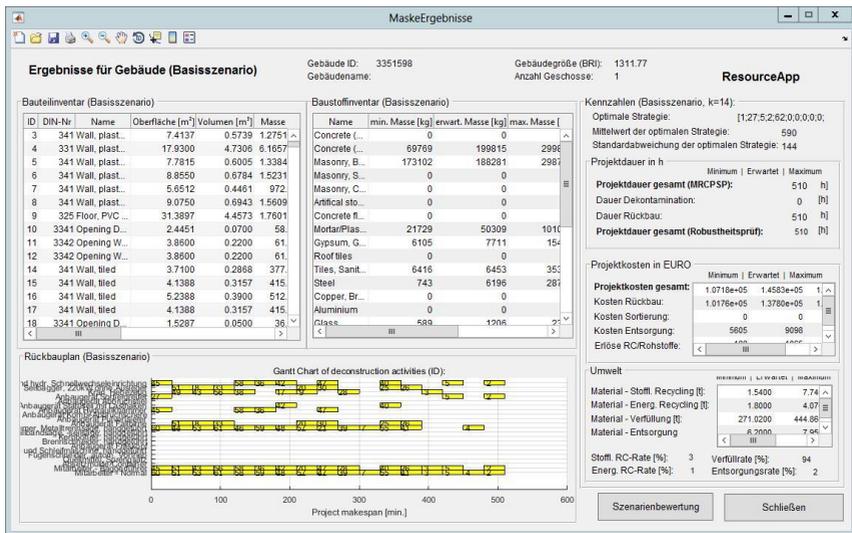


Abbildung 16: Ausgabemaske Inventarisierung und Projektplanung für den Gebäuderückbau

Das Ergebnis wird in einer Ausgabemaske dem Nutzer zurückgegeben (vgl. Abbildung 16), der er das Bauteilinventar (linke Tabelle), das Baustoffinventar (mittlere Tabelle) sowie ein Gantt-Diagramm aller Aktivitäten

entnehmen kann (unten links). Weiterhin wird die optimale Rückbaustrategie ausgegeben sowie weitere Kennzahlen wie die Projektdauer und die Projektkosten sowie die Rohstoff- und Abfallfraktionen gegliedert in Recycling, energetische Verwertung, Verfüllung und Entsorgung angezeigt. Im Modell werden weiterhin optimale Projektpläne für verschiedene Szenarien berechnet, die dann miteinander auf ihre Robustheit hin miteinander verglichen werden.

Abbildung 17 zeigt exemplarisch die durchschnittliche Projektdauer und Projektkosten der ermittelten optimalen Rückbaustrategien (über alle Szenarien). Dabei kann man in der rechten Graphik die zeit- und kostenoptimale robuste Lösung ablesen. In dem hier berechneten Beispiel ist dies die Rückbaustrategie 24 (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 17), die über alle Szenarien die minimale durchschnittliche Projektdauer und die minimalen durchschnittlichen Projektkosten aufweist.

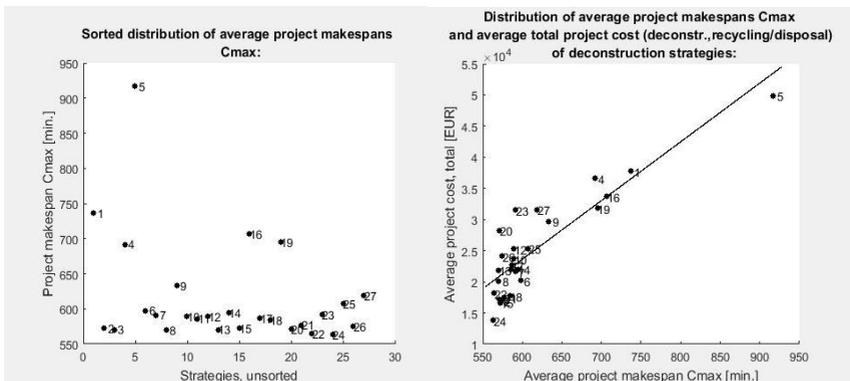


Abbildung 17: Berechnungsergebnisse der durchschnittlichen Projektdauer und Projektkosten der ermittelten Rückbaustrategien

2 Eingehende Darstellung

Tabelle 15: Gebäudestammdaten der Beispielgarage 1 (fiktiv)

Gebäude-Stammdaten		Ausprägung															
1. Standort- informationen	ID	001															
	Gebäude-Name	Beispielgarage 1															
	Straße, Hausnr.	-															
	PLZ	-															
	Gemeinde	-															
2. Gebäudety & -gliederung	Bundesland	-															
	Bauwerksuntergruppe	719 Freistehende Konstruktionen															
	Bauwerksklasse	-															
	Bauwerksunterklasse	-															
	Bauart	Gebäudety V															
	Baujahr	-															
	Baualtersklasse	-															
	Geschosszahl	1															
	Anzahl Wohneinheiten	0															
	Technische Ausrüstung (je TGA)	AW:	W:	GAS:	HEIZ:	LÜFT:	STROM:	IT:	FÖRD:	0	0	0	0	0	1	0	0
Siedlungstyp	Freistehendes Haus																
3. Hauptmaße & Geometrien	Grundfläche	-															
	Höhe	-															
	Bruttorauminhalt (BRI)	-															
	Bruttogrundfläche (BGF)	-															
	Nettorauminhalt (NRI)	-															
	Nettogrundfläche (NGF)	-															
	Dachform	Flachdach															
	Dachneigung	0°															
	Fundamentart	32212 Flachgründung – Einzelfundament*															
Fundamenthöhe	0,25m*																
4. Hausan- schlüsse (TGA)	Anschlusspunkte	AW:	W:	GAS:	HEIZ:	LÜFT:	STROM:	IT:	FÖRD:	-	-	-	-	-	Wand 1	-	-

1: vorhanden; 0: nicht vorhanden; *: Annahme

Tabelle 16 zeigt an dem gleichen Beispiel die exemplarische Massenbilanzierung für Garagenbeispiel 1 für alle darin enthaltenen Bauteile. Dabei erfolgt hier die Lokalisierung der Bauteile nach Himmelsrichtung bzw. anhand einer Durchnummerierung der vier Wände⁹. Weiterhin sind das Volumen und die Masse der Bauteile aufgeführt. Tabelle 17 zeigt die beispielhafte monetäre Bewertung der Massenbilanzierung für Garagenbeispiel 1 nach Marktpreisen der Region Hannover.

Tabelle 18 stellt mögliche Massenbilanzabweichungen der Beispielgarage 1 durch Unsicherheiten bei verdeckten Bauteilen am Beispiel der elektrischen Anlagen (444**) dar. Da bei der Berechnung bzw. Abschätzung der

⁹ Die Lokalisierung wurde für Wohn- und Nicht-Wohngebäude weiterentwickelt, sodass damit im finalen ResourceApp-Prototyp die Räume eines Gebäudes gemeint sind.

Bauteilmassen auch Abweichungen auftreten können, ist in Tabelle 18 und Tabelle 19 exemplarisch eine Abweichungsanalyse für elektrische Anlagen aufgeführt. Die Leitungslängen wurden mit einfachem (rechtwinklige Verbindung der Anschlüsse) und technischem Leitungsverlauf sowie mit zwei- bis fünf-adriger Ausführung berechnet. Aus diesen Unterschieden ergeben sich die gezeigten Abweichungen. Weitere mögliche Variabilität kann sich durch unterschiedliche Baustoffdichten, die Verifikation mit Mindestausstattungen (Anzahl Beleuchtungs-/Steckdosenanschlüsse je Raum, Anzahl Stromkreise pro m²) oder technischen Mindestquerschnitten je Kabelabschnitt nach DIN 18015-3 ergeben. Dabei ist zu erkennen, dass diese Abweichung je nach Leitungsführung und je nach verlegter Kabelstärke deutlich voneinander abweichen können. Dies ist auch graphisch in Abbildung 19 zu sehen.

Tabelle 16: Beispielhafte Massenbilanzierung für Garagenbeispiel 1 (fiktiv)

DIN-Nr	Bauteil	Lokalisierung	Volumen	Baustoff (Dichte)	Masse	
		[gemäß Abbildung 18]	[m ³]	[kg/m ³]	[kg]	[t]
322	Gründung G1	-	5,6	Stahlbeton (2400)	13439,5	13,4
331	Wand W1	00004	2,496	Stahlbeton (2400)	7315,2	7,3
	Wand W2	00002	3,308		7939,2	7,9
	Wand W3	00001	1,371		3289,9	3,3
334	Tür T1	00004	0,02	Aluminium (2700)	54,0	0,1
	Tür T2	00003	0,047		127,9	0,1
334	Fenster F1r	00004	0,01408°°	Aluminium (2700)	38,0	0,038
	Fenster F1g	00004	0,0002992	Glas (2500)	7,5	0,007
351	Dach D1	-	4,254	Stahlbeton (2400)	10210,8	10,2
	Schüttung D2		1,595	Kies (1500)	2393,0	2,4
	...					

Beim realen Test an Fertigteilgarage 2 wurden deren Gebäudestammdaten (Tabelle 19) soweit bekannt aufgenommen wurden, und die Garage im Rahmen des Projekttreffens am 04.09.2013 mit dem mobilen MS Kinect-Sensor aufgenommen. Dabei wurde basierend auf den in AP1 recherchierten Bauinformationen (für Garagen) ein Modell entwickelt, das

2 Eingehende Darstellung

semantische Informationen je Bauteil abrufen und diese mit optisch erkannten Bauteilinformationen zur Ermittlung von sichtbaren und nicht-sichtbaren Bauteilvolumina verknüpfen kann. Für das Beispiel Fertigteilgarage lassen sich derartige semantische Regeln bspw. aus DIN EN 13978-1:2005, [Stahlbox 2014] ableiten.

Tabelle 17: Beispielhafte monetäre Bewertung der Massenbilanzierung für Garagenbeispiel 1 (fiktiv) nach Marktpreisen der Region Hannover [Recycling Park Harz 2014, Schrott 2014]

Baustoff	Masse		Preis(-)/Erlös(+) [€/kg] oder [€/t]	Wert [€]
	[kg]	[t]		
Stahlbeton	48184,8	48,2	-7,02 bis -10,59 [€/t] für bewehrten Beton	-338,36 € bis -510,44
Aluminium	218,9	0,2	+1000,00 [€/t] für Aluminium-Bleche	+200,00 €
Glas	7,5	0,0075	-8,57 bis -19,04 [€/t] für Bauschutt, rein mineral.	-0,06 € bis -0,14 €
Kies	2393,0	2,4	-8,57 bis -19,04 [€/t] für Bauschutt, rein mineral.	-20,57 € bis -45,70 €
...
Summe:				-353,13 € bis -154,79

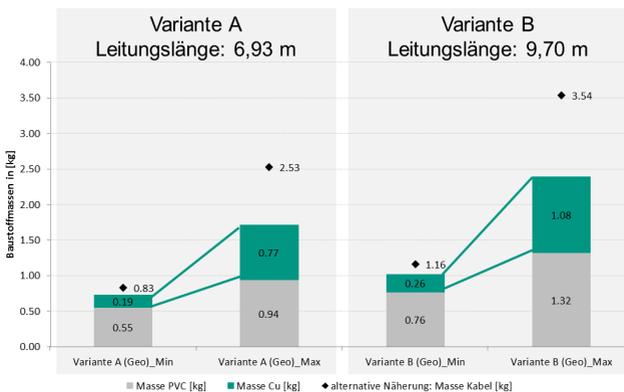


Abbildung 19: Exemplarische Massenbilanzabweichungen der Beispielgarage 1 (nach Tabelle 1)

Tabelle 18: Massenbilanzabweichungen der Beispielgarage 1 durch Unsicherheiten bei verdeckten Bauteilen am Beispiel der Elektrischen Anlagen (444**)

	Leitungs- länge [m]	Volumina [m ³]	Massen [kg]	Alternative Kabelmasse [kg] nach [25]
Variante A (einfacher Lei- tungsverlauf)	6,93 m	PVC: 0,00057 m ³ Cu: 0,000054 m ³	PVC: 0,7 kg Cu: 0,5 kg	Kabel: 1,7 kg
<ul style="list-style-type: none"> • einfache Verbindung der erkannten Anschlüsse; • Mittlere Kabel- und Leiterquerschnitte, Kabelmassen (82,5 mm² PVC und 7,75 mm² Cu; 242,5 g/m PVC-Leitung); • Mittlere Dichten (PVC: 1300; Cu 8900) 				
Abweichungen in Variante A durch Geometrie	6,93 m	PVC: 0,00042 bis 0,00072 m ³ Cu: 0,000021 bis 0,000087 m ³	PVC: 0,5 - 0,9 kg Cu: 0,2 - 0,8 kg	Kabel: 0,8 – 2,5 kg
<ul style="list-style-type: none"> • einfache Verbindung der erkannten Anschlüsse; • Bandbreiten der Kabel- und Leiterquerschnitte, Kabelmassen (<u>60,6 bis 104,4 mm² PVC und 2*1,5 bis 5*2,5mm² Cu; 120-635 g/m PVC-Kabel</u>); • Mittlere Dichten (PVC: 1300; Cu 8900) 				
Variante B (technischer Lei- tungsverlauf)	9,70 m	PVC: 0,00080 m ³ Cu: 0,00008 m ³	PVC: 1,1 kg Cu: 0,7 kg	Kabel: 2,5 kg
<ul style="list-style-type: none"> • technische Verbindung der erkannten Anschlüsse; • Mittlere Kabel- und Leiterquerschnitte (82,5 mm² PVC und 7,75 mm² Cu; 242,5 g/m PVC-Leitung); • Mittlere Dichten (PVC: 1300; Cu 8900) 				
Abweichungen in Variante B durch Geometrie	9,70 m	PVC: 0,00042 bis 0,00101 m ³ Cu: 0,00002 bis 0,00012 m ³	PVC: 0,5 – 1,1 kg Cu: 0,2 – 0,8	Kabel: 1,2 – 3,7 kg
<ul style="list-style-type: none"> • technische Verbindung der erkannten Anschlüsse; • Bandbreiten der Kabel- und Leiterquerschnitte (<u>60,6 bis 104,4 mm² PVC und 2*1,5 bis 5*2,5mm² Cu</u>); • Mittlere Dichten (PVC: 1300; Cu 8900) 				
Mögliche Abweichungen von der einfachen Variante	+ 46%	PVC: -26% bis +47% Cu: -61% bis +61%	PVC: -29% bis +57% Cu: -60% bis +60%	Kabel: -53% bis +118 %



Abbildung 20: Beispielgarage 2 (reale Garage am ICT)

Abbildung 20, Abbildung 21 und Tabelle 19 zeigen die untersuchte Fertigteilgarage auf dem Gelände des Projektpartners ICT, die inventarisiert und aufgenommen wurde. Für die Inventarisierung der aufgeführten Garagen wurde sukzessive eine Bauteil-Datenbank mit typischen Bauteilausprägungen erstellt, basierend auf den in AP1 recherchierten Informationen, sowie mit Daten aus bereits rückgebauten Gebäuden, um darauf aufbauend Annahmen über Gebäudeinformationen oder Bauteilvolumina und -ausprägung treffen zu können, wenn die Sensordaten nicht ausreichend sind oder keine Nutzereingabe erfolgt.

Als weitere Fallstudie wurde ein Apartment mit vier Räumen modelliert, um die Lokalisierung von Bauteilen sowie die Bauteilinventarisierung und den Leitungsverlauf über mehrere Räume berechnen zu können. Da es sich bei der Fallstudie um ein fiktives Beispiel handelte, wurden einige Annahmen getroffen. Es wurde angenommen, dass das Apartment zum Konstruktionstyp II gehört (vgl. Tabelle 10) und damit aus einem Massivbau mit Mauerwerkswänden und Holzdecken besteht. Diese Fallstudie bestand aus vier Räumen und wurde zur graphischen Darstellung als 3D-Modell modelliert (siehe Abbildung 22). Der zugehörige Grundriss ist in Abbildung 23 zu sehen. Die Wohnung besteht aus 49 Bauteilen (siehe auch Tabelle 20) basierend auf 35 Flächenbauteilen (=facial building elements) und 154 Punktbauteilen (=vertex or compact building elements) in der CSV/OBJ-Schnittstelle (siehe Tabelle 20 und Tabelle 21). In Abbildung 22 und Abbildung 23 sind einige Bauteil-IDs zu sehen, die zum CSV/OBJ-Datensatz aus der Schnittstelle (Tabelle 21) gehören und die Bauteile in der Fallstudie eindeutig identifizieren.

Tabelle 19: Gebäudestammdaten der Beispielgarage 2 (real am ICT)

Gebäude-Stammdaten		Ausprägung							
1. Standortinformationen	ID	002							
	Gebäude-Name	Beispielgarage 2							
	Straße, Hausnr.	Joseph-von-Fraunhofer-Str.							
	PLZ	76327							
	Gemeinde	Pfinztal							
2. Gebäudetypp & -gliederung	Bundesland	Baden-Württemberg							
	Bauwerksuntergruppe	719 Freistehende Konstruktionen							
	Bauwerksklasse	-							
	Bauwerksunterklasse	-							
	Bauart	Gebäudetypp V							
	Baujahr	-							
	Baualtersklasse	-							
	Geschlosszahl	1							
	Anzahl Wohneinheiten	0							
	Technische Ausrüstung (je TGA)	AW:	W:	GAS:	HEIZ:	LÜFT:	STROM:	IT:	FÖRD:
		1	0	0	0	0	1	0	0
3. Hauptmaße und Geometrien	Siedlungstyp	Freistehendes Haus							
	Grundfläche	-							
	Höhe	-							
	Bruttorauminhalt (BRI)	-							
	Bruttogrundfläche (BGF)	-							
	Nettorauminhalt (NRI)	-							
	Nettogrundfläche (NGF)	-							
	Dachform	Flachdach							
	Dachneigung	0°							
	Fundamentart	32212 Flachgründung – Einzelfundament*							
	Fundamenthöhe	0,25m*							
4. Hausanschlüsse (TGA)	Anschlusspunkte	AW:	W:	GAS:	HEIZ:	LÜFT:	STROM:	IT:	FÖRD:
		Wand 1	-	-	-	-	:Wand	-	-
		2							

1: vorhanden; 0: nicht vorhanden; *: Annahme

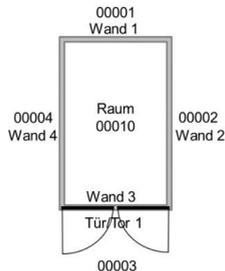


Abbildung 21: Grundriss mit exemplarischer Lokalisierungsbezeichnung der Beispielgarage 2

2 Eingehende Darstellung

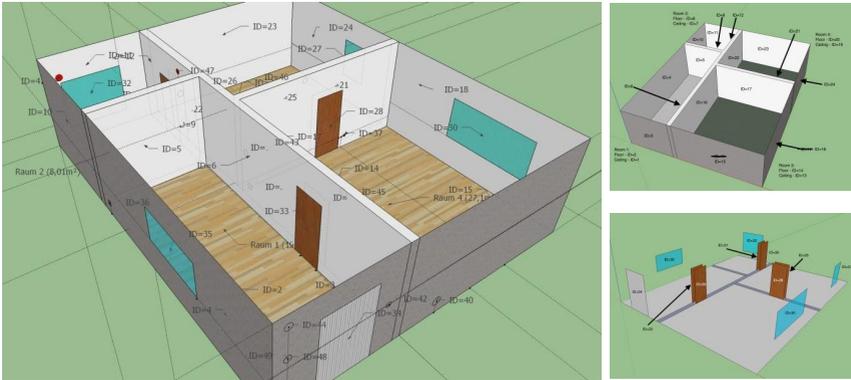


Abbildung 22: Google SketchUp-Modellansicht in drei verschiedenen Perspektiven des Fallbeispiels Apartment

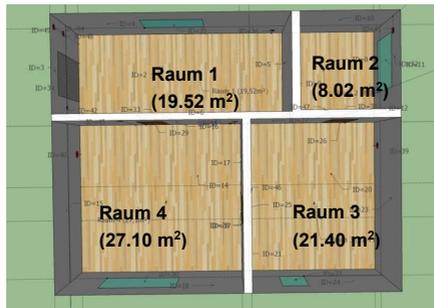


Abbildung 23: Vertikale Projektion (Grundriss) mit den Raumnummern und der Grundfläche je Raum [m²] im Google SketchUp-Modell für das Fallbeispiel Apartment

Tabelle 20: Allgemeine Gebäudeinformation bezüglich der enthaltenen Bauteile, Punkt- und Flächeninformation (Fallstudie Apartment)

Generelle Information	Strukturelle Bauteile (Tragstruktur)	Ausbau-Bauteile (Innenausbau)
4 Räume	4 Decken	4 Fenster
49 Bauteile	4 Böden/Fundamente	4 Türen
154 Punkte	16 Wände	14 Elektrische Anschlüsse (Steckdosen, Schalter, Lampen, Verteiler) (TEQ Power)
35 Flächen		

Tabelle 21: Beispielhafte OBJ-Schnittstellen-Struktur für Flächeninformation (f=faces) mit den Daten für das Fallbeispiel Apartment

Geometrischer Typ (GeoRefType)	Ref.-Punkt 1	Ref.-Punkt 2	Ref.-Punkt 3	Ref.-Punkt 4	Geometrischer Typ (GeoRefType)	Ref.-Punkt 1	Ref.-Punkt 2	Ref.-Punkt 3	Ref.-Punkt 4
F	1	2	3	4	f	73	74	75	76
F	5	6	7	8	f	77	78	79	80
F	9	10	11	12	f	81	82	83	84
F	13	14	15	16	f	85	86	87	88
F	17	18	19	20	f	89	90	91	92
F	21	22	23	24	f	93	94	95	96
F	25	26	27	28	f	97	98	99	100
F	29	30	31	32	f	101	102	103	104
F	33	34	35	36	f	105	106	107	108
F	37	38	39	40	f	109	110	111	112
F	41	42	43	44	f	113	114	115	116
F	45	46	47	48	f	117	118	119	120
F	49	50	51	52	f	121	122	123	124
F	53	54	55	56	f	125	126	127	128
F	57	58	59	60	f	129	130	131	132
F	61	62	63	64	f	133	134	135	136
F	65	66	67	68	f	137	138	139	140
F	69	70	71	72					

Nach dem Import der Sensordaten aus der Schnittstelle, werden die Daten weiterverarbeitet. Abbildung 24 zeigt die vertikale Projektion (Grundriss) der Innenwände mit den Raumnummern (links) und das Drahtmodell in isometrischer Projektion (rechts) als graphische Ausgabe aus Resource-App (Modellteil B).

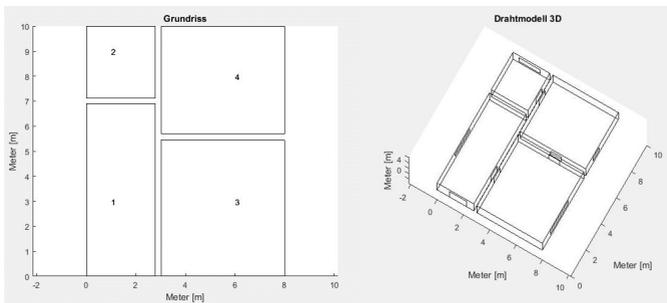


Abbildung 24: Vertikale Projektion (Grundriss) der Innenwände mit den Raumnummern (links) und Drahtmodell in isometrischer Projektion (rechts) als graphische Ausgabe aus ResourceApp (Modellteil B)

Im linken Teil der Eingabemaske für Modellparameter (Abbildung 13) sind die Stoffdichten eingegeben und können über Regler ggf. angepasst werden. Im mittleren und rechten Teil der Eingabemaske in Abbildung 13 können Parameter für tragende Bauteile (Wände, Decken, Böden, Fundamente) und für Ausbauten (Fenster, Türen, Tore) eingegeben werden. Wand-, Decken-, Boden- und Fundamentparameter bestehen insbesondere in der Dicke der Bauteile sowie dem Bewehrungsgrad (falls Stahlbeton vorliegt) sowie in den Dicken der Aufbauschichten (z.B. Putz, Fliesenbelag, etc.). Im Bereich der Ausbaubauteile können Tür-/Fensterrahmendicken [m], Tür-/Fensterblattdicken [m], Glasdicken [m], Rahmen- und Fensteranteile [%] in Prozent der Öffnungsfläche festgelegt werden. Je nach Bauart und Konstruktionsweise ist im Modell ein typischer Wert voreingestellt. Der Nutzer kann diesen Wert aber bei Bedarf in der Eingabemaske anpassen (mit Dropdown-Listen oder Reglern). Für die Inventarisierung in dieser Fallstudie wurden die Werte angenommen die in Tabelle 22 aufgelistet werden.

Außerdem wird der Kupferanteil in elektrischen Leitungen als prozentualer Wert (30%) im das Modell verwendet, der sich auf Angaben der Praxispartner stützt. Dies ist ein eher niedriger Wert, da Recherchen ergaben, dass Schrotthändler bei der Massenbilanzierung herkömmlicher Stromkabel aus Gebäuden einen Kupferanteil von 38% annehmen. Somit ist der Wert von 30% eine eher konservative Annahme und kann vom Nutzer ggf. geändert werden.

Zur Erschließung des Ressourceneffizienzpotentials ist zum einen die Ermittlung des Gebäudeinventars und der Massenbilanzierung erforderlich (siehe folgende Abschnitte). Zum anderen ist eine optimierte Projektplanung mit den verfügbaren Ressourcen erforderlich. Im Folgenden wird dies anhand des Fallbeispiels Apartment näher erläutert.

Tabelle 22: Liste der Inventarisierungsparameter die in der Fallstudie Apartment verwendet wurden

Modellparameter	Einheit	Modellparameter	Einheit
Fundamentdicke	0.20 m	Fensterrahmenanteil	20%
Fundamentbewehrung	1 kg/m ²	Fensterrahmendicke	0.04 m
Wanddicke, außen	0.24 m	Fensterglasdicke	0.01 m
Wanddicke, innen	0.24 m	Türrahmenanteil	20 %
Deckendicke	0.2 m	Türrahmendicke	0.06 m
		Kupferanteil in elektrischen Leitungen	30%

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen erste Modellergebnisse. Hier wurden die Bruttogrundfläche und der Bruttorauminhalt automatisiert mittels einer Triangulationsfunktion berechnet. In diesem Fallbeispiel beträgt die Bruttogrundfläche 86 m² und die „Nettogrundfläche“ 80 m² (mit Standfläche der Innenwände, ohne Standfläche der Außenwände). Der automatisiert berechnete Bruttorauminhalt beträgt 208 m³ (ohne Außenwände) und 240 m³ (inkl. Außenwände). Da in diesem einfachen Fall keine Nischen, Vorsprünge oder Rücksprünge in der Fassade vorhanden sind, ermittelt die Triangulationsfunktion den exakten Wert (basierend auf den CSV/OBJ-Sensordaten) hinsichtlich Grundfläche und Rauminhalt und muss nicht weiter korrigiert werden.

Dann werden die Bauteile im Modell einzeln nacheinander inventarisiert und die Massen berechnet. In diesem Schritt werden verschiedene Aggregationslevel unterschieden. Die Datensätze im aggregierten Inventar sind gleich strukturiert wie die durch den Sensor erkannten Bauteile, die über die CSV/OBJ-Schnittstelle eingelesen werden. Dabei umfasst das Inventar jeweils als Baustoffangabe das Hauptmaterial des Bauteils, z.B. bei einer Ziegelmauerwerkswand wäre dies Ziegelstein.

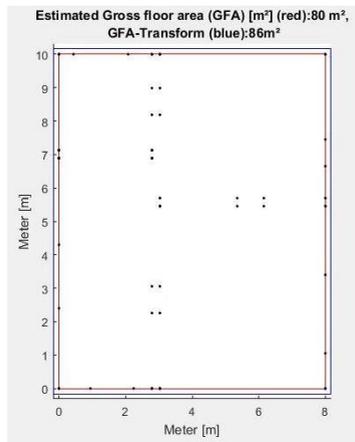


Abbildung 25: Bruttogrundfläche des Apartments, blau: äußere Gebäudehülle (inkl. Außenwänden), rot: innere Gebäudehülle (Sicht auf Innenwände)

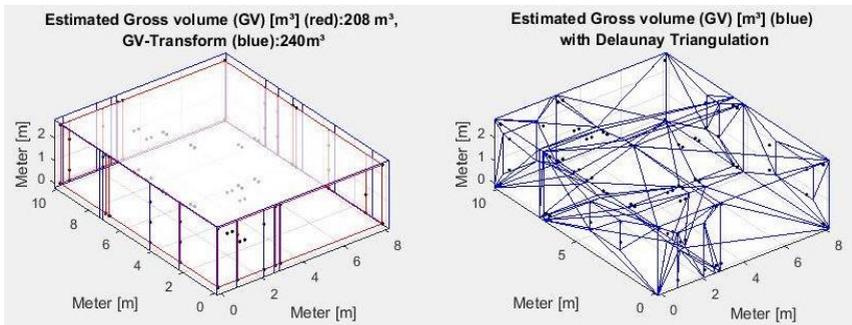


Abbildung 26: Bruttorauminhalt des Apartments, blau: äußere Gebäudehülle (inkl. Außenwänden), rot: innere Gebäudehülle (exkl. Außenwänden)

Das detaillierte Inventar beinhaltet sowohl erkannte (Sensor) und angenommene (Logik) Bauteile. Außerdem sind im detaillierten Inventar die Bauteile soweit unterteilt aufgelistet, dass den Bauteilen oder ihren Bestandteilen jeweils genau ein Material zugeordnet werden kann, z.B. ist die Wandbewehrung einer Stahlbetonwand extra aufgeführt mit dem Baustoff Stahl und die Wandmatrix mit dem Baustoff Beton.

Das so erzeugte Bauteilinventar wird dann genutzt um einen optimalen Rückbauplan zu bestimmen (Basisszenario). Tabelle 23 listet alle in der Fallstudie vorhandenen Bauteile auf mit ihrer Referenz zu einer Koordinate (in Tabelle 24), einem Parent-Bauteil bzw. Raum und dem Baustoff. Die Bauteile umfassen in diesem Fall Wände, Decken, Böden, Fenster, Türen und elektrische technische Gebäudeausstattung. Basierend auf den erkannten Bauteilen wird dem Bauteil eine DIN276-Klassifizierung zugeordnet und Volumen und Masse zugeordnet (im Fall von punktförmigen Bauteilen wie Steckdosen, Waschbecken) oder berechnet (im Fall von Flächenbauteilen oder Leitungen/Rohren). In Abhängigkeit vom Bauteil werden Volumina und Massen zugeordnet, die der Literatur entstammen, bspw. werden Steckdosen ein Default-Wert hinsichtlich ihres Volumens und ihrer Masse zugeordnet.

Tabelle 24 listet für alle Punkt- und Flächenbauteile alle relevanten Eckpunkte mit ihren räumlichen Koordinaten auf und bildet damit das Bezugssystem für alle Bauteile im Gebäude.

2 Eingehende Darstellung

Tabelle 23: Struktur der CSV-Schnittstelle mit Flächenbauteilen (f=faces) und Punktbauteilen (v=vertices), dem tragenden Bauteil oder dem Raum (Parent) und Baustoffinformation für die Fallstudie Apartment

ID	Building element type	GeoRef-Type	Geo-Ref	Parent	Building element material
1	Ceiling	f	1	1	Timber
2	Floor	f	2	1	Timber
3	Wall	f	3	1	Cellular Concrete
4	Wall	f	4	1	Cellular Concrete
5	Wall	f	5	1	Cellular Concrete
6	Wall	f	6	1	Cellular Concrete
7	Ceiling	f	7	2	Timber
8	Floor	f	8	2	Reinforced Concrete
9	Wall	f	9	2	Cellular Concrete
10	Wall	f	10	2	Cellular Concrete
11	Wall	f	11	2	Cellular Concrete
12	Wall	f	12	2	Cellular Concrete
13	Ceiling	f	13	3	Timber
14	Floor	f	14	3	Reinforced Concrete
15	Wall	f	15	3	Cellular Concrete
16	Wall	f	16	3	Cellular Concrete
17	Wall	f	17	3	Cellular Concrete
18	Wall	f	18	3	Cellular Concrete
19	Ceiling	f	19	4	Timber
20	Floor	f	20	4	Reinforced Concrete
21	Wall	f	21	4	Cellular Concrete
22	Wall	f	22	4	Cellular Concrete
23	Wall	f	23	4	Cellular Concrete
24	Wall	f	24	4	Cellular Concrete
25	Door	f	25	21	Timber
26	Door	f	26	22	Timber
27	Window	f	27	24	Timber
28	Door	f	28	17	Timber
29	Door	f	29	16	Timber
30	Window	f	30	38	Timber
31	Door	f	31	12	Timber
32	Window	f	32	11	Timber
33	Door	f	33	6	Timber
34	Door	f	34	3	Timber
35	Window	f	35	4	Timber
36	Socket	v	141	4	PVC
37	Socket	v	142	17	PVC
38	Socket	v	143	16	PVC
39	Socket	v	144	23	PVC
40	Socket	v	145	15	PVC
41	Socket	v	146	11	PVC
42	Socket	v	147	3	PVC
43	Switch	v	148	16	PVC
44	DistributionBox	v	149	3	PVC
45	DistributionBox	v	150	16	PVC
46	DistributionBox	v	151	21	PVC
47	DistributionBox	v	152	12	PVC
48	DistributionBoxFlat	v	153	3	PVC
49	DistributionBox-Building	v	154	3	PVC

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse

Tabelle 24: OBJ-Schnittstelle und Datensatz für Fallstudie Apartment mit (x,y,z)-Koordinaten

Ref	Geo-RefType	X	Y	Z
1	v	0.00000	6.89120	2.60000
2	V	0.00000	0.00000	2.60000
3	v	2.79078	0.00000	2.60000
4	V	2.79078	6.89120	2.60000
5	v	0.00000	6.89120	0.00000
6	v	0.00000	0.00000	0.00000
7	v	2.79078	0.00000	0.00000
8	v	2.79078	6.89120	0.00000
9	v	0.00000	0.00000	0.00000
10	v	2.79078	0.00000	0.00000
11	v	2.79078	0.00000	2.60000
12	v	0.00000	0.00000	2.60000
13	v	0.00000	6.89120	0.00000
14	v	0.00000	0.00000	0.00000
15	v	0.00000	0.00000	2.60000
16	v	0.00000	6.89120	2.60000
17	v	2.79078	6.89120	0.00000
18	v	0.00000	6.89120	0.00000
19	v	0.00000	6.89120	2.60000
20	V	2.79078	6.89120	2.60000
21	v	2.79078	0.00000	0.00000
22	V	2.79078	6.89120	0.00000
23	v	2.79078	6.89120	2.60000
24	v	2.79078	0.00000	2.60000
25	v	2.79078	7.13120	2.60000
26	v	2.79078	10.00000	2.60000
27	v	0.00000	10.00000	2.60000
28	v	0.00000	7.13120	2.60000
29	v	2.79078	7.13120	0.00000
30	v	2.79078	10.00000	0.00000
31	v	0.00000	10.00000	0.00000
32	v	0.00000	7.13120	0.00000
33	v	0.00000	7.13120	0.00000
34	v	2.79078	7.13120	0.00000
35	v	2.79078	7.13120	2.60000
36	v	0.00000	7.13120	2.60000
37	v	0.00000	10.00000	0.00000
38	v	0.00000	7.13120	0.00000
39	v	0.00000	7.13120	2.60000
40	v	0.00000	10.00000	2.60000
41	v	2.79078	10.00000	0.00000
42	v	0.00000	10.00000	0.00000
43	v	0.00000	10.00000	2.60000
44	v	2.79078	10.00000	2.60000
45	v	2.79078	7.13120	0.00000
46	v	2.79078	10.00000	0.00000
47	v	2.79078	10.00000	2.60000
48	v	2.79078	7.13120	2.60000
49	v	3.03078	5.45314	2.60000
50	v	3.03078	0.00000	2.60000
51	v	8.00000	0.00000	2.60000
52	v	8.00000	5.45314	2.60000
53	v	3.03078	5.45314	0.00000
54	v	3.03078	0.00000	0.00000
55	v	8.00000	0.00000	0.00000
56	v	8.00000	5.45314	0.00000

2 Eingehende Darstellung

57	v	3.03078	0.00000	0.00000
58	v	8.00000	0.00000	0.00000
59	v	8.00000	0.00000	2.60000
60	v	3.03078	0.00000	2.60000
61	v	3.03078	5.45314	0.00000
62	v	3.03078	0.00000	0.00000
63	v	3.03078	0.00000	2.60000
64	v	3.03078	5.45314	2.60000
65	v	8.00000	5.45314	0.00000
66	v	3.03078	5.45314	0.00000
67	v	3.03078	5.45314	2.60000
68	v	8.00000	5.45314	2.60000
69	v	8.00000	0.00000	0.00000
70	v	8.00000	5.45314	0.00000
71	v	8.00000	5.45314	2.60000
72	v	8.00000	0.00000	2.60000
73	v	8.00000	5.69314	2.60000
74	v	8.00000	10.00000	2.60000
75	v	3.03078	10.00000	2.60000
76	v	3.03078	5.69314	2.60000
77	v	8.00000	5.69314	0.00000
78	v	8.00000	10.00000	0.00000
79	v	3.03078	10.00000	0.00000
80	v	3.03078	5.69314	0.00000
81	v	3.03078	5.69314	0.00000
82	v	0.00000	5.69314	0.00000
83	v	0.00000	5.69314	2.60000
84	v	3.03078	5.69314	2.60000
85	v	3.03078	10.00000	0.00000
86	v	3.03078	5.69314	0.00000
87	v	3.03078	5.69314	2.60000
88	v	3.03078	10.00000	2.60000
89	v	8.00000	10.00000	0.00000
90	v	3.03078	10.00000	0.00000
91	v	3.03078	10.00000	2.60000
92	v	8.00000	10.00000	2.60000
93	v	8.00000	5.69314	0.00000
94	v	8.00000	10.00000	0.00000
95	v	8.00000	10.00000	2.60000
96	v	8.00000	5.69314	2.60000
97	v	5.35300	5.69314	0.00000
98	v	5.35300	5.69314	1.80000
99	v	6.15300	5.69314	1.80000
100	v	6.15300	5.69314	0.00000
101	v	3.03078	8.98870	1.80000
102	v	3.03078	8.98870	0.00000
103	v	3.03078	8.18870	0.00000
104	v	3.03078	8.18870	1.80000
105	v	8.00000	7.45176	1.89930
106	v	8.00000	6.65176	1.89930
107	v	8.00000	6.65176	0.79930
108	v	8.00000	7.45176	0.79930
109	v	6.15300	5.45314	1.80000
110	v	5.35300	5.45314	1.80000
111	v	5.35300	5.45314	0.00000
112	v	6.15300	5.45314	0.00000
113	v	3.03078	3.05787	0.00000
114	v	3.03078	2.25787	0.00000
115	v	3.03078	2.25787	1.80000
116	v	3.03078	3.05787	1.80000

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse

117	v	8.00000	1.05035	1.89930
118	v	8.00000	1.05035	0.79837
119	v	8.00000	3.40035	0.79837
120	v	8.00000	3.40035	1.89930
121	v	2.79078	8.98870	0.00000
122	v	2.79078	8.98870	1.80000
123	v	2.79078	8.18870	1.80000
124	v	2.79078	8.18870	0.00000
125	v	2.07376	10.0000	0.44064
126	v	0.43376	10.0000	0.44064
127	v	0.43376	10.0000	1.80094
128	v	2.07376	10.0000	1.80094
129	v	2.79078	2.25787	0.00000
130	v	2.79078	2.25787	1.80000
131	v	2.79078	3.05787	1.80000
132	v	2.79078	3.05787	0.00000
133	v	2.24241	0.00000	0.00000
134	v	0.94241	0.00000	0.00000
135	v	0.94241	0.00000	2.00000
136	v	2.24241	0.00000	2.00000
137	v	0.00000	2.40013	1.80094
138	v	0.00000	4.30013	1.80094
139	v	0.00000	4.30013	0.90094
140	v	0.00000	2.40013	0.90094
141	v	0.00000	6.54000	0.34000
142	v	6.24000	5.45314	0.34000
143	v	3.03078	5.12000	0.34000
144	v	3.82000	10.0000	0.34000
145	v	4.00000	0.00000	0.34000
146	v	0.43000	10.0000	1.95000
147	v	2.54000	0.00000	1.25000
148	v	3.03078	5.26000	1.25000
149	v	0.30000	0.00000	2.30000
150	v	3.03078	1.90000	2.30000
151	v	5.10000	5.69314	2.30000
152	v	2.80000	8.00000	2.30000
153	v	0.30000	0.00000	1.50000
154	v	0.30000	0.00000	1.50000

Tabelle 26 zeigt das aggregierte, baustoffspezifische Inventar für das Fallbeispiel Apartment mit minimaler Masse, erwarteter Masse und maximaler Masse basierend auf den erhobenen Sensordaten, der oben beschriebenen Berechnungslogik und den Nutzerangaben zum Material. Dabei werden jedoch Baustoffdichten im Modell bislang nicht variiert. Hier wird davon ausgegangen, dass unterschiedliche Baustoffe auch als solche mit ihren unterschiedlichen Materialdichten in das Modell aufgenommen werden, bspw. Beton unterschiedlicher Gewichts- und Festigkeitsklassen. Bislang sind 29 mögliche Baustoffkategorien im Modell implementiert (vgl. Tabelle 25). Tabelle 26 umfasst die Aggregation der Massen aus Tabelle

23 anhand von 31 möglichen Baustoffkategorien. In dem vorliegenden Fallbeispiel ist das Baustoffinventar auf die im Beispiel enthaltenen Baustoffkategorien reduziert.

Tabelle 25: Baustoffkategorien im ResourceApp-Modell

Baustoffe	
Mineralisch	Mauersteine
	Beton (ohne Betonstahl)
	Mörtel/Putz/Gips/Estrich
	Kunst-/Naturstein
	Dachziegel
	Fliesen, Sanitärkeramik
Anorganisch	Stahl
	Sonstige Eisen- und Nicht-Eisen-Metalle (Gusseisen, Cu , Bronze, Messing, Al)
	Glas
Organisch	Holz (behandelt, unbehandelt)
	Asphalt und Bitumen
	Papier, Pappe
	Kunststoffe
Verbund	Dämmstoffe
	Elektronikschrott, Kabel
	Teppich und Textilien
Schadstoffe	Baustoffe mit Asbest
	Leichtbauplatten (Gips)
	Baustoffe mit KMF, Holzschutzmitteln/Pestiziden (PCP, Lindan, DDT, PCB), PAK, Metallen (Pb, Cd, Cr, Zn, Hg)

Weiterhin wird das Baustoffinventar zu Recycling- und Entsorgungspfaden aggregiert (siehe Tabelle 27). Tabelle 27 zeigt die minimalen, erwarteten und maximalen Rückbaumassen, die den möglichen Recycling- und Entsorgungspfaden zugeordnet werden können: stoffliches Recycling (Sekundärrohstoffnutzung, z.B. Glas, Metall), energetisches Recycling (Verbrennung, z.B. Holz, Kunststoffe), Verfüllung (Deponie-/ Straßenbau, z.B. mineralische Abfallfraktionen) und Entsorgung (z.B. Schadstoffe). Basierend auf dem aggregierten Baustoffinventar werden die Kosten für Recycling und Entsorgung der anfallenden Materialfraktionen mittels aktueller Kostensätze für den Raum Niedersachsen (Bielefeld) berechnet. Die

zugrunde gelegten Kostensätze können durch den Nutzer einfach an die örtlichen Kostensätze angepasst werden.

Tabelle 26: Aggregiertes Baustoffinventar für die Fallstudie Apartment im Basis-szenario mit erwarteten Entsorgungskosten je Baustoffkategorie

Baustoff	Min. Masse [kg]	Erw. Masse [kg]	Max. Masse [kg]	Erw. Kosten [EUR/kg]
Mauerwerk, Porenbeton/Ytong	27593	41731	71847	0.02
Aluminium	4	4	4	-0.91
Glas	76	151	302	0.02
Holz (behandelt)	2482	7370	11359	0.1
Kunststoff (PVC) (ohne Leitungen)	2	2	2	0.23
Leitungen, Kabel	7	7	7	-0.67

Tabelle 27: Verwertungspfade mit den berechneten Baustoffmassen [t] für Fallstudie Apartment im Basisszenario

Verwertungspfade	Minimale Masse [t]	Erwartete Masse [t]	Maximale Masse [t]
Stoffliches Recycling [t]	0	0	0
Energetisches Recycling [t]	2	7	11
Verfüllung [t]	28	42	72
Entsorgung [t]	0	0	0

Methode zur Identifizierung kritischer Gebäude-/Bauteil-(Schad)Stoff-Kombinationen zur Integration eines Gefahrstofffrühwarnsystems

Für die Identifizierung kritischer Bauteile sowie Gebäude-/Bauteilkombinationen ist der derzeit eingesetzte Sensor und die entwickelte Software nur bedingt geeignet. Der eingesetzte Sensor ermöglicht eine räumliche Erfassung von baulichen Strukturen und somit die Quantifizierung von Bauteilvolumina. Da in dem entwickelten Modell die Materialangabe vom

Nutzer vorzunehmen ist, ist hier weiterhin das Expertenwissen des Modellnutzers gefragt.

Im Rahmen der Bauteil- und Baustoffinventarisierung eines Gebäudes wurden die in Abbildung 4 grau hinterlegten Schadstoffe als mögliche Bauteilausprägung implementiert. Bauteile, die mit diesen Schadstoffen behaftet sind, können ebenfalls inventarisiert werden und die zusätzlichen Projektkosten die mit der Schadstoffbehandlung einhergehen können berechnet werden. Die Recherchen in AP1 ergaben jedoch, dass es schwierig ist, lediglich auf Basis des Gebäudealters und des Auftretens bzw. Vorhandenseins bestimmter Bauteile Schadstoffkontaminationen vorherzusagen. Dafür sind die bislang in der Literatur vorliegenden Daten nicht geeignet. Es gibt zwar vereinzelt (bei Schadstoffsanierern, Schadstoffgutachtern und dem Gesamtverband für Schadstoffsanierung) Erfahrungswerte wo in welchen Gebäudetypen und Baualtersklassen möglicherweise Schadstoffe vorhanden sein könnten. Diese Verdachtsmomente sind jedoch nicht zahlenmäßig/ statistisch belegt, und können je Region und Sanierungszustand eines Gebäudes stark voneinander abweichen. Aufgrund der schlechten Datenlage wurde im Projekt hier auf eine weitere Ausgestaltung dieser Funktion im Modell verzichtet. Bei zukünftigen Projekten könnten durch eine Hardwareergänzung (durch Schadstoffsensoren wie einem (mobilen) Röntgenfluoreszenz-Screening (RFA-Screening) oder einem Nah-Infrarot-Analysator (NIR-Analysator) zur Erkennung von Materialien bzw. Asbestfasern) und Modellerweiterung um weitere Sensorinformation zur Schadstofferkennung der schlechten Datenlage entgegengewirkt werden. Da jedoch Schadstoffsanierungen von Gebäuden meist mit einem negativen Image oder Imageverlust verknüpft sind, ist es in diesem Bereich besonders schwierig, an verlässliche Daten zu gelangen. Daher könnte durch systematische Datenerhebung Datenlücken geschlossen werden und eine Implementierung und statistische Analyse des validierten Expertenwissens und der sensorgestützten Schadstofferkennung in diesem Bereich erlauben.

2.1.3.2 Erschließung des Ressourceneffizienzpotentials (AP3.2)

Zur Erschließung des Rohstoffeffizienzpotenzials wurden, wie oben beschrieben, zunächst das Bauteil- und das Rohstoffinventar des Gebäudes (mit eventuellen Abweichungen) ermittelt. Dies listet die im Gebäude vorhandenen Bauteile bzw. Baustoffe detailliert auf. Daraus lässt sich ableiten, welche Rohstoffe in welchen Bauteilen enthalten sind. Basierend auf diesen Informationen kann eine Rückgewinnung geplant und durchgeführt werden.

Daher wurde ein Planungsmodell entwickelt und auf konventionellen PCs implementiert, das die Rückgewinnung (den Rückbau) dieser Bauteile möglichst ressourcenschonend (zeitoptimal) plant. Dabei können vom Nutzer Ressourcen (Maschinen, Personal) mit einer bestimmten Kapazität vorgegeben werden, die für den Rückbau des Gebäudes zur Verfügung stehen. Die Projektaktivitäten werden dann so auf Ressourcen geplant, dass die Bauteile und Rohstoffe möglichst schnell aus dem Gebäude zurückgewonnen werden.

Die Verwendung der Rohstoffe wird im Modell im Rahmen der Verwertungspfade bestimmt (vgl. Tabelle 27). Dabei wird von derzeit üblichen Techniken und Verwendungen je Material im Bereich des stofflichen und energetischen Recyclings, der Verfüllung und der Entsorgung ausgegangen. Tabelle 27 zeigt ebenfalls die exemplarisch für die aufgeführten Baustoffe verwendeten Kosten bzw. Erlöse für Recycling, Verfüllung oder Entsorgung, die im Modell für den Raum Niedersachsen angesetzt werden. An dieser Stelle bietet das Modell Erweiterungspotenzial hinsichtlich innovativer und zukünftiger Recyclingverfahren, die im aktuellen Demonstrator nicht implementiert sind, aber die Zuordnung der anfallenden Materialfraktionen je Verwertungspfade verändern würde und damit Einfluss auf das Rohstoffpotenzial und das Ressourceneffizienzpotential haben.

Die eingeplanten Ressourcen (Maschinen, Personal) für den Rückbau und die Rückgewinnung von Rohstoffen liefern dann einen optimalen Rückbauplan, aus dem sich die Kosten für die Ressourcen berechnen lassen. Dabei werden im Modell übliche Kostensätze zugrunde gelegt, die

von den Praxispartnern so bestätigt wurden. Die Kostensätze lassen sich einfach in Microsoft Excel anpassen und ins Modell importieren.

Die berechneten Projektkosten werden auf die zurückgewonnenen Rohstoffe umgelegt. Damit lässt sich der Sekundärrohstoffpreis bestimmen, der je Einheit im Gebäude vorhandenen Rohstoffes gezahlt werden muss. Diese Werte werden im Modell je Rohstoffkategorie berechnet und an den Nutzer ausgegeben (vgl. Abbildung 16, mittleren Tabelle (nicht im Bild)). Der berechnete Wert umfasst den Preis je Rohstoffeinheit, wenn aus dem Gebäude lediglich der jeweilige Rohstoff zurückgewonnen würde. Da meist nicht genau klar ist, welche Abfallfraktionen welchen Verwertungspfaden folgen, wurde auf eine detailliertere Berechnung bei gleichzeitiger stofflicher Rückgewinnung mehrere Rohstoffkategorien verzichtet. Damit wird der berechnete Sekundärrohstoffpreis tendenziell zu hoch angesetzt. Eine detailliertere Berechnung kann aber, falls erforderlich, im Modell sehr leicht implementiert werden, wenn bspw. festgelegt wird, welche Fraktionen in jedem Fall stofflich recycelt werden und somit zu einem Erlös führen. Es muss jedoch auch vom Nutzer festgelegt werden, zu welchen Anteilen bspw. mineralische Abfallfraktionen stofflich recycelt werden oder bspw. als Füllmaterial genutzt werden, dann davon hängen die Verwertungskosten ab.

Auf konventionellen PCs implementiertes Modell zur ökonomischen und ökologischen Optimierung der Planung des selektiven Rückbaus

Das Modell zur ökonomischen und ökologischen Optimierung der Planung des selektiven Rückbaus wurde im Rahmen des Arbeitspaketes ebenfalls basierend auf einem bestehenden formalen Modell weiterentwickelt und implementiert.

Das Modell basiert auf dem multi-modalen, ressourcen-beschränkten Projektplanungsproblem, das in der Operations-Research-Literatur mathema-

tisch formuliert ist. Es handelt sich dabei um ein Problem, welches Aktivitäten (in diesem Fall Rückbauaktivitäten) auf erneuerbare¹⁰ Ressourcen (Maschinen und Personal) einplant, die in ihrer Kapazität beschränkt sind. Weiterhin dürfen die Rückbauaktivitäten in unterschiedlichen Modi ausgeführt werden. Das bedeutet, dass zur Durchführung einer Rückbauaktivität unterschiedliche Ressourcenalternativen eingesetzt werden können. Die folgende mathematische Formulierung basiert im Wesentlichen auf [Schultmann 1998].

Zur Herleitung des Grundmodells sowie zur Reduzierung der Anzahl erforderlicher Variablen ist es notwendig, eine (möglichst kleine) obere Schranke \bar{T} für die Projektgesamtdauer T zu ermitteln. Dies kann etwa durch die Summe der Demontagezeiten sämtlicher Demontagegruppen geschehen mit

$$\bar{T} = \sum_{j=1}^J d_j .$$

Bei gegebenem \bar{T} lassen sich dann früheste Anfangs- (ES_j) und Endzeitpunkte (EF_j) durch die bei der Zeitplanung¹¹ üblichen Methoden der Vorwärtsrekursion berechnen. Entsprechend lassen sich nach dem Setzen von $LF_j = T$ bzw. $LF_j = \bar{T}$ späteste Anfangs- und Endzeitpunkte (LS_j und LF_j) durch Rückwärtsrekursion berechnen. Kapazitätsrestriktionen werden dabei zunächst vernachlässigt, so dass sich sämtliche auf diese Weise ermittelten Zeitpunkte auf einen hinsichtlich Reihenfolge und Kapazitätsbeschränkungen zulässigen Ablaufplan beziehen. Die Obergrenze der

¹⁰ Erneuerbare Ressourcen in diesem Sinne bedeuten Ressourcen, die zu jedem Planungszeitpunkt bzw. nach ihrer Nutzung wieder zur Verfügung stehen und nicht verbraucht werden. Nicht-erneuerbare Ressourcen sind in dem Sinne Ressourcen, die im Projektverlauf verbraucht werden wie bspw. Budget, Energie, Hilfs- und Betriebsstoffe.

¹¹ Mit den Standardmethoden MPM und CPM lassen sich beim Vorliegen deterministischer Vorgangsdauer und deterministischer Vorgangsbeziehungen die minimale Projektdauer, Zeitfenster für die Start- und Endzeitpunkte der einzelnen Aktivitäten sowie der kritische Pfad ermitteln. Dabei wird allerdings vorausgesetzt, dass die zur Durchführung der einzelnen Vorgänge benötigten Ressourcen nicht beschränkt sind.

Projektdauer berechnet sich dabei im Mehr-Modus Fall aus der jeweils längsten Vorgangsdauer:

$$\bar{T} = \sum_{j=1}^J \max_{m=1}^{M_j} \{d_{jm}\}, \quad \text{mit: } d_{jm}: \text{ Dauer der Demontagegruppe } j \text{ im Modus } m.$$

Zur Berechnung der Zeitfenster für die einzelnen Demontagegruppen sind die Modi der einzelnen Demontagegruppen aufsteigend nach Dauer zu ordnen und jeweils der Modus mit der kürzesten Vorgangsdauer auszuwählen¹². Unter diesen Voraussetzungen berechnen sich Start- und Endzeitpunkte einer Demontagegruppe im Mehr-Modus-Fall wie folgt:

$$ES_1 = 0$$

$$EF_1 = d_{11}$$

$$ES_j = \max \{ ES_i + d_{i1} \mid i \in P_j \} \quad j = 2, \dots, J$$

$$EF_j = \max \{ EF_i \mid i \in P_j \} + d_{j1} \quad j = 2, \dots, J$$

$$LS_J = \bar{T} - d_{J1}$$

$$LS_i = \min \{ LS_j \mid j \in S_i \} - d_{i1} \quad i = 1, \dots, J-1$$

$$LF_J = \bar{T}$$

$$LF_i = \min \{ LF_j - d_{j1} \mid j \in S_i \} \quad i = 1, \dots, J-1$$

Ferner gelten die Zusammenhänge:

$$ES_j = \max \{ EF_i \mid i \in P_j \} \quad j = 2, \dots, J$$

$$EF_j = ES_j + d_{j1} \quad j = 1, \dots, J$$

$$LF_i = \min \{ LS_j \mid j \in S_i \} \quad i = 1, \dots, J-1$$

$$LS_i = LF_i - d_{i1} \quad i = 1, \dots, J$$

¹² Die frühesten und spätesten Start- bzw. Endzeitpunkte ES_j , EF_j , LS_j , LF_j einer Demontagegruppe j beziehen sich im Multi-Mode-Fall somit immer auf die jeweils minimale Vorgangsdauer.

Das verallgemeinerte Projektplanungsproblem kann somit wie folgt formuliert werden:

$$\text{MIN } \Phi(x) = \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} t \cdot x_{Jmt}$$

u.d.N.

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} &= 1 & j = 1, \dots, J \\ \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} t \cdot x_{imt} &\leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_{jm}) \cdot x_{jmt} & j = 2, \dots, J, \quad i \in P_j \\ \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{jmr} \sum_{\tau=t}^{t+d_{jm}-1} x_{jm\tau} &\leq Q_{rt} & r \in R, \quad t = 1, \dots, \bar{T} \\ \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{jmn} \sum_{\tau=EF_j}^{LF_j} x_{jm\tau} &\leq Q_n & n \in N \\ x_{jmt} &\in \{0, 1\} & j = 1, \dots, J, \quad m = 1, \dots, M_j, \\ & & t = EF_j, \dots, LF_j \end{aligned}$$

Mit folgender ergänzter Notation:

$$x_{jmt}: \begin{cases} 1, & \text{falls die Bearbeitung von Demontagegruppe } j \text{ in Periode } t \text{ im} \\ & \text{Modus } m \text{ beendet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

q_{jmr} : Periodische Ressourcennachfrage nach der erneuerbaren Ressource r , $r \in R$ von Demontagegruppe j im Modus m ,

q_{jmn} : Ressourcennachfrage nach der nicht erneuerbaren Ressource n , $n \in N$ von Demontagegruppe j im Modus m ,

Q_n : Zur Verfügung stehende Kapazität der nicht erneuerbaren Ressource n , $n \in N$,

M_j : Anzahl der Ausführungsarten/Modi, in denen Demontagegruppe j durchgeführt werden kann,

d_{jm} : Dauer der Demontagegruppe j im Modus m ; $d_{1m} = d_{jm} = 0$,

n : Nicht erneuerbare Ressource, $n \in N$.

Ist der zuletzt durchzuführende Vorgang J nur im Modus 1 ausführbar, kann die Zielfunktion in vereinfachter Form als

$$\Phi(x) = \sum_{t=EFJ}^{LFTJ} t \cdot x_{Jt}$$

formuliert werden. Da es sich bei dem letzten Vorgang gemäß den Modellannahmen um eine (einzige) Senke mit der Dauer Null handelt, stellt diese zusätzliche Annahme keine Einschränkung dar. Weiterhin wurden als Erweiterung zum klassischen Modell in [Schulmann 1998] Einsatzorte auf der Baustelle als erneuerbare Ressourcen modelliert und implementiert, die dadurch die Logistik auf der Baustelle explizit in der Planung berücksichtigen. Auch ist die Auswahl und Kapazitätsbeschränkung von Personal mit unterschiedlicher Qualifikationen (verknüpft mit den entsprechenden Kostensätzen) möglich. Im Modell sind derzeit Maschinenführer (Hydraulikbagger, Kran) und einfache Arbeitskräfte hinterlegt. Die Modelllösung umfasst einerseits eine Modezuweisung für jede Aktivität (Zuordnung, mit welchen Ressourcen die Aktivität durchzuführen ist), und andererseits einen Zeitplan (Zuordnung, wann die Aktivität durchzuführen ist) mit minimaler Projektgesamtdauer. Zur integrierten Bestimmung der optimalen Modi (Ressourcennutzung) und zur Berechnung der jeweiligen optimalen Rückbaupläne wurde der Solver CPLEX von IBM ILOG Optimization Studio 12.6.2(x86-64) herangezogen.

Der Einfachheit halber wurde auf die Modellierung unterbrechbarer Rückbauaktivitäten, einer variierenden Ressourcennachfrage, nicht-erneuerbarer und kontinuierlicher Ressourcen verzichtet. Dies würde die Modellgröße stark erhöhen und dazu führen, dass das ohnehin schon schwer lösbare Projektplanungsproblem bei realen Anwendungsfällen nicht mehr in endlicher Zeit lösbar ist.

Aus ökonomischer Sicht löst das Modell das Projektplanungsproblem hinsichtlich minimaler Projektgesamtdauer. Da bei operativer Projektplanung die ökonomischen Konsequenzen jeder Einzelentscheidung nicht quantifiziert werden können [Corsten 1994, p. 419; Daub 1994, p. 68], „greifen betriebswirtschaftliche Planungsmethoden in der Regel auf Zeitgrößen als

Substitute zurück“ [Schultmann 1998, p. 123]. “Auch vor dem Hintergrund der kurzfristigen Planungshorizonte bei Rückbauprojekten und dem hohen Detaillierungsgrad im vorliegenden Modell bietet sich eine zeitbezogene Zielfunktion an“ (Schultmann 1998 p. 123). Daher stützt sich operative Projektplanung meist auf Ressourceneinsatz- und Kapazitätsplanungsmodelle, bei denen dann Kosten vom optimalen Zeitplan abgeleitet werden. Dies wird ebenfalls in der Rückbaupraxis dadurch unterstützt, als dass es Strafkosten (durch Vertragstrafen bei Projektverzug) zu vermeiden gilt und schnell beendete Projekte die betrieblich eingesetzten Ressourcen schnell für andere Projekte freiwerden lässt [Schultmann 1998, p. 123]. Im Einklang mit der einschlägigen Literatur liegt daher der Fokus des hier implementierten Projektplanungsmodells auf der Projektdauerminimierung. Projektkosten werden als minimal angesehen, wenn sie aus einer zeitoptimalen Planung resultieren.

Aus technischer Sicht werden lassen sich beim Gebäuderückbau verschiedene Aktivitäten unterscheiden. Abbildung 27 zeigt die hier unterschiedenen Aktivitäten von Reinigung/Dekontamination, Trennung, Rückbau, Zerkleinerung, Sortierung und Verladung. Im ResourceApp-Modell sind aus Gründen der Problemreduktion lediglich Rückbauaktivitäten im Demonstrator implementiert. Weitere Aktivitäten können aber leicht im Modell integriert werden.

Für die genannten Rückbauaktivitäten werden zahlreiche Modi (technische Ausführungsvarianten mit unterschiedlichem Ressourceneinsatz) im Modell abgebildet und hinsichtlich ihrer Optimalität im Projektzeitplan evaluiert. Insgesamt sind 25 Modi abgebildet, wobei sich 9 Modi auf Rückbauaktivitäten beziehen. Dies kann für Praxisanwendung beliebig detailliert werden. Die gewählten 9 Modi sind jedoch klassische Rückbauverfahren, die einen Großteil der Rückbauverfahren abdecken. Für weitere Rückbauverfahren siehe bspw. Abbildung 27. Eine zusätzliche Detaillierung könnte darin bestehen, die eingesetzten Maschinen in weitere Größenklassen zu unterteilen, bzw. den Maschinenpark und das Personal an die jeweilige betriebliche Ausgangslage und Entscheidungssituation anzupassen. Tabelle 28 zeigt die im Modell implementierten Modi der Rückbauaktivitäten

mit ihren Ressourcenbedarfen an Maschinen und Personal (MA=Mitarbeiter). Bei den Verfahren/Modi mit Hydraulikbagger oder Kran ist jeweils ein Mitarbeiter der angegebenen Anzahl als Maschinenführer eingeplant.

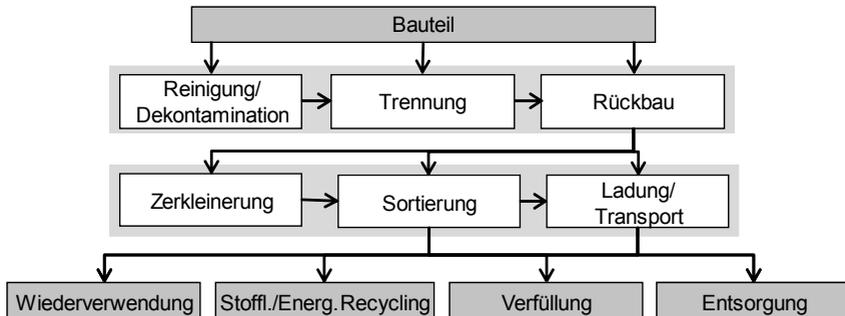


Abbildung 27: Allgemeine Arten von Rückbauaktivitäten und ihre Reihenfolge vom Bauteil zur Wiederverwendung, stofflichem oder energetischem Recycling, der Verfüllung und der Entsorgung

Weiterhin müssen bei der Rückbauplanung technische Vorrangreihenfolgen eingehalten werden, die insbesondere die Standsicherheit des rückzubauenden Gebäudes sicherstellen. Abbildung 29 zeigt diese Rückbau-reihenfolge in vereinfachter Form für ein dreigeschossiges Gebäude. Zuerst werden üblicherweise schadstoffbehaftete Bauteile entfernt, dann werden die Innenausbauten und technischen Ausrüstungen aus dem Gebäude entfernt. Als nächstes folgen die Verkleidung und Beläge der Decken, Wände und Böden, die rückgebaut werden. Dann wird die tragende Struktur „von oben nach unten“ meist mit Hydraulikbagger und geeignetem Anbaugerät zurückgebaut. Bei einem mehrgeschossigen Gebäude wird mit der obersten Geschosdecke begonnen, dann folgen die Wände und die nächste Geschosdecke bis das Fundament erreicht ist.

Abbildung 28 zeigt die technische Eignung von Rückbauverfahren bei bestimmten Konstruktionsarten, Bauteilen und Baustoffen. Diese technisch vorgegebene Eignung ist im ResourceApp-Modell in einer Datenbank hinterlegt und wird bei der Rückbauplanung beachtet.

Tabelle 28: Auflistung der im Modell implementierten Modi
(technische Ausführungsvarianten) (MA=Mitarbeiter)

Modus	Ressourcen
1: Abgreifen	Hydraulikbagger* 200 kV, Sortiergreifer, 2 MA
2: Einschlagen	Seilbagger** 220 kV mit Stahlmasse, 2 MA
3: Eindrücken	Hydraulikbagger 200 kV, Abbruchstiel, 2 MA
4: Einziehen	Hydraulikbagger 200 kV, Stahlseil, 2 MA
5: Reißen	Hydraulikbagger 200 kV, Abbruchstiel, 2 MA
6: Stemmen	Hydraulikbagger 200 kV, Hydraulikhammer, 2 MA
7: Demontieren	Schnellmontagekran mit Laufkatzausleger, 4 MA
8: Handabbruch	Handwerkzeug (Elektrohammer), 1 MA
9: Pressschneiden	Hydraulikbagger 200 kV, Kombi-Cutter, 2 MA

Aus ökologischer Sicht werden Recyclingraten (stofflich/energetisch), Verfüllraten und Entsorgungsraten im Modell wie oben beschrieben berechnet. Die Berechnung dieser Raten hängt dabei am identifizierten Baustoff und dem dafür üblichen Verwertungspfad. Wie oben beschrieben werden dabei neue/innovative Verfahren noch nicht berücksichtigt, können aber leicht integriert werden, in dem die Zuordnung der Abfallfraktion zum Verwertungspfad entsprechend angepasst wird und der jeweilige Kostensatz dafür interlegt wird. Wiederverwendung wird im Modell derzeit noch nicht abgebildet, da das Modell noch nicht automatisiert erkennen kann, ob Bauteile als Ganzes wiederverwendet werden können, da sie einen hohen Wiederverwendungs- und Marktwert haben. In der Praxis wird dies aktuell durch Experten beurteilt und ggf. in die Kalkulation des Rückbaus eingeplant. Dies betrifft aber derzeit nur einen kleinen Anteil der vorzufindenden Bauteile, bei denen die Wiederverwendung derzeit durchgeführt wird. Dies sind typischerweise historische Bauteile, bei denen ein hoher Marktwert den gesonderten Ausbau, die Reinigung, die Verpackung, die Zwischenlagerung und den Transport an einen neuen Einsatzort ökonomisch rechtfertigt. Im Praxisbeispiel Wohnhaus in Lemgo (vgl. Abbildung 39, Abbildung 43) waren dies zum Beispiel die hochwertigen, alten Holztüren, die im Nachgang zum Rückbau auf einer Bauteilbörse angeboten wurden.

2 Eingehende Darstellung

Eignung und Auswirkung von Abbruchverfahren	Konstruktion	Bauteil	Baustoff
Verfahren	Flach- und Hallenbauten mehrgeschossige Skelettkonstruktion mehrgeschossige Wandkonstruktionen kompakte Bauwerke turmartige Bauwerke/Schornsteine/Masten Brücken Stios und Behälter Schalenbauweise Verkehrswege Decken/Sohlen Gewölbe Dächer Unterzüge/Bücher Stützen Wände Fundamente/Grundungskörper Maschinen-Anlagenteile Holz Mauerwerk Asphaltbeton unbewehrter Beton bewehrter Beton Stahl hochlegierter Stahl und Guß Nischenmetalle Dämm- und Ausbaumaterial Kunststoffe Asbest Kunstliche Mineralfasern		
Abgreifen	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Einschlagen	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Eindrücken	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Einziehen	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Reißen	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Stemmen	□ □ □ □ □	□ □ □ □ □	□ □ □ □ □
Preßschneiden	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Scherschneiden	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Spalten durch Pressen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Spalten durch Queldrücken	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Demontieren	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Lockerungs Sprengen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Spalten durch Sprengen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Umlegen durch Sprengen	----- konstruktionsunabhängig -----	----- bauteilunabhängig -----	■ □ □ □ □
Zusammenstürzen durch Sprengen	□ □ □ □ □	----- bauteilunabhängig -----	■ □ □ □ □
Niederbringen durch Sprengen	■ □ □ □ □	----- bauteilunabhängig -----	■ □ □ □ □
Kernbohren	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Vollbohren	----- ist nur Bestandteil anderer Verfahren -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Wandsägen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Bodensägen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Seilsägen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Kettensägen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Brennschneiden mit Autogenbrennen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Plasmaschneiden	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Brennschneiden / Sauerstoffkerlanzen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Brennschneiden / Pulverschneidbrennen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Hochdruckwasserschneiden	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Fräsen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Schleifen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
Hochdruckwasserstrahlen	----- konstruktionsunabhängig -----	■ □ □ □ □	■ □ □ □ □
□ = geeignet	¹⁾ muß ggfs. durch andere Verfahren aus dem Verbund gelöst werden		
■ = besonders geeignet	²⁾ gilt nicht für Guß		
	x = Emissionen sind gegebenenfalls zu berücksichtigen		

Abbildung 28: Rückbauverfahren (Modi) und ihre Anwendbarkeit auf Konstruktionsweisen, Bauteile und Baustoffe (DIN 18007:2000-05, Appendix A)

Aus rechtlicher Sicht müssen bei Rückbaugebäuden zunächst die schadstoffbehafteten Bauteile entfernt werden (siehe VDI/GVSS 6202:2013). Dies ist in der Vorrangreihenfolge (vgl. Abbildung 29) berücksichtigt. Zudem dürfen getrennt anfallende Abfallfraktionen nicht vermischt werden (siehe Gewerbeabfallverordnung GewAbfV, [Knappe et al. 2010, S. 42]. Auch dies ist in der hier implementierten selektiven Rückbauplanung gegeben, da der Ausbau der Bauteile einzelnen geplant (und durchgeführt) wird und somit einer Vermischung der Abfallfraktionen entgegensteht.

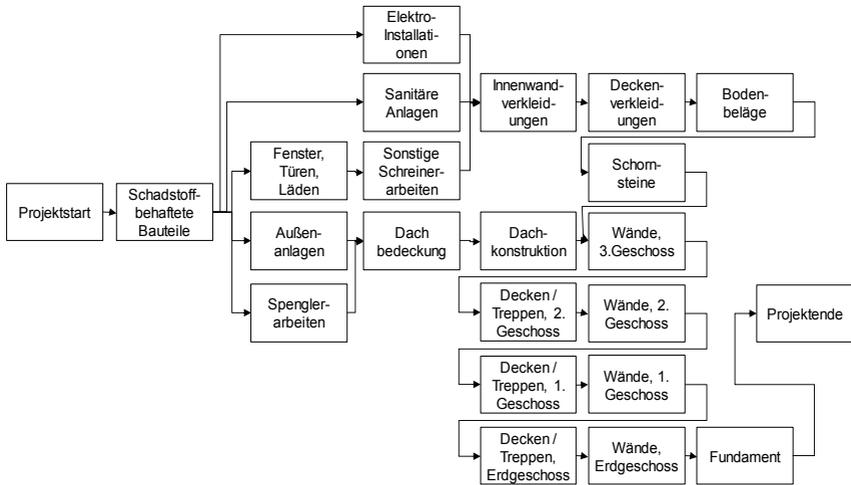


Abbildung 29: Vorrangreihenfolge der Rückbauaktivitäten für ein dreigeschossiges Gebäude

Das in Abschnitt 2.1.3.1 beschriebene Inventarisierungsmodell und das oben aufgeführte Optimierungsproblem wurde in MATLAB 2015 implementiert (vgl. Abbildung 30). Für die skizzierten Fallbeispiele und Praxisbeispiele wurden auf einem konventionellen PC und einem Rechenrechner die Gebäudeinventare berechnet und die Projektplanungsprobleme gelöst. Es handelte sich dabei um ein Dell Intel® Core™ 2 Duo (CPU) P4900 @2.40 GHz mit Windows 7, 64-Bit-Betriebssystem und 4 GB Arbeitsspeicher (RAM) sowie ein 64-Bit-Betriebssystem auf einem Windows Server 2012 mit Intel® Core™ i7-4930K CPU @ 3.40 GHz und 64 GB installiertem Arbeitsspeicher (RAM). Das Modell läuft auch auf einem konventionellen PC, kann dort aber je nach Problemgröße an die Grenze der Rechenleistung stoßen. Daher wurde das Modell primär auf dem genannten Rechenrechner entwickelt und getestet. In Abbildung 30 ist die MATLAB-Benutzeroberfläche zu sehen nach dem Aufruf der ResourceApp.

sondere den Sekundärrohstoffpreis und die Recycling-, Verfüll- und Entsorgungskosten. Weiterhin wurden Rückbaudauern je Bauteil, Rückbaukostensätze je Bauteilkategorie, Maschinen- und Personalkostensätze recherchiert und zusammen mit den Praxispartnern validiert. Der berechnete Sekundärrohstoffpreis kann dann mit dem Primärrohstoffpreis verglichen werden. Beispielsweise kostet der Betonbruch je m^3 aus dem abgebrochenen Fallbeispiel des Krankenhauses ca. 1808 €/m^3 , wenn man die entstehenden Projektgesamtkosten des Rückbaus durch das Volumen des zurückgewonnenen Betonbruchs dividiert. Wenn man dies bspw. mit den derzeitigen Kosten für Beton für den Einsatz im Straßen- und Wegebau vergleicht, der zwischen $65\text{-}110 \text{ €/m}^3$ liegt¹³, sieht man, dass diese Preise eine Größenordnung weit darüber liegen. Dabei kommen bei dem zurückgewonnenen Material noch zusätzliche weitere Verarbeitungs- und Transportkosten hinzu, um es mit einsatzfertigem Beton vergleichen zu können.

Betrachtete ökologische Kennwerte umfassen insbesondere die stoffliche Recyclingrate, die energetische Recyclingrate, die Verfüllrate und die Entsorgungsrate. Diese wird hier berechnet als der prozentuale Anteil der jeweiligen Massen [kg] im Verwertungspfad im Verhältnis zur Gesamtmasse [kg]. Rohstoffkennwerte umfassen insbesondere die Masse der Baustoffe bzw. Abfallfraktionen in [kg]. Dieser Wert wurde im Baustoffinventar in minimaler, erwarteter und maximaler Ausprägung (wie oben beschrieben) berechnet. Für diese Werte gibt es je Gebäudetyp und je Baustoffkategorie Vergleichswerte in der Literatur, die hier zur Validierung der in ResourceApp berechneten Größenordnung der Baustoffmassen herangezogen werden. Dies ist allerdings nur ein grober Richtwert, da die Praxisbeispiele zum Teil nur Gebäudeabschnitte sind (und keine vollständigen Gebäude) und da es Einzelgebäude sind, die Literaturwerte aber

¹³ Beton: $65 - 110 \text{ €/m}^3$ bzw. $85\text{-}103 \text{ €/m}^3$ abhängig von der Druckfestigkeitsklasse für den Einsatz im Straßenbau (<http://www.beton-mischen.de/Fertigbeton-Preis.htm>, <http://www.heyer-brebag.de/PDF-Dateien/Betonpreisliste%2001.2012.pdf>, Abruf: 02.12.2016).

typische Werte für Gebäude mit gleicher Nutzungsart oder Konstruktionsweise angeben.

Eine Aktualisierung der baustofflichen Kennwerte aus AP1 wurde nicht vorgenommen, da im Rahmen des Projektes lediglich zwei Praxisbeispiele vermessen, verwogen und rückgebaut wurden. Da dies ein Krankenhaus und ein Wohngebäude waren, erlaubt diese Einzelmessung keine Rückschlüsse und keine Anpassung auf gebäudetypspezifische Kennzahlen hinsichtlich ihrer baustofflichen Zusammensetzung.

Die untersuchten Praxisbeispiele sind im Folgenden dargestellt, zusammen mit den berechneten, gemessenen und recherchierten Vergleichswerten aus der Literatur.

Praxisbeispiel Krankenhaus Bad Pyrmont

Als Praxisbeispiel wurde mit Hilfe der Praxispartner ein altes, seit ca. 6 Jahren ungenutztes Krankenhaus in Bad Pyrmont ausgewählt. Es hatte ein Volumen von ca. 50.000 m³ umbautem Raum und bestand aus drei verschiedenen Gebäuden mit verschiedenen Gebäudeabschnitten mit meist 4-5 Stockwerken (siehe Abbildung 31, Abbildung 32 und Abbildung 33). Abbildung 31 zeigt die Straßen- und die Hofansicht des Gebäudes. Abbildung 32 zeigt einen Grundriss und Fluchtplan des mit ResourceApp aufgenommenen 2.OG, in dem der erfasste Bereich im Bettentrakt räumlich markiert ist. Dabei ist der zentral liegenden Gang, der Patientenzimmer von Behandlungs- und Personalräumen trennt, gut zu erkennen. Abbildung 33 zeigt einen im Keller des Gebäudes gefundenen Grundriss des 2.OG, dem einige Abmessungen für die Berechnung des Praxisbeispiels zu entnehmen waren, der aber auch in einigen Details von der realen Situation im Gebäude abwich.

Bei einer ersten gemeinsamen Begehung aller Projektpartner wurde der Gebäudezustand begutachtet und entschieden, welcher Bauabschnitt für die Aufnahmen mit dem ResourceApp-Demonstrator geeignet ist. Es wurde ein Geschoss aus einem Hauptgebäudetrakt mit vier übereinanderliegenden, nahezu identischen Geschossen im Bettentrakt ausgewählt.

Der ausgewählte Bereich bestand aus einem durchgehenden Flur sowie Patientenzimmern auf der einen und Arbeitsräume (Bad, Schwesternzimmer etc.) auf der anderen Seite. Insgesamt handelte es sich um 30 Räume mit 512 bei der Begehung erfassten Bauteilen, darunter 30 Decken, 30 Böden, 165 Wände, 26 Fenster, 29 Türen, 36 Heizkörper, 151 elektrische Anschlüsse und jeweils 11 WCs und Waschbecken. Die Räume wurden durchnummeriert, fotografisch dokumentiert, es wurde mit Hilfe eines Laser-Distanzmessgerätes ein konventionelles Aufmaß aufgenommen und die Maße (für die Verifikation der automatisch erfassten Sensordaten) händisch notiert. Parallel wurden die einzelnen Räume mit dem Demonstrator (Sensor) aufgenommen. Dabei wurden die Sensoraufnahmen in Form von Punktwolken und Videos auf einem mobilen Laptop gespeichert. Abbildung 34 zeigt einige Innenansichten aus der aufgenommenen Krankenhausetage. Links oben zu sehen ist der zentrale Flur, von dem die Patientenzimmer und die Behandlungs- und Personalräume abzweigen. Rechts oben ist ein großes Patientenbad zu sehen, in dem Heilbehandlungen durchgeführt wurden. Die beiden unteren Bilder in Abbildung 34 zeigen ein Patientenzimmer, zum einen von der Sicht der Tür zum anderen von der Sicht des Fensters bzw. Patientenbades.

Abbildung 35 zeigt die Aufnahme eines Patientenzimmers mit dem Kinect-Sensor des Demonstrators und die entstandene Punktwolke mit den darin erkannten Ebenen (Wandflächen, Fenstern und Türen) (oben) sowie der räumlichen Rekonstruktion des Raums (unten links). Mithilfe der Sensorinformationen wurde ein Gebäudeinventar erstellt und mit den gemessenen Werten der Praxispartner, die beim Rückbau durch die Verriegelung der Bauteile entstanden, abgeglichen.



Abbildung 31: Krankenhaus Bad Pyrmont, links: Hofansicht, rechts: Straßensicht (Quelle: Volk, KIT/IIP)

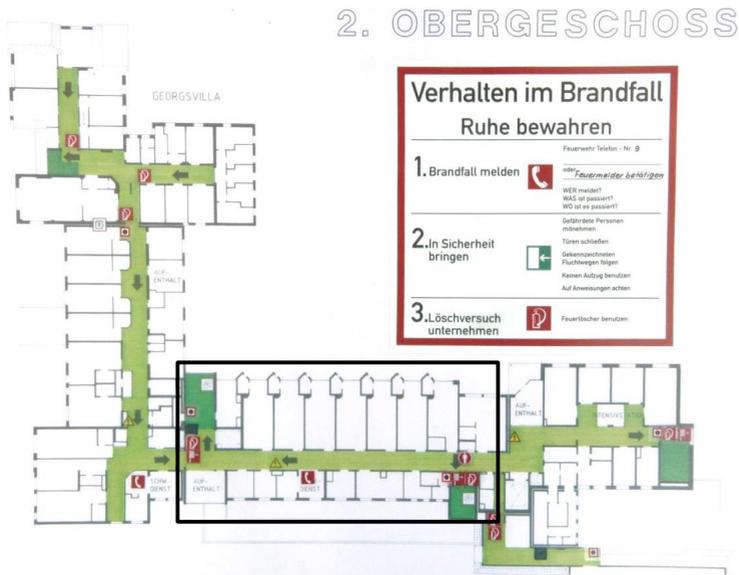


Abbildung 32: Grundriss und Fluchtplan Krankenhaus Bad Pyrmont, 2.OG mit Markierung des aufgenommenen Bereichs (Quelle: Volk, KIT/IIP)

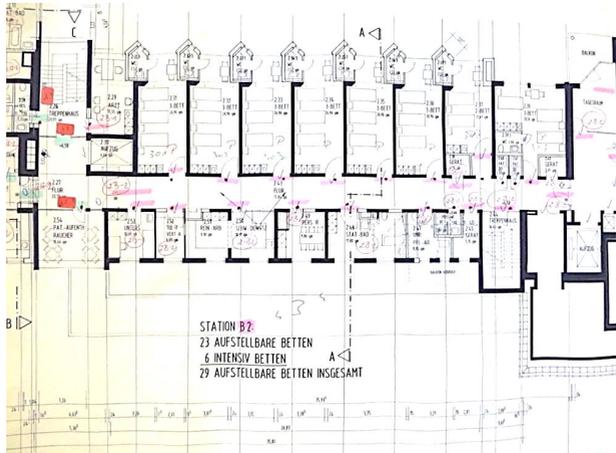


Abbildung 33: Veralteter Grundriss des Krankenhauses Bad Pyrmont, 2.OG
(Quelle: Volk, KIT/IIP)



Abbildung 34: Innenraumansichten Krankenhaus Bad Pyrmont, oben links: Gang, oben rechts: Badezimmer, unten beide: Patientenzimmer
(Quelle: Volk, KIT/IIP)

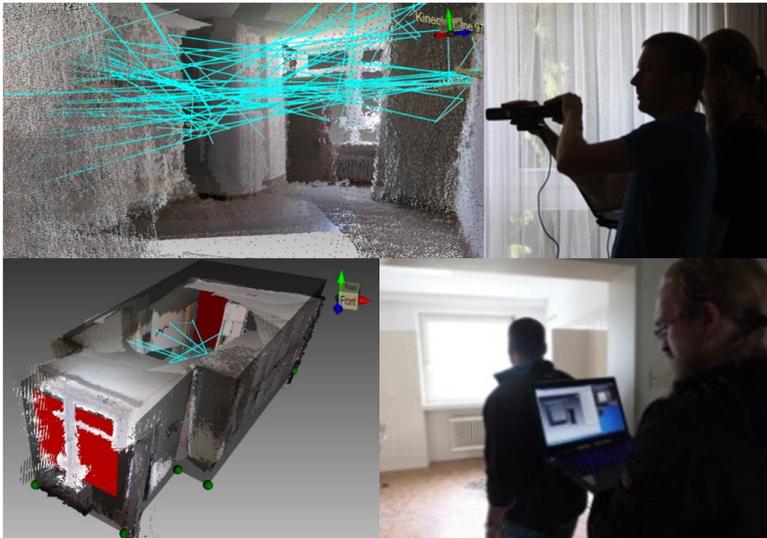


Abbildung 35: Punktwolke aus der Sensoraufnahme (links oben) und automatisch erzeugtes 3D-Modell eines Patientenzimmers im ausgewählten Gebäudebereich eines Krankenhauses in Bad Pyrmont (links unten), sowie ein Eindruck aus der Gebäudebegehung mit Laptop und Sensor (rechts oben und unten) (Quellen: IGD, KIT/IIP)

Das aufgenommene und vermessene Krankenhausgeschoss umfasst einen Bruttorauminhalt von 1503 m^3 und hat eine Bruttogrundfläche von 494 m^2 . Bei der Berechnung wird im ResourceApp-Modell eine umhüllende Triangulationsfunktion verwendet, die Vor- und Rücksprünge (wie bei den Erkern der Patientenbäder) nicht berücksichtigt. Daher handelt es sich in diesem Fallbeispiel nur um einen geschätzten Bruttorauminhalt und einer geschätzten Bruttogrundfläche. Bei einem kompakteren Grundriss wäre eine exakte Berechnung möglich (siehe Abbildung 37).

Das Krankenhausgeschoss besteht aus 30 Räumen, davon sind acht Patientenzimmer und acht Patientenbäder. Weiterhin sind sechs kleine und ein großer Sanitärraum, ein Bereitschaftszimmer, zwei Behandlungszimmer, drei kleine Personal- und Abstellräume sowie ein Flur vorhanden.

Abbildung 37 zeigt den Grundriss des aufgenommenen Krankenhauseschosses sowie das 3D-Modell in isometrischer Projektion.

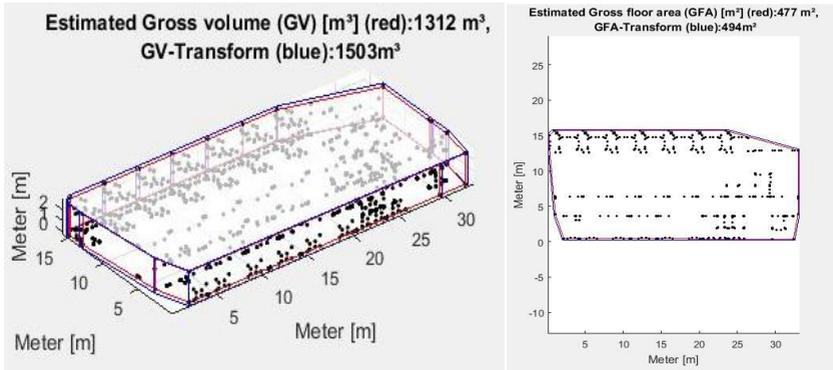


Abbildung 36: Geschätzter Bruttorauminhalt [m³] (links) und Bruttogrundfläche [m²] (rechts) des Praxisbeispiels Krankenhauseschoss

Die Auswertung der durch den ResourceApp-Demonstrator erhobenen Sensordaten zeigte, dass 26 der 30 Räume mit der ResourceApp erfasst werden konnten. Vier Räume konnten wegen Schwächen der Hardware (Kinect-Sensor) nicht erfasst werden, da diese durch ihre kleine Grundfläche kein Mindestabstand des Sensors zu den aufzunehmenden Wand-, Decken- und Bodenflächen gewährleisten konnte. Dadurch lag eine Abweichung bei den Bauteilmassen der großen Bauteile der Wände, Decken, Böden, Fenster, Türen von ca. 15 % vor. Weiterhin wurde nur ein Teil der technischen Gebäudeausstattung von dem eingesetzten Kinect-Sensor erkannt, da teilweise die Konturen und Kontraste im Gebäude bzw. in den Räumen nicht ausreichend für eine automatisierte Erkennung waren. Insgesamt wurden 9 von 36 (25%) Heizkörper und 26 von 151 (17%) elektrischen Anschlüssen erkannt. Mögliche weitere Gründe dafür sind zum Beispiel die teilweise starke Beschädigung einiger Bauteile durch den längeren Leerstand des Gebäudes, sowie die Beeinträchtigungen bei den

Raumaufnahmen durch in den Räumen verbliebene Einrichtung, Möbel, Textilien und Abfall.

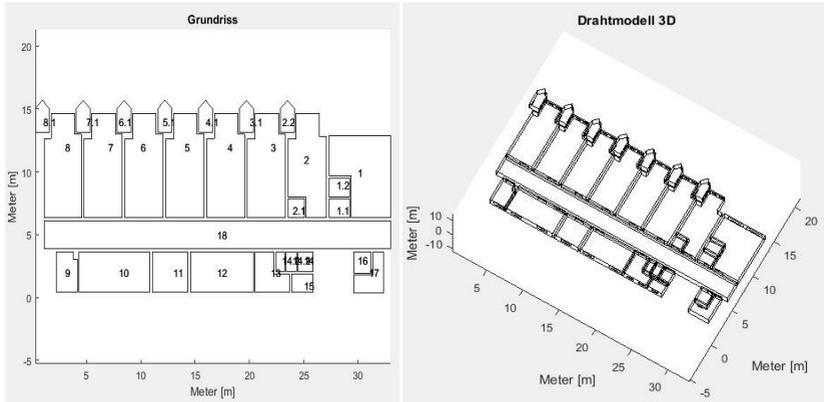


Abbildung 37: Graphische Ausgabe aus dem ResourceApp-Modell, Grundriss (links) und Drahtmodell (rechts)

Der abgegrenzte und im Vorfeld manuell aufgenommene Gebäudeteil wurde nach der Begehung selektiv zerlegt, sortiert und verwogen, um die ResourceApp-Daten zu verifizieren (vgl. Abschnitt 2.1.5). Abbildung 38 zeigt eine Gegenüberstellung der in ResourceApp berechneten und gemessenen Massen verschiedener Baustoffkategorien. Man sieht, dass sich in den gezeigten Kategorien die durch den ResourceApp-Demonstrator berechneten Massen von den gemessenen Massen im Rückbau unterscheiden. Jedoch liegen die tatsächlichen, gemessenen Werte in den errechneten Bandbreiten. Im Fall der Stromleitungen lag der gemessene Wert nah an dem erwarteten Wert. Im Fall des Dämmmaterials lag der gemessene Wert deutlich über den erwarteten Wert, jedoch unter der berechneten Obergrenze. Im Fall des Holzes lag der gemessene Wert deutlich unter dem erwarteten Wert. Insbesondere in diesem Fall berechnete das Modell eine große Bandbreite möglicher Massen, die bei Weiterentwicklung des Modells noch geeignet eingeschränkt werden könnte.

Berechnete Masse Stromleitungen			Gemessener Wert
Masse min.	Erwartete Masse	Masse max.	
211 kg	336 kg	456 kg	353 kg



Berechnete Masse Dämmmaterial			Gemessener Wert
Masse min.	Erwartete Masse	Masse max.	
99 kg	243 kg	482 kg	404 kg



Berechnete Masse Holz			Gemessener Wert
Masse min.	Erwartete Masse	Masse max.	
581 kg	2847 kg	5808 kg	1345 kg



Abbildung 38: Berechnete und gemessene Massen unterschiedlicher Abfall-fractionen im Praxisbeispiel Krankenhaus (Quelle: KIT/IIP)

Praxisbeispiel Wohnhaus Lemgo

Als Praxisbeispiel wurde ebenfalls mit Hilfe der Praxispartner ein altes Wohnhaus in Lemgo ausgewählt. Es hatte eine Bruttogrundfläche von 85m² und ein Volumen bzw. Bruttorauminhalt von ca. 677 m³ umbautem Raum (vgl. Abbildung 46) und bestand aus zwei Stockwerken (plus Dachgeschoss, ohne Keller) und zwei kleineren Nebengebäuden/Schuppen (siehe Abbildung 39 und Abbildung 43). Abbildung 39 zeigt die Straßen- und Hofansicht des Gebäudes. Ein Grundriss oder Fluchtplan des Gebäudes war nicht vorhanden.

Bei einer gemeinsamen Begehung aller Projektpartner wurde der Gebäudezustand begutachtet und entschieden, welcher Bauabschnitt für die Aufnahmen mit dem ResourceApp-Demonstrator geeignet ist. Im Erdgeschoss waren eine Küche, zwei Bäder, ein Eingangsflur, eine Diele, ein Wohnraum und ein Lagerraum. Im ersten Obergeschoss befanden sich 5 Wohnräume mit Holzdecke und Teppichboden (vgl. Abbildung 40). Abbildung 40 zeigt die Anordnung der fünf Räume im 1. OG. Im Dachgeschoss

waren ein großer Speicherraum und zwei kleinere, ausgebaute Wohnräume vorzufinden. Aufgrund der Gebäudeausstattung und des Gebäudezustandes wurde das 1.OG für die Sensorerfassung ausgewählt (vgl. Abbildung 40). Der ausgewählte Bereich bestand aus einer Diele mit Treppenhaus sowie fünf Wohnräumen. Zusätzlich wurde im Rahmen des AP3 das gesamte Gebäude für die Validierung der Inventarisierung manuell aufgemessen.



Abbildung 39: Wohnhaus in Lemgo, links: Straßenansicht, rechts: Hofansicht
(Quelle: KIT/IIP)

Insgesamt handelte es sich um 16 Räume mit 226 bei der Begehung erfassten Bauteilen, darunter 16 Decken, 16 Böden, 68 Wände, 22 Fenster, 15 Türen, 80 elektrische Anschlüsse, 2 Wasser-/Abwasser-Anschlüsse und jeweils 2 Duschen, WCs, Waschbecken und Boiler. Heizkörper waren nicht vorhanden, da in jedem Raum des Gebäudes Elektroöfen installiert waren, die jedoch zum Zeitpunkt der Begehung nicht mehr vorhanden waren.

2.1 Verwendung der Zuwendungen und Projektergebnisse

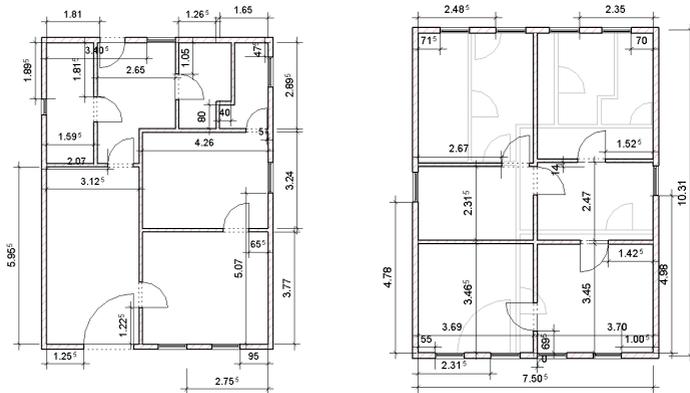


Abbildung 40: Grundriss des Wohnhauses Lemgo in Autodesk Revit, EG (links) und 1.OG (rechts) (Quelle: KIT/IIP)

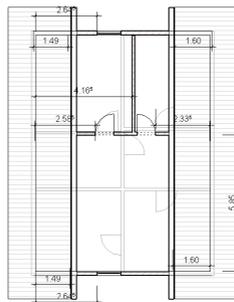


Abbildung 41: Grundriss des Dachgeschosses des Wohnhauses in Lemgo in Autodesk Revit (Quelle: KIT/IIP)

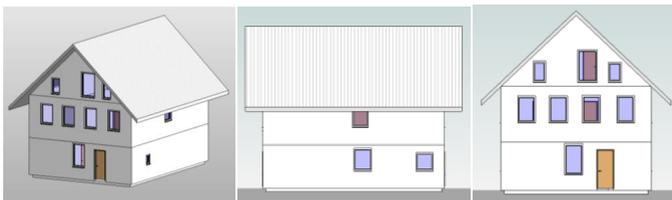


Abbildung 42: Ansichten des Wohnhauses Lemgo in Autodesk Revit (Quelle: KIT/IIP)

2 Eingehende Darstellung

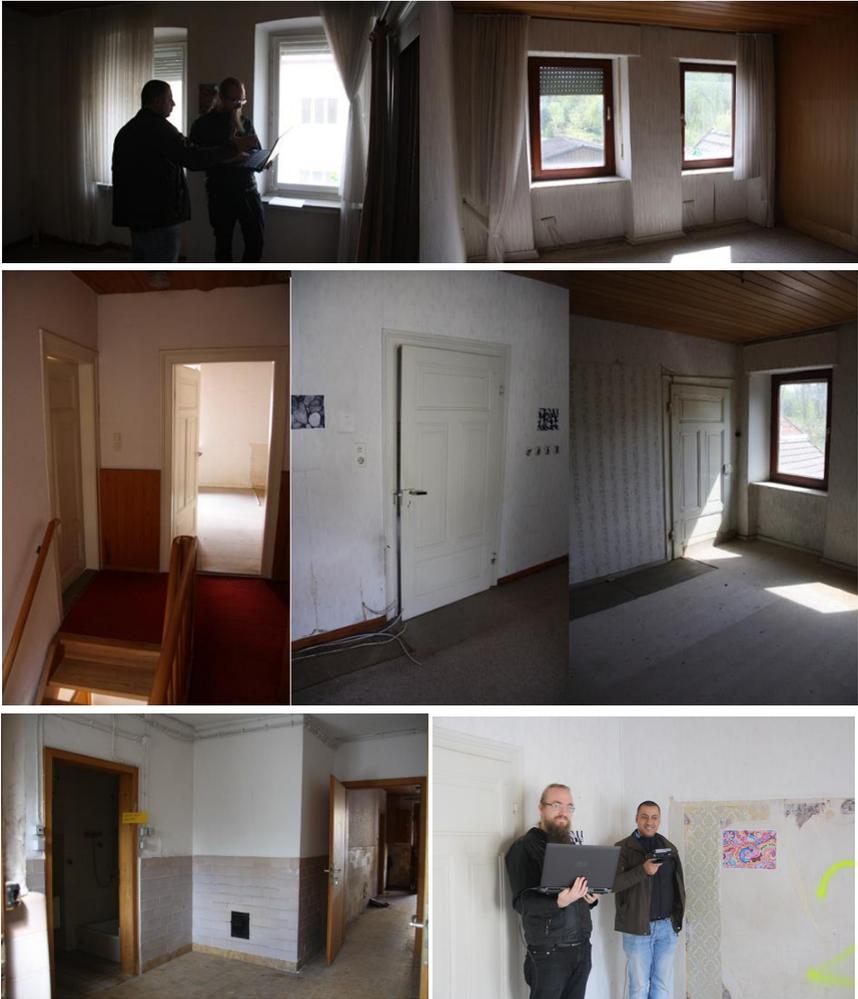


Abbildung 43: Innenraumansichten des Wohnhauses in Lemgo im 1. OG zum Zeitpunkt der Begehung und des Demonstratortests (Quelle: KIT/IIP)

Die Räume wurden durchnummeriert, fotografisch dokumentiert, es wurde mit Hilfe eines Laser-Distanzmessgerätes ein konventionelles Aufmaß

aufgenommen und die Maße (für die Verifikation der automatisch erfassten Sensordaten) manuell notiert. Parallel wurden die einzelnen Räume mit dem Demonstrator (Sensor) aufgenommen. Dabei wurden die Sensoraufnahmen in Form von Punktwolken und Videos auf einem mobilen Laptop gespeichert.

Abbildung 43 zeigt Innenraumansichten der Wohnräume des 1.OG des Wohnhauses in Lemgo sowie eine Ansicht vom Treppenabsatz des 1.OG aus dem Treppenhaus und die Diele im Erdgeschoss (unten rechts). Im Mai 2016 wurde das Gebäude mit dem ResourceApp-Demonstrator aufgenommen und manuell für die Verifikation der Sensordaten aufgemessen. Abbildung 44 zeigt die Auswertung der Sensordaten für das 1. Obergeschoss mit den fünf Wohnräumen (#1-5) und der Diele (#6) mit dem Treppenhaus.

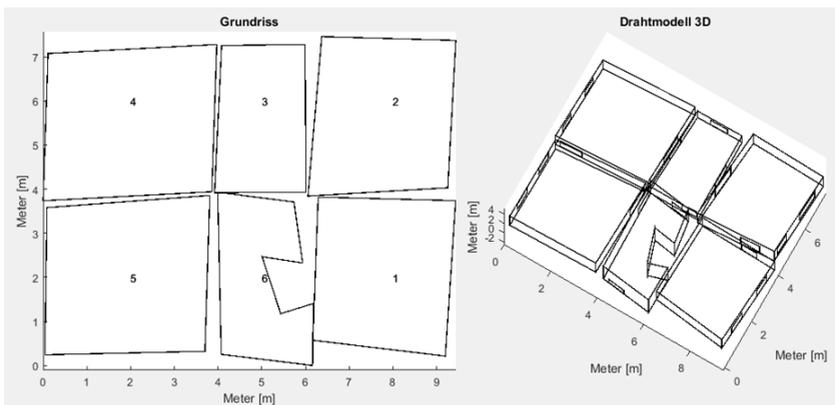


Abbildung 44: Automatisiert erzeugter Grundriss und Drahtmodell von Praxisbeispiel Wohnhaus Lemgo (1.OG) basierend auf Sensordaten (Quelle: KIT/IIP)

Abbildung 45 zeigt die Eingabemaske für das Wohngebäude Lemgo mit den bereits importierten Sensordaten und der erzeugten Raumliste (rechts) sowie den Angaben zu den Gebäudestammdaten (links) und den Gebäudeanschlüssen (Mitte). Hinsichtlich der Bauwerksgruppierung liegt

ein Wohngebäude, genauer ein Einfamilienhaus des Gebäudetyps II (Massivbau: Mauerwerkswand - Holzträgerdecke) mit einer Bodenplatte vor. Die Wände der Räume waren verputzt, teilweise tapeziert (Wohnräume) und teilweise verflieselt (Bäder). Der Boden im Erdgeschoss war mit Fliesen verkleidet, der Boden im 1.OG war mit Teppichboden belegt. Der Boden im Dachgeschoss war mit PVC ausgelegt. Im 1. OG waren die Decken mit Holzpanelen verkleidet. Die Fensterrahmen und die Türen (inkl. Rahmen) bestanden aus Holz und (im Fall der Fenster mit einfacher Verglasung).

Abbildung 46 zeigt die graphische, räumliche Auswertung des Datensatzes. Links sind die Koordinatenpunkte der Bauteile zu sehen, die von der roten bzw. blauen Umhüllenden umgrenzt sind. Die rote Umhüllende beschreibt dabei die Innenraummaße ohne Außenwände (Bruttogrundfläche ohne Standfläche der Außenwände), während die blaue Umhüllende die Innenraummaße plus Außenwände abbildet und damit die Bruttogrundfläche (BGF) darstellt. Rechts ist die Triangulation aller Bauteilkoordinaten zu sehen, die für die Berechnung der Gebäudeoberfläche (Umhüllenden) und des Bruttorauminhalts (BRI) verwendet wird. In diesem kompakten Fallbeispiel berechnet das Modell den exakten Wert, da keine Vorsprünge und Rücksprünge, Erker oder Gauben vorhanden sind.

Abbildung 47 zeigt den Grundriss und das 3D-Drahtmodell des Datensatzes Wohngebäude Lemgo in ResourceApp. Wie man beim Vergleich von Abbildung 44 und Abbildung 47 erkennen kann, besteht ein Unterschied zwischen Sensordatensatz und manuell vermessenem Datensatz. Für zukünftige Entwicklungen sollte zusätzlich eine Logik zur Berücksichtigung von Schiefe bspw. Mittels Korrekturfaktoren eingeführt werden, die bspw. die Höhe der Fußböden nachträglich innerhalb eines Schwellwertes oder einer Bandbreite korrigiert, oder die eine Prüfung der Rechtwinkligkeit der Wände zueinander prüft. Da in der Fallstudie Krankenhaus Bad Pyrmont auch Räume mit diagonal stehenden Wänden vorhanden waren, wurde bei der Entwicklung bzw. automatischen Prüfung des Datensatzes zu-

nächst auf die Rechtwinkligkeitsprüfung verzichtet. Angesichts von Abbildung 44 könnte diese aber im Rahmen der weiteren Entwicklung des Demonstrators sinnvoll sein.

The screenshot shows the 'ResourceApp - Gebäudeerfassung' window. It is divided into three main sections: 'Gebäudestammdaten' (left), 'Gebäudeanschlüsse (TGA)' (middle), and 'Raumstammdaten' (right). A 'Speichern' button is located at the bottom center.

Gebäudestammdaten

Gebäude-ID: 459313

Gebäude-Name: EFH Lemgo

Straße, Nr.: Orpingstr.

PLZ: 32657

Gemeinde: Lemgo

Bundesland: Niedersachsen (NI)

Bauwerksuntergruppe: 7111 Wohngebäude

Bauwerksklasse: 7111 Wohngebäude ohne Wohnheime

Bauwerksunterklasse: 71111 Einfamilienhaus (EFH)

Gebäudetyp: II - Massivbau: Mauerwerkwand - Holzträ...

Baujahr:

Baualtersklasse: vor 1918

Anzahl Geschosse: 3 (inkl. Keller) Keller vorhanden

Dachform: Steildach

Fundamentart: 32400 Unterböden/Bodenplatten

Bruttoflächen (BR), nach DIN 277: m²

Bruttogrundfläche (BGF), nach DIN 277: m²

Gebäudeanschlüsse (TGA)

x, y, z - Koordinaten Parent

Abwasser (AW): 3 0 0 4

Wasser (TW): 3 0 0 4

Gas (GAS): 0 0 0 0

Heizung/Wärme (HEIZ): 0 0 0 0

Lüftung (LUFT): 0 0 0 0

Strom (STROM): 3 0 0 4

Fernmelde-Anlagen (IT): 0 0 0 0

Förderanlagen (FÖRD): 0 0 0 0

TW: Sternnetz eingeschleifte Anschlüsse... Ringleitungssystem

HEIZ: Sternnetz Etagensternnetz

STROM: Sternnetz Etagensternnetz

Raumstammdaten

ID	Name	Raumtyp	Bodenbelag	Torrahmen
1	Room 1.EG	Living Ro	Tiles	<input type="checkbox"/>
2	Room 2.EG	Living Ro	Tiles	<input type="checkbox"/>
3	Room 3.EG	Bathroom	Tiles	<input type="checkbox"/>
4	Room 4.EG	Bathroom	Tiles	<input type="checkbox"/>
5	Room 5.EG	Bathroom	Tiles	<input type="checkbox"/>
6	Room 5.EG	Living Ro	Tiles	<input type="checkbox"/>
7	Room 7.EG	Living Ro	Tiles	<input type="checkbox"/>
8	Room 1.OG	Living Ro	Wood	<input type="checkbox"/>
9	Room 2.OG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>
10	Room 3.OG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>
11	Room 4.OG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>
12	Room 5.OG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>
13	Room 5.OG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>
14	Room 1.DG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>
15	Room 2.DG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>
16	Room 3.DG	Living Ro	Timber	<input type="checkbox"/>

Abbildung 45: Eingabemaske 1 für das Wohngebäude Lemgo mit den bereits importierten Sensordaten und der erzeugten Raumlite (rechts) sowie den Angaben zu den Gebäudestammdaten (links) und den Gebäudeanschlüssen (Mitte) (Quelle: KIT/IIP)

2 Eingehende Darstellung

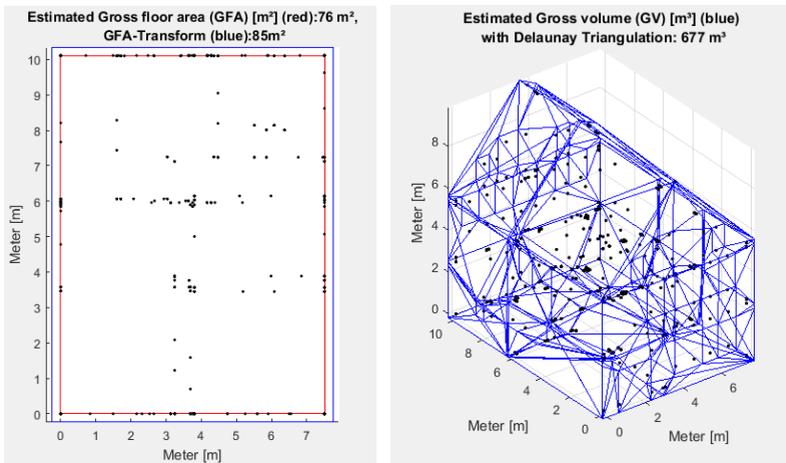


Abbildung 46: Räumliche Abschätzung des umbauten Raums des Wohngebäudes Lemgo hinsichtlich der Bruttogrundfläche [m²] (links) und des Bruttorauminhalts [m³]

Mithilfe der Sensorinformationen wurde ein Gebäudeinventar erstellt und mit den gemessenen Werten der Praxispartner, die beim Rückbau durch die Verriegelung der Bauteile entstanden, abgeglichen.

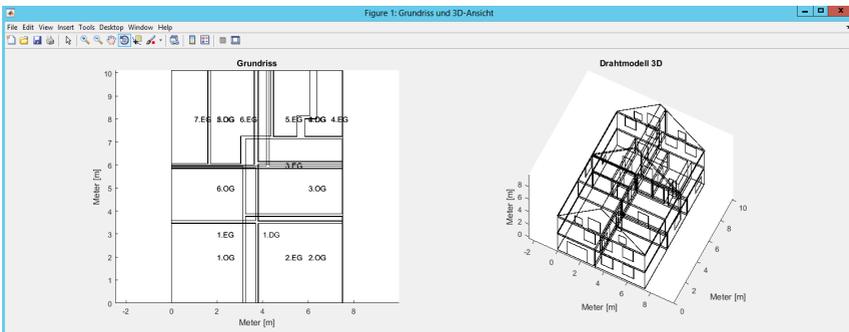


Abbildung 47: Grundriss und 3D-Drahtmodell in ResourceApp (gesamtes Gebäude)

Die Auswertung der durch den ResourceApp-Demonstrator erhobenen Sensordaten zeigte, dass alle 6 der 6 Räume im 1.OG mit der ResourceApp erfasst werden konnten. Diese automatisiert erfassten 6 Räume im 1.OG enthalten 90 Bauteile von denen 29 elektrische Anschlüsse, 28 Wände, 6 Decken, 6 Böden, 10 Fenster und 11 Türen im Datensatz enthalten sind. Von insgesamt 36 elektrischen Anschlüssen wurden 29 erkannt (80%), von 24 Wänden wurden 28 erkannt (116%), von 5 Türen wurden 5 erkannt (100%) und von den Decken, Fenstern und Böden wurden 100% erkannt. Insgesamt zeigen die Zahlen, dass Decken, Böden, Türen und Fenster zuverlässig erkannt werden können und dass der Anteil der erkannten elektrischen Anschlüsse in dieser Fallstudie deutlich höher ist, als in der Fallstudie Krankenhaus Bad Pyrmont. Jedoch zeigen die Prozentzahlen >100%, dass es durch die Innenraumaufnahme auch möglich ist, Bauteile mehrfach aufzunehmen, die in Zukunft in der Datenkorrektur berücksichtigt werden müssen. Dies betrifft insbesondere Wände. Mögliche Gründe hierfür sind kleine Vorsprünge oder Schächte, die vom Kinect-Sensor als kurze Wandstücke interpretiert werden, die aber im manuell erstellten Referenzdatensatz der Einfachheit halber vernachlässigt wurden. Der Teil der technischen Gebäudeausstattung, der von dem eingesetzten Kinect-Sensor nicht erkannt wurde, waren die elektrischen Anschlüsse der Lampen an den Raumdecken. Mögliche Gründe dafür sind zum Beispiel die fehlenden Lampengehäuse und die von der Decke hängenden Kabel, die als solche bspw. aufgrund mangelnder Auflösung des Sensors nicht erkannt werden konnte. Sonst waren die Konturen und Kontraste im Gebäude bzw. in den Räumen ausreichend für eine automatisierte Erkennung bzw. wurden im Rahmen der Begehung mit Features und Markern entsprechend ausgestattet.

Die Inventarisierung der Bauteile im gesamten Gebäude erfolgte unter der Annahme von Außenwandstärken von 0,175 m, Innenwandstärken von 0,115 m, Decken- und Bodendicken von 0,2 m sowie Bodenplattendicken von 0,25 m. Dabei entstand folgendes automatisiert erstelltes Inventar für das gesamte Wohnhaus:

2 Eingehende Darstellung

Tabelle 29: Rohstoffinventar Wohngebäude Lemgo

Rohstoff	Min. Masse [kg]	Erwartete Masse [kg]	Max. Masse [kg]
Beton, Kies, Naturstein	12675	45341	54402
Ziegelstein	65681	47892	120869
Putz, Mörtel, Estrich	1165	4659	6989
Fliesen, Sanitärkeramik	1505	1530	8407
Stahl	65	706	3387
Glas	76	166	274
Holz (behandelt)	4077	12074	18291
Kunststoff (PP, PE)	8	8	8
Kunststoff (PVC, ohne Kabel)	14	14	14
Dämmung	14	35	69
Kabel	52	255	799
Teppich/Textilien	46	46	114

Berechnete Masse Stromleitungen			Gemessener Wert ¹⁴
Min. Masse	Erwartete Masse	Max. Masse	
52 kg	255 kg	799 kg	280 kg



Berechnete Masse Dämmmaterial			Gemessener Wert
Min. Masse	Erwartete Masse	Max. Masse	
14 kg	35 kg	69 kg	160 kg



Berechnete Masse behandeltes Holz			Gemessener Wert
Min. Masse	Erwartete Masse	Max. Masse	
4077 kg	12074 kg	18291 kg	17870 kg



Abbildung 48: Berechnete und gemessene Massen unterschiedlicher Abfallfraktionen im Praxisbeispiel Wohngebäude Lemgo (Quelle: KIT/IIP)

¹⁴ vgl. Abschnitt 2.1.5.3 im Absatz „Praxisbeispiel Einfamilienhaus in Lemgo“

Der abgegrenzte und im Vorfeld manuell aufgenommene Gebäudeteil wurde nach der Begehung selektiv zerlegt, sortiert und verwogen, um die ResourceApp-Daten zu verifizieren (vgl. Abschnitt 2.1.5). Abbildung 38 zeigt eine Gegenüberstellung der in ResourceApp berechneten und gemessenen Massen verschiedener Baustoffkategorien.

Es zeigt sich, dass sich in den gezeigten Kategorien die durch den ResourceApp-Demonstrator berechneten Massen von den gemessenen Massen im Rückbau unterscheiden. Jedoch liegen die tatsächlichen, gemessenen Werte, bei den Stromleitungen und beim Holz in den errechneten Bandbreiten. Im Fall der Stromleitungen lag die der gemessene Wert sehr nah an dem erwarteten Wert. Im Fall des Holzes lag der gemessene Wert deutlich über dem erwarteten Wert, aber unterhalb der berechneten Obergrenze. Im Fall des Dämmmaterials lag der gemessene Wert deutlich über den erwarteten Wert und über der berechneten Obergrenze.

2.1.3.4 Ergebnistransfer: Deutsches Rohstoffgebäudeinventarkataster (AP3.4)

Das anfangs eingeplante AP3.4. (Ergebnistransfer: Deutsches Rohstoffgebäudeinventarkataster), das ursprünglich für die zweite Projektphase 2 vorgesehen war, wurde aufgrund von Mittelkürzung nicht erarbeitet.

Fazit AP3

Im Rahmen des dritten Arbeitspakets wurde die Systemarchitektur des ResourceApp-Demonstrators entwickelt, und es wurden zusammen mit den Praxispartnern geeignete Testgebäude identifiziert, anhand dessen die Demonstrator-Entwicklung durchgeführt werden kann. Außerdem wurde die Methodik für Abschätzung von sichtbaren und verdeckten Bauteilen zunächst für eine Fertigteilarge entwickelt und darauf aufbauend für Wohn- und Nicht-Wohngebäude weiterentwickelt.

Der funktionsfähige Demonstrator wurde an Teilen eines Wohngebäudes und eines Nicht-Wohngebäudes auf Rückbau-Baustellen getestet. Parallel zur Methodikentwicklung und zum Demonstratorfortschritt wurde eine,

das AP3 begleitende Recherche durchgeführt, da die Komplexität (d.h. die Anzahl der Bauteile und der Baustoffe) sukzessive erhöht wurden.

2.1.4 Hardwaredemonstrator AP4) (IGD – Neyir Sevilmis)

Die folgende Tabelle 30 zeigt die Untergliederung des vierten Arbeitspaketes in die Teilschritte AP4.1 (Planung und Auswahl der Hardware (HW)-Plattform), AP4.2 (Komponenten- und Integrationstest) und AP4.3 (Feinabstimmung und Optimierung Software/Hardware), die im Folgenden detailliert beschrieben werden.

Tabelle 30: Untergliederung des Arbeitspakets 4

AP4.1: Planung und Auswahl der Hardware (HW)-Plattform	
• Meilenstein M9: ResourceApp-Hardware ausgewählt	15.10.2013 (Monat 6)
AP4.2: Komponenten- und Integrationstest	
• Meilenstein M10: Erste Version Software fertig für Test	15.12.2014 (Monat 21)
• Meilenstein M13: Finaler Prototyp Hardware Demonstrator	15.01.2016 (Monat 33)
AP4.3 Feinabstimmung und Optimierung Software/Hardware	
• Meilenstein M11: Erster Prototyp Hardware Demonstrator	15.10.2014 (Monat 18)
• Meilenstein M12: Erster Prototyp Hardware Demonstrator	15.04.2015 (Monat 24)
• Meilenstein M14: Finaler Prototyp Hardware Demonstrator	15.02.2016 (Monat 34)
Outputs	
• ResourceApp-System bestehend aus mobiler und stationärer Komponente (erste Version und verbesserte Version nach Optimierung) als Input für AP5	

Das Ziel von AP4 ist es, eine HW-Plattform zu spezifizieren, welche den Anforderungen der Anwenderpartner gerecht wird. Die Ziel-HW-Plattform soll mobil einsetzbar sein, damit beim Begehen von Räumlichkeiten eine direkte Aufnahme der räumlichen Umgebung erfolgen kann und somit eine in Echtzeit berechnete 3D-Rekonstruktion des Raumes ermöglicht wird,

die der Anwender direkt betrachten kann. Der in 3D rekonstruierte Raum dient schließlich als Grundlage für die Ressourcenschätzung.

2.1.4.1 Planung und Auswahl der Hardware (HW)-Plattform

Im Rahmen von AP4 wurden zunächst verschiedene Verfahren der 3D-Rekonstruktion gegenübergestellt. Dabei wurden nicht nur Erkenntnisse aus der Literatur in Betracht gezogen, sondern es wurden auch praktische Tests durchgeführt. Die folgenden Verfahren wurden näher untersucht:

- **Laserscanning:**

Bei diesem Verfahren wird die Oberfläche eines Objekts zeilen- bzw. rasterartig mit einem Laserstrahl abgetastet, um diese zu vermessen. Beim 3D-Laserscanning wird als Ergebnis eine Punktwolke erzeugt, welches das vollständige Abbild der aufgenommenen Szene darstellt. Auf der Grundlage der Punktwolke wird eine geschlossene Oberfläche aus Dreiecken (Dreiecksnetz) konstruiert. Beim Laserscanning unterscheidet man noch zwischen Near-field- und Long-Range-Scannern:

- **Laser Near Field (dt.: Nahfeld-Scanner):** Hauptanwendungsgebiet bilden hier die von elektronischen Bauteilen abgegebene Strahlungsmessung bis auf hundertstel Millimeter genau.
- **Laser Long Range (dt.: Fernfeld-Scanner):** Hauptanwendungsgebiet sind hier die Aufnahme von großen Gebäuden, Fabriken und Landschaften (z.B. Inseln), die eine hohe Laserreichweite erfordern.

- **Structured-Light (dt.: Steifenprojektion)**

Dieses Verfahren verwendet ein Kamera-Projektor-System. Es projiziert ein Farbstreifenmuster auf das Zielobjekt, welches die Digitalkamera aufnimmt. Die räumliche Tiefe berechnet es aus der Verzerrung des aufgenommenen Musters. Als Ergebnis erhält man ein Drahtgitter, welches 3D Programme auch als solides 3D Objekt darstellen.

- **Multi-View-Stereo (MVS):**

Bei diesem Ansatz werden mehrere Bilder aus verschiedenen Perspektiven eines Objekts vereinigt, um zu jedem Bild eine Tiefenkarte und Kameraposition zu ermitteln. Mehrere Tiefenkarten erzeugen zusammen eine Punktwolke des Objektes. Die Berechnungen des MVS-Ansatzes sind im Allgemeinen sehr aufwendig und können nicht in Echtzeit erfolgen.

Unter der Berücksichtigung der Echtzeitfähigkeit, Mobilität, Handhabbarkeit und Ergebnisgenauigkeit hat die Evaluierung ergeben, dass das Structured-Light Verfahren für unseren Anwendungsbereich in ResourceApp das geeignete Verfahren ist. Die mit dem Structured-Light Verfahren in kurzer Zeit erreichbare Messpunktdichte erlaubt präzise, flächenhafte Aussagen über die Geometrie eines Objekts. Structured-Light Systeme werden unter anderem zur Formbestimmung und Formprüfung in industriellen Anwendungen sowie bei der Digitalisierung von Kunstobjekten für Dokumentationszwecke eingesetzt.

2.1.4.2 Komponenten- und Integrationstest

Damit das Structured-Light Verfahren auch praxistauglich angewendet werden kann, braucht man ein entsprechendes HW-Setup, welches im Allgemeinen folgende Komponenten umfassen muss:

- Streifenprojektionssensor: kann aus einem oder mehreren Musterprojektoren bestehen
- Mindestens eine analoge oder digitale Videokamera

Mittlerweile haben sich Systeme etabliert, bei denen ein Projektor und zwei Kameras zum Einsatz kommen, wie z.B. bei der Microsoft (MS) Kinect. Bei der MS Kinect sorgen ein Infrarot-Projektor und ein Infrarot-Sensor für die Tiefeninformationen, während eine dazwischenliegende Kamera die RGB-Farbinformationen erfasst. Mit Hilfe der MS Kinect sind 3D-Rekonstruktionen von Räumlichkeiten in Echtzeit möglich, welches eines der Kernanforderungen unserer Anwenderpartner war.

Die Entscheidung bezüglich der HW-Plattform für ResourceApp fiel auf die MS Kinect in Kombination mit einem Laptop, der über eine leistungsstarke Grafikkarte verfügt. Die wesentlichen Eckdaten der Grafikkarte sind: 4GB Speicher, 2,369 GFLOPS Rechenleistung. Die MS Kinect sowie der Laptop wurden mit dem in ResourceApp deklarierten Budget für Sachmittel beschafft.



Abbildung 49: Microsoft Kinect Tiefenkamera [Golem 2016]

Die Kinect Kamera ist über ein USB-Kabel mit dem Laptop verbunden. Die Integration beider Komponenten (Laptop und Kinect-Kamera) erfolgt über eine zusätzliche Treibersoftware der Kinect, die auf dem Laptop installiert ist. Die mit der Kinect-Kamera aufgenommenen Farb- und Tiefenbilder können somit direkt zum Laptop übertragen und weiterverarbeitet werden.

2.1.4.3 Feinabstimmung und Optimierung Software/Hardware

Damit die ResourceApp robust funktioniert, ist eine Feinabstimmung der Software- und Hardwarekomponenten unter verschiedenen Umgebungsbedingungen erforderlich. Insbesondere die unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen (z.B. helle und dunkle Räume, Schattenwürfe) in Räumen sowie die Häufigkeit charakteristischer Merkmale von Gegenständen in den Räumen (z. B. Heizkörper, Tapeten, Türen und Fenster) haben einen Einfluss auf die Qualität der 3D-Rekonstruktion und bildbasierte Objekterkennung. Die Herausforderung bestand darin, eine Feinabstimmung zu finden, die für möglichst viele Fälle mit variierenden Bedingungen zuverlässig funktioniert. Für die Umsetzung der Feinabstimmung wurden Konfigurationsdateien erstellt, die verschiedene Parameter beinhalten. Die Parameter können dann je nach Umgebungsbedingung angepasst

werden. Auf diese Weise konnte die ResourceApp dynamisch und flexible angepasst werden, ohne dass die Software geändert werden musste.

Fazit AP4:

In ResourceApp setzen wir das Structured-Light-Verfahren für die 3D-Rekonstruktion von Räumen bzw. Gebäuden ein. Die mit diesem Verfahren in kurzer Zeit erreichbare Messpunktdichte erlaubt präzise, flächenhafte Aufnahmen der Raumgeometrie. Die zugrunde liegende HW-Plattform besteht aus einer Microsoft Kinect-Kamera und einem leistungsstarken Laptop. Im Zuge der Verbesserung der Praxis-tauglichkeit der ResourceApp, sind weitere Recherchearbeiten gelaufen. Die Recherchen bezogen sich auf aktuelle Trends und Entwicklungen auf dem Markt der mobilen Tablets. Die Rechercheergebnisse haben ergeben, dass die Tablets von ihren Leistungsdaten her noch nicht für die Anforderungen in ResourceApp geeignet sind. Der Hersteller von Grafikprozessoren Nvidia Corporation hat allerdings angekündigt, einen speziell für mobile Geräte spezifizierten Grafikprozessor auf den Markt zu bringen, der von den Leistungsdaten her durchaus für ResourceApp in Betracht gezogen werden kann. Beobachtungen der aktuellen Trends auf dem Markt der mobilen Tablets werden über die Projektlaufzeit hinaus verfolgt, um die Handhabbarkeit der ResourceApp in weiter-führenden Projekten zu verbessern.

2.1.5 Praxisverifikation (ICT – Ansilla Bayha/Christian Stier)

Die folgende Tabelle 31 zeigt die Untergliederung des fünften Arbeitspaketes in die Teilschritte AP5.1 (Definition von Schnittstellen und Anforderungen), AP5.2 (Verifikationsphase I (Funktionstest) bei Praxispartnern) und AP5.3 (Verifikationsphase I (Funktionstest) bei Praxispartnern), AP5.4 (Übertragung auf andere Produkte und Branchen) und AP5.5

(Dienstleistungsentwicklung durch die Praxispartner), die im Folgenden detailliert beschrieben werden.

Tabelle 31: Untergliederung des Arbeitspakets 5

AP5.1: Definition von Schnittstellen und Anforderungen	
AP5.2: Verifikationsphase I (Funktionstest) bei Praxispartnern	
• Meilenstein M15: Finale Version Software fertig für Test	15.04.2015 (Monat 24)
AP5.3 Verifikationsphase I (Funktionstest) bei Praxispartnern	
AP5.4 Übertragung auf andere Produkte und Branchen	
• Meilenstein M16: Fachgespräche mit potentiellen Anwendern aus anderen Branchen sind geführt und deren Auswertung liegt vor	15.04.2015 (Monat 24)
AP5.5 Dienstleistungsentwicklung durch die Praxispartner	
Outputs	
<ul style="list-style-type: none"> • Hinweise und Anforderungen für Software und Hardware sowie Anpassungsarbeiten als Input für AP2 und AP4 • Test-Szenarien als Input für AP2 und AP4 • Prognostizierte und gemessene Rohstoffinventare bzw. zugehörige Volumina und Längen als Input für AP2 und AP3 • Ökonomische, technische und rechtliche Rahmenbedingungen für Abriss und Rückbauunternehmen als Input für AP3 • Hinweise zur Effizienzerhöhung bei Rückbau- und Abbruchvorhaben für AP1 • Anforderungsprofil für ResourceApp 2.0 zur Ergebnisverwertung des Vorhabens • Dienstleistungsansatz 	

2.1.5.1 Definition von Schnittstellen und Anforderungen

Dieser Arbeitsschritt wurde zweimal durchgeführt, zunächst zu Beginn des Projektes um die Erwartungen und Anforderungen der Praxispartner zu erfassen und im Projekt umzusetzen.

Zunächst wurden die äußeren technischen Anforderungen erfasst:

- Robustes baustellengeeignetes System
- Autarke Energieversorgung (Reichweite mindestens 8 h)
- Tragbares Gerät
- Einfache Bedienung

In abzubrechenden Gebäuden herrschen teilweise recht unterschiedliche Rahmenbedingungen vor, oft sind die Gebäude nicht ganz leer und müssen vor dem eigentlichen Abbruch entrümpelt werden. Zum Teil sind die Gebäude bei Besichtigung schon von den Versorgungsleitungen getrennt, so dass kein Strom und Licht mehr genutzt werden kann.

Neben den äußeren Anforderungen galt es festzulegen, welche Bauteile die App in welcher Projektphase erkennen können soll.

Tabelle 32: Anforderung an die ResourceApp in unterschiedlichen Projektphasen

Kriterium	Phase 1	Phase 2	
	Muss	Soll	Kann
Erkennung von Steckdosen		x	
Erkennung von Heizkörpern		x	
Erkennung von Lampen		x	
Erkennung von Wänden	x		
Erkennung von Schadstoffen			x
Erstellung eines Gebäudemodells	x		
Berechnung /Rekonstruktion verdeckter Bauteile z.B. Dachstuhl		x	
Erfassung von Oberflächen mit Textur und Farbe			x

Neben den zu erkennenden Bauteilen, sind Schadstoffe ein wichtiges Thema, anhand von Baualter und Nutzungsart lassen sich viele Verdachtsmomente erahnen, versteckte Schadstoffe können von erfahrenen Fachleuten an bestimmten Stellen entdeckt werden. Vielfach liegt bereits ein Schadstoffgutachten vor der Begehung durch die Abbruchunterneh-

men vor, aber auch, dass ist keine Garantie dafür, dass nicht beim eigentlichen Abbruch weitere Schadstoffe entdeckt werden, die dann gesondert entsorgt werden müssen. An dieser Stelle sind erfahrene Fachleute erforderlich, die diese auch während dem Abbruch erkennen und die entsprechenden Maßnahmen ergreifen.

Gegen Ende des Projektes wurde nochmals ein Fragebogen zu technischen Assistenzsystemen beim Gebäuderückbau, der Gebäudesanierung und anderen Dienstleistungen im Gebäudebereich erstellt und verteilt. Hintergrund dazu war, im Rahmen des Verwertungsplans der Projektergebnisse von ResourceApp, Informationen, Anforderungen etc. von potentiellen Anwendern des ResourceApp-Ansatzes abzufragen und auszuwerten. Hier lag der Schwerpunkt auf der Verwertung der Ergebnisse.

2.1.5.2 Auswahl der Befragten

Bei der Auswahl der Befragten wurde bewusst darauf verzichtet über Verteillisten bspw. von Verbänden (Deutscher Abbruchverband etc.) zu gehen, da dabei erfahrungsgemäß der Rücklauf sehr gering ausfällt. Somit wurde entschieden, Praktiker gezielt, persönlich anzuschreiben. Ausgewählt wurden Personen und Unternehmen aus den Branchen Abbruch, Schadstoffsanierung, Recycling, Wohnungs(bau)verwaltung, Architektur, Ingenieurdienstleistung, (Schadstoff)gutachten und Wohnraumvermittlung (Makler).

2.1.5.3 Aufbau des Fragebogens

Der Fragebogen beinhaltete 17 Fragen. Die ersten Fragen (Frage 1 bis Frage 4) zielten auf den Stand der Technik und den damit verbundenen aktuell verwendeten Hilfsmitteln bei der Begehung/Bewertung von Gebäuden ab. Die Frage 5 ging gezielt auf die erwarteten Anforderungen der ResourceApp ein, Frage 6 diente mit der Abfrage möglicher Konkurrenzsysteme der Bestätigung des Alleinstellungsmerkmals des ResourceApp-Ansatzes. Mit Frage 7 sollte ein Interesse als Testunternehmen und damit

das mögliche Marktpotenzial abgefragt werden. Die Fragen 8, 9 und 10 dienten der Abfrage der Anschaffungs- und Zahlungsbereitschaft. Die folgenden Fragen 11 bis 16 dienten der Abfrage von Daten konkret zu den angeschriebenen Unternehmen, hinsichtlich Ansprechpartner, Unternehmensart und -größe, sowie Wirkungsradius.

Abschließend bestand die Möglichkeit sonstige Anmerkungen, Hinweise und Wünsche als Freitext anzugeben. Die meisten Fragen wurden zum Ankreuzen gestaltet, bei einigen bestand die Möglichkeit einen Freitext einzutragen.

2.1.5.4 Einzelne Fragen

Im Folgenden werden die Fragen des Fragebogens vorgestellt und erläutert.

Frage 1

1. Welche Hilfsmittel nutzen Sie heute bei der Begehung von Gebäuden für das Aufmaß ?			
Meterstab und Papier (Handskizze)	<input type="radio"/>	Laserentfernungsmesser ohne Kopplung an mobile Endgeräte	<input type="radio"/>
3D-Laserscanner	<input type="radio"/>	Laserentfernungsmesser mit Kopplung an mobile Endgeräte (auch mit weiterer Software für 3D-Modellierung)	<input type="radio"/>
weitere			

Frage 1 zielte konkret auf dem Stand der Technik bzgl. des **Aufmaßes** bei einer Gebäudebegehung. Es standen sowohl vordefinierte Antwortmöglichkeiten, als auch ein Freifeld für andere Hilfsmittel zur Verfügung.

Frage 2

2. Welche Hilfsmittel nutzen Sie heute bei der Begehung von Gebäuden als Grundlage für die Angebotserstellung im Hinblick auf die Massenbilanzierung . Also der Erfassung der Massen der einzelnen Baustoffe?					
persönliche Erfahrungswerte	<input type="radio"/>	Fotodokumentation	<input type="radio"/>	Bildererkennungssysteme	<input type="radio"/>
weitere, wenn ja, welche?					

Um Kenntnisse darüber zu gewinnen, ob bereits alternative Systeme zur „klassischen“ Bewertung auf Basis von persönlichen Erfahrungswerten genutzt werden, bot Frage 2 die Möglichkeit andere Vorschläge zu wählen, oder ergänzende Angaben zu machen.

Frage 3

3. Welche Hilfsmittel nutzen Sie heute bei der Begehung von Gebäuden zur Schadstofferkennung bzw. Erstellung eines Schadstoffgutachtens?	
persönliche Erfahrungswerte (bspw. anhand des Baujahrs oder der Bauart) <input type="radio"/>	Probennahme (inkl. Kernbohrung) mit anschließender Laborauswertung <input type="radio"/>
Vorortanalyse mit stationären oder mobilen Analysegeräten	
Wenn ja, für welche Schadstoffe?:	<input type="radio"/>
Wenn ja, welche Geräte?:	

Die Schadstofferkennung war zwar kein Bestandteil des ResourceApp-Demonstrators, es zeigte sich jedoch im Verlauf des Vorhabens, dass Schadstoffe beim Rückbau eine große Rolle spielen. Gerade im Hinblick auf mögliche Folgeprojekte sollte mit dieser Frage die Grundlage für die Anforderungen an mögliche (mobile) Sensoren zur Schadstoffdetektion gelegt werden. Somit wurde gezielt nach Art der Schadstoffe und den verwendeten Geräten gefragt.

Frage 4

4. Welche Hilfsmittel nutzen Sie heute bei der Angebotserstellung und Rückbauplanung ?	
persönliche Erfahrungswerte (bspw. anhand des Baujahrs oder der Bauart) <input type="radio"/>	
Spezielle Software, wenn ja welche?	<input type="radio"/>

Um Informationen zu am Markt verwendeten Software-Tools zu erhalten, wurde in Frage 4 angefragt, ob spezielle Software zur Angebotserstellung und Rückbauplanung verwendet wird.

Frage 5

5. Im Forschungsprojekt ResourceApp wird derzeit ein mobiles System entwickelt, das die Erschließung der Ressourcen beim Rückbau von Gebäuden unterstützen und erleichtern soll. Welche Eigenschaften erwarten Sie von einem solchen Gerät, bzw. was sollte das System leisten? (Mehrfachnennungen möglich)		
Digitales Aufmaß der Innenräume	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Digitales Aufmaß der Gebäude-Außenhülle	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
3D-Modellierung	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Video der Begehung	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Fotos mit Zuordnung zu Räumen	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Schnittstelle an Software, wenn ja an welches System?	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Erkennung und Erfassung von Objekten wie Türen, Fenster, Heizkörper etc.	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Welche Objekte sind für Sie besonders relevant (eigene Nennungen)?		
Rückbauplanung	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Schadstofferkennung	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Zeitersparnis bei der Angebotserstellung für Rückbau oder Sanierung bzw. bei der Schätzung des Objektwertes.	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Reproduzierbare Erfassung von Gebäudedaten	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Sonstige Erwartungen?		

Frage 5 bildet die Basis für die Erstellung eines Anforderungskatalogs für die Weiterentwicklung der ResourceApp. Dabei wurden sowohl Antwortmöglichkeiten vorgegeben, als auch Raum für eigene Ergänzungen gelassen.

Frage 6

6. Kennen Sie Systeme welche die von Ihnen gewünschten Anforderungen erfüllen?	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
Wenn ja, welche?		

Als eine entscheidende Frage zur Abgrenzung von möglichen Konkurrenzprodukten wurde Frage 6 formuliert.

Frage 7

7. Wären Sie bei einer Markteinführung interessiert, als Testunternehmen mit-zuwirken?	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
---	-----------------------------	-------------------------------

Die Frage 7 diente dazu Erkenntnisse darüber zu gewinnen, ob die Idee einer „ResourceApp“ überhaupt den Bedarf der Praxisanwender adressiert und um eine Datenbank für mögliche Testunternehmen zu generieren.

Fragen 8 und 9

8. Wäre es für Ihr Unternehmen von Interesse ein solches System anzuschaffen ?	ja <input type="radio"/>	nein <input type="radio"/>
9. Würden Sie ein solches System tendenziell eher kaufen oder mieten ?	kaufen <input type="radio"/>	mieten <input type="radio"/>

Um einen Eindruck vom Marktpotenzial zu erhalten wurden die Unternehmen gefragt, ob das Interesse über die Mitwirkung als Testunternehmen hinausgeht (Frage 8) und in welcher Form eine Anschaffung denkbar wäre (Frage 9).

Frage 10

10. Was wäre Ihr Unternehmen bereit hierfür auszugeben ?

Bei der Frage 10, wieviel das befragte Unternehmen bereit wäre auszugeben, wurde bewusst darauf verzichtet Preiskategorien vorzugeben, um keine Beeinflussung zu erzeugen.

Fragen 11 und 12

11. Name und Anschrift Ihres Unternehmens (Angaben freiwillig)
12. Ansprechpartner mit Kontaktdaten für Rückfragen (Angaben freiwillig)

Um die Möglichkeit zu erhalten, künftig auf die Unternehmen zuzugehen, oder Rückfragen zu stellen, wurde in den Fragen 11 und 12 die Kontaktdaten der Unternehmen abgefragt. Diese Fragen waren bewusst mit dem Hinweis „Angaben freiwillig“ gekennzeichnet, damit sich die Unternehmen frei entscheiden konnten, ob sie darauf antworten möchten.

Fragen 13 bis 16

13. Wie viele Mitarbeiter hat Ihr Unternehmen?			
< 10	<input type="radio"/>	zwischen 10 und 49	<input type="radio"/>
zwischen 50 und 100	<input type="radio"/>	> 100	<input type="radio"/>

14. In welchen Bundesländern ist Ihr Unternehmen aktiv?			
Baden-Württemb.	<input type="radio"/>	Bayern	<input type="radio"/>
Bremen	<input type="radio"/>	Berlin	<input type="radio"/>
Niedersachsen	<input type="radio"/>	Brandenburg	<input type="radio"/>
Sachsen	<input type="radio"/>	Hamburg	<input type="radio"/>
Sachsen-Anhalt	<input type="radio"/>	Hessen	<input type="radio"/>
		Rheinland-Pfalz	<input type="radio"/>
		Saarland	<input type="radio"/>
		Schleswig-Holstein	<input type="radio"/>
		Thüringen	<input type="radio"/>

15. Ist Ihr Unternehmen auch außerhalb von Deutschlands aktiv, wenn ja in welchen Ländern?	ja	nein
	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

16. Überwiegender Arbeitsschwerpunkt Ihres Unternehmens (Mehrfachnennung möglich)			
Abbruch	<input type="radio"/>	Schadstoffsanierung	<input type="radio"/>
Wohnungs(bau)verwaltung	<input type="radio"/>	Architektur	<input type="radio"/>
(Schadstoff)gutachten	<input type="radio"/>	Wohnraumvermittlung (Makler)	<input type="radio"/>
		Recycling	<input type="radio"/>
		Ingenieurdienstleistung	<input type="radio"/>
		Sonstige und zwar:	

Die Fragen 13 bis 17 dienen der Einordnung der Unternehmen hinsichtlich Unternehmensgröße, geografischen Aktionsradius und den überwiegenderen Arbeitsschwerpunkt.

Frage 17

17. Sonstige Anmerkungen, Hinweise, Wünsche

Abschließend bot die Frage 17 die Möglichkeit in Form eines Freitextes weitere Anmerkungen, Hinweise oder Wünsche zu geben.

2.1.5.5 Ergebnisse der Befragung

Rücklauf des Fragebogens

Die Befragung möglicher Anwender fand im Zeitraum zwischen Februar und Mai 2016 statt. Es wurden dabei insgesamt 48 Anfragen per Mail gestellt. Insgesamt meldeten sich 26 Unternehmen (teils erst nach erneuter Anfrage). Dies entspricht einer Rücklaufquote von 54,2 %.

Frage 1 – Hilfsmittel für das Aufmaß

Von fast allen Unternehmen wurde angegeben, dass diese Ihr Aufmaß ausschließlich sowohl mit konventionellen Hilfsmitteln wie Meterstab und Papier (Handskizze) oder Laserentfernungsmesser (ohne Kopplung an mobile Endgeräte) vornehmen. Lediglich ein Unternehmen (Fraport) gab an, 3D-Laserscanner zu verwenden. Ein Unternehmen verwendet nach eigener Aussage Laserentfernungsmesser mit Kopplung an mobile Endgeräte (auch mit weiterer Software für 3D-Modellierung). Im Freitextfeld für weitere Hilfsmittel wurde folgendes angeben (gleiche Antworten zusammengefasst):

- Planunterlagen
- Fotodokumentation
- Erfahrungswerte

Frage 2 – Hilfsmittel für Massenbilanzierung

Entscheidend für die Angebotserstellung hinsichtlich der Massenbilanzierung eines Objektes sind in erster Linie die persönlichen Erfahrungswerte der Entscheider. Auch die Fotodokumentation spielt in den meisten Fällen eine entscheidende Rolle. Keiner der Befragten gab an zur Angebotserstellung Bilderkennungssysteme zu verwenden. Im Freitextfeld für weitere Hilfsmittel wurde folgendes angegeben (gleiche Antworten zusammengefasst):

- Planunterlagen
- Adobe-PDF-DC mit Auswertemöglichkeiten
- Handskizze und Bestandspläne
- Internet (geoportal.bayern.de/bayernatlas/)
- händische Probelöcher und Massenermittlung
- Digitale Bild und Datenerfassung mit mobilen Geräten
- Überprüfung des Maßes der Pläne
- Bauwerksaufschlüsse
- Digitale Architekturgrafik

Frage 3 – Hilfsmittel für Schadstofferkennung

Für alle Befragten sind persönliche Erfahrungswerte (bspw. anhand von Baujahr oder Bauart) grundlegende Hilfsmittel hinsichtlich der Schadstofferkennung. Fast alle gaben an zur Schadstofferkennung Probennahmen (inkl. Kernbohrung) mit anschließender Laborauswertung durchzuführen. Eine Vorortanalyse mit stationären oder mobilen Analysegeräten wird ausschließlich von einem Unternehmen angegeben. Diese werden bspw. für Staubmessungen verwendet. Als zu untersuchende Schadstoffe wurden im Freitextfeld von einzelnen Unternehmen:

- Asbest
- PAK
- PCB
- PCP

- VOC
- Staub

angegeben.

Ein Unternehmen schrieb, dass die Schadstofferkundung grundsätzlich durch den Bauherrn im Vorfeld erfolgt. Einmal wurde genannt, dass die Laborauswertung von Subunternehmen ausgeführt wird.

Frage 4 – Hilfsmittel für Angebotserstellung und Rückbauplanung

Die meisten Befragten greifen auch bei Angebotserstellung und Rückbauplanung auf ihre persönlichen Erfahrungswerte zurück.

Wenige gaben an spezielle Software zu verwenden. Dabei wurden folgende Softwares genannt:

- BRZ¹⁵ und eigene Stammdaten
- BPS¹⁶
- Word/Excel
- Kalkulationssoftware, Software für Bauzeitenpläne
- Eigenentwicklungen
- Arriba¹⁷
- Bauvision Software¹⁸

Frage 5 – Erwartete Eigenschaften ResourceApp

Mit mehr als 90% sind die wichtigsten Eigenschaften für die Befragten ein digitales Aufmaß der Gebäude-Außenhülle (92,3%) und die Erkennung und Erfassung von Objekten wie Türen, Fenster, Heizkörper etc. (92,3%). Fast ebenso wichtig sind Fotos mit Zuordnungen zu Räumen (88,5%), ein digitales Aufmaß der Innenräume (84,6%) sowie die Schadstofferkennung

¹⁵ <http://www.brz.eu/de/>

¹⁶ <http://www.bps-software.de/>

¹⁷ <http://www.rib-software.com/de/>, im Fragebogen stand ARiBA

¹⁸ <http://www.experte-bauvision.de/>

(84,6%). 76,9 % der Befragten sprachen sich für das Kriterium „Zeitersparnis bei der Angebotserstellung für Rückbau oder Sanierung bzw. bei der Schätzung des Objektwertes“ aus. Die reproduzierbare Erfassung von Gebäudedaten ist für 65,3 % der Befragten von Interesse. Etwas mehr als die Hälfte der potentiellen Anwender hält eine Schnittstelle zu einer bestimmten Software (53,8%) für ein entscheidendes Kriterium. Für 50 % und weniger sprachen sich die Befragten bei Rückbauplanung (50%), 3D-Modellierung (50%) und Video der Begehung (38,5%) aus.

Keine vorgeschlagene Eigenschaft wurde als überhaupt nicht relevant ausgewählt. Als sonstige Erwartung an die ResourceApp wurden:

- Aufmaßerleichterung mit Bilderfassung und Positionszuordnung
- leichte Bedienbarkeit; robuste Ausführung für den Baustellenalltag; Datenbank über Schadstoffe (z.B. Brandschutztüren, Nachspeicheröfen etc.) und
- Flächenerfassung ggf. auch Baugrubenaufnahmen

im Freifeldtext vermerkt. Bei der Freitextfrage „Welche Objekte sind für Sie besonders relevant?“ fanden sich bei der Auswertung der Fragebögen folgende Antworten:

Frage auf Objekt als Gebäudeart bezogen	Frage auf Objekt als Bauteil bezogen
Industrieanlagen, Büro- und Wohngebäude Wohngebäude, Kaufhallen, Industrieobjekte Größere Objekte ab Baujahr 1960	Türen, Fenster, Elektroinstallationen (Leuchten, Schalter, Steckdosen, Leitungen AP und ggf. UP...), HKLS-Installationen (Heizkörper, Geräte, Sanitärgegenstände, Leitungen aller Art AP u. ggf. UP, ...) Wandflächen, Einbauten Schadstoffe, Unterscheidung zwischen Holzbaustoffen, Beton, Mauerwerk und Stahlbauteilen Ermittlung von Flächen und Volumina, Fotos Rohrleitungen, Bodenbeläge

Folgendes Diagramm stellt die Ergebnisse zu Frage 5 grafisch dar.

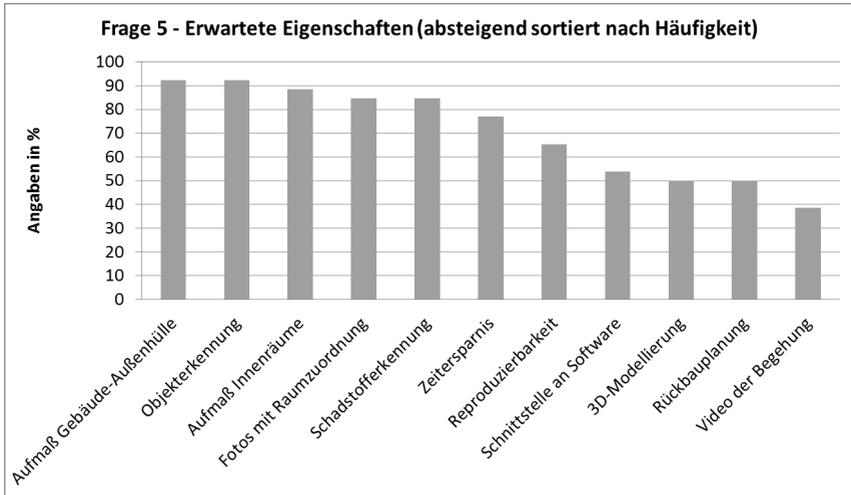


Abbildung 50: Auswertung Fragebogen: Erwartete Eigenschaften von einer ResourceApp

Hinsichtlich der Frage zu welcher Software eine Schnittstelle vorhanden sein sollte gab es folgende Antworten (Freitext):

- Office (Excel)
- BRZ
- ArchiCAD¹⁹
- CAD
- AVA Software²⁰
- BPS
- AriBa

¹⁹ <http://www.graphisoft.de/archicad/>

²⁰ <http://www.avaplan.de/index.php?s=100>

Frage 6 – Vergleichssysteme

Keiner der Befragten kennt Systeme, welche die zuvor als relevant definierten Anforderungen erfüllen würde.

Frage 7 – Testunternehmen

Fast zwei Drittel (65,4%) wären bereit als Testunternehmen bei einer Markteinführung mitzuwirken.

Frage 8 – Bereitschaft zur Anschaffung

15 Unternehmen und damit mehr als die Hälfte zeigte Interesse ein solches System anzuschaffen

Frage 9 – kaufen vs. mieten

Angaben zum Kaufen bzw. Mieten wurden insgesamt 20 mal (77%) gemacht. Dabei hielt sich Bereitschaft zum Kauf und die Möglichkeit der Miete mit 10 zu 10 genau die Waage.

Frage 10 – Bereitschaft für System auszugeben

Folgende Angaben wurden bzgl. der Frage „Was wäre Ihr Unternehmen bereit hierfür auszugeben?“ gemacht:

- Abhängig von der Leistungsfähigkeit (wurde mehrmals genannt)
- 500-1.000 €
- 10.000 €
- Max. 5.000€, je nach Leistung
- 10.000-25.000 €, je nach Leistung
- 100-300 € monatliche Miete
- 2.000 €²¹
- 250 € Miete /Tag

²¹ Unklar ob für Kauf oder Miete

- 5.000 €
- Software Programm ca. 3.000 €; Hardware Scanner ca. 2.000 €; ggf. Miete / bei guter Einsatzfähigkeit auch höhere Kosten tragbar.

Frage 11 und Frage 12 - Kontaktdaten

Die detaillierten Kontaktdaten werden aus Datenschutzgründen nicht veröffentlicht.

Frage 13 - Unternehmensgröße

Die meisten der Unternehmen, welche sich an der Befragung beteiligten, sind klassische KMU mit 10 bis 49 Mitarbeitern.

Frage 14 – Bundesländer

Es gibt kein Bundesland, welches von keinem Unternehmen bedient wird. Die meisten Unternehmen sind in Baden-Württemberg (52,2%) aktiv, gefolgt von Bayern (47,8%), Hessen (43,5%) und Rheinland-Pfalz (43,5%). In Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Brandenburg, Berlin, Bremen und Hamburg sind zwischen 30 und 40% der Unternehmen aktiv. Am wenigsten (zwischen 20 und 30%) sind die befragten Unternehmen in Sachsen, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Saarland, Schleswig-Holstein und Thüringen aktiv.

Frage 15 – Tätigkeiten außerhalb Deutschlands

Fünf Unternehmen gaben an, auch außerhalb Deutschlands tätig zu sein, meist in den angrenzenden Ländern. Zwei Unternehmen sind auch weltweit aktiv.

Frage 16 – Arbeitsschwerpunkt

Die meisten der Unternehmen (76,2%) gaben an im Bereich Abbruch tätig zu sein. Mehr als die Hälfte der Unternehmen sind auch in der Schadstoffsanierung (66,7%) und im Recycling (52,4%) tätig. Die folgende Abbildung 51 gibt einen Überblick über die Arbeitsschwerpunkte der befragten Unternehmen.

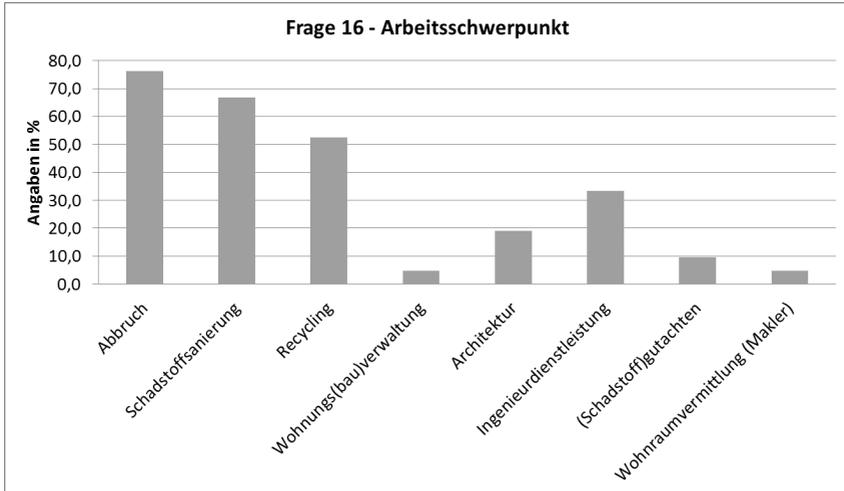


Abbildung 51: Auswertung Fragebogen: Überwiegender Arbeitsschwerpunkt der befragten Unternehmen

2.1.5.6 Verifikationsphase I (Funktionstest) bei Praxispartnern

Im Lauf des Projektes zeigte sich, dass die Entwicklung der ResourceApp doch mehr Tests bei den Entwicklern benötigt, bevor sie an realen Gebäuden getestet werden konnte. Zunächst wurde in einer frühen Phase des Projektes eine Fertiggarage am ICT, für einen ersten Praxistest verwendet, diese Garage wurde nach den Versuchen jedoch nicht zurück gebaut. Die Untersuchungen und Ergebnisse an der Fertiggarage am ICT werden im Abschnitt 2.1.3.1 beschrieben.

2.1.5.7 Verifikationsphase II (Kalibrierung, Detailtest) bei Praxispartnern (COSAWA Sanierung GmbH und Werner OTTO GmbH)

Nach den Funktionstests im Labor und an der Fertiggarage wurden im zweiten Schritt zwei reale Abbruchgebäude mittels des ResourceApp-Ansatzes untersucht. Die wissenschaftlichen Untersuchungen und deren Ergebnisse werden im Abschnitt 2.1.3.3 ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden die Arbeiten der Praxispartner dargelegt.

Praxisbeispiel Krankenhaus Bad Pymont (COSAWA Sanierung GmbH - Jörg Jäger)

Praktische Ausführung Rückbau zur Mengen- und Baustoffbewertung durch Firma Cosawa - Zeitraum: 12.10. - 16.11.2015

Im Zuge des Forschungsprojektes „ResourceApp“ wurde am 24.Juli 2015 im Rahmen einer Baustellenbesichtigung, in Bad Pymont, durch die projektbeteiligten Personen, ein Bauabschnitt festgelegt und gesperrt, um diesen während der nachfolgenden Abbruchmaßnahmen unversehrt zu erhalten und einen differenzierten, definierten Rückbau vorzunehmen.

Personal- und Materialbedarf

Um die Ausführung der Arbeiten nachvollziehbar, differenziert nach Material und Einbaugegebenheiten organisiert durchführen zu können, wurde nachfolgendes Personal über den gesamten Zeitraum eingesetzt:

1. Projektleiter
2. Vorarbeiter
3. Fachwerker

Zur Sammlung der einzelnen Baustoffe wurden Kunststoffsäcke, Müllsäcke, Sammelbehälter und Container bereitgestellt. Die personenbezogenen Verbrauchsartikel wie Schutzanzüge, Handschuhe, Einwegmasken

etc. wurden an die Mitarbeiter täglich ausgegeben und nach Gebrauch entsorgt. Der Maschinen- und Geräteeinsatz wurde dem Einsatzzweck entsprechend disponiert, es wurden die nachfolgenden Maschinen eingesetzt: Mauernutfräse, Betonsäge, Bohr- und Stemmhämmer, Trennschleifer, Hydraulikschere, Radlader, Minibagger, Absauganlage, Staubsauger, Reziprok Sägen, Bohrmaschinen, Kreissägen, Bohrschrauber, und div. Einzelgerät.

Ablaufbeschreibung

In der ersten Phase wurden die Patientenzimmer, welche durch ihre räumliche Gleichförmigkeit eine zeitgleiche Arbeitsweise zuließen, entleert und die einzelnen Bauteile wie Einbaumöbel, Fenster, Türen, Wand- und Bodenbeläge, Elektroinstallation und Wasser- / Abwasserleitungen sowie Heizkörper entfernt. Die anfallenden Massen / Mengen wurden in separate Behältnisse verpackt und mit den Raumnummern beschriftet. Vor den Bohr- und Schneidarbeiten wurde der Wand- und Decken- bzw. Fußbodenbelag entfernt. Mittels Kernlochbohrgerät wurden Löcher in die Wände und Böden gebohrt, somit konnte die Stärke des Mauerwerks und der Betondecke bestimmt und deren Gewicht berechnet werden. In den Boden wurde ein 50 cm x 50 cm großes Loch geschnitten und der daraus entnommene Beton wog 54,90 kg. Der Wandputz, welcher auf einer definierten Fläche von 1 m² entfernt wurde, hatte ein Gewicht von 11,60 kg. Zu Feststellung der Wandstruktur wurde ein 1 m² großer Mauerdurchbruch geschaffen und anschließend mit 130,00 Kg gewogen. Die Ein- und Anbauteile, wie Lichtschalter, Lampen, Steckdosen, etc. wurden einzeln gehalten und in einer gesonderten Liste erfasst. Abbildung 52 zeigt Eindrücke aus dem selektiven Rückbauprozess, der Sortierung und der Vorbereitung für die Verwiegung der einzelnen Bauteile sowie der Ermittlung der Putzdicken.



Abbildung 52: Fotos von dem selektiven Rückbau des Krankenhauses in Bad Pyrmont (Quelle: Cosawa GmbH)

Besonders schwierig gestaltete sich der Rückbau der Einzelräume, da diese von ihrer Ausstattung, ihrem Aufbau und der Größe, starke Unterschiede aufwiesen und ein zeitgleiches Arbeiten nur in begrenztem Umfang und mit unterschiedlichem Personaleinsatz möglich war.

In den gefliesten Nassbereichen mussten die Fuß- und Wandbelege mittels Stemmarbeiten entfernt (Fliesen- und Steinzeug) werden. Wände wurden mittels Säge oder Stemmhammer geöffnet um die Rohrleitungen freizulegen und auszubauen.

Die meisten Decken waren in der abgehängten Bauform ausgeführt und konnten somit einfach und schnell demontiert werden. Nach der Demontage der Deckenplatten fanden sich die unterschiedlichsten Baustoffe vor. So wurden Rohr-, Strom- und Telekommunikationsleitungen im Laufe des Gebäudelebens mehrfach verändert und die Materialmengen wiesen somit starke Schwankungen auf.

Mengenerfassung

Die bereitgestellten und sortierten Abfälle und Abbruchmassen wurden gesammelt und mittels Abrollcontainer zur Verwiegung gefahren. Der Projektleiter, unterstützt durch einen weiteren Mitarbeiter, verwog alle Einzelfraktionen und erfasste die Gesamtmassen. Da eine Verwiegung mittels einer LKW Waage nur < 400 kg möglich ist, wurden die Kleinmengen mittels Personenwaage und Zug-Waage ermittelt. Die Gewichte werden in einer gesonderten Liste erfasst und zur Einsicht bereitgestellt.

Gegenüberstellung zum konventionellen Rückbau

Im Verhältnis zum konventionellen Rückbau ist hier mit einem erheblich größerem Personal- und Zeitaufwand zu rechnen, welcher durch eine höhere Vergütung der Wertstoffe nicht auszugleichen ist. Die Wertstoffe, wie Stahl, Kupfer, Aluminium, Messing sind in diesem Objekt nicht in den notwendigen Größenordnungen vorzufinden und werden größtenteils auch im konventionellen Verfahren aussortiert.

Entsorgungskosten

Eine bessere Trennung und das damit verbundene Auffinden von bisher nicht beachteten Wertstoffen, die im normalen Abbruchverfahren (bedingt durch Größe und Gewicht) nicht separat erfasst werden beeinflussen den Erlös. Außerdem ist die Zuordnung der einzelnen Abfallfraktionen genauer möglich. Dies wirkt sich auf die Entsorgungskosten reduzierend aus.

Nachbetrachtung

Abschließend ist am Beispiel dieses Objektes, aufgrund seiner Struktur und Beschaffenheit, erkenntlich geworden, dass Masse und Wertigkeit der Wertstoffe maßgeblich den positiven Abschluss beeinflussen. Es werden mehr und hochwertigere Materialien benötigt um den personellen Aufwand zu rechtfertigen. Denkbar wäre eine vorherige gesonderte Materialbestimmung bezogen auf Masse und Qualität. Um diese Frage abschließend klären zu können, müsste ein kleines Objekt mit zwei gleichwertigen Bereichen in beiden Verfahren abgerissen werden.

Im Zuge einer reinen Sanierungs- oder Entkernungsmaßnahme ist die Nachbetrachtung neu zu erstellen, da die Personalkosten einen ganz anderen Stellenwert einnehmen und daher das Ergebnis weitaus besser ausfallen würde.

Praxisbeispiel Einfamilienhaus in Lemgo (Werner OTTO GmbH – Uwe Panneke)

Neben dem im Vorangegangenen beschriebenen Krankenhaus wurde im Rahmen des ResourceApp-Vorhaben ein freistehendes Einfamilienhaus in Lemgo zunächst wie im Abschnitt 2.1.3.3 mit dem gesamten Projektteam begangen. Dabei wurde das Gebäude sowohl mit dem ResourceApp-Demonstrator aufgenommen als auch mittels Fotos und Handskizzen dokumentiert und die Maße mit Hilfe eines Laserdistanzmessgerätes aufgenommen. Im Folgenden wird der dem Abbruchobjekt zugrundeliegende Leistungstext dargelegt:

Rückbauarbeiten

Schadstoffsanierung

Im Rahmen des Rückbaus des Krankenhauses wurden lackierte, bzw. behandelte Hölzer der Kategorie 170204* Holz AIV sowie der Dachbahn Onduline als Dacheindeckung der Kategorie 170301* separiert und entsorgt.

Gebäudeentkernung

Die Gebäude vor dem maschinellen Rückbau händisch entkernern. Demontage von Türen, Fenstern, Bodenbelägen aus PVC oder Linoleum, abgehängte Decken, Leichtbauwände. Die bei der Entkernung angefallenen Stoffe fachgerecht entsorgen.

Gebäudeabbruch

Die Gebäude bis UK- Fundamente (Kellersohle -1,00m) maschinell abbrechen. Fundamente und Wände, die zur Sicherung von öffentlichen Verkehrsflächen sowie benachbarter Bauwerke dienen, werden nicht abgebrochen. Sortierung der angefallenen Stoffe und Entsorgung von Bauschutt (bis max. RCL 1), Baumischabfall, Holz, Kunststoffe. Grobe Planierung des Rückbaugeländes nach Beendigung der Rückbauarbeiten mit vorhandenem Boden.

Einrichtungen bzw. Sonderleistungen

Weiterhin wurde die Abdeckung des Satteldachs in Handarbeit, vor dem maschinellen Abbruch abgenommen sowie eine abfallrechtliche Dokumentation über den Verbleib der bei dem Gebäuderückbau angefallenen Abfälle erstellt. Folgende Maschinen kamen beim Rückbau des Gebäudes zum Einsatz:

- Hubsteiger
- Bagger Cat M316
- Rüttelplatte

Die Rückbaudauer wurde mit einer Woche kalkuliert. Durch das durch das ResourceApp-Projekt erforderliche zusätzliche Sortieren ergab sich eine reale Rückbaudauer von 3,5 Wochen. Gleichzeitig wurde ein zusätzlicher Personalaufwand für die Sortierung von 4 Mitarbeitern notwendig.

Ebenso waren 6 zusätzliche Transporte durch die separate Erfassung erforderlich. Durch die an der Abbruchbaustelle stark beengten Verhältnisse (siehe Abbildung 55) war eine Nachsortierung auf dem Betriebshof der Fa. Werner OTTO GmbH in Hameln notwendig.

Die folgende Tabelle 33 stellt die anhand der Wiegescheine erstellte Übersicht der Materialzusammensetzung des Abbruchgebäudes dar.

Tabelle 33: Materialzusammensetzung des Abbruchgebäudes in Lemgo anhand der Wiegescheine

Abfallschlüssel	Material	Masse
AVV 170101	Bauschutt, Beton	104,24 t
AVV 170102	Bauschutt, Ziegel	127,26 t
AVV 170103	Bauschutt, gemischt	135,52 t
AVV 170201	Holz AIII	9,6 t
AVV 170204	Holz AIV	8,27 t
AVV 170301	Dachbahn	1,18 t
AVV 170405	Mischschrott	1,26 t
AVV 170411	Kabel	0,28 t
AVV 170504	Bauschutt mit Boden	15,24 t
AVV 170603	KMF	0,16 t
AVV 170605	Asbest	0,14 t
AVV 170802	Gipskarton	3,96 t
AVV 170904	Bau-Misch (Vermüllung)	1,72 t
AVV 170904	Bau-Misch (Teppich und PVC)	0,44 t

Nach dem Vorbereiten des Gebäudes, sowie dem Abbruch des Dachstuhls per Hand aus der Bühne, begann das maschinelle Abbrechen des Gebäudes von der Straße aus. Das Gebäude wurde entkernt, das Dach abgedeckt, der Dachstuhl im oberen Bereich mit der Kettensäge zurückgeschnitten und die Giebelspitzen per Hand abgebrochen. Die Folgenden Abbildungen (Abbildung 53 bis Abbildung 62, Quelle: Werner OTTO GmbH) geben einen Überblick über den Abbruch und die beengten Verhältnisse vor Ort.

2 Eingehende Darstellung



Abbildung 53: Abbruchobjekt Lemgo:
Vorbereitetes Gebäude



Abbildung 54: Abbruchobjekt Lemgo:
Abbruch Dachstuhl per
Hand aus Bühne



Abbildung 55: Abbruchobjekt Lemgo: Beginn der maschinellen Rückbauarbeiten



Abbildung 56: Abbruchobjekt Lemgo: Abbruch des Straßengiebels und OG sowie Teilbereiche des Dachstuhls



Abbildung 57: Abbruchobjekt Lemgo: Straßenfront des Gebäudes ist abgebrochen, im Vordergrund Sortierungshaufen Stahl und Kupfer



Abbildung 58: Abbruchobjekt Lemgo: Abbruch Dachstuhl und Decken EG und OG, rechts Sortierung Holz



Abbildung 59: Abbruchobjekt Lemgo: Abstand zum Nachbargebäude (links), Sortierungshaufen Vermüllung



Abbildung 60: Abbruchobjekt Lemgo: Nahezu vollständiger Abbruch der aufstehenden Wände



Abbildung 61: Abbruchobjekt Lemgo: Vollständiger Abbruch Gebäude Orpingstraße Lemgo, lediglich die Remisen müssen noch abgebrochen werden



Abbildung 62: Abbruchobjekt Lemgo: Vollständiger Abbruch Gebäude Orpingstraße Lemgo, lediglich die Remisen müssen noch abgebrochen werden

2.1.5.8 Übertragung auf andere Produkte und Branchen

Schifffahrt

Zur Abklärung der Einsatzmöglichkeiten der ResourceApp in der Schifffahrtsbranche fanden zwei Gespräche mit Experten aus der Branche statt mit den Herren Herrmann und Heitkämper von der N&P SHIP SAFETY (www.npmarine.com) mit Niederlassungen und Kooperationspartnern in Indien, Singapore und Shanghai und mit Ralf Reinhard, der als Schiffsmakler im Gebrauchtsegment von Frachtschiffen bei der Rönner-Gruppe, Bremen, Bremerhaven arbeitet. Die Aussagen der Experten sind im Wesentlichen deckungsgleich.

Nahezu 100% der Altschiffe werden über einen Schiffsmakler/Agent in London vermittelt, dort sind teilweise mafiöse Strukturen vorhanden. Der Preis richtet sich nach Metallmasse und Wert der eingesetzten Metalle im jeweiligen Schiff; von Schifftyp zu Schifftyp unterschiedlich, d.h. Schüttgutfrachter zu Stückgutfrachter zu Flüssiggutfrachter. Im Gegenteil zum Markt von gebrauchten Immobilien, verfügen die Schiffe durchweg über

eine sehr gute und auch verfügbare Dokumentation; dies ist zu vergleichen mit Kraftfahrzeugen, die auch wie Schiffe regelmäßig zum TÜV (alle 5 Jahre, teilweise heute auf 7 Jahre gedehnt) müssen.

Es gibt nur eine geringe überschaubare Anzahl von Altschiffe; die kalkulierte Lebensdauer von Schiffen lag bei ca. 25 Jahren; momentan ist der Wert bedingt durch viele Insolvenzen, Containerneubauten, d.h. Verlagerung der Frachtart, auf 17-18 Jahre gesunken; von den dann anstehenden Schiffen sind ausreichende Dokumentationen vorhanden. Aktuell kommen sehr junge Schiffe, bis zu einer Jugend von 10 Jahren in die Verschrottung; dies hängt vor allem mit den deutlich verbesserten Umweltauflagen in Bezug auf Treibstoff zusammen; früher wurden Antriebsaggregate auf Geschwindigkeit getrimmt, heute, d.h. seit 10 Jahren sind die Maschinen auf reduzierten Treibstoffeinsatz zu Lasten der Geschwindigkeit gebaut; u.a. Verbot schwefelreiche Schweröle; daher auch das relativ geringe Alter der teilweise zur Verschrottung anstehenden Schiffe.

Schiffe werden zuerst nach Werthaltigem demontiert, d. h. Technik, Antrieb, Motoren, Steuerungen, Computeranlagen usw., anschließend werden sie am Markt mit entsprechenden Pflichtenheft zum Abschrotten angeboten; je nach Typ, Tanker, Bulker (Schüttgutfrachter), ist bekannt, auf was sich der Abschrotter einlässt, um was es sich handelt und welche Werkstoffe i.d.R. verbaut sind. Schiffe bestehen heutzutage zu 95-98% aus „Feld-, Wald- und Wiesenstahl“; 2. größte Fraktion sind Edelstähle (V4A, Sonderlegierungen, geschätzt 2-3%) und Cu mit ca. mit 0,03-0,04% Anteil; Isolierungen werden vor dem Brennen entfernt, Materialien sind auch an dieser Stelle bekannt.

80-90% der zu verschrottenden Schiffe werden in Südostasien (Indien, China, Bangladesch) verbracht; Marktführer ist Indien, wo an einem ca. 30 km langen Strand ca. 200 Slots zur Demontage aufgestellt sind. Die Schiffe werden einfach auf den Strand gesetzt, die Arbeitsbedingungen entsprechen nicht europäischen Standards. Die Arbeitskräfte werden aus den umliegenden Slums rekrutiert. Sicherheitsvorschriften und Umweltvorschriften gibt es nicht. Die Arbeitsbedingungen in China sind im Vergleich zu Indien deutlich besser. Das demontierten Interieur/Zubehör wird

gezielt nach Art und Gegenstand an eigenen Ständen angeboten und verkauft; z.B. ein Stand für Bestuhlung oder einer für Tische.

Ein interessanter Aspekt ist die Marktsituation; während Abwracker in Fernost Geld für die Übernahme der "Altschiffe" zahlen, muss der Reeder für das Abwracken in Europa Geld mitbringen; damit erklärt sich u.a. auch der unendliche Strom der Schiffe nach Fernost. Kalkulationen zum Abschrotten, bzw. zum Angebot für ein Abschrotten wird i.d.R. wie beim Abbruch aus der Erfahrung heraus erstellt.

Obwohl vieles mit der Baubranche vergleichbar ist, Anteile von vorherrschenden Fraktionen (Stähle im Vergleich zu Beton), Grobschlächtigkeit der Vorgehensweise (Brennen im Vergleich zum Abbruchbagger) sahen alle 3 Gesprächspartner keine sinnvolle Möglichkeit den ResourceApp Ansatz, auch in abgewandelter Form, ein zu setzen. Schiffe sind nach der Demontage der werthaltigen Baugruppen nur noch einfache Gerippe.

Fazit: Aufgrund guter und vorhandener Dokumentation: Aktuell kein Einsatz der Ressource App.

Bahn

Neben der Schifffahrt sind auch Bahnen, ein mögliches Anwendungsfeld für die Resource App. In einem Expertengespräch wurde prinzipielles Interesse seitens der Bahn an der ResourceApp geäußert. Sie sehen Einsatzmöglichkeiten bei der Demontage bzw. Verschrottung von Altzügen. Die eigentlichen Arbeiten bei der Verschrottung führen Subunternehmer aus, aber zur Bewertung für eine Ausschreibung, vergleichbar zum Gebäudeabbruch, kann die App eine hilfreiche Ergänzung sein.

Flugzeug

Ein Workshop mit der europäischen Luftfahrtindustrie im Rahmen des EU-Projekts JTI Clean Sky hat ergeben, dass die ResourceApp durchaus auch in der Entsorgung von alten Flugzeugen Anwendung finden kann. Insbesondere hat die Luftfahrtindustrie betont, dass die Lokalisierung von

Schadstoffen (z.B. Asbest) im erfassten 3D-Modell eines zu entsorgenden Flugzeugs eine große Erleichterung und eine verlässliche Planungsgrundlage bildet. Die folgenden Anforderungen wurden im Rahmen des Workshops erarbeitet:

- 3D-Rekonstruktion eines Flugzeugs (innere und äußere Strukturen) in Echtzeit
- Automatische Identifikation und Lokalisierung von Schadstoffen unter Verwendung von weiterer Sensorik und dokumentiertem Erfahrungswissen. Das dokumentierte Erfahrungswissen dient quasi als eine Art „Gebäudetypologie“ für Flugzeuge.
- Bilderkennung von Flugzeugteilen
- Digitale Transformation und Dokumentation der gewonnen Informationen in unternehmensinternen Datenbanken

Einige der Anforderungen wurden bereits in der ResourceApp am Beispiel von Gebäuden umgesetzt. Die bestehende ResourceApp-Software müsste jedoch an die Gegebenheiten der Luftfahrtindustrie angepasst werden. Die Identifikation und Lokalisierung von Schadstoffen ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt in der Luftfahrtindustrie und stellt eine mögliche Erweiterung der ResourceApp dar. Auch gibt es derzeit keine automatisierte Standardlösung hinsichtlich des strategischen Rückbaus von Flugzeugen. Diese und weitere Punkte bieten Raum für die Fortführung der Forschungsarbeiten in potentiellen Nachfolgeprojekten.

2.1.5.9 Dienstleistungsentwicklung durch die Praxispartner

Eine Dienstleistungsentwicklung setzt ein marktfähiges oder fast marktfähiges Produkt voraus. Im Rahmen des ResourceApp Projektes wurde jedoch kein marktfähiges Produkt entwickelt, sondern lediglich ein Prototyp, vor diesem Hintergrund, ist die Dienstleistungsentwicklung ein allgemein gehaltenes und grundlegendes Prinzip zu verstehen.

Die Arbeiten lassen sich in verschiedene Bereiche gliedern, zum einen die Betrachtung des Marktes, Befragung der potentiellen Nutzer, Analyse des bestehenden Marktes, Förderungsmöglichkeiten für Businessplan, Aus-/Gründung.

Zunächst wurden die aktuellen Konkurrenzprodukte analysiert, die mit ähnlichem Prinzip einen vergleichbaren Leistungsumfang erzeugen²². Dazu wurde eine Auswahl der gebotenen Lösungen erstellt. Diese werden mit dem derzeitigen Leistungspotential der ResourceApp verglichen. Die beigefügte Tabelle 34 soll dazu einen kurzen Überblick der Vergleichbarkeit bieten.

Leica Geosystems Pegasus Backpack²³

Das Leica Geosystems stellt mit dem Pegasus Backpack einen sehr starken Konkurrenten dar. Das Gerät besteht je nach Usecase aus verschiedenen Hardwarekomponenten, die der Anwender in einem Rucksack trägt. Während des Vorbeilaufens oder der Begehung des Objekts wird live Vermessen, die Daten werden direkt aufgearbeitet und auf ein mitgeliefertes Tablet visualisiert, welches mit einer schlanken und einfachen Ausführung den Anwender unterstützen soll.

Eine Erzeugung von Modellen, wie sie in dem Leistungsrahmen der ResourceApp vorgesehen sind stellen für das System keine Probleme dar. Eine Akkulaufzeit von bis zu 6 Stunden stellt dies sicher. Die gesammelten Daten werden in den gängigen Dateiformaten abgespeichert und können mit beliebigen CAD-Programmen weiterbearbeitet werden. Gerade in dunklen oder monotonen Räumen, stellt sich hier ein Vorteil zur ResourceApp ein, da mit geeigneten Sensoren die Visualisierung unterstützt wird. Ein Nachteil findet sich bei der eventuellen Nachbearbeitung von Innenräumen, da die Technik hier noch nicht ausgereift genug ist alles genau

²² <http://www.heise.de/ct/ausgabe/2012-11-Raemlich-scannen-mit-Digitalkamera-Kinect-oder-Laser-Scanner-2346188.html>

²³ http://www.leica-geosystems.de/de/Leica_PegasusBackpack_106730.htm

zu erkennen und mit den geeigneten GPS-Koordinaten zu versehen. Ebenso wird die Detailtiefe geringer, je größer das Scannvolumen wird. Die Preise hängen stark vom Usecase des Anwenders sowie der damit verbundenen Hardware ab, können aber bei bis zu 300.000 € liegen.

Autodesk 123D^{24, 25}

Das Autodesk 123D Catch (ehemals Fotofly) bietet keine Hardware-Lösung, es ist lediglich eine Software, um Fotos die man mit einem Smartphone schießt in ein 3-D Modell umzuwandeln. Hierzu bedarf es eines Objektes, welches aus allen Winkeln fotografiert werden soll. Diese Fotos werden an das Unternehmen geschickt, welches das 3D Modell via Cloud-Computing erstellt. Allerdings bezieht sich dies zurzeit nur auf kleine Objekte die dann z.B. in einem 3-D Drucker gedruckt werden können. Ein Scannvolumen wie es bei der ResourceApp vorkommt wird mit dieser App sehr schwer bis gar nicht visualisierbar sein. Ebenso wie die ResourceApp stellen sich Nachteile bei Gegenlicht sowie bei der Aufnahme von transparenten Objekten ein. Diese werden verzerrt im Modell dargestellt. Eine Nachbearbeitung der Daten ist möglich. Für die Erstellung des Modells wird dank Cloud-Computing keine eigene Rechenleistung erforderlich, dies ist ein entscheidender Unterschied zur ResourceApp. Des Weiteren ist keine Live Time Visualisierung möglich, sondern nur eine Fotostrecke. Die App wird kostenlos auf allen gängigen Plattformen angeboten.

²⁴ http://www.chip.de/downloads/123D-Catch_50702473.html

²⁵ <http://www.123dapp.com/catch>

Freestyle3D von Faro²⁶

Der Freestyle3D von FARO erzeugt eine 3-D Visualisierung über einen handgeführten mobilen Scanner. Auch hier wird zu dem Scanner ein Tablet mitgeliefert, welches mit firmeneigener Software die Bedienung erleichtern soll.

Der Anwender scannt das Objekt und erhält in Echtzeit eine Visualisierung seines abgescannten Volumens. Die Daten werden zunächst auf dem Tablet dargestellt, können aber für eine Weiterverarbeitung in den gängigen Dateiformaten exportiert werden.

Ein Vorteil zur ResourceApp stellt die Scannkontrolle dar, denn erst, wenn genug Daten gesammelt sind meldet die Software, dass ein Modell erstellt werden kann, vorher müssen weitere Messungen erfolgen. Für Scans in dunkler Umgebung wird die Aufnahme mit einer LED Lichtquelle unterstützt. Das Scanvolumen wird allerdings vom Hersteller auf acht cbm begrenzt, dies stellt einen Nachteil für Objekte dar, wie sie die ResourceApp verarbeiten soll. Ein Vorteil ist die Flexibilität und Handlichkeit dieses Scanners, sowie die Bedienbarkeit dank der Unterstützung der firmeneigenen Software. Mit einem Preis von circa 11.000 € können Scanner mit Tablet erworben werden. Über Softwarelizenzen ließ sich zum derzeitigen Stand nichts in Erfahrung bringen.

Bosch^{27, 28}

Bosch bietet derzeit keine Lösungen zur 3D Visualisierung lediglich Rotationslaser, die einen Raum vermessen können finden sich im Portfolio. Dennoch wurde vor kurzem auch von Bosch angekündigt, dass es eine Kombination der Lasermessgeräte mit 3D- Visualisierungen geben soll.

²⁶ <http://www.faro.com/de-de/produkte/3d-dokumentation/faro-freestyle-3d/uebersicht>

²⁷ <https://www.bosch-professional.com/de/de/grl-500-hv-+-lr-50-35969-ocs-p/>

²⁸ https://www.bosch-professional.com/de/de/service/news/pressemitteilungen/neue-measuring-master-app-von-bosch-fuer-profis_11974.html

Zurzeit gibt es lediglich die App Measuring Master. Damit können Baupläne, Fotos von Objekten sowie die gemessenen Daten vor Ort kombiniert werden. Eine Lösung wie die ResourceApp sie bieten soll wird von Bosch nicht verfolgt.

Geschäftsmodelle

Denkbar sind verschiedene Ansätze:

- Joint Venture
Zusammenschluss mit einem Konkurrentenanbieter, Weiterentwicklung der ResourceApp, Kombination mit Konkurrenzsystem, Nutzung der bestehenden Vertriebsstrukturen

- Gründung einer eigenen Firma durch die Projektpartner
Vor der Gründung muss, aber zunächst ein marktfähiges Produkt fertig entwickelt werden. Vorstellbar wäre zunächst nur eine marktfähige Basisversion zu verkaufen und nach und nach Updates und Plugins zu verkaufen. Kamera und Rechner werden von kommerziellen Anbietern zugekauft. Die Software wird von der gegründeten Firma gewartet, optimiert und gegebenenfalls weiterentwickelt. Gewinne werden erzielt durch Verkauf von Hard- und Software, Support und Updates. Angebot von maßgeschneiderten Lösungen für den Kunden.

Tabelle 34: Vergleich von Konkurrenzprodukten der ResourceApp

	Vorteile	Nachteile	Unterschiede zur Resource-App	Marktreife	Preis
Leica Geosystems: Pegasus Backpack	Lichtsensor, Innen und Außenaufnahmen, Echtzeitvisualisierung, Bedienbarkeit, Nachträgliche Weiterbearbeitung	Details von Objekten, Innenraumscans oft ungenau	Wesentlich mehr Hardware, bessere Kameraauflösungen, GPS-Kopplung	Reifes Produkt	Stark abhängig vom Usecase Bis zu 300.000€
Autodesk 123D Catch	Keine eigene Rechenleistung notwendig, Nachträgliche Weiterbearbeitung, Teilbereiche gesondert auflösbar	Transparente Oberflächen verzerren Modell zwecks Lichteffekten, Gegenlicht	Manuelle Fotostrecke, Cloud-Computing	Vollständige Software	kostenlos
FARO Scanner My3DScanner	Bedienbarkeit, Flexible Datenerfassung, Nachträgliche Weiterbearbeitung, Lichtsensor	Maximales Scanvolumen $8m^3$, Gegenlicht	Ähnliches Prinzip wie bei ResourceApp Auflösungen höher, Scanvolumen kleiner	Reifes Produkt (Red Dot Design Award 2015)	10,000 € +Tablet 1,000 €
Bosch Professional GRL 500 HV Rotationslaser			Laserscansystem	Reifes Produkt (Red Dot Design Award 2015)	1,000 €

- Basisversion ResourceApp, das Gerät kann ein komplettes Gebäude aufnehmen, daraus ein 3-D Modell erstellen, Werte wie Brutto-rauminhalt, umbauter Raum errechnen und mineralische Bauteilmengen berechnen
- Rückbauplanung-Tool
- ResourceApp Metalle

Das Gerät kann zusätzlich zur Basisversion Steckdosen erkennen, daraus Leitungsverläufe errechnen und damit neben mineralischen Bauteilmengen, auch metallische Bauteilmengen berechnen

- ResourceApp Premium
- Beinhaltet ResourceApp Basisversion, Rückbauplanungstool und ResourceApp Metalle

Personalbedarf

- Vertriebsmitarbeiter (technischer Hintergrund)
- Support (Programmierung)

Einsatz der ResourceApp bei den Praxispartnern als Demozentren, wo sich potentielle Interessenten, die ResourceApp im Einsatz anschauen können.

Vorstellung bei Messen und Fachveranstaltung, Zusammenarbeit mit den Verbänden

Potentielle Kunden: Abbruchunternehmen, Bau- und Sanierungsunternehmen, Architekten, Makler

Im Rahmen einer Rechercharbeit zur Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotentialen beim Rückbau von Infrastruktur und Produkten wurde die Verwertung der sogenannten ResourceApp genauer betrachtet. Hierzu wurde ein Dienstleistungskonzept, sowie ein Verwertungsplan erstellt.

Die in der Recherche betrachteten Szenarien beziehen sich zum einen auf die Möglichkeiten der Projektpartnerinternen Struktur wie z.B. Fraunhofer Venture oder KIT Gründerschmiede, zum anderen aber auch auf die Förderungsmöglichkeiten des öffentlichen Raumes, hierzu zählt beispielsweise das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Die Basis dieser Arbeit bildet die Annahme, dass ein Bestreben der Ausgründung und eine marktfähige Lösung bestehen. Denn erst dann macht eine Existenzgründung Sinn.

Sofern eine Existenzgründung ansteht, sollte allen Projektpartnern bewusst sein, dass die marktfähige Lösung nicht weiter erforscht, sondern lediglich weiterentwickelt wird. Denn eine Gründung beinhaltet die Existenz eines marktfähigen Produkts, einer Lösung.

Fraunhofer Umgebung:

Die Fraunhofer Gesellschaft möchte das Bestreben der Ausgründungen vorantreiben, hierzu wurde das Fraunhofer Venture Institut gegründet. Dieses präsentiert sich als Begleiter und Ansprechpartner für die Unternehmensgründung. Vor allem im Bereich Intrapreneurship, Gründung, Technologie, Finanzierung und Beteiligungsmanagement wird Unterstützung angeboten. Zunächst wird die Marktfähigkeit der Idee festgestellt und etwaige vergleichbare Technologien recherchiert. Ist dies aussichtsreich so wird der nächste Schritt eingeleitet und es gilt zu klären wie Investoren für das Projekt zu finden sind, und welche Partner benötigt werden. Für diese Prozesse gliedert sich Fraunhofer Venture in die Bereiche:

FFI – Fraunhofer fördert Intrapreneurship, hier geht es um die Förderung des Unternehmergeists, die Ideenumsetzung, sowie die Beratung bei der Umsetzung in der Idee zur Lösung. Eine frühe Einbindung in das FFI-Ökosystem bietet Möglichkeiten auf ein großes Gründungsnetzwerk zurückzugreifen. Ebenso wird eine frühe Einbettung in Förderprogramme angestrebt. Dies bildet den ersten Teil der Ausgründung.

Sollte die Umsetzung der Idee vielversprechend sein, und der Technologietransfer angestrebt werden, so übernimmt das FFE – Fraunhofer fördert Entrepreneure. Hier wird die Ausgründung projektbezogen in der Zeit vor der Gründung unterstützt. Es können ein internes Projektbudget, ein Businessplan erstellt und Entwicklungsaktivitäten ausgeführt werden. Das

Verwertungspotential wird ermittelt und die Unsicherheiten werden versucht zu reduzieren. Finanzielle Unterstützung findet sich in einem internen Projektbudget von 50.000 € hier muss allerdings ein Eigenanteil von 50% geleistet werden. Eine Anschlussförderung ist über FFE extended in Höhe von 100.000 € möglich. Während des gesamten Prozess wird durchgängig und individuell gecoacht. Ebenso wird der Zugang zum Fraunhofer Venture Netzwerk ermöglicht.²⁹

Die Gründung ist vollzogen, nun übernimmt FFM – Fraunhofer fördert Management. Hier findet sich vor allem in der kritischen Anfangsphase der frühen Nachgründungsphase viel Unterstützung. Das individuelle Coaching wird beibehalten. Eine finanzielle Förderung ist wie bei FFE mit bis zu 100.000 € möglich, dies ist wichtig, um unkompliziert und flexibel an finanzielle Mittel für die erste Finanzierungsrunde zu kommen.³⁰

KIT Umgebung:

Sollte das IIP des KIT als Projektpartner die Ausgründung vorantreiben, so steht die KIT Umgebung zur Verfügung. Hierzu zählen das Center for Interdisciplinary Entrepreneurship (CIE) sowie die Gründerschmiede des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Einen Überblick über die Vorgänge der Ausgründung liefert hier der ausführliche Gründerguide. Dieser stellt Informationen über den Ausgründungsprozess bereit und zeigt eine mögliche Vorgehensweise mit Beispielen und geeigneten Erfahrungsberichten. Des Weiteren bietet das CIE beratende Tätigkeiten an, ein Netzwerk, in dem die Idee diskutiert werden kann und für weitere Schritte Mentoren, sowie Investoren-Treffen. Eine methodische Unterstützung sowie die Beratung wird während des Gründungsprozess gewährleistet.

²⁹ <http://www.fraunhoferventure.de/de/leistungen/finanzierung/FFE.html> (Aufruf am 29.05.16)

³⁰ <http://www.fraunhoferventure.de/de/leistungen/finanzierung/FFM.html> (Aufruf am 29.05.16)

Öffentlicher Raum:

Der öffentliche Raum wird hier als Umgebung definiert, wo weder Fraunhofer noch KIT Fördermöglichkeiten bieten. Hierzu zählen zum Beispiel die Handwerkskammern der Länder, das Bundesministerium für Bildung und Forschung mit dem Förderprogramm KMU innovativ und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie liefert hier ausführliche Informationen, vor allem Programme wie der Gründungslotse, welcher einen Überblick über die Fördermöglichkeiten bietet, oder dem Behördenwegweiser, welcher bei der Auswahl der zuständigen Behörden für das Vorhaben hilft.

Die Förderdatenbank des BMWi weist circa 1800 Förderprogramme von Bund, Ländern und EU, bei konkretem Businessplan auf. Sie ermöglicht eine gezielte Suche. Das BMWi-Existenzgründungsportal bündelt Hintergrundinformationen, Expertenberatung, Tools und Hilfen rund um die Existenzgründung. Mit dem dazugehörigen BMWi-Businessplan wird eine rund um Betreuung gewährleistet. Dies wird mit Beispielen und Vorlagen bei der Planung der Finanzierung sowie einer Start-App unterstützt.

Ein sehr interessantes Programm zur Förderung einer Gründung liefert hier der EXIST-Forschungstransfer. Dieser gilt für Forschungseinrichtungen die eine Gründungsidee realisieren wollen. In Phase I werden Forschungsergebnisse weiterentwickelt mit dem Ziel der technischen Machbarkeit der Produktidee sicherzustellen. Eine Finanzierung von bis zu 250.000 € wird in dieser Phase zur Verfügung gestellt. In Phase II geht es darum, die Geschäftstätigkeit aufzunehmen und eine externe Anschlussfinanzierung sicherzustellen, dies wird mit einem Gründungszuschuss von bis zu 180.000 € unterstützt.³¹

³¹ <http://www.exist.de/DE/Programm/Exist-Forschungstransfer/Konditionen/inhalt.html;jsessionid=AD0DF28F1CFA8FD91E17A78BC479DE1D> (Aufruf am 29.05.16)

Fazit AP5

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden gemeinsam mit den Praxispartnern Anforderungen an eine ResourceApp erstellt. Auch sollten die wissenschaftlich erarbeiteten Erkenntnisse der vorangegangenen AP praktisch in realen Objekten eingesetzt werden. Nachdem zunächst die Hard- und Softwarekombination in Büroräumen und einer Garage angewendet wurden, wurden mit Unterstützung der Praxispartner zuerst der Teil einer Klinik, anschließend ein Einfamilienhaus aufgenommen und danach durch die Praxispartner abgebrochen. Die Erkenntnisse flossen in die anderen AP für die Weiterentwicklung mit ein. Insgesamt konnten weniger reale Gebäude begangen werden als zu Beginn des Vorhabens angedacht war. Dies lag u.a. daran, dass sich als schwierig dargestellt hat, geeignete Objekte zu finden. Die Gebäude müssen von Ihrer Bauart und dem Zustand her geeignet sein. Es konnten also keine Gebäude begangen werden, die bspw. einsturzgefährdet oder durch Wertstoffdiebe zu sehr vom Originalzustand verändert waren. Auch müssen die Rahmenbedingungen passen. Die Begehung und der anschließende selektive Abbruch dürfen den Zeitplan gegenüber dem Auftraggeber nicht (zu sehr) beeinflussen. Bei den beiden betrachteten Gebäuden stimmten sowohl der Zustand als auch die Rahmenbedingungen der Gebäude. Durch Fachgespräche konnten weitere mögliche Anwendungen des ResourceApp-Ansatzes geprüft und Möglichkeiten für Dienstleistungsansätze aufgezeigt werden.

2.1.6 Projektmanagement (ICT – Ansilla Bayha/Christian Stier)

Die folgende Tabelle 35 zeigt die Untergliederung des sechsten Arbeitspaketes.

Tabelle 35: Untergliederung des Arbeitspakets 6

AP6: Projektmanagement – Operative Kontrolle des Projektes	
• Meilenstein M17: Workshop 1 zusammen mit PRRIG hat stattgefunden	09.07.2013 (Monat 3)
• Meilenstein M18: Workshop 2 zusammen mit PRRIG hat stattgefunden	04.09.2014 (Monat 18)
Outputs	
• Projekttreffen, Zwischen- und Abschlussberichte	
• Veröffentlichungen (nach Absprache)	
• Projektsteuerung	

Das Arbeitspaket 6 „Projektmanagement“, diente der operative Kontrolle des Projektes, mit folgenden Zielen:

- Festlegung der Forschungsschwerpunkte
- Ziel-, Zeit- und Kostenüberwachung,
- Berichtswesen (Dokumentation, Berichte)
- Sicherung Informationsfluss (Termine, Kooperation Projektteam, Projektträger, BMBF)
- Öffentlichkeitsarbeit
- Kooperation mit “PRRIG“-Vorhaben

Während der Projektlaufzeit wurden mehrere Projekt- und Arbeitstreffen, sowie Telefonkonferenzen geplant und durchgeführt. Im Folgenden werden die wichtigsten Ereignisse aufgeführt:

- Kickoff am 17.04.2013 im Rahmen des Kick-off des Förderschwerpunktes r³
- Vorstellung des Projektes ResourceApp zusammen mit PRRIG bei r³ Kick-off am 18.04.2013
- Projekttreffen in Hameln am 29.05.2013
- Workshop mit PRRIG in Darmstadt am 09.07.2013

- Arbeitstreffen IIP, ICT, IGD am IGD in Darmstadt
- Projekttreffen in Pfinztal am 04.09.2013
- Projekttreffen in Darmstadt am 03.12.2013
- Projekttreffen in Peine am 28.04.2014
- Workshop mit Vorhaben PRRIG in Pfinztal am 21.07.2014
- Workshop mit Vorhaben PRRIG in Darmstadt am 04.09.2014
- Projekttreffen in Hameln am 10.12.2014
- 09.02.2015: Telefonkonferenz
- 21.04.2015: Bewertungsworkshop mit der Begleitforschung am Fraunhofer IGD in Darmstadt
- 30.06.2015: 1. Begehung und Abstimmungstreffen in Bad Pyrmont
- 30.07.2015: 2. Begehung und Abstimmungstreffen in Bad Pyrmont
- 01.10.2015: Telefonkonferenz
- 18.11.2015 und 18.12.2015: Telefonkonferenz

Neben den Projekttreffen wurde das Projekt und seine Ergebnisse ebenfalls einem breiten Fachpublikum vorgestellt, dazu gab es Vorträge bei Fachveranstaltungen und Veröffentlichungen, eine genaue Auflistung der Veröffentlichungen findet sich im Abschnitt 2.6.

Bewertungsworkshop mit der Begleitforschung am Fraunhofer IGD in Darmstadt

Am 21. April 2015 fand am Fraunhofer IGD in Darmstadt gemeinsam mit Vertretern der Begleitforschung (TU BAF) ein Bewertungsworkshop statt. Ziel dieses bei fast allen r³-Vorhaben durchgeführten Workshops war es aufbauend auf Einschätzungen der Projektpartner Aussagen zu Gesamteffekten der r³-Fördermaßnahme treffen zu können, um daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. Im Anschluss erfolgte die Erstellung eines Protokolls durch die Vertreter der TU BAF, welches von den Projektpartnern geprüft, ergänzt und zurückgesendet wurde.

Fazit AP6

Das Arbeitspaket AP6 umfasste mit dem Projektmanagement die operative Kontrolle des Projektes. Neben der Organisation und Leitung der Projekttreffen, kümmerte sich das Fraunhofer ICT federführend um das Berichtswesen und leistete seinen Beitrag bei der Verbreitung der Projektergebnisse.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Kostenrahmen wurde wie im beantragten Förderantrag beschrieben, eingehalten. Die Zeitplanung des Projektes wurde eingehalten, es wurde ein gemeinsamer Antrag für eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung (bis 30.06.2016) gestellt, der von der Projektträgerschaft bewilligt wurde.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Durchführung des Projektes, entsprechend der Aufgabenstellung erforderte einen hohen Forschungsaufwand, verbunden mit Personal-, Sach- und Reisekosten. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit zeigt sich zum einen in den im vorher beschriebenen Erreichen der Projektergebnisse. Zum anderen erzeugte das Vorhaben großes Interesse sowohl innerhalb der wissenschaftlichen- als auch anwenderorientierten Gebiete. Dies zeigte sich durch viele Einladungen zu Vorträgen und Veröffentlichungen.

Die Entwicklungen auf dem Markt wie z. B. in Smartphones integrierte 3D-Kameras, zeigt die Aktualität des Forschungsgebiets, aber auch den weiteren Forschungsbedarf basierend auf der technischen Weiterentwicklung der Sensorik.

Das Thema „ResourceApp“ wurde auch im Jahresbericht 2015 des Projektträgers Jülich PTJ aufgenommen.³²

Die ResourceApp-Projektleitung wurde eingeladen einen Vertreter zu einer Expertenrunde bzgl. der im BMBF-Rahmenprogramm FONA3 formulierten Leitinitiative Zukunftsstadt zu schicken. Am 12.10.2015 fand diese Expertenrunde unter Teilnahme eines ICT-Vertreters in Berlin statt. Dies zeigt auch das große politische Interesse an dem Themenfeld der Ressourcenerfassung.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertung der Ergebnisse

Das Marktpotential des Vorhabens wurde im Rahmen des Projektes untersucht und in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt. Potenzielle Anwender der Projektergebnisse sind insbesondere Rückbauplaner und Rückbauunternehmen, aber auch Architekten zeigten Interesse an dem Projekt, da die ResourceApp als Teilergebnis eine Digitalisierung eines Bestandsgebäudes ermöglicht. Dies ist bislang nur mit sehr großem Aufwand verbunden und könnte durch die ResourceApp automatisiert werden.

Der Nutzen des Projektes liegt insbesondere darin, dass die Projektergebnisse für die eher innovationsferne Baubranche eine Möglichkeit bieten, Industrie 4.0 in ihre Prozesse zu integrieren. Dabei ermöglichen die Projektergebnisse die Digitalisierung von Gebäuden und die semantische Weiterverarbeitung dieser Daten. Bei der weiteren, erforderlichen Entwicklung des Demonstrators könnte dies auch auf den Bereich der Gebäudesanierung, der Umplanung und des Projektcontrollings ausgeweitet werden, in dem weitere Aktivitäten bspw. interaktiv integriert werden oder mittels Sensorik der Projektfortschritt automatisiert aufgezeichnet und einem Entscheidungsträger mitgeteilt wird.

³² <https://www.ptj.de/geschaeftsbericht>

Die Vorstellung des Themas auf diversen Konferenzen und bei Gesprächen mit möglichen Anwendern stieß auf großes Interesse. Für die Erreichung eines marktfähigen Produktes wird jedoch weitere Forschungsarbeit notwendig sein.

Auch entstanden Ansätze für Folgeprojekte welche in Form einer Projekt-skizze „Mobile digitale Gebäudeerfassung, Schadstoffanalyse und schadstoffberücksichtigende Planung und Durchführung von Sanierungs- und Abbruchmaßnahmen in Bestandsgebäuden zur Verbesserung des Gesundheits- und Umweltschutzes (Akronym: „HealthSense“)“ im Juli 2015 beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des FuE-Programms „Zukunft der Arbeit“ mit dem Forschungsschwerpunkt: „Arbeit in der digitalisierten Welt“ eingereicht wurde.

Die automatisierte Abbildung realer Verhältnisse in digitalen Modellen und Prozessen ist ein sehr innovativer Ansatz (Stichwort: Industrie 4.0). Es besteht daher großer Forschungsbedarf an der geeigneten Verarbeitung und Integration von Sensordaten im Baubereich sowie deren semantische Modellierung (siehe auch z. B. [Thomson 2015], [Xiong et al. 2013], [Valero et al.2012]). Auch die Weiterverwendung der Daten in betrieblichen Prozessen bspw. in Projektplanungssystemen, betrieblichen Enterprise-Resource-Planning (ERP)³³-Systemen, Verwertungs-/ Abfallmanagementsystemen und deren Dokumentationen in Gebäude-Management-Systemen (FM) oder aktuellen Architektur-Modellierungsprogrammen (BIM) sind wichtige Fragestellungen. Aus der Industrie stark nachgefragt wird neben der Anwendung im Rückbau vor allem die Anwendung in existierenden Gebäuden für das Gebäudemanagement oder für die Planung von Maßnahmen im Bereich der Gebäudesanierung (automatisierte Gebäudeaufnahme als Planungsgrundlage), der Gebäudemodernisierung, des Gebäudeumbaus aber auch im Bereich des Neubaus (Abgleich des vorhandenen geplanten Gebäudemodells mit aktuellen

³³ Englisch für Enterprise-Resource-Planning. Beschreibt bereichsübergreifende (Software)lösungen für betriebswirtschaftliche Prozesse.

Sensordaten von der Baustelle). Für diese vielversprechenden Anwendungsfelder besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich Erfassung weiterer Bauteiltypen, der Anpassung und detaillierten Inventarisierungsmethodik und Projektplanung sowie Anbindung an vorhandene Gebäudemanagement-Systeme oder Planungssysteme wie CAD/BIM. Zudem könnte das Modell auf andere Bereiche erweitert werden, wie bspw. die Aufnahme und die Projektplanung von Infrastrukturen, Kraftwerken oder Verkehrsmitteln.

Für die weitere Anwendung der ResourceApp ist aufgrund der komplexen Gebäudegeometrien und zahlreicher Bauteiltypen in Gebäuden, der hohen Datenvolumina sowie der technischen Grenzen heutiger Sensoren und Computer weiterer Forschungsbedarf vorhanden. In Folgeprojekten könnte das aktuelle ResourceApp-System um weitere, zu erkennende Bauteile der tragenden Struktur sowie der technischen Gebäudeausstattung oder der Materialien erweitert werden. Speziell müssten neuere und zusätzliche Sensoren entwickelt werden, bspw. zur Material- oder Schadstofferkennung oder der Einsatz von Drohnen (u. a. für Außenaufnahmen) getestet werden. Aufgrund der aktuellen technischen Grenzen von Smartphones und Tablets ist die ResourceApp bisher auch noch keine klassische „App“, sondern benötigt einen leistungsfähigen Laptop mit externem Sensor, zur Verarbeitung der großen Datenmengen. Sobald diese technischen Grenzen überwunden sind, kann die ResourceApp auch als „echte“ App in kleineren Geräten angewendet werden. Zudem sind Sensitivitätsanalysen und weitere Funktionalitäts- und Praxistests der ResourceApp erforderlich, um die Beeinflussungsfaktoren des Systems zu ermitteln sowie die Praxistauglichkeit auch in anderen Gebäuden und Gebäudetypen zu zeigen.

2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen

Im Rahmen der Literaturrecherche sind zahlreiche Quellen untersucht worden, die für die Durchführung des Vorhabens von Relevanz waren. Im Rahmen deutscher Forschungsprojekte ist hier insbesondere das nuBAU-Projekt des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung BBR zu nennen [Donath et al. 2010]. Dieses Forschungsprojekt wies einige methodische Parallelen auf, da es sich mit der Bild- bzw. Mustererkennung von Gebäudeteilen befasst, jedoch dies zur Abschätzung von Sanierungskosten im Rahmen von Baumaßnahmen im Bestand nutzt. International gibt es insbesondere von den Arbeitsgruppen um Huber et al., Akbarnezhad, Cheng und Ma interessante Beiträge zur automatisierten Gebäudeerfassung [Huber et al. 2011], basierend auf Punktwolken sowie zur Ableitung von Recyclingstrategien basierend auf Gebäudemodellen [Akbarnezhad et al. 2012], [Akbarnezhad et al. 2014], [Cheng und Ma 2012]. Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in einem Journalpapier und in einem Konferenzpapier zusammengefasst und veröffentlicht [Volk et al. 2014], [Volk et al. 2015]. Der Fokus lag dabei insbesondere auf dem Einsatz von neuen Technologien wie Building Information Models (BIM), Laserscanning, Photogrammetrie, RFID oder Barcodes zur Erfassung und Speicherung bauproduktbezogener Informationen zur Bestimmung von Rohstoffinventaren, der Rückbauplanung und der Ressourceneffizienz der eingebauten Bauteile sowie der Projektplanung von Rückbauprojekten. Aus wissenschaftlicher Sicht sind keine weiteren Fortschritte anderer Stellen bekannt (IIP).

Weitere Wissenschaftliche Ansätze verfolgen das ebenfalls im r³-Kontext geförderte Vorhaben PRRIG, mit welchem auch eine Zusammenarbeit in Form von Workshops stattfand (siehe Abschnitt 1.5 und 2.1.1.2). Die Technische Universität Wien untersucht ebenfalls Gebäude als urbane Mine [Kleemann et al. 2016]. Sowohl PRRIG als auch die Aktivitäten der TU Wien nutzen jedoch andere Ansätze und keine bilderkennenden Systeme zur Wertstoffermittlung.

Was die technischen Systeme betrifft, wurden im Kapitel 2.1.5.5 verschiedene Möglichkeiten dargelegt. Alle aufgeführten Systeme arbeiten nach anderen Prinzipien, als die ResourceApp und nur das Produkt von Leica stellt ein wirkliches Konkurrenzsystem zur ResourceApp dar. Bei einem der ResourceApp vergleichbaren Ausstattungsumfang ist das System preislich mit fast 300.000 € jedoch weit von den durch die Befragung ermittelten Zahlungsbereitschaften der möglichen Anwender entfernt.

2.6 Erfolgte Veröffentlichungen

[Hübner, F., et al. 2017] Review of project planning methods for deconstruction projects of buildings [in press]. Built environment project and asset management, 7 (2). doi:10.1108/BEPAM-11-2016-0075

[Kühlen et al. 2016] Kühlen, A.; Volk, R.; Schultmann, F. (2016). State of the Art of Demolition and Reuse and Recycling of Construction Materials. Proceedings of the CIB World Building Congress 2016: Volume V - Advancing Products and Services. Ed.: N. Achour, 664-678, Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering, Tampere.

[Stier 2014] Stier, C.: „ResourceApp“ Erkennung & Erschließung von Rohstoffpotenzialen aus dem Hochbau mittels eines mobilen Systems. Vortrag, URBAN MINING Kongress & r³ Statusseminar „Strategische Metalle. Innovative Ressourcentechnologien“. Essen, 12.06.2014

[Stier et al. 2014_1] Stier, C.; Bayha, A.; Volk, R.; Sevilmis, N.: ResourceApp - Erkennung und Erschließung von Rohstoffpotenzialen aus dem Hochbau. Vortrag, Jahreskongress des Deutschen Abbruchverbandes 2014, Wiesbaden, 18.-20.09.2014

[Stier et al. 2014_2] Stier, C.; Woidasky, J.; Bayha, A.; Stork, A.; Sevilmis, N.; Schultmann, F.; Volk, R.; Stengel, J. (2014): Erkennung und Erschließung von Rohstoffpotenzialen aus dem Hochbau mittels eines mobilen Systems – ResourceApp. Konferenzbeitrag und Poster, In: Ulrich Teipel,

Armin Reller (Hrsg.) 3. Symposium "Rohstoffeffizienz + Rohstoffinnovationen", Nürnberg, 5.+6.02.2014, Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg, 496 S., Fraunhofer Verlag, Stuttgart, pp. 355-362, ISBN 978-3-8396-0668-1, 2014

[Stier et al. 2015_1] Stier, C; Bayha, A.; Forberger, J.; Sevilimis, N; Volk, R.: Erkennung und Erschließung von Rohstoffpotenzialen aus dem Hochbau mittels eines mobilen Systems – ResourceApp. Poster und Tagungsbeitrag, Jahrestagung Aufbereitung und Recycling am 11./12.Nov. 2015. Freiberg, 2015, pp. 41-42

[Stier et al. 2015_2] Stier, C.; Volk, R.; Sevilimis, N.: ResourceApp - zur mobilen Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau. Vortrag, Ressourceneffizienz – Baustoffe effizient verwenden, Nutzen und recyceln - Messe Bau 2015. München, 20.01.2015

[Stier et al. 2015_3] Stier, C.; Volk, R.; Sevilimis, N.: ResourceApp. Vortrag, r³ Abschlusskonferenz „Die Zukunftsstadt als Rohstoffquelle – Urban Mining“. Bonn, 16.09.2015

[Stier et al. 2016_1] Stier, C.; Volk, R.; Sevilimis, N.; Bayha, A.: Erkennung und Erschließung von Rohstoffpotenzialen aus dem Hochbau mittels eines mobilen Systems – ResourceApp. Vortrag, Fachtagung Recycling R'16. Weimar, 19.09.2016

[Stier et al. 2016_2] Stier, C.; Volk, R.; Sevilimis, N.; Bayha, A.; Glöde, H.: ResourceApp: Innovativer Ansatz zur Erkennung und Erschließung von Rohstoffen im Hochbau sowie künftige Handlungs- und Forschungsbedarfe beim Bauschuttrecycling. Vortrag, Tagung Aufbereitung und Recycling. Freiberg, 09.11.2016

[Volk et al. 2014] Volk, R.; Stengel, J.; Schultmann, F.: Building Information Modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs, Automation in Construction, 2014, pp. 109–127

[Volk et al. 2015a] Volk, R.; Hübner, F.; Schultmann, F.: Robust multi-mode resource constrained project scheduling of building deconstruction under uncertainty, 7th Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications (MISTA 2015), Prague, Czech Republic, 25-28 August 2015, pp. 638-644

[Volk et al. 2015b] Volk, R.; Sevilmis, N.; Schultmann, F.: Deconstruction project planning based on automatic acquisition and reconstruction of building information for existing buildings, In: Proceedings of SASBE2015, Smart and Sustainable Built Environments Conference, 9-11.12. 2015 in Pretoria, South Africa, pp.47-56, ISBN 978-0-7988-5624-9

[Volk et al. 2016] Volk, R.; Sevilmis, N.; Stier, C.; Bayha, A. (2016): ResourceApp – Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur und Produkten. Beitrag zum Abschlussbuch für die r³ Fördermaßnahme, In: Dürkoop, A.; Brandstetter, C. P.; Gräbe G.; Rentsch, L. (Hrsg.) Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien. Ergebnisse der Fördermaßnahme r³, Freiberg, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, pp. 389-404, ISBN 978-3-8396-1102-9, 2016

[Volk et al. 2017] Volk, R.; Luu, T.-H.; Mueller-Roemer, J.; Sevilmis, N.; Schultmann, F.: Deconstruction project planning of existing buildings based on automated acquisition and reconstruction of building information – demonstrated in a non-residential case study (eingereicht)

[Volk 2017] Volk, R.: Proactive-reactive, robust scheduling and capacity planning of deconstruction projects under uncertainty, Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016, Produktion und Energie Band 20, KIT Scientific Publishing, 2017, 475 Seiten, Englisch, ISBN: 978-3-7315-0537-2

[Woidasky et al. 2013_1] Woidasky, J.; Stier, C.; Stork, A.; Sevilmis, N.; Schultmann, F.; Stengel, J.: Erkennung und Erschließung von Rohstoffpotentialen aus dem Hochbau. Vortrag und Konferenzbeitrag, 2.

Darmstädter Ingenieurkongress, ISBN 978-3-8440-1747-2, Darmstadt, 12.03.2013, S. 669-673

[Woidasky et al. 2013_2] Woidasky, J.; Stier, C.; Stork, A.; Sevilmis, N.; Bein, M.; Schultmann, F.; Stengel, J.; Volk, R.: Erkennung und Erschließung von Rohstoffpotentialen aus dem Hochbau. Vortrag, Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress Baden-Württemberg 2013, Forum 12 – Ressourceneffizienz in der Bauwirtschaft. Stuttgart, 13.11.2013

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	ResourceApp - Allgemeines Vorgehen	2
Abbildung 2:	Abfallaufkommen in 10 ³ t für Deutschland 2014.....	10
Abbildung 3:	Demontagestufen beim Gebäuderückbau	19
Abbildung 4:	Schadstoff-Typologie mit einer Auswahl an auftretenden Schadstoffen in Gebäuden und den ResourceApp betrachteten Typen (grau)	37
Abbildung 5:	Mengenrelevanz des deutschen Gebäudebestands nach Nutzungsarten.....	40
Abbildung 6:	Typologie zur Konstruktionsweise der Wohngebäude und der in ResourceApp betrachtete Typen.....	42
Abbildung 7:	Vergleich der paarweisen und globalen Registrierung .	52
Abbildung 8:	Benutzungsoberfläche der ResourceApp: 3D-Ansicht (oben), 2D-Ansicht (unten) und Werkzeugleiste (rechts)	53
Abbildung 9:	Schritte der 3D-Rekonstruktion: Aus einer Punktwolke (a) gewinnt die Wanderkennung ein Grundriss und daraus die Wände (b). Dann sucht die Objektanalyse nach Türen und Fenstern (c) und anschließend wird das Model manuell nachbearbeitet (d).....	53
Abbildung 10:	Vereinfachte Systemarchitektur von ResourceApp, (Stand: 28.06.2016)	58
Abbildung 11:	Eingabemaske 1 – Gebäudestammdaten, Gebäudeanschlüsse der TGA und detaillierte, importierte Raumstammdatenliste.....	59
Abbildung 12:	Übersicht über die Bauteilinventarisierung in ResourceApp	62
Abbildung 13:	Eingabemaske 2 - Nutzereingabe der Modellparameter für die Inventarisierung des vorliegenden Einzelgebäudes	65

Abbildung 14:	Vertikale und horizontale Leitungsführung in Wohngebäuden (nach DIN18015-03:2007-09).....	66
Abbildung 15:	Eingabemaske 3 - Nutzereingabe der Modellparameter für die Rückbauplanung des vorliegenden Einzelgebäudes	67
Abbildung 16:	Ausgabemaske Inventarisierung und Projektplanung für den Gebäuderückbau	69
Abbildung 17:	Berechnungsergebnisse der durchschnittlichen Projektdauer und Projektkosten der ermittelten Rückbaustrategien	70
Abbildung 18:	Beispielgarage 1 (fiktiv), T: Tür/Tor, W: Wand, F: Fenster.....	71
Abbildung 19:	Exemplarische Massenbilanzabweichungen der Beispielgarage 1 (nach Tabelle 1).....	74
Abbildung 20:	Beispielgarage 2 (reale Garage am ICT).....	76
Abbildung 21:	Grundriss mit exemplarischer Lokalisierungsbezeichnung der Beispielgarage 2.....	77
Abbildung 22:	Google SketchUp-Modellansicht in drei verschiedenen Perspektiven den Fallbeispiels Apartment und seine Bauteil-IDs.....	78
Abbildung 23:	Vertikale Projektion (Grundriss) mit den Raumnummern und der Grundfläche je Raum [m ²] im Google SketchUp-Modell für das Fallbeispiel Apartment	78
Abbildung 24:	Vertikale Projektion (Grundriss) der Innenwände mit den Raumnummern (links) und Drahtmodell in isometrischer Projektion (rechts) als graphische Ausgabe aus ResourceApp (Modellteil B)	79
Abbildung 25:	Bruttogrundfläche des Apartments, blau: äußere Gebäudehülle (inkl. Außenwänden), rot: innere Gebäudehülle (Sicht auf Innenwände)	82

Abbildung 26:	Bruttorauminhalt des Apartments, blau: äußere Gebäudehülle (inkl. Außenwänden), rot: innere Gebäudehülle (exkl. Außenwänden)	82
Abbildung 27:	Allgemeine Arten von Rückbauaktivitäten und ihre Reihenfolge vom Bauteil zur Wiederverwendung, stofflichem oder energetischem Recycling, der Verfüllung und der Entsorgung	98
Abbildung 28:	Rückbauverfahren (Modi) und ihre Anwendbarkeit auf Konstruktionsweisen, Bauteile und Baustoffe.....	100
Abbildung 29:	Vorrangreihenfolge der Rückbauaktivitäten für ein dreigeschossiges Gebäude	101
Abbildung 30:	Screenshot des MATLAB-Fensters nach Aufruf der ResourceApp und Bestätigung der Nutzereingabemaske 1	102
Abbildung 31:	Krankenhaus Bad Pyrmont, links: Hofansicht, rechts: Straßenansicht	106
Abbildung 32:	Grundriss und Fluchtplan Krankenhaus Bad Pyrmont, 2.OG mit Markierung des aufgenommenen Bereichs	106
Abbildung 33:	Veralterter Grundriss des Krankenhauses Bad Pyrmont, 2.OG	107
Abbildung 34:	Innenraumansichten Krankenhaus Bad Pyrmont, oben links: Gang, oben rechts: Badezimmer, unten beide: Patientenzimmer	107
Abbildung 35:	Punktwolke aus der Sensoraufnahme (links oben) und automatisch erzeugtes 3D-Modell eines Patientenzimmers im ausgewählten Gebäudebereich eines Krankenhauses in Bad Pyrmont (links unten), sowie ein Eindruck aus der Gebäudebegehung mit Laptop und Sensor (rechts oben und unten).....	108

Abbildung 36:	Geschätzter Bruttorauminhalt [m ³] (links) und Bruttogrundfläche [m ²] (rechts) des Praxisbeispiels Krankenhausgeschoss	109
Abbildung 37:	Graphische Ausgabe aus dem ResourceApp- Modell, Grundriss (links) und Drahtmodell (rechts).....	110
Abbildung 38:	Berechnete und gemessene Massen unterschiedlicher Abfall-fractionen im Praxisbeispiel Krankenhaus	111
Abbildung 39:	Wohnhaus in Lemgo, links: Straßenansicht, rechts: Hofansicht	112
Abbildung 40:	Grundriss des Wohnhauses Lemgo in Autodesk Revit, EG (links) und 1.OG (rechts)	113
Abbildung 41:	Grundriss des Dachgeschosses des Wohnhauses in Lemgo in Autodesk Revit	113
Abbildung 42:	Ansichten des Wohnhauses Lemgo in Autodesk Revit	113
Abbildung 43:	Innenraumansichten des Wohnhauses in Lemgo im 1. OG zum Zeitpunkt der Begehung und des Demonstratortests	114
Abbildung 44:	Automatisiert erzeugter Grundriss und Drahtmodell von Praxisbeispiel Wohnhaus Lemgo (1.OG) basierend auf Sensordaten	115
Abbildung 45:	Eingabemaske 1 für das Wohngebäude Lemgo mit den bereits importierten Sensordaten und der erzeugten Raumliste (rechts) sowie den Angaben zu den Gebädestammdaten (links) und den Gebäudeanschlüssen (Mitte).....	117
Abbildung 46:	Räumliche Abschätzung des umbauten Raums des Wohngebäudes Lemgo hinsichtlich der Bruttogrundfläche [m ²] (links) und des Bruttorauminhalts [m ³]	118
Abbildung 47:	Grundriss und 3D-Drahtmodell in ResourceApp (gesamtes Gebäude)	118

Abbildung 48:	Berechnete und gemessene Massen unterschiedlicher Abfallfraktionen im Praxisbeispiel Wohngebäude Lemgo.....	120
Abbildung 49:	Microsoft Kinect Tiefenkamera.....	125
Abbildung 50:	Auswertung Fragebogen: Erwartete Eigenschaften von einer ResourceApp	139
Abbildung 51:	Auswertung Fragebogen: Überwiegender Arbeitsschwerpunkt der befragten Unternehmen	142
Abbildung 52:	Fotos von dem selektiven Rückbau des Krankenhauses in Bad Pyrmont.....	145
Abbildung 53:	Abbruchobjekt Lemgo: Vorbereitetes Gebäude	150
Abbildung 54:	Abbruchobjekt Lemgo: Abbruch Dachstuhl per Hand aus Bühne	150
Abbildung 55:	Abbruchobjekt Lemgo: Beginn der maschinellen Rückbauarbeiten	150
Abbildung 56:	Abbruchobjekt Lemgo: Abbruch des Straßengiebels und OG sowie Teilbereiche des Dachstuhls	151
Abbildung 57:	Abbruchobjekt Lemgo: Straßenfront des Gebäudes ist abgebrochen, im Vordergrund Sortierungshaufen Stahl und Kupfer	151
Abbildung 58:	Abbruchobjekt Lemgo: Abbruch Dachstuhl und Decken EG und OG, rechts Sortierung Holz	152
Abbildung 59:	Abbruchobjekt Lemgo: Abstand zum Nachbargebäude (links), Sortierungshaufen Vermüllung.....	152
Abbildung 60:	Abbruchobjekt Lemgo: Nahezu vollständiger Abbruch der aufstehenden Wände.....	153
Abbildung 61:	Abbruchobjekt Lemgo: Vollständiger Abbruch Gebäude Orpingstraße Lemgo, lediglich die Remisen müssen noch abgebrochen werden	153
Abbildung 62:	Abbruchobjekt Lemgo: Vollständiger Abbruch Gebäude Orpingstraße Lemgo, lediglich die Remisen müssen noch abgebrochen werden	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zielwertstoffe im r^3 Projekt ResourceApp	4
Tabelle 2:	Anteil und Gewicht von Metallen in Rückbauprojekten	12
Tabelle 3:	Zeit- und Meilensteinplanung.....	26
Tabelle 4:	Untergliederung des Arbeitspakets 1.....	27
Tabelle 5:	Strukturierung der Bauteile in ResourceApp, Priorisierung der Bauteile (nach der Priorität: 1: hoch, 2: mittel, 3: niedrig) sowie identifizierte, relevante Normen	31
Tabelle 6:	Übersicht Normenrecherche zu Rohrleitungen in Gebäuden im Hinblick auf den Werkstoff, Rohrgeometrien und Eignung für verschiedene Technische Gebäudeausrüstungen (TGA)	32
Tabelle 7:	Vorschlagsliste mit Stoffidentifikation für Garagen des Gebäudetyps V (1: möglicherweise enthaltene Bauteil-Baustoff-Kombination)	34
Tabelle 8:	Auflistung der Gebäude-Stammdaten.....	39
Tabelle 9:	Bauwerksunterklassen und Nutzungsarten.....	41
Tabelle 10:	Rohstoffbezogene, baualtersklassen-unabhängige Gebäudetypen die für Wohngebäude relevant sind	43
Tabelle 11:	Derzeitige Abbruchmaterialschätzungen je Bauart und Baualtersklasse in $[t/m^3 \text{ BRI}]$ in der Literatur.....	45
Tabelle 12:	Einteilungen verschiedener Baualtersklassen von Wohngebäuden in Deutschland.....	46
Tabelle 13:	Untergliederung des Arbeitspakets 2.....	48
Tabelle 14:	Untergliederung des Arbeitspakets 3.....	55
Tabelle 15:	Gebäudestammdaten der Beispielgarage 1 (fiktiv)	72
Tabelle 16:	Beispielhafte Massenbilanzierung für Garagenbeispiel 1 (fiktiv).....	73

Tabelle 17:	Beispielhafte monetäre Bewertung der Massenbilanzierung für Garagenbeispiel 1 (fiktiv) nach Marktpreisen der Region Hannover.....	74
Tabelle 18:	Massenbilanzabweichungen der Beispielgarage 1 durch Unsicherheiten bei verdeckten Bauteilen am Beispiel der Elektrischen Anlagen (444**).....	75
Tabelle 19:	Gebäudestammdaten der Beispielgarage 2 (real am ICT)	77
Tabelle 20:	Allgemeine Gebäudeinformation bezüglich der enthaltenen Bauteile, Punkt- und Flächeninformation (Fallstudie Apartment)	78
Tabelle 21:	Beispielhafte OBJ-Schnittstellen-Struktur für Flächeninformation (f=faces) mit den Daten für das Fallbeispiel Apartment.....	79
Tabelle 22:	Liste der Inventarisierungsparameter die in der Fallstudie Apartment verwendet wurden.....	81
Tabelle 23:	Struktur der CSV-Schnittstelle mit Flächenbauteilen (f=faces) und Punktbauteilen (v=vertices), dem tragenden Bauteil oder dem Raum (Parent) und Baustoffinformation für die Fallstudie Apartment.....	84
Tabelle 24:	OBJ-Schnittstelle und Datensatz für Fallstudie Apartment mit (x,y,z)-Koordinaten	85
Tabelle 25:	Baustoffkategorien im ResourceApp-Modell	88
Tabelle 26:	Aggregiertes Baustoffinventar für die Fallstudie Apartment im Basisszenario mit erwarteten Entsorgungskosten je Baustoffkategorie.....	89
Tabelle 27:	Verwertungspfade mit den berechneten Baustoffmassen [t] für Fallstudie Apartment im Basisszenario.....	89
Tabelle 28:	Auflistung der im Modell implementierten Modi (technische Ausführungsvarianten).....	99
Tabelle 29:	Rohstoffinventar Wohngebäude Lemgo.....	120
Tabelle 30:	Untergliederung des Arbeitspakets 4	122

Tabelle 31:	Untergliederung des Arbeitspakets 5.....	127
Tabelle 32:	Anforderung an die ResourceApp in unterschiedlichen Projektphasen	128
Tabelle 33:	Materialzusammensetzung des Abbruchgebäudes in Lemgo anhand der Wiegescheine	149
Tabelle 34:	Vergleich von Konkurrenzprodukten der ResourceApp .	162
Tabelle 35:	Untergliederung des Arbeitspakets 6.....	168

Literaturverzeichnis

[Ackermann et al. 2010] Ackermann, J.; Ritz, M.; Stork, A.; Goesele, M.: Removing the Example from Examplebased Photometric Stereo. In: You, S. (Organizer) u.a.: Reconstruction and Modeling of Large-Scale 3D Virtual Environments: ECCV 2010 Workshop W10, 14 p.

[AGÖF 2013] AGÖF: Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V. (AGÖF) - Fachinformationen zu Schadstoffen 2013, http://agoef.de/agoef/schadstoffe/schadstoffe_uebersicht.html.

[Akbarnezhad et al. 2012] Akbarnezhad, A.; Ong, K.; Chandra, L. and Lin, Z.: "Economic and Environmental Assessment of Deconstruction Strategies Using Building Information Modeling." In: Proceedings of Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World, West Lafayette, USA, 2015, 1730–1739

[Akbarnezhad et al. 2014] Akbarnezhad, A.; Ong, K. and Chandra, L.: "Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling." In: Automation in Construction, 37, 2014, 131–144.

[Berg et al. 2010] Berg A, Bischof W, Bossemeyer H-D, Clemens-Ströwer M, Dill I, Fischer G, Jäckel U, Kämpfer P, Kessel M, Koser F, Osberghaus T, Schauer M, Schwarz E, Stache A, Theißen H, Thumulla J, Varbelow H, Wiesmüller G, Wilke M, Zwiener G.: Schadstoffe in Innenräumen und an Gebäuden. 1. Aufl. Köln: Rudolf Müller; 2010.

[BG Bau 2013] BG Bau: Gefahrstoff-Informationssystem der BG BAU - GISBAU 2013.

[Brunner 2009] Brunner, P.H.: Quo vadis Baurestmassen? Nachhaltige Bewirtschaftung von Baurestmassen – ein Beitrag zur Ressourcenschonung. Proceedings "Nachhaltige Nutzung von Baurestmassen – Ein Beitrag zur Ressourcenschonung und Umweltverträglichkeit im Bauwesen, 13. November, Wien. http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_187072.pdf.

[Buchert et al. 2004] Buchert, M.; Fritsche, U.; Jenseit, W.; Rausch, L.; Deilmann, C.; Schiller, G.; Siedentop, S. and Lipkow, A. (2004): Material-flow related elements for a national concept of Sustainable Development - linking the construction and housing sector with the corresponding infrastructure/Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland: Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche Infrastruktur“. UBA, 412.

[Cheng und Ma 2012] Cheng, J. and Ma, L.: “A BIM-based System for Demolition and Renovation Waste Quantification and Planning.” In: Proceedings of the 14th International Conference on computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2012), Moskow, 2012

[Corsten 1994] Corsten, H.: Produktionswirtschaft. München, Wien, Oldenburg.

[Daub 1994] Daub, A.: Ablaufplanung: Modellbildung, Kapazitätsabstimmung und Unsicherheit. Bergisch Gladbach, Köln.

[DBU 2013] Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU (Hrsg.): Bauen und Wohnen - ressourcenschonend und energieeffizient, Osnabrück. 2013. <https://www.dbu.de/phpTemplates/publikationen/pdf/070213013430iea6.pdf>

[DBU 2014] DBU: Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch (unveröffentlichter Projektbericht), Az: 29014/02-23. 2014.

[Destatis 2011] Destatis: „Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969 – 2011“

[Deutscher Abbruchverband 2015] Deutscher Abbruchverband e.V.: Abbrucharbeiten - Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung. Rudolf Müller, Köln.

[Deutscher Abbruchverband 2016] Deutscher Abbruchverband e.V.: <http://www.deutscher-abbruchverband.de/index.php?page=verzeichnis> (28.09.2016)

[Dirlich et al. 2011] Dirlich, S., Gruhler, K., and Deilmann, C.: Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. BMVBS, Dresden.

[Donath et al. 2010] Donath, D.; Petzold, F; Braunes, J.; Fehlhaber, D.; Tauscher, H.; Junge, R.; Göttig, R.s: IT-gestützte projekt- und zeitbezogene Erfassung und Entscheidungsunterstützung in der frühen Phase der Planung im Bestand (Initiierungsphase) auf Grundlage eines IFC-basierenden CMS. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Stuttgart, 2012

[Ee concept 2013] Ee concept gmbh: Schadstoffe in Bauwesen | Hintergrundinformationen - ee concept GmbH 2013, <http://www.ee-concept.de/leistungen/baustoffberatung/schadstoffberatung/schadstoffe.html>.

[Erdmann et al. 2004] Erdmann, L. et al. (2004): Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen. Werkstattbericht Nr. 68 des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. S. 28.

[Faulstich 2010] Faulstich, M.: Informationspapier zur BMBF-Fördermaßnahme „r³ - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien, S.55.

[Faulstich 2011] Faulstich, M.: Entwicklung der Abfallwirtschaft zur Ressourcenwirtschaft in Recycling Almanach

[Fergus 2003] Fergus R.; Perona P.; Zisserman A.: Object class recognition by unsupervised scale-invariant learning, CVPR, Vol. 2, pp. 264-271.

[Goemann 1997] Goemann, J.: Rückbau des Eisenwerkes Homberg (Efze) – Holzhausen. In Koch/Schneider (Hg.) Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau.

[Goesele et al. 2007] Goesele M.; Snavely N.; Curless B.; Hoppe H.; Seitz S. M.: Multi-view stereo for community photo collections, in Proc. Int. Conf. Comput. Vis.

[Goesele et al. 2010] Goesele, M.; Ackermann, J.; Fuhrmann, S.; Klowsky, R.; Langguth, F.; Muecke, P.; Ritz, M.: Scene Reconstruction from Community Photo Collections. In: IEEE Computer 43, 6, pp. 48-53.

[Golem 2016] Voller Körpereinsatz im Wohnzimmer: <http://www.golem.de/1011/79226.html>; 19.04.2016.

[Görg 1997] Görg H.: Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. TU Darmstadt, 1997.

[Huber et al. 2011] Huber D, Akinci B, Adan A, Anil E, Okorn B, Xiong X.: Methods for Automatically Modeling and Representing As-built Building Information Models. Proceedings of the NSF CMMI Research Innovation Conference, 2011.

[IWU 2005] IWU: Deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze. Darmstadt: IWU; 2005.

[IWU 2011] IWU: Deutsche Gebäudetypologie - Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt; 2011.

[IWU 2012a] IWU: TABULA - Scientific Report Germany - Further Development of the German Building Typology. 2012.

[IWU 2012b] IWU: TABULA - Webseite: <http://www.building-typology.eu/country/typology-de.html>, DE Germany 2012.

[Kadir et al. 2001] Kadir T.; Brady M.: Saliency, scale and image description. IJCV,45(2):83–105.

[Klauß et al. 2009] Klauß S, Kirchhof W, Gissel J.: Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten, Bericht. Kassel: Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB); 2009.

[Kleemann et al. 2016] Kleemann, F.; Lederer, J.; Aschenbrenner, P; Fellner, J.: Gebäude als urbane Mine – Fallstudie Wien. Vortrag, Fachtagung Recycling R'16. Weimar, 19.09.2016

[Knappe et al. 2010] Knappe, F., und Lansche, J. :Optimierung der Verwertung mineralischer Bauabfälle in Baden-Württemberg. ifeu, Heidelberg.

[Kohler et al. 1999] Kohler N, Hassler U, Paschen H.: Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen. Berlin: 1999.

[Kohlhammer 1978] Kohlhammer: Systematik der Bauwerke. Wiesbaden: W. Kohlhammer GmbH Stuttgart und Mainz; 1978.

[Künzel 2016] Künzel, H.M., Plagge, R., Klauß, S.: MASEA – geprüfte Datenbank: Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung, <http://www.masea-ensan.de/>, (Aufruf: 28.09.2016), Fraunhofer IBP, TU Dresden, ZUB

[Landesanstalt für Umweltschutz 2001] Landesanstalt für Umweltschutz: Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden – Handlungshilfe. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/13512/?shop=true>.

[Leibe et al. 2004] Leibe, B.; Schiele, B.: Combined Object Categorization and Segmentation with an Implicit Shape Model, in: ECCV'04 Workshop on Statistical Learning in Computer Vision, pp. 1–15.

[LFU 2001] LfU.: Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden - Handlungshilfe. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; 2001.

[Lippok 2007] Lippok J., Korth D.: Abbrucharbeiten - Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung. 2. aktualisierte und erweiterte. Köln: Rudolf Müller; 2007.

[Loga et al. 2012] Loga T, Diefenbach N, Stein B.: Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Main Results of the TABULA project - Final Project Report -. IWU; 2012.

[Lowe 2004] Lowe, D.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Int. J. of Computer Vision*, 60, 2, pp. 91-110.

[Maas 2010] Maas, A.: Bestandsersatz als Variante der energetischen Sanierung. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. <http://www.bvbaustoffe.de/root/img/pool/downloads/studie-bestandsersatz.pdf>.

[May 2011] May: Statistik des Bauabgangs - Merkmalsdefinitionen. DESTATIS; 2011.

[Nießen 1997] Nießen, R.; Koch, E.: Verwertung von Bauabfällen. in Koch/Schneider (Herausgeber) *Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau*. Springer. Berlin.

[Petzschmann 1987] Petzschmann, E. (1987): Recycling der Umwelt zu liebe, in: *Baumarkt* Nr. 5, Düsseldorf.

[Recycling Park Harz 2014] Recycling Park Harz GmbH: Entsorgung von Bauschutt, mineralischen Abfällen, Mischabfälle, Elektroschrott, Kompost, Altreifen | Recycling-Park Harz 2014, <http://www.recyclingpark.de/entsorgung.html> (Abruf: 08.01.2014)

[Rentz 1998a] Rentz, O.: Rückbau des staatlichen Aufbaugymnasiums Rottweil – Gebäudeauditierung, Rückbau und Verwertungsplanung. Auftraggeber: Staatliches Vermögens- und Bauamt Rottweil

[Rentz 1998b] Rentz: Chantier de déconstruction sélective Lycée Xavier Bichat, Nantua. Rapport final, Juillet 1999, S. 24

[Rentz et al. 1994] Rentz, O. et al.: Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden, dargestellt am Beispiel des Hotel Post in Dobel, 146 S., Ecomed, Landsberg

[Rentz et al. 1998a] Rentz, O. et al.: Selektiver Gebäuderückbau und konventioneller Abbruch – Technisch-wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes. ecomed. Landsberg.

[Rentz et al. 1998b] Rentz, O. et al.: Selektiver Rückbau und konventioneller Abbruch – Technisch-Wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes, Ecomed, Landsberg, S. 108

[Rentz et al. 2001] Rentz, O.; Seemann, A.; Schultmann, F.: Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden – Handlungshilfe, Endbericht zum gleichnamigen Projekt im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, erschienen unter: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Reihe „Kreislaufwirtschaft und Abfallbehandlung“, Nr. 17, <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/13512/?shop=true>

[Ritz et al. 2010]Ritz, M.; Scholz, M.; Goesele, M.; Stork, A. (2010): High Resolution Acquisition of Detailed Surfaces with Lens-Shifted Structured Light. In: Artusi, Alessandro (Ed.) u.a.; European Association for Computer Graphics (Eurographics): VAST 2010. : Eurographics Symposium Proceedings. Goslar : Eurographics Association, pp. 1-8.

[Rötzel 2009] Rötzel A.: Schadstoffe am Bau. IRB Verlag; 2009.

[Santos et al. 2009] Santos, P.; Schmedt, H.; Hohmann, S.; Stork, A.: The Hybrid Outdoor Tracking Extension for the Daylight Blocker Display. In: Inakage, Masa (Hrsg.); ACM SIGGRAPH: Siggraph Asia 2009. New York : ACM Press.

[Schiller et al. 2010] Schiller, G.; Deilmann, C.; Gruhler, K.; Röhm, P.: Ermittlung von Ressourcenschonungspotentialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. In: Umweltbundesamt (UBA)-Texte 56/2010, ISSN: 1862-4804, Dessau-Roßlau, -<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-von-ressourcenschonungspotenzialen-bei>, 2010

[Schrott 2014] Schrott.de.: Preise für Schrott und Altmittel in Region Hannover 2014, <http://www.schrott.de/schrottpreise-in-region-hannover> (Abruf: 08.01.2014).

[Schultmann 1998] Schultmann, F.: Kreislaufführung von Baustoffen - Stoffflussbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden. Dissertation. Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 1.

[Schultmann 2005] Schultmann, F: Deconstruction in Germany, in: Deconstruction and Materials Reuse – an International Overview, International Council for Research and Innovation in Building Construction (CIB) Publication 300, Final Report of Task Group 39 on Deconstruction, Edited by Abdol R. Chini, University of Florida, www.cce.ufl.edu/affiliations/cib.

[Stahlbox 2014] Stahlbox Fertigaragen: Fertigaragen Grundrisse - Fertigaragen & Carports, http://www.garagen-riese.de/fertigaragen_-_grundrisse.php (Abruf: 09.01.2014)

[Statistik Portal 2016] Statistik Portal: http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb10_jahrta12.asp; 05.12.2016

[Thomson und Boehm 2015] Thomson, C. and Boehm, J.: “Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM.” In: Remote Sensing, 7(9), 11753–11775, 2015

[Valero et al. 2012] Valero, E.; Adan, A. and Cerrada, C.: “Automatic Construction of 3D Basic-Semantic Models of Inhabited Interiors Using Laser Scanners and RFID Sensors.” In: Sensors, 12, 5705–5724, 2012

[Volk 2017] Volk, R.: Proactive-reactive, robust scheduling and capacity planning of deconstruction projects under uncertainty, Dissertation, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016, Produktion und Energie Band 20, KIT Scientific Publishing, 2017, 475 Seiten, Englisch, ISBN: 978-3-7315-0537-2

[Volk et al. 2015] Volk, R.; Sevilimis, N.; Schultmann, F.: Deconstruction project planning based on automatic acquisition and reconstruction of building information for existing buildings, In: Proceedings of SASBE2015,

Smart and Sustainable Built Environments Conference, 9-11.12. 2015 in Pretoria, South Africa, pp.47-56, ISBN 978-0-7988-5624-9

[Xiong et al. 2013] Xiong, X.; Adan, A.; Akinci, B. and Huber, D.: “Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data.” In: Automation in Construction, 31, 325–337, 2013

PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung



ISSN 2194-2404

- Band 1** National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente.
Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland. 2012
ISBN 978-3-86644-853-7
- Band 2** Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE). 2013
ISBN 978-3-86644-857-5
- Band 3** Frederik Trippe
Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien. 2013
ISBN 978-3-7315-0031-5
- Band 4** Dogan Keles
Uncertainties in energy markets and their consideration in energy storage evaluation. 2013
ISBN 978-3-7315-0046-9
- Band 5** Heidi Ursula Heinrichs
Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem im europäischen Energieverbund. 2013
ISBN 978-3-7315-0131-2

- Band 6** Julian Stengel
**Akteursbasierte Simulation der energetischen
Modernisierung des Wohngebäudebestands
in Deutschland.** 2014
ISBN 978-3-7315-0236-4
- Band 7** Sonja Babrowski
**Bedarf und Verteilung elektrischer Tagesspeicher im
zukünftigen deutschen Energiesystem.** 2015
ISBN 978-3-7315-0306-4
- Band 8** Marius Wunder
**Integration neuer Technologien der
Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette.** 2015
ISBN 978-3-7315-0319-4
- Band 9** Felix Teufel
**Speicherbedarf und dessen Auswirkungen auf
die Energiewirtschaft bei Umsetzung der politischen
Ziele zur Energiewende.** 2015
ISBN 978-3-7315-0341-5
- Band 10** D. Keles, L. Renz, A. Bublitz, F. Zimmermann, M. Genoese,
W. Fichtner, H. Höfling, F. Sensfuß, J. Winkler
**Zukunftsfähige Designoptionen für den deutschen
Strommarkt: Ein Vergleich des Energy-only-Marktes
mit Kapazitätsmärkten.** 2016
ISBN 978-3-7315-0453-5
- Band 11** Patrick Breun
**Ein Ansatz zur Bewertung klimapolitischer Instrumente
am Beispiel der Metallerzeugung und -verarbeitung.** 2016
ISBN 978-3-7315-0494-8
- Band 12** P. Ringler, H. Schermeyer, M. Ruppert, M. Hayn,
V. Bertsch, D. Keles, W. Fichtner
**Decentralized Energy Systems,
Market Integration, Optimization.** 2016
ISBN 978-3-7315-0505-1

- Band 13** Marian Hayn
Modellgestützte Analyse neuer Stromtarife für Haushalte unter Berücksichtigung bedarfsorientierter Versorgungssicherheitsniveaus. 2016
ISBN 978-3-7315-0499-3
- Band 14** Frank Schätter
Decision support system for a reactive management of disaster-caused supply chain disturbances. 2016
ISBN 978-3-7315-0530-3
- Band 15** Robert Kunze
Techno-ökonomische Planung energetischer Wohngebäudemodernisierungen: Ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell auf Basis einer vollständigen Finanzplanung. 2016
ISBN 978-3-7315-0531-0
- Band 16** A. Kühlen, J. Stengel, R. Volk, F. Schultmann, M. Reinhardt, H. Schlick, S. Haghsheno, A. Mettke, S. Asmus, S. Schmidt, J. Harzheim
ISA: Immissionsschutz beim Abbruch - Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch. 2017
ISBN 978-3-7315-0534-1
- Band 17** Konrad Zimmer
Entscheidungsunterstützung zur Auswahl und Steuerung von Lieferanten und Lieferketten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten. 2016
ISBN 978-3-7315-0537-2
- Band 18** Kira Schumacher, Wolf Fichtner and Frank Schultmann (Eds.)
Innovations for sustainable biomass utilisation in the Upper Rhine Region. 2017
ISBN 978-3-7315-0423-8

- Band 19** Sophia Radloff
Modellgestützte Bewertung der Nutzung von Biokohle als Bodenzusatz in der Landwirtschaft. 2017
ISBN 978-3-7315-0559-4
- Band 20** Rebekka Volk
Proactive-reactive, robust scheduling and capacity planning of deconstruction projects under uncertainty. 2017
ISBN 978-3-7315-0592-1
- Band 21** Erik Merkel
Analyse und Bewertung des Elektrizitätssystems und des Wärmesystems der Wohngebäude in Deutschland. 2017
ISBN 978-3-7315-0636-2
- Band 22** Rebekka Volk (Hrsg.)
Entwicklung eines mobilen Systems zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau von Infrastruktur und Produkten („ResourceApp“): Schlussbericht des Forschungsvorhabens. 2017
ISBN 978-3-7315-0653-9



Der vorliegende Endbericht des Forschungsprojektes ResourceApp wurde im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „r³ - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz“ erstellt. Das Projekt adressierte den Forschungsbedarf im Bereich Urban Mining zur Erstellung eines Ressourcenkatasters von Gebäuden und Infrastrukturen. Im Rahmen des Projektes wurde ein mobiles System zur Erfassung und Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen beim Rückbau entwickelt, mit dem insbesondere Gebäudestrukturen automatisiert erfasst werden können und typologiebasiert ein Rohstoffgebäudeinventar erstellt wird. Aufbauend auf dem Gebäudeinventar gibt das System einen optimierten Projektplan für den Rückbau aus. Im Rahmen des Projektes wurde ein handgeführter Sensor eingesetzt, der die visuellen Datenpunkte der Räume im Gebäude aufnimmt und verarbeitet. Die verarbeiteten Sensordaten bilden zusammen mit Nutzereingaben und Modellparametern die Grundlage für die Erstellung des Rohstoffinventars und des Rückbauplans des Gebäudes. Durch das entwickelte System können Anwender bei einer Gebäudebegehung mit minimalen Nutzereingaben eine belastbare und reproduzierbare Aussage über das Rohstoffpotenzial eines Gebäudes treffen. Das entwickelte System wurde mehrfach im Rahmen der Projektarbeit in Wohngebäuden, Bürogebäuden und einem Krankenhaus erfolgreich getestet.

ISSN 2194-2404
ISBN 978-3-7315-0653-9

