

Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Fakultät Architektur

Schlussbericht zum InnoProfile Forschungsvorhaben

Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung

Autoren

Albert Vogel ◦ Conrad Völker ◦ Jörg Arnold ◦ Jens Schmidt
Torsten Thurow ◦ Jörg Braunes ◦ Christian Tonn
Kay-Andre Bode ◦ Franziska Baldy
Wolfgang Erfurt ◦ Rene Tatarin

Januar 2013

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



- Zuwendungsempfänger:** Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Bauphysik
Professur Polymere Werkstoffe
Professur Werkstoffe des Bauens
Fakultät Architektur
Professur Informatik in der Architektur
- Förderkennzeichen:** 03IP 705
- Vorhabenbezeichnung:** Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung
- Laufzeit des Vorhabens:** 01.02.2008 bis 31.01.2013
- Berichtszeitraum:** 01.02.2008 bis 31.01.2013
- Projektleitung:** Dipl.-Ing. Albert Vogel
Dr.-Ing. Conrad Völker
Dr.-Ing. Sabine Hoffmann
Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Bauphysik
Coudraystraße 11a
99423 Weimar
- Ansprechpartner:** Dr.-Ing. Kay A. Bode
Bauhaus-Universität Weimar
F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Professur Polymere Werkstoffe
Coudraystraße 11
99421 Weimar
Tel.: 0 36 43 / 58 47 21
Fax.: 0 36 43 / 58 47 59
kay-andre.bode@uni-weimar.de
- Internet:** <http://www.nubau.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung.....	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.2.1	Doppeltes Weltkulturerbe Weimar	6
1.2.2	Bauwirtschaft.....	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
1.4.1	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	8
1.4.2	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	15
1.4.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	15
2	Eingehende Darstellung	19
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	19
2.1.1	Digitales Gebäudemodell	19
2.1.2	Bauphysikalische Methoden.....	31
2.1.3	Ergänzungsbaustoffe	45
2.1.4	Zerstörungsfreie Prüfmethode.....	58
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	73
2.2.1	Digitales Gebäudemodell und Aufmaßstechniken	73
2.2.2	Bauphysikalische Methoden.....	77
2.2.3	Ergänzungsbaustoffe	78
2.2.4	Zerstörungsfreie Prüfmethode.....	81
2.3	Verwendung der Geräte nach Auslaufen der Förderung	82
2.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	83
2.4.1	Digitales Gebäudemodell	83
2.4.2	Bauphysikalische Methoden.....	83
2.4.3	Ergänzungsbaustoffe	83
2.4.4	Zerstörungsfreie Prüfmethode.....	84
2.5	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	84
2.5.1	Digitales Gebäudemodell und Aufmaßstechniken	84
2.5.2	Bauphysikalische Methoden.....	84
2.5.3	Ergänzungsbaustoffe	85
2.5.4	Zerstörungsfreie Prüfmethode.....	86

2.6	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	87
2.7	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	89
2.7.1	Veröffentlichungen	89
2.7.2	Studentische Abschlussarbeiten.....	97
2.7.3	Fremdliteratur.....	101

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, innovative Methoden und Verfahren für eine nutzerorientierte Bausanierung zu entwickeln und damit die technologische Stellung der Region Weimar im Bereich der Gebäudesanierung erheblich weiter zu stärken. Nutzerorientierte Bausanierung bedeutet eine gegenüber dem herkömmlichen Vorgehen deutlich stärkere Ausrichtung des Planungs- und Sanierungsprozesses auf die Anforderungen der Gebäude-nutzer. Dies hat einerseits ein hochwertigeres Produkt zum Ergebnis, erfordert aber andererseits den Einsatz neuer Techniken, Verfahren und Materialien und ein wesentlich stärker vernetztes Zusammenarbeiten aller am Bauprozess Beteiligten. Der Fokus des Projektes lag dabei auf den Bereichen, die eine hohe Relevanz für eine nutzerorientierte Sanierung besitzen. Dabei handelt es sich zum einen um Methoden zur Verbesserung beziehungsweise Optimierung der Behaglichkeit der Nutzer im Gebäude, zum anderen um materialtechnische und baustoffliche Weiterentwicklungen und im weiteren um deren Vernetzung beziehungsweise Einbindung in das Gesamtgebäude mit Hilfe eines entsprechenden computergestützten Gebäudemodells.

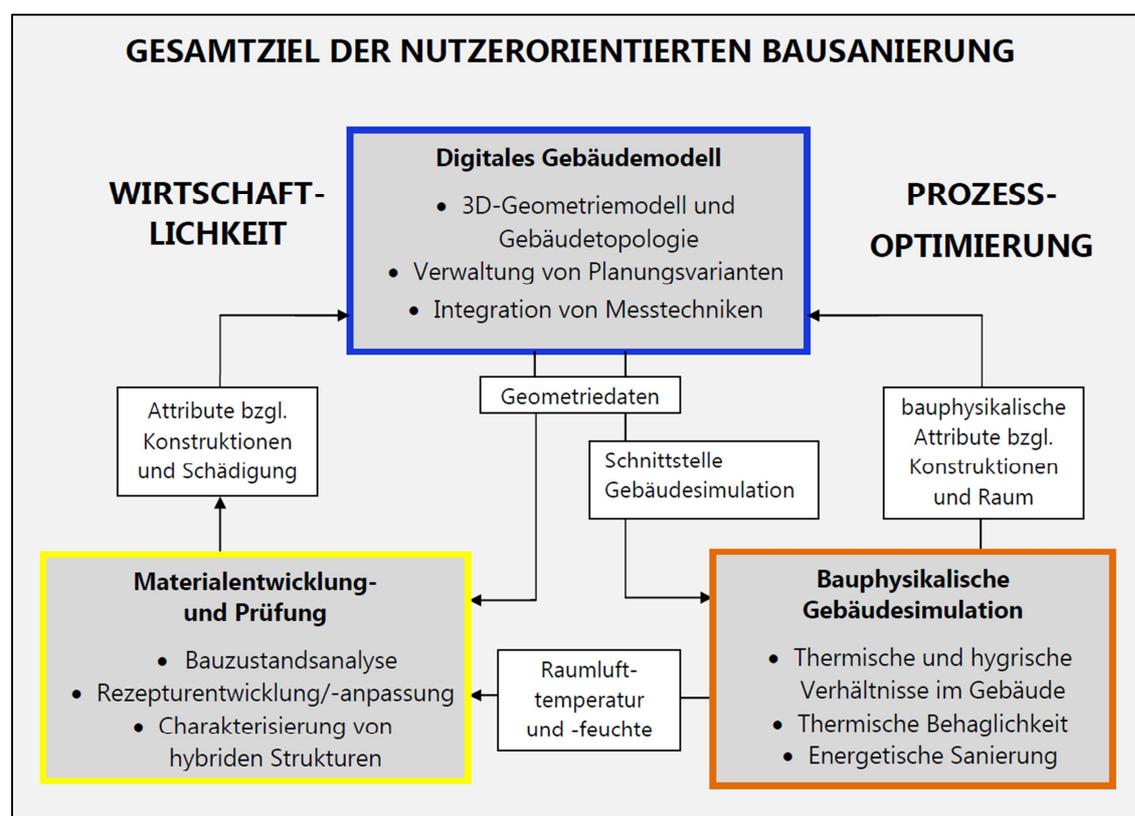


Abbildung 1: Fokus und Ziel des Projektes

Ein Schwerpunkt lag dabei in der Entwicklung fortschrittlicher Verfahren zur Erstellung beziehungsweise Auswahl von Sanierungsvarianten bei gleichzeitiger Optimierung des Energiebedarfs. Ein weiteres Ziel des Forschungsvorhabens lag in der Prozessoptimierung und damit in einer Kostenreduktion bei einer technisch anspruchsvollen Gebäudesanierung. Abbildung 1 verdeutlicht nochmals die Schwerpunkte des Projektes und insbesondere die Vernetzung und Wechselwirkung der verschiedenen Bereiche, die über das digitale Gebäudemodell sichergestellt werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.2.1 Doppeltes Weltkulturerbe Weimar

Als historische Goethe- und Schillerstadt sowie als Bauhaus-Gründungsstätte lebt Weimar von seinem doppelten „Weltkulturerbe“. Dieser kulturelle und damit Tourismus und Wirtschaft anziehende Faktor ist für die lokale Region um Weimar von größter Bedeutung. Mit der gesteigerten Attraktivität der Stadt Weimar seit der Benennung zur „Kulturstadt Europas“ im Jahr 1999 erhöhen sich seitdem sowohl die Einwohner- als auch die Besucherzahlen, wohingegen in Ostdeutschland insgesamt ein Schrumpfen der Bevölkerung zu verzeichnen ist.

Hauptsächlich werden das „Weltkulturerbe“ und damit die Wirtschaftskraft der Region Weimar durch die vielen historischen Altbauten bestimmt (Abbildung 2). Der Erhaltung und Sanierung des Gebäudebestandes und insbesondere der denkmalgeschützten Bauwerke kommt damit eine für die Region wirtschaftlich und gesellschaftlich überlebenswichtige Aufgabe zu. Der Altbaubestand Weimars ist wichtigstes Kapital der Region. Diesen zu schützen und nachhaltig zu sanieren ist eine große Herausforderung für Forschung und Wirtschaft.

Das Potenzial an zu sanierenden Gebäuden in der Region um Weimar ist nach wie vor bedeutend. Durch die Entwicklung innovativer Methoden und Verfahren im Rahmen dieses Forschungsvorhabens profitieren daher die beteiligten Unternehmen direkt. Darüber hinaus wird auch das Profil der Region um die Bauhaus-Universität Weimar als Technologieträger für die Bausanierung erheblich gestärkt und damit auch weiterhin überregional an Gewicht gewinnen.

1.2.2 Bauwirtschaft

Die Baubranche ist einer der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland. Vor allem in Thüringen und in der Region Weimar sind viele Erwerbstätige im bundesweiten Vergleich im Baugewerbe tätig (Abbildung 3).

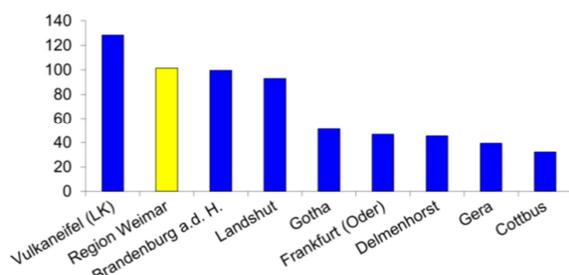


Abbildung 2: Anzahl Baudenkmäler je 10TSD Einwohner (Quelle: Verwaltungsämter, Stand 2009)

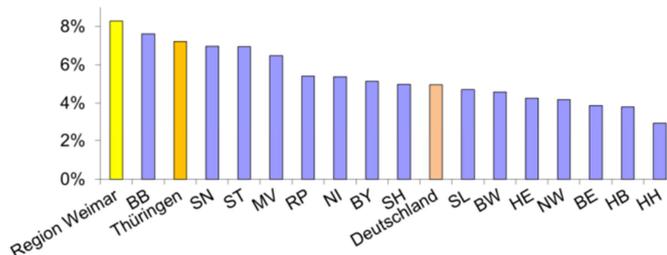


Abbildung 3: Anteil Erwerbstätige im Baugewerbe (Quelle: StatBA, Stand 2007)

Damit ist das Baugewerbe für einen überdurchschnittlich großen Teil der Wirtschaftsleistung in der Region verantwortlich. Viele Firmen, aber auch Familien und Haushalte der Region Weimar sind somit abhängig von der Bauindustrie und ihrer positiven Entwicklung. Das Wachstum der klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) der Region kann vor allem durch innovative Ideen und zukunftsweisende, verwertbare Forschung sowie durch lebenslanges Lernen erfolgen, wodurch der Standort Weimar mit seinen vielen Baufirmen und der Bauhaus-Universität Weimar ein prädestinierter Forschungsstandort für die Bauforschung ist.

Des Weiteren ist der Anteil an Bestandsgebäuden im Vergleich zum Neubauvolumen in den neuen Ländern im Bundesvergleich bedeutend. So sind z. B. die Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen auf den letzten drei Plätzen im Bundesdurchschnitt zu finden, wenn man den Neubaubereich betrachtet. Entgegen vieler anders lautender Meinungen finden im Baubereich zahlreiche sehr erfolgreiche Weiterentwicklungen statt. So beträgt beispielsweise der Energiebedarf eines modernen Neubaus oder fortschrittlich sanierten Altbaus nur noch etwa ein Zehntel dessen, was ein unsanierter Altbau (etwa Baujahr 1960) an Energie zum Heizen benötigt. Übertragen auf die Autoindustrie würde das bedeuten, dass ein modernes Auto im Durchschnitt nur noch etwa 1-2 l/100 km benötigen dürfte. Neben dem Bereich der Sanierung von Wohngebäuden mit Fokus auf die energetische Optimierung ist insbesondere die Sanierung denkmalgeschützter Gebäude von großer Bedeutung für die Region um Weimar.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan des Projektes bestand aus drei übergeordneten Arbeitspaketen: 1. Methoden zur Erfassung des Bestandsgebäudes; 2. Werkzeuge zur nutzerorientierten Sanierungsplanung; 3. Kombination der Methoden und Werkzeuge. Das Arbeitspaket 1 beschäftigte sich vorrangig mit dem Ist-Zustand des zu sanierenden Gebäudes. Dazu gehören das Gebäudeaufmaß, die Erfassung der Gebäudesubstanz und bauphysikalisch relevanter Parameter und die messtechnische Überprüfung von Bauwerksschäden. Der Ist-Zustand des Gebäudes ist unter anderem ausschlaggebend dafür, welche Ergänzungsmaterialien eingesetzt werden. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die weiterführenden Methoden und Werkzeuge und für die Kopplung der Fachbereiche untereinander. Das zweite Arbeitspaket „Werkzeuge zur nutzerorientierten Sanierungsplanung“ schafft Werkzeuge zur effektiveren Sanierung von Gebäuden durch Automatisierung und Verknüpfung der einzelnen Disziplinen. Insbesondere werden die Kombination von Geometriedatenerfassung und Prüfverfahren, die Schnittstelle zwischen Geometriemodell und thermischer Simulation und die Datenhaltung der projektrelevanten Daten im digitalen Gebäudemodell entwickelt. Darüber hinaus werden die thermischen und hygrischen Einflüsse auf Ergänzungsmaterialien wie zum Beispiel polymermodifizierter Beton oder Holzergänzungen untersucht.

Das Arbeitspaket 3 „Kombination der Methoden und Werkzeuge“ fügte die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 und 2 zusammen und entwickelte daraus mehrere Software-Testmuster. Es wurde ein Anforderungskatalog aufgestellt, der beinhaltet, welche Kriterien für unterschiedliche Gebäudetypen und Nutzungen bei der nutzerorientierten Sanierung berücksichtigt werden müssen. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien im konkreten Sanierungsfall ist Grundlage für die Optimierung und die Entwicklung eines entsprechenden Algorithmus.

Das Gesamtkonzept eines dynamisch erweiterbaren digitalen Gebäudemodells, welches alle nötigen Informationen über den Ist-Zustand eines Gebäudes bereitstellt, wurde in unterschiedlichen Software-Testmustern umgesetzt. Einzelne Softwarebausteine wurden im Laufe der Bearbeitung zu den Projektmeilensteinen umgesetzt und am Ende zu mehreren Testmustern kombiniert.

		2008	2009	2010	2011	2012									
Methoden zur Erfassung des Bestandsgebäudes															
1.1	Kombination verschiedener Aufmaßtechniken und Datenhaltung im Geometriemodell	6	4	4	1	1									
1.2	Entwicklung bzw. Optimierung von Messverfahren zur Bestimmung bauphysikalischer Kennwerte	10	6	6	4	4	4	2	1						
1.3	Entwicklung und Adaption von Messverfahren zur Erfassung von Schäden in Bauteilen	7	5	5	4	4	2	2	1						
1.4	Materialentwicklung zur Ergänzung und Sanierung geschädigter Bausubstanz	7	5	5	4	4	2	2	1						
1.5	Entwicklung einer neuen Aufmaß-Gerätekonfiguration				2	2	2	2	1	1					
Werkzeuge zur nutzerorientierten Sanierungsplanung															
2.1	Entwicklung des Basisschemas und der Ordnungsstruktur im Gebäudemodell		4	4	3	3	3	2							
2.2	Entwicklung eines Simulationsmoduls z. Berechnung d. Energiebedarfs und thermischer Behaglichkeit für Bestandsgebäude		6	6	4	4	4	2	2						
2.3	Einbindung von Methoden der Bauzustandsanalyse		2	2	2	2	3	3							
2.4	Bewertungsschema und Anwendungsmatrix (PCC, PC)				2	2	3	3	6						
Kombination der Methoden und Werkzeuge															
3.1	Aufstellung eines Katalogs von Kriterien der nutzerorientierten Sanierung		4	4	4	4	2	2	1						
3.2	Versionierungssystem				3	3	3	2	2						
3.3	Algorithmusentwicklung				4	4	4	4	4	4	6				
3.4	Entwicklung eines Testmusters						4	6	10	15	17				
3.5	Verifikation des Testmusters							4	8	15	17				

Abbildung 4: Angepasster Zeitplan des Projektes inklusive Arbeitsaufwand in Mannmonaten

Durch die Nachinvestitionen ergaben sich für das Forschungsprojekt neue Möglichkeiten und Anforderungen hinsichtlich des Forschungsumfangs. Um diesen gerecht zu werden, musste der Arbeitsplan des Projektes geringfügig angepasst werden. Mit den Neuanschaffungen konnten Arbeitspakete ausgeweitet (AP 1.1 ‚Kombination verschiedener Aufmaßtechniken und Datenhaltung im Geometriemodell‘) und zusätzlich neue geschaffen werden (AP 1.5 ‚Entwicklung einer neuen Aufmaß-Gerätekonfiguration‘). Der orangefarbene Meilenstein (Juni 2010) bildet ebenfalls einen neuen geschaffenen Abschnitt. Dieser steht für AP 1.2 und steht für die Fertigstellung sowohl des akustischen als auch des raumklimatischen Prüfstands.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Bestandserfassung und digitales Gebäudemodell

Jedem Sanierungsprozess geht die geometrische Bauaufnahme voran. Mittlerweile hat sich eine Vielzahl von kommerziellen Produkten zur computergestützten Bauwerksaufnahme auf dem Markt etabliert. Die Systeme unterstützen vor allem die geometrische Erfassung mit den Techniken des computergestützten Handaufmaßes, der Tachymetrie und der Photogrammetrie. Laserscanner etablieren sich zunehmend für die (Detail-) Aufnahme von Bauwerksteilen [LUH06]. Aktuelle Forschungsaspekte streben nach Automatisierung und Integration

verschiedener Verfahren [SCHE07]. Obwohl die flexible Kombination verschiedener Aufmaßtechniken insbesondere in der Bestandssanierung sinnvoll und notwendig ist, stellen marktübliche Applikationen in der Regel Insellösungen für spezielle Techniken dar, eine Kombination der Techniken innerhalb einer Softwareumgebung ist daher Forschungsthema der Professur Informatik in der Architektur und Ausgangspunkt für die Entwicklungen im Rahmen des Projektes.

Im Neubaubereich geht die Tendenz zur Abbildung aller Planungsdaten in einem digitalem Bauwerksmodell (Konzept des Building Information Modelling - BIM). Dies ermöglicht die Verwaltung der Gebäudedaten auf Basis von parametrisierten Konstruktionselementen (Bauteile / Baugruppen) in Kombination mit bspw. Materialangaben oder bauteilspezifischen Attributen. Aktuelle CA(A)D-Systeme sind jedoch vorrangig für die Neubauplanung konzipiert und genügen kaum den spezifischen Anforderungen einer Bestandserfassung/ Bestandsplanung.

Aufmaßsysteme mit Bauwerksmodellen beziehungsweise CA(A)D-Systeme ermöglichen je nach Eigenschaft des Bauwerksmodells die teilweise Nachbildung des Bestandes, sind aber statischer Natur. Heutige bauteilorientierte Systeme bieten eine feste Strukturierung in Raum- und Bauteilobjekte sowie deren geometrische Ausprägung an. Eine nutzer- und projektorientierte Anpassung hinsichtlich Strukturierung und geometrischer Ausprägung ist derzeit nicht möglich. Dies ist aber durch den unikalen Charakter von Bestandsgebäuden – insbesondere Repräsentativbauten wie Kirchen oder Schlösser im Bereich der Denkmalpflege – unabdingbar. Die Bauwerksmodelle entstammen in der Regel der Neubauplanung und lassen sich auf den Bestand nur bedingt anwenden. Hierzu wurde vom Antragsteller der Ansatz eines dynamisch verändernd erweiterbaren Bauwerksmodells erarbeitet [THU03; THU04; PET04], das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens weiterentwickelt wurde. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass allen marktüblichen Systemen die Betrachtung der Bestandserfassung als der Planung vorangestellter, abgeschlossener Prozess gemein ist. Bestandsdaten und Planungsdaten liegen getrennt voneinander vor. Eine Anreicherung von Bestandsinformationen während der Planungsphasen (notwendig bspw. bei zuvor nicht erkannter, weil verborgener Schädigung oder Konstruktion) ist nicht möglich beziehungsweise nur getrennt vom Planungsmodell. Dies stellt einen Bruch in der Datenhaltung eines Gebäudes im Lebenszyklus dar.

Bauphysik

Akustik

Bei Sanierungsmaßnahmen ist aus bauaufsichtlicher Sicht die Prognose von Schall infolge haustechnischer Anlagen (Heizung, Sanitär, Klima etc.) erforderlich. Schwingbewegungen beim Betrieb technischer Geräte werden über die gesamte Gebäudestruktur bis in schutzbedürftige Räume weitergeleitet und dort als Luftschall abgestrahlt. Dadurch können den Nutzer störende Geräusche entstehen. Zur Prognose derart verursachter Geräusche steht dem Bauplaner mit DIN EN 12354-5 ein Berechnungskonzept zur Verfügung. Ausgehend von einer charakteristischen Körperschallquelle wird dabei über das Verhältnis von Quell- und Strukturimpedanzen auf eine „in die Struktur übertragene“ Körperschalleistung geschlossen. Im Anschluss wird die Gebäudestruktur systematisch in einzelne voneinander unabhängige Teilübertragungswege zerlegt und für jeden Übertragungsweg die übertragene Teil-Schalleistung separat und detailliert berechnet. Aus der abschließenden energetischen

Summenbildung ergibt sich der Gesamtbetrag der übertragenen Schalleistung und damit der Schalldruckpegel in dem betrachteten schutzbedürftigen Raum.

In der aktuellen Fassung ist das genannte Berechnungsverfahren für Bauplaner aber nicht direkt anwendbar, da wesentliche Eingangsparameter für das Berechnungskonzept fehlen. Zum einen existiert für einen wesentlichen Eingangsparameter des Prognoseverfahrens – die charakteristische Körperschalleistung der Schallquelle – kein genormtes Messverfahren. Dieses ist nach Aussage der Norm erst zu entwickeln beziehungsweise zu verifizieren. Andererseits ist das Konzept aufgrund seiner Ableitung aus der Statistischen Energieanalyse (SEA) ausschließlich auf homogene Strukturen anwendbar und damit bei Skelett- und Leichtbaukonstruktionen, wie sie beispielsweise auch bei Holzbalkendecken vorzufinden sind, nicht anwendbar. Zur Erstellung eines neuen Prognoseverfahrens der Körperschallübertragung in Gebäuden mit inhomogenen Bauteilaufbauten wird zum Teil auf die Ergebnisse von [FIS06] zurückgegriffen.

Ein Ziel der Forschergruppe im Arbeitspaket 1.2 bestand darin, das Prognoseverfahren gemäß DIN EN 12354-5 detailliert zu untersuchen, um es für den Bauplaner in eine anwendbare Form zu bringen. Dazu sollte sowohl ein Messverfahren zur Bestimmung der charakteristischen Körperschalleistung verifiziert als auch eine Möglichkeit der Anwendbarkeit des Verfahrens für inhomogene Gebäudestrukturen erarbeitet werden. Im Gegensatz zur Norm, bei der alle an der Körperschallübertragung beteiligten Übertragungswege separiert und getrennt voneinander berechnet werden, wurde in dieser Arbeit versucht, ein Gesamtübertragungsverhalten von Gebäuden in Leichtbauweise zu bestimmen. Dafür wurden sogenannte „Globale Transferfunktionen“ bestimmt. Dieser Ansatz wurde von der Forschergruppe nuBau aufgegriffen und weiter verfolgt.

Thermische Behaglichkeit

Bei den raumklimatischen Messungen in der eigens hierfür errichteten Klimakammer musste der menschliche Körper berücksichtigt werden, da dieser die Temperatur- und Strömungsverhältnisse beeinflusst, weil er gleichzeitig Hindernis und Wärmequelle darstellt. Um diesen mitunter entscheidenden Einfluss zu berücksichtigen, eignet sich der Einsatz eines so genannten thermischen Manikins bei der Untersuchung und Bewertung des Raumklimas. Dadurch kann nicht nur der Einfluss des Raumklimas auf den Menschen, sondern auch die Auswirkung des Menschen auf das Raumklima simuliert werden. Das im Rahmen der raumklimatischen Untersuchungen des Projektes verwendete thermische Manikin *Feelix* ist eine Entwicklung der Denmark Technical University und wurde von der Firma pt-technik angefertigt. Es ist durch unter der Oberfläche verlaufende Heizdrähte in der Lage, eine dem Menschen ähnliche Hauttemperatur zu simulieren. Bei Bedarf kann zusätzlich eine künstliche, mittels Pumpen gesteuerte Atmung erzeugt werden. Das Manikin ist in insgesamt 22 Segmente unterteilt, welche bezüglich Setup und Monitoring separat ansteuerbar sind.

Um die raumklimatischen Messungen mit Simulationen vergleichen zu können, musste die Geometrie des Messaufbaus möglichst detailliert in die Simulation übertragen werden. Dabei stand insbesondere die Implementierung des thermischen Manikins im Mittelpunkt, da erst mit einer übereinstimmenden Geometrie eine Validierung der CFD-Simulationen möglich ist. Um die komplexe Geometrie des Manikins zu erfassen, wurde auf ein 3D-Laserscanning-Verfahren zurückgegriffen. Bei dieser Methode wird die Oberfläche des zu scannenden Objektes mit Hilfe eines kontinuierlichen Laserstrahls rasterförmig erfasst. Der verwendete Laserscanner der Firma FARO arbeitet nach dem Phasendifferenzverfahren, wobei ein

Laserstrahl kontinuierlich ausgesandt wird. Nach der Reflexion des Laserstrahls an der Objekt Oberfläche wird die Distanz über die Phasenverschiebung der Laserwelle zu einem Referenzstrahl ermittelt. Anschließend wurden die Einzelscans in der Software FARO Scene mit Hilfe von Passkugeln und Passmarken miteinander verknüpft. Unter Verwendung der Programme JRC 3D Reconstructor, Rhinoceros3D sowie des Plugins Grasshopper konnte die Geometrie des Manikins abschließend nachmodelliert und in den CFD-Code StarCCM+ [STA10] implementiert werden.

Die Steuerung der Oberflächentemperatur – sowohl beim thermischen Manikin als auch in der CFD-Simulation – erfolgte mit Hilfe des *UCB Thermal Comfort Model* [HOF08], welches das derzeit am weitesten entwickelte Thermoregulations- und Komfortmodell ist. Dieses lässt sich in drei Teilbereiche zerlegen: (1) Die Definition der thermischen Umgebung, wobei die Raumgeometrie, die klimatischen Randbedingungen sowie die Physiognomie festgelegt werden. Darauf basierend werden mit Hilfe eines thermophysiologischen Modells (2) die menschliche Wärmeabgabe sowie die Körpertemperaturen simuliert, worauf im nachstehenden Kapitel näher eingegangen wird. An diese Ergebnisse ist ein detailliertes Modell zur Bestimmung des lokalen und globalen thermischen Empfindens und Komforts (3) gekoppelt.

Zur Erfassung der Geschwindigkeit der Raumluftrömung wurde auf das an der TU Berlin entwickelte Verfahren Particle Streak Tracking (PST) zurückgegriffen [DAH07]. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die flächige Erfassung und Visualisierung der Strömungsgeschwindigkeit. Darüber hinaus ist der Eingriff in die Strömung durch den Messaufbau gering. Zur Visualisierung der Strömung leitet ein spezieller Generator Partikel in die Klimakammer. Die Kompensation der Masse der Blasenhaut erfolgt durch eine Heliumfüllung, was zur Gewichtsneutralität der etwa 3 mm großen Blasen und einem guten Folgeverhalten gegenüber der Luft führt. Das Strömungsfeld wird durch so genannte Lichtschnitte in einer Ebene gleichmäßig ausgeleuchtet. Wird dieses Licht gepulst, ergeben die Tracerpartikel charakteristische Muster, die mit einer hochauflösenden Spiegelreflexkamera festgehalten wurden. Die so gewonnenen Daten wurden anschließend gefiltert und bearbeitet, sodass nur noch die Spuren der Tracerpartikel ohne Hintergrund sichtbar waren. Nach Eingabe der Toleranzen konnte abschließend die Partikelspuranalyse, bei der aus den Bildspuren respektive aus dem Abstand der Mittelpunkte zweier Spuren und Pulszeit die Partikelgeschwindigkeit berechnet wird, erfolgen. Ergänzend zu den PST-Messungen (PST - Particle Streak Tracking) wurde die Strömungsgeschwindigkeit mit Anemometern und die Lufttemperatur mit NTC-Sensorelemente (NTC - Negative Temperature Coefficient Thermistor) der Firma Ahlborn aufgezeichnet.

Konvektiver Feuchtetransport

Im Jahresdurchschnitt wird weltweit ein großer Teil des Gesamtenergieaufwandes für Privathaushalte zur Erwärmung des Wohnraumes verwendet [HUG10]. Studien gehen davon aus, dass ca. 25 – 50 % dieser Energie durch Lüftungswärmeverluste verloren gehen [YOU12; ORN01; MOR07]. Diese energetischen Verluste entstehen zu einem großen Teil infolge von Konvektion durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle [JOK09; SIN12]. Diese Ex-beziehungsweise Infiltrationen führen infolge eines anliegenden Druckgradienten und der spezifischen Wärmekapazität der Luft zu einem Energieaustausch zwischen Innenraum und Umgebung. Neben energetischen Verlusten können durch Luftströmungen Partikel, Bakterien und Feuchte transportiert werden. Während die transportierten Medien in z.B. Operationssäle zu schweren Folgen für den Patienten führen können, besteht z.B. bei Exfiltration aus biologischen oder chemischen Labors ein erhöhtes Gefahrenpotential für die im Umkreis

lebende Bevölkerung [LOG07; MON11; ROL07; JUN07]. Neben diesen Effekten kann es bei Erreichen des Taupunktes im Leckagestrom durch die Gebäudehülle zu hygri-schen Hüllflächeninfiltrationen kommen [SCHM10a]. Dabei kann um ein Vielfaches mehr Feuchte in die Konstruktion eingetragen werden als durch Diffusion [GEV00, HEN08]. Die daraus resultierende Feuchteanreicherung in der Konstruktion kann zu gesundheitsschädigendem Schimmel- und Pilzbefall führen [GRO00; HAG04; HAG08; BOR10]. Um das Gefahrenpotential der hygri-schen Hüllflächeninfiltration zu bewerten, analysierte die Forschergruppe im Arbeitspaket 1.2 Leckageströme durch verschiedene Einzelleckagen in Holzleichtbaukonstruktionen und entwickelte ein Vorhersagemodell zum konvektiven Feuchteeintrag.

Bestehende Simulations- und Berechnungsprogramme wie WUFI Pro V5 [ZIR09] oder Delphin [HÄU97] können konvektive Feuchteinträge zurzeit nur durch Spalten und Fugen mit direkter Verbindung zur Umgebung abschätzen. WINHam2D simuliert konvektive Feuchtetransporte nur bei freier Konvektion innerhalb permeabler Dämmstoffe [RIE04, RIE09]. Der konvektive Feuchteeintrag durch Einzelleckagen in Wand- und Dachkonstruktionen mit integrierter permeabler Dämmstoffebene (Holzleichtbauweise) unter realen Druckdifferenzen (Wind und Auftrieb) zwischen Innenraum und Umgebung ist hingegen wenig erforscht und prognostizierbar. So wies der numerische Ansatz von [MAT07] ca. 40% Abweichung gegenüber Messungen auf. Dies kann auf die nicht genügend genauen Berechnungsmodelle der an einer perforierten Gebäudehülle anliegenden Druckdifferenz und unzureichende Kenntnisse zu den die Leckageströmung beeinflussenden Kennwerten zurückgeführt werden. Die Gesamtenergiebilanz von Gebäuden erfordert allerdings auch die Betrachtung des Lüftungswärmeverlustes [SCHO09]. Der Einfluss von Dimension, Form und Randausbildung von Einzelleckagen in der Gebäudehülle kann unter realen anliegenden Druckdifferenzen zu Abweichungen des Luftwechsels führen. Untersuchungen auf diesem Gebiet wurden daher notwendig.

Im Rahmen des Arbeitspaktes 1.2 wurden von der Forschergruppe charakteristische Leckagen in der Gebäudehülle untersucht und quantifiziert. Zum Einsatz kamen dabei verschiedene Messverfahren zur Bestimmung von Luftströmungen und Druckunterschieden (Differenzdruckmessanlage, Tracer-Gas-Messanlage, Laser-Doppler-Anemometrie, Hitzdrahtanemometrie, MCMT [BAU10]). Ergänzend wurden Temperaturmessungen an den untersuchten Gebäudehüllenelementen mit NTC-Sensoren und Thermografie durchgeführt.

Ergänzungsbaustoffe

Bei der Sanierung von Bauwerken ist es von Interesse, vorhandene Bausubstanz zu erhalten und in vielen Fällen zu ertüchtigen beziehungsweise zu ergänzen, um heutigen Anforderungen z. B. an die Tragfähigkeit oder den Brandschutz gerecht zu werden. Häufig wird von Denkmalschützern das sogenannte "Einfrieren" des Istzustandes des Gebäudes gefordert. Hier kommen Ergänzungsbaustoffe zum Einsatz, die einerseits eine mechanische Funktion erfüllen (z. B. Tragkraftherhöhung), andererseits aber auch optischen Anforderungen entsprechen sollen.

Eine relativ einfache und kostenrentable Möglichkeit zur Verstärkung z. B. von Holzbalkendecken kann mit Polymerbetonen realisiert werden [ERL04; DIE02]. Im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten wurde ein Polymerbeton definierter Zusammensetzung hinsichtlich seiner baustofflichen Kennwerte und Eignung im Verbund zu Altholz charakterisiert [STI05; SCHOB05]. Auf diese Ergebnisse baute das Forschungsvorhaben auf; es sollte ein für die Ergänzung geschädigter Holzbauteile geeigneter Polymerbeton entwickelt werden, mit dem

auch Teilergänzungen möglich sind. Dabei stand nicht die Verstärkung im Vordergrund, sondern zunächst der Substanzerhalt.

Auf dem Gebiet der Zementbaustoffe konzentrierte sich die Forschung auf Zusatzstoffe, Zusatzmittel oder auch Faserstoffe, um bestimmte Eigenschaften gezielt zu verbessern.

Im Bereich der polymermodifizierten Mörtel und Betone konnte auf Ergebnisse langjähriger eigener Forschung zurückgegriffen werden. Diese Materialien haben sich in den letzten Jahren besonders in den Bereichen der Sanierung bewährt und sind als Instandsetzungsmaterialien anerkannt und etabliert [z. B. OHA95]. Immer häufiger sind unter zu sanierenden Bauwerken auch denkmalgeschützte Betonkonstruktionen (z. B. Industriedenkmäler oder Kirchen), bei deren Sanierung die üblichen Instandsetzungsmethoden an ihre Grenzen stoßen, da sie den häufig hohen optischen Anforderungen nur schwer entsprechen können. Hier sollte das Potential von polymermodifizierten Mörteln und Betonen genutzt werden und durch weitere Anpassung bestimmter Eigenschaften (z. B. niedriger E-Modul, verbesserter Haftverbund und Einfärbbarkeit) ein für die Denkmalpflege geeignetes Material entwickelt werden. Das Forschungsvorhaben baut auf Ergebnisse des Teilprojektes B3 des SFB 524 auf [DIM05; DIM06a; DIM06b; DIM06c; DIM07].

Zerstörungsfreie Prüfmethode

Eine zuverlässige und möglichst schnelle Beurteilung des Zustandes von Bauwerksteilen erfordert die Entwicklung innovativer Prüfstrategien, die im Hinblick auf eine großflächige und wirtschaftliche Anwendung einen weitestgehend zerstörungsfreien Untersuchungscharakter aufweisen. Im Bauwesen hat die Anwendung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Für Labor oder Bauwerksmessungen werden überwiegend akustische oder elektromagnetische Verfahren eingesetzt. Diese werden zum Teil aus anderen Fachgebieten wie dem Maschinenbau oder der Geophysik adaptiert. In Abbildung 5 sind die wesentlichen Anwendungsfelder und Zielstellungen zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden im Lebenszyklus eines Bauwerks dargestellt.

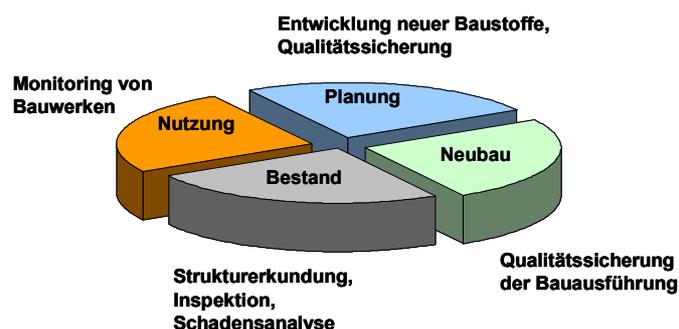


Abbildung 5: Anwendung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden im Lebenszyklus eines Bauwerks

Zur Realisierung von Umnutzungskonzepten bei der Sanierung von Bestandsgebäuden werden zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden insbesondere für die Charakterisierung neuer Baustoffe, zur Bewertung des Ausgangszustandes von Bauwerksteilen sowie zur Qualitätssicherung der durchgeführten baulichen Maßnahmen eingesetzt [GRO05; WIG06]. Die akustischen Verfahren der Ultraschallprüfung erlauben eine globale Bewertung des Zustandes von monolithischen Beton- und Stahlbetonkonstruktionen. Dadurch lassen sich Inhomogenitäten innerhalb der Konstruktion detektieren und somit gezielt relevante Stellen für weitere

auch zerstörungsbehaftete Untersuchungsmethoden lokalisieren [ERF98; ERF06]. Zur Identifikation werden vorrangig Änderungen der Ultraschallparameter herangezogen [ERF02] oder Korrelationsbeziehungen zu mechanischen Kennwerten erstellt [BUN91]. Weitere relevante Fragestellungen sind die Strukturanalyse von Bauwerksteilen zur Detektion von Einbauteilen, Rissen, Fehlstellen oder Schalenbildungen bei nur einseitiger Zugänglichkeit. Dies wird durch neuartige Ansätze der zerstörungsfreien Prüfung unter Anwendung von Scherwellen in Verbindung mit tomografischen Rekonstruktionsrechnungen erreicht [SAM06].

Im Rahmen der Bauzustandsanalyse sind die akustischen Verfahren der ZfP-Bau überwiegend auf monolithische Bauwerksteile beschränkt und für mehrschalige Konstruktionen oder Mauerwerk nur eingeschränkt anwendbar. Die alleinige Anwendung einer zerstörungsfreien Untersuchungsmethode kann die oftmals komplexen Fragestellungen zum Aufbau und Erhaltungszustand von Bauwerksteilen nicht umfassend beantworten. Durch den Einsatz komplementärer zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden lässt sich die Aussagekraft im Hinblick auf die innere Struktur sowie zum Erhaltungszustand von Bauwerksteilen und Bauwerken wesentlich erhöhen [KOH05]. Zur Kombination mit akustischen Untersuchungsmethoden (Ultraschall-Tomografie, Ultraschall-Echo, Impact-Echo) eignen sich besonders Verfahren, die auf elektromagnetischen Wellenfeldern beruhen (RADAR). Die jeweilige Wellenausbreitung wird bei vergleichbarer Ortsauflösung von jeweils unterschiedlichen Materialparametern beeinflusst und ermöglicht insbesondere die Detektion von Bewehrungslagen und Einbauteilen [DGZFP 2008]. Ergänzende zerstörungsfreie Verfahren (magnetisches Wechselfeldverfahren, Potentialfeldverfahren) und zerstörungsbehaftete Verfahren (Bohrkernentnahmen, Dünnschliffe, Röntgendiffraktometrie, lichtmikroskopische Endoskopie) liefern weitere, wesentliche Informationen zum Bauzustand, zu den verwendeten Werkstoffen und zu den abgelaufenen Schädigungsmechanismen (z. B. Betonüberdeckung und Korrosionszustand der Bewehrung, Carbonatisierungstiefen, Schichtdicken, Gefügestand, Phasenbestand).

Vor diesem Hintergrund war es ein Ziel der zerstörungsfreien Prüfung innerhalb des Projektes, ausgewählte Untersuchungsmethoden zur umfassenden, zerstörungsfreien Charakterisierung des Erhaltungszustandes von Bauwerksteilen und zur Bewertung von Baustoffen einzusetzen und für die speziellen Fragestellungen der Bausanierung zu adaptieren. Wesentliche Schwerpunkte waren zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden zur Bewertung der inneren Struktur von Bauwerksteilen, zur globalen Zustandsbewertung von Bauwerksteilen und zur Auswahl und Bewertung angepasster Materialien für die sachgerechte Sanierung bestehender Bauwerke (vgl. Arbeitspaket 1.3). Die Kooperation mit regionalen Unternehmen war auf die gezielte Förderung und Akzeptanz substanzschonender, zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden und deren Einsatz für die speziellen Problemstellungen der Bausanierung ausgerichtet.

Ein generelles Problem bei der Untersuchung bestehender Bausubstanz besteht darin, Bauwerksgeometrie, Messstellen und Messergebnisse unterschiedlicher Methoden der Bauzustandsanalyse zusammenzuführen. Als weiterer Schwerpunkt wurde daher die exemplarische Verknüpfung ausgewählter zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden mit den Methoden der Bestandserfassung im Rahmen eines digitalen Bauwerksmodells als Grundlage für neuartige Untersuchungsstrategien im Rahmen der Bauzustandsanalyse entwickelt. Diese sollen die methodische Unterstützung unterschiedlicher werkstoffdiagnostischer Methoden und die nachfolgende Zusammenführung, Visualisierung und Bewertung der gewonnenen Daten in einheitlicher Form ermöglichen. Gegenüber der Anwendung von Einzelmessverfahren lässt sich dadurch die Dichte, Zuverlässigkeit und Aussagekraft der in den

Datensätzen enthaltenen Informationen erhöhen. Dies soll Fachplanern eine differenzierte Interpretation der Messergebnisse erlauben und somit zu einer umfassenderen Beurteilung von Bauwerksteilen beitragen (vgl. Arbeitspaket 2.3).

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Im Projektverlauf wurde der aktuelle Stand der Forschung durch regelmäßig durchgeführte Literaturrecherchen erfasst. Es erfolgte eine überwiegend PC-basierte Literaturrecherche in einschlägigen Datenbanken (u. a. Datenbank Informationssystem DBIS der Bauhaus-Universität Weimar, RSWB Plus, SCOPUS, science direct, SCHADIS, elektronische Zeitschriftendatenbanken EZB). Darüber hinaus wurde eine regelmäßige Sichtung relevanter Fachzeitschriften (u. a. Beton, Bautechnik, Cement and Concrete Composites, Cement and Concrete Research, Journal of Nondestructive Evaluation, Materials and Structures, Ultrasonics, Bauphysik, Energy and Buildings) durchgeführt. Zudem war ein ständiger Informations- und Erfahrungsaustausch durch die eigenständig durchgeführte Organisation von Workshops und Fachtagungen sowie durch die Teilnahmen an nationalen und internationalen Konferenzen gewährleistet. Eine Auswahl der wichtigsten Fachliteratur sowie der eigenen Veröffentlichungen und studentischen Arbeiten kann unter 2.6 gefunden werden.

1.4.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Besonders hervorzuheben ist in diesem Abschnitt die Zusammenarbeit mit dem Förderverein „Renaissanceschloss Ponitz“. Durch das Zurverfügungstellen des historischen Bauwerks *Schloss Ponitz* (Abbildung 6) durch den Eigentümer konnte die Nachwuchsforschergruppe die neu entwickelten Methoden und Materialien anwenden, testen und verifizieren. Dabei fanden die verschiedenen Wissenschaftsfelder des Projektes nuBau Anwendung (Details dazu werden im Verlauf des Berichtes gegeben).



Abbildung 6: Renaissanceschloss Ponitz, Verifikationsobjekt der Nachwuchsforschergruppe nuBau

Nr.	Firmen, Verbände, Institutionen	Art der Zusammenarbeit
1.	Bauhaus Weiterbildungsakademie Weimar e. V.	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenarbeit in der Aus- und Weiterbildung • Unterstützung bei der Organisation der Tagungen
2.	b.a.u.werk	<ul style="list-style-type: none"> • Beteiligung an nuBau Veranstaltungen (Workshops, Tagung, 3. Evaluationsworkshop) • intensive Zusammenarbeit in Praxisprojekten (Laserscanning Georgenkirche Eisenach, Wartburg, Schlosskirche Wittenberg, Wittumspalais Weimar) • fachlicher Austausch
3.	Bennert Ingenieurbau GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • Schichtdickenmessung von Sprühabdichtungen (z. B. Polyurethan), • Strukturanalyse von Bauwerksteilen (BWT) aus Stahlbeton, Bauzustandsanalyse • allgemeiner fachlicher Input • „Kunde“ von Dienstleistungen • Personalaustausch • Beteiligung an nuBau-Veranstaltungen (Workshop, Tagung Nutzerorientierte Bausanierung)
4.	Desoi Injektionstechnik GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • Problemstellungen der Bauwerkssanierung • Prüfung und Verbesserung von Baustoffen (Spiralankermörtel) • Unterstützung bei verschiedenen baustofflichen Fragestellungen • Mitarbeiteraustausch beziehungsweise Kompetenztraining • allgemeiner fachlicher Input • Beteiligung an nuBau-Veranstaltungen (Workshop, Tagung Nutzerorientierte Bausanierung)
5.	Diakonisches Werk Frankfurt/Main	<ul style="list-style-type: none"> • Zurverfügungstellung des Verifikationsobjektes Glockenturm der Weißfrauenkirche Frankfurt/Main
6.	Dynapox GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • Schichtdickenmessung von ESD-Belägen und Isolierbeschichtung • Austausch zu Instandsetzungs- und Reparaturmaterialien • Zusammenarbeit am Verifikationsobjekt Glockenturm der Weißfrauenkirche Frankfurt/Main • zur Verfügung Stellung von Materialien und Möglichkeit zum Anlegen von Musterflächen • fachlicher Input zu Materialien und Anforderungen

Nr.	Firmen, Verbände, Institutionen	Art der Zusammenarbeit
7.	Enag - Forschungs- und Kooperationsnetzwerk für energieeffiziente, nachhaltige Gebäude in Thüringen	<ul style="list-style-type: none"> • Netzwerk
8.	IBW Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • Strukturanalyse von Bauwerksteilen (BWT) aus Stahlbeton; Bauzustandsanalyse • Beteiligung an nubau-Veranstaltungen (Workshop)
9.	Ingenieurbüro Heuer & Tonne	<ul style="list-style-type: none"> • Problemstellungen der Bauwerkssanierung
10.	Ingenieurbüro Trabert + Partner, Geisa	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenarbeit am Verifikationsobjekt Glockenturm der Weißfrauenkirche Frankfurt/Main • fachlicher Input zu Anforderungen und Planungen • Beteiligung an nubau-Veranstaltungen (Tagung Nutzerorientierte Bausanierung)
11.	Kubit GmbH	<ul style="list-style-type: none"> • intensiver fachlicher Austausch • Beteiligung an nuBau Veranstaltungen mit <ul style="list-style-type: none"> ○ Fachvorträgen (1. Workshop, 1. Tagung) ○ Fachausstellung (1. und 2. Tagung) • Übernahme eines Nachwuchswissenschaftlers als Mitarbeiter im Bereich FuE • Beteiligung an nubau-Veranstaltungen (Workshop, Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Evaluationsworkshop)
12.	Landesamt für Denkmalpflege Hessen	<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen bei der Sanierung des Verifikationsobjektes Glockenturm der Weißfrauenkirche Frankfurt/Main
13.	Lindab	<ul style="list-style-type: none"> • Kooperation im Rahmen einer Promotionsarbeit • Betreuung eines Stipendiaten
14.	materials & technology consulting, Prof. Dr.-Ing. Rolf P. Gieler	<ul style="list-style-type: none"> • allgemeiner fachlicher Input • fachlicher Erfahrungsaustausch zur Betoninstandsetzung • „Kunde“ von Dienstleistungen • Beteiligung an nubau-Veranstaltungen (Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Evaluationsworkshop)
15.	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Vergabe der Promotionsthemen im bauakustischen Bereich an die Projektmitarbeiter Dipl.-Ing. Albert Vogel und Dipl.-Ing Jörg Arnold • Zusammenarbeit auf wissenschaftlicher Ebene, offener wissenschaftlicher Austausch und wissenschaftliche Diskussionen zu den Promotionsthemen

Nr.	Firmen, Verbände, Institutionen	Art der Zusammenarbeit
16.	Rehau AG	<ul style="list-style-type: none"> • gemeinsamer Forschungsantrag • allgemeiner fachlicher Austausch
17.	Romstedt - Technologien für Restauratoren GmbH, Kirchheim	<ul style="list-style-type: none"> • Zurverfügungstellung von Materialien • fachlicher Input zu Materialfragen
18.	Sichau und Walther Architekten BDA, Fulda	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenarbeit am Verifikationsobjekt Glockenturm der Weißfrauenkirche Frankfurt/Main • fachlicher Input zu Anforderungen und Planungen
19.	University of California Berkeley	<ul style="list-style-type: none"> • FuE im Bereich der thermischen Behaglichkeit • Forschungsaufenthalt
20.	Verein Deutscher Betoningenieure (VDB)	<ul style="list-style-type: none"> • Mitgliedschaft • allgemeiner fachlicher Erfahrungsaustausch
21.	Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft (WTA)	<ul style="list-style-type: none"> • Mitgliedschaft • allgemeiner fachlicher Erfahrungsaustausch
22.	Förderverein Renaissance-schloss Ponitz	<ul style="list-style-type: none"> • Zurverfügungstellung Referenzobjekt zur Durchführung von Verifikationsmessungen und -untersuchungen

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Ziel des Forschungsvorhabens nuBau war es, die Sanierungsplanung deutlich stärker auf die Anforderungen der Gebäudenutzer auszurichten. Neben den Bedürfnissen der Bewohner der sanierten Wohneinheit stehen auch die Anforderungen der Bauplanenden und -ausführenden an eine nachhaltige Sanierung im Vordergrund der Forschung. Die Anforderungen beider Nutzergruppen, Planer und Bewohner, werden dann in einem digitalen Gebäudemodell verknüpft.

2.1.1 Digitales Gebäudemodell

Wesentliche Aspekte der Bauaufnahme sind neben der reinen Geometrie die Topologie (z. B. die räumliche Struktur eines Gebäudes) sowie die Ermittlung von Mängeln und Bauteilzuständen. Es existieren heute die unterschiedlichsten Techniken der Bauzustandsanalyse wie Wärmebildaufnahmen, zerstörungsfreie Untersuchung von Bauwerksteilen mittels Ultraschall, Bohrkernentnahmen etc. Eine der wesentlichen Problemstellungen ist dabei, die gewonnenen meist unterschiedlichen Daten miteinander in Bezug zu setzen, um zu einem aussagekräftigen Gesamtbauwerksmodell zu gelangen. Dabei gilt es einerseits, die Daten topologisch mit den räumlichen Elementen (Bauteilen und Baugruppen) des Bauwerkes zu verknüpfen. Dies ist ein informationstechnischer Forschungsaspekt. Andererseits gilt es, die Positionen, an denen die Messdaten erfasst wurden, in einem gemeinsamen Geometriemodell als Teil des Bauwerksmodells zusammenzufassen. Diese Aufgabenstellung liegt interdisziplinär in den Bereichen Geodäsie, Numerik und Informatik.

Digitales Bauwerksmodell

Digitale Bauwerksmodelle, auch unter dem Schlagwort BIM (Building Information Modeling) propagiert, sind den in der Informatik sogenannten Produktmodellen zuzurechnen. Sie ermöglichen die Beschreibung von Bauwerken in Computermodellen auf Grundlage des objektorientierten Paradigmas. Dabei wird unter dem Begriff Modell eigentlich ein Metamodell verstanden, nicht die konkrete Abbildung eines Bauwerks, sondern die Definition von Klassen und ihren Strukturen, welche erst die Möglichkeit bieten, verschiedene Bauwerke abbilden zu können. Problematisch sind dabei aus Informatiksicht u.a. die Individualität von Bauwerken und die Vielzahl möglicher und wechselnder Fachplaner und Gewerke. Innerhalb des Projektes wurde im Rahmen des Arbeitspaketes 2.1 „Entwicklung des Basisschemas und der Ordnungsstrukturen im Gebäudemodell“ ein neuer Ansatz eines Produktmodells erarbeitet und in Testmustern implementiert, welcher als Ausgangsbasis für die Entwicklung von Bauwerksmodellen dient. Dabei wurde eine vor dem Projekt entwickelte Software-Experimentalplattform FREAK komplett überarbeitet und neu implementiert, es entstand die neue Experimentalplattform FREAC. Diese wird im Folgenden näher erläutert.

Modellkonzept

Bei FREAC (Framework for Enhancing Research in Architectural Design and Communication) werden Verfahren eingesetzt, die es ermöglichen, ein Produktmodell stetig um Teilm Modelle zu erweitern. Es wurden in erster Linie Teilm Modelle entwickelt, welche das Produktmodell als Gebäudemodell nutzen. Teilm Modelle können dabei das Gesamtmodell um

neue Aspekte ergänzen, z. B. um Teilmodelle für Statik, Klimatik, Baudiagnostik usw. Grundsätzlich ist der FREAC-Kern allerdings auch für andere Bereiche (z. B. Produktdesign oder Städtebau) adaptierbar. FREAC nutzt Techniken wie Transaktionen und Versionierungen (Arbeitspunkt 3.2 „Versionierungssystem“) mit Online-Synchronisation, welche die Speicherung der Historie von Modellen sowie ihre scheinbar parallele Bearbeitung erlauben. Ein FREAC-Modell wird auf einem lokalen Computer mittels verschiedener Tools für spezielle Aufgaben bearbeitet. Diese Tools arbeiten nach einem Plug-In-Prinzip als eine Clientanwendung (Task). Clients mehrerer Rechner gleichen ihre Modelldaten über einen zentralen Server ab. Jeder Client hält dabei lokal eine Kopie der Modelldaten vor. Die Synchronisation der Kopien erfolgt transaktionsbasiert, nur die Änderungen der Modelldaten von erfolgten Transaktionen auf den Clients werden übertragen. Der Ansatz ist zur verteilten Arbeit einer sehr kleinen Anzahl von Clients geeignet, indem den Clients sequentiell das exklusive Recht für eine kurze Transaktion gegeben wird.

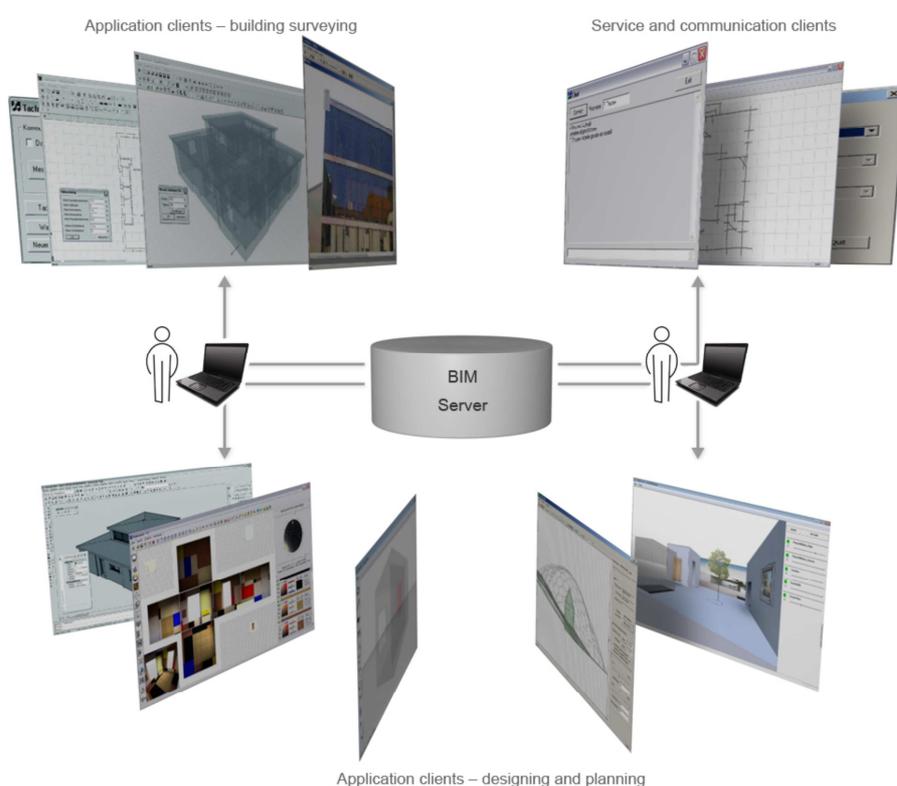


Abbildung 7: FREAC Konzept: verschiedene Clients sind mit einem zentralen Server verbunden

Technische Grundlagen von FREAC

Bei dem FREAC zugrunde liegenden Ansatz erfolgt die Synchronisation von Veränderungen an einem Modell nicht nach dem Ansatz entfernter Methodenaufrufe. Stattdessen wird direkt auf einer lokalen Kopie des Datenmodells gearbeitet. Die Änderung der verteilten Objekte erfolgt nur innerhalb von Transaktionen lokal und nach deren Abschluss werden die lokalen Kopien synchronisiert. Ein Argument für diesen Ansatz ist die Auffassung, dass die meisten Objektaufrufe lesender Natur sind. Weiter muss nach einer Transaktion jedes veränderte Objekt nur einmal übertragen werden, gleich wie oft es bei der Transaktion verändert wurde. Nachteilig ist der Ansatz, wenn die Größe von Objekthinhalten die Einsparungen bei den entfernten Methodenaufrufen übersteigt, wie etwa bei großen Tabellen. Es ergaben sich auch eine Fülle anderer neuer Punkte bei diesen Ansatz, für die Softwarearchitekturansätze ent-

wickelt werden müssen, welche in der Projektlaufzeit aber nicht mehr näher betrachtet werden konnten.

Bei jeder Transaktion entsteht eine neue Version. Die Versionen und somit die Entstehungsgeschichte des Datenmodells wird persistent gespeichert. Jede Version kann mehrere Nachfolgeversionen besitzen, wodurch alternative Modellentwicklungen abbildbar sind (Varianten). Zur Synchronisation von Clients vergibt ein Synchronisationsserver exklusive Rechte zur Durchführung von Transaktionen in Variantenzweigen. Die Transaktionen erfolgen damit immer sequentiell, es muss so nicht auf Merging zurückgegriffen werden. Der Ansatz erfordert jedoch für ein flüssiges scheinbar paralleles Arbeiten jeweils kurze Transaktionen der Clients. Daraus resultieren neue Problemstellungen zur Reduzierung langer Versionsfolgen, die im Projekt zwar diskutiert, aber deren technische Umsetzung nicht weiter betrachtet werden konnte.

Eine entscheidende Frage beim Entwurf einer Modellverwaltung ist die Größe der zu verwaltenden Modelle. Die Verwendung konventioneller Datenbanken erlaubt die Bearbeitung sehr großer Modelle, da hier der Arbeitsspeicher nicht die Modellgröße beschränkt. Dafür ist die Zugriffsgeschwindigkeit auf Datenbankinhalte relativ langsam im Vergleich zu Modellen, welche vollständig im Arbeitsspeicher gehalten werden. Der vorgestellte FREAC-Ansatz geht hier einen Kompromiss ein, verteilte Objekte werden im Arbeitsspeicher gehalten, die Versionsgeschichte persistent gehalten. Verteilte Objekte werden erst dann in den Arbeitsspeicher geladen, wenn auf ihren Inhalt zugegriffen wird. Da dieses Procedere mittels Objektverweisen erfolgt, muss sich ein Entwickler nicht um Objektzugriffe kümmern und kann klassisch nach OOP (Objekt orientiertes Paradigma) programmieren. Auch im Verständnis komplex wird hingegen die Unterscheidung der Lebenszeit verteilter Objekte und ihrer sie im Arbeitsspeicher repräsentierenden Stellvertreter. Es ergibt sich die Fragestellung, ob statt der geschaffenen API von FREAC zur Arbeit mit verteilten Objekten eine eigene Programmiersprache oder eine Erweiterung einer solchen nicht ein für den Programmierer einfacherer Weg wäre. Auch diese Fragestellung konnte in diesem Projekt mangels Ressourcen nicht betrachtet werden.

Für Entwickler bietet FREAC u.a. APIs (Application Programming Interface) auf unterschiedlichen Schichten. Es können eigenständige Clients erstellt werden. Weiter besteht ein hauptsächlich genutzter Hauptclient, Toolbox benannt, für welchen über eine weitere API Plug-Ins (im Folgenden Tools genannt) erstellt werden können, die wie eigenständige Clients erscheinen, aber in einem Adressraum arbeiten und auf die Grundfunktionen und -dialoge der Toolbox zurückgreifen können. Gleiches gilt weiter für ein hauptsächlich eingesetztes Tool, welches die Funktionalitäten zur Arbeit mit 2D- und 3D-Visualisierungen bietet.

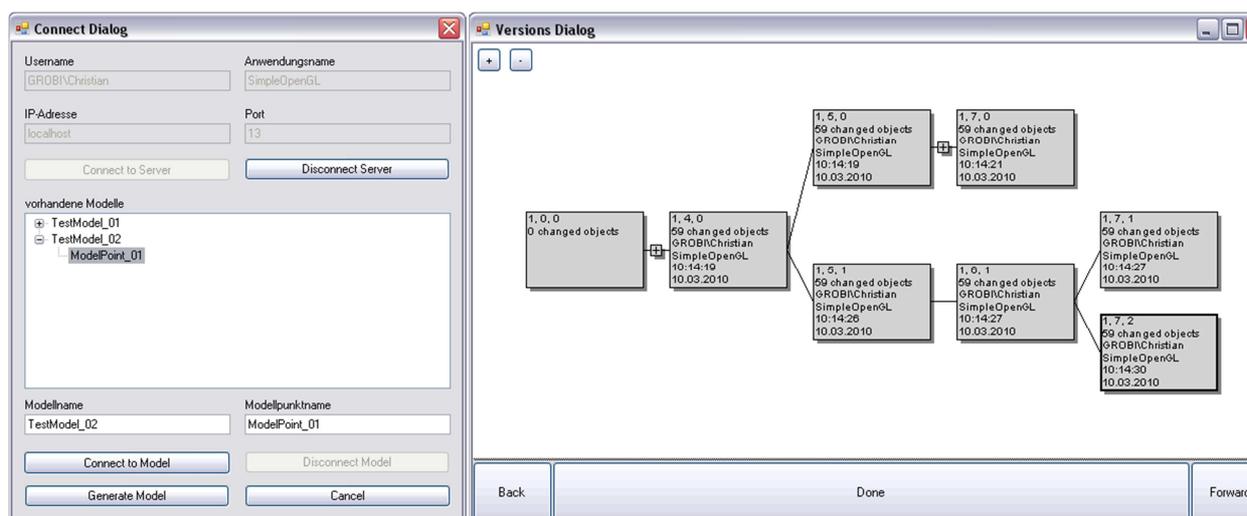


Abbildung 8: Dialoge der FREAC API: ConnectDialog zur Verbindung mit dem Server und Auswahl des Modells und der Modellversion (links) und Versionsverwaltung als Versionsbaum (rechts)

Nutzerspezifische Modelldynamik

Der folgende Abschnitt fasst die Arbeiten und Ergebnisse am Arbeitspaket 2.1 „Entwicklung des Basisschemas und der Ordnungsstruktur im Gebäudemodell“ zusammen.

Grundanforderung

Innerhalb der FREAC-Modellstruktur bedeutet Dynamik, dass bei einer bestehenden Datenstruktur jederzeit Objekte hinzugefügt, die Eigenschaften der Objekte erweitert sowie neue Methoden zur Bearbeitung von Objekten erstellt werden können. Die Dynamik betrifft also sowohl Modellstruktur wie auch die darauf aufbauenden Algorithmen, wobei sich bei beiden vor allem auf die Erweiterbarkeit konzentriert wurde. Ein in dieser Art dynamisches Gebäudemodell ist deshalb so wichtig, da bei Gebäuden nicht alle Elemente, deren Eigenschaften und Interaktionsmöglichkeiten vorherbestimmt werden können. In der Regel bringt jeder Planungs- und Entwurfsprozess Sonderfälle mit sich, insbesondere in der Bausanierung.

FREAC wurde auf Grundlage von Microsofts Software-Plattform .NET erstellt. Teile mit hohen Anforderungen an Performance oder Speicherbedarf sind in unmanaged code (C++/CLI) geschrieben. Die .NET Plattform bietet verschiedene Eigenschaften, welche sich sehr gut zur Realisierung der beschriebenen Dynamik eignen. Zum einen gibt der Reflection-Mechanismus Auskunft über vorhandene Klassen und Datenstrukturen. Zum anderen können neue Assemblies (DLLs) zur Laufzeit hinzugefügt werden. Auf letztgenannter Möglichkeit basiert die Erstellung neuer Teilmodelle in FREAC.

Die Dynamik der FREAC-Modellstruktur soll in Zukunft nicht nur für Programmierer, sondern auch für Administratoren und Nutzer verfügbar sein. Dieser Ansatz des dynamischen Produktmodells von FREAC ist daher in Schichten organisiert, welche die Erweiterbarkeit in unterschiedlichen Stufen der Flexibilität ermöglichen sollen [KOE10a]. Innerhalb der Fachschale werden Teilmodelle durch Programmierer erstellt, welche unterschiedliche Aspekte des Gebäudemodells abbilden. Die Teilmodelle können sich dabei sowohl gegenseitig referenzieren als auch erweitern.

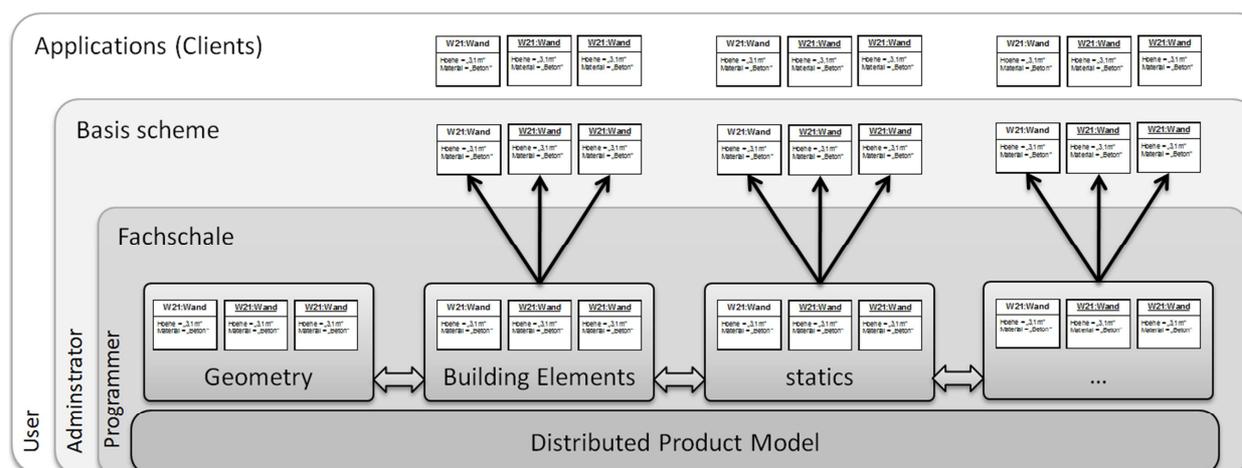


Abbildung 9: Prinzip der Dynamik der Modellstruktur: Auf verschiedenen Programmiererebenen können Teilmodelle (Fachschale) hinzugefügt beziehungsweise Objekte durch Attribute und Algorithmen erweitert werden (Basisschemata)

Umsetzung auf Anwenderebene

Auf Ebene der Basisschemata sieht die Modelldynamik vor, dass Fachplaner zur Laufzeit Änderungen beziehungsweise Erweiterungen am Modellschema vornehmen können, um dieses auf spezifische Projektbedürfnisse anzupassen. Hierzu wurden drei Strategien entwickelt, welche verschiedene Detailtiefen der Bearbeitung des Modellschemas sowie der darauf aufbauenden Modelle erlauben:

1. Erstellen neuer Klassen inklusive Attribute und Methoden im Sinne der Objektorientierten Modellierung
2. Erweiterung bestehender Klassen und/oder Objekte durch Attribute und Methoden
3. Filtern, Verarbeiten und Erweitern von Informationen im Bauwerksmodells mit Hilfe eines grafischen Scripteditors

Für die Realisierung des ersten Ansatzes wird das Reflection Konzept des Software-Frameworks Microsoft .NET genutzt. Mittels Reflection können zur Laufzeit Metainformationen über die einzelnen Programmkomponenten wie Klassen oder Objekte abgerufen und zum Teil auch verändert beziehungsweise erweitert werden. Der Vorteil liegt darin, dass der Nutzer (Fachplaner) zur Laufzeit die gleichen Komponenten verwenden kann wie der Programmierer bei der Erstellung von Teilmodellen, inklusive der Implementierung von Verarbeitungslogik. Neuer Programmcode zur Ergänzung des Bauwerksmodells wird quasi zur Laufzeit durch den Nutzer erstellt. Der Nutzer muss dabei keine Kenntnisse einer Programmiersprache besitzen.

Auf dieser Basis wurde in FREAC ein Teilmodell DynamicAssemblyModel sowie ein Client DynamicModelBrowser implementiert, welche es dem Fachplaner (Administrator) erlauben, auf Basis des verteilten Produktmodellschemas neue Assemblies und Klassen zu erstellen. Die Klassen können dabei sowohl frei definiert als auch von bereits bestehenden abgeleitet (Vererbung) werden. Auf diese Weise lassen sich bestehende Teilmodelle durch neue Klassen ergänzen als auch neue Teilmodelle zur Laufzeit erstellen. Nach Abschluss der Definition werden die neuen Klassen finalisiert und die Assembly (.DLL) kann lokal gespeichert und genutzt werden.

Der zweite Ansatz erlaubt die Erweiterung bereits bestehender Objekte um zusätzliche Objekteinträge (AdditionalEntries) und Methoden (AdditionalMethods). Diese werden unter Verwendung eines DictionaryContainers an vorhandene Objekte angefügt. Die Definition der Methoden erfolgt durch Anfügen eines DynamicMethodObjects. Dieses führt ein IronPython Script aus, welches quasi den eigentlichen Methodenrumpf repräsentiert. Der Fachplaner definiert somit über eine einfache Scriptsprache (IronPython) das Verhalten einer Methode, welche dann an ein Objekt angehängt werden kann. Übergabeparameter und Rückgabebetyp können dabei frei definiert werden.

Diese dynamischen Methoden sind zunächst ausschließlich objektbezogen. Die Anforderungen an eine dynamische Erweiterbarkeit des Modellschemas sehen aber auch die Erweiterung von Klassen durch Methoden vor. Hier kommt das .NET ComponentModel zum Tragen. Dieses ermöglicht es, Klassen zur Laufzeit Nutzerattribute hinzuzufügen. In .NET erlauben Attribute, zusätzliche Informationen im Code abzulegen, welche mittels Reflection ausgewertet werden können. Bei der Definition einer dynamischen Methode wird deren Quellcode (das Pythonscript) in einem nutzerdefinierten Attribut als Information an eine Klasse angefügt. Bei der Instanziierung sowie beim Methodenaufruf wird nun dieses Attribut abgefragt und ein DynamicMethodObjekte erstellt, welches wiederum die eigentliche dynamische Methode beinhaltet.

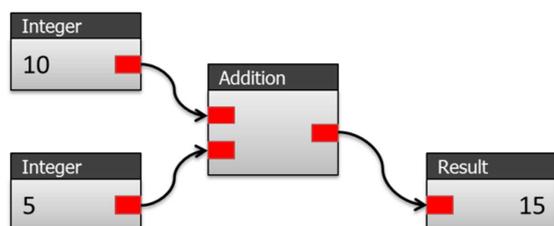


Abbildung 10: Prinzip des Node-based Scriptings

Als Ergebnis dieser geforderten Dynamik liegt jedem individuellen Bauprojekt ein in sich veränderbares Modellschema zugrunde. Um dem Nutzer dennoch Anfragen und Operationen auf Basis dieses veränderlichen Systems zu gewähren, wurde ein Node-basierter grafischer Scripteditor als FREAC-Tool entwickelt. Zentraler Gegenstand des Editors sind so genannte Nodes, welche durch Links miteinander verbunden werden. Ein Node kann über ein- oder mehrere Input- und Output-Connectors verfügen. Die am Input anliegenden Links liefern einen Datenstrom, welcher vom Node in einer bestimmten Weise verarbeitet wird. Die Resultate der Verarbeitung werden wiederum als Datenstrom an die Output-Connectors geleitet, welche erneut als Input für andere Nodes dienen können. Abbildung 10 verdeutlicht das Prinzip und Abbildung 11 zeigt einen Screenshot des implementierten ScriptEditors.

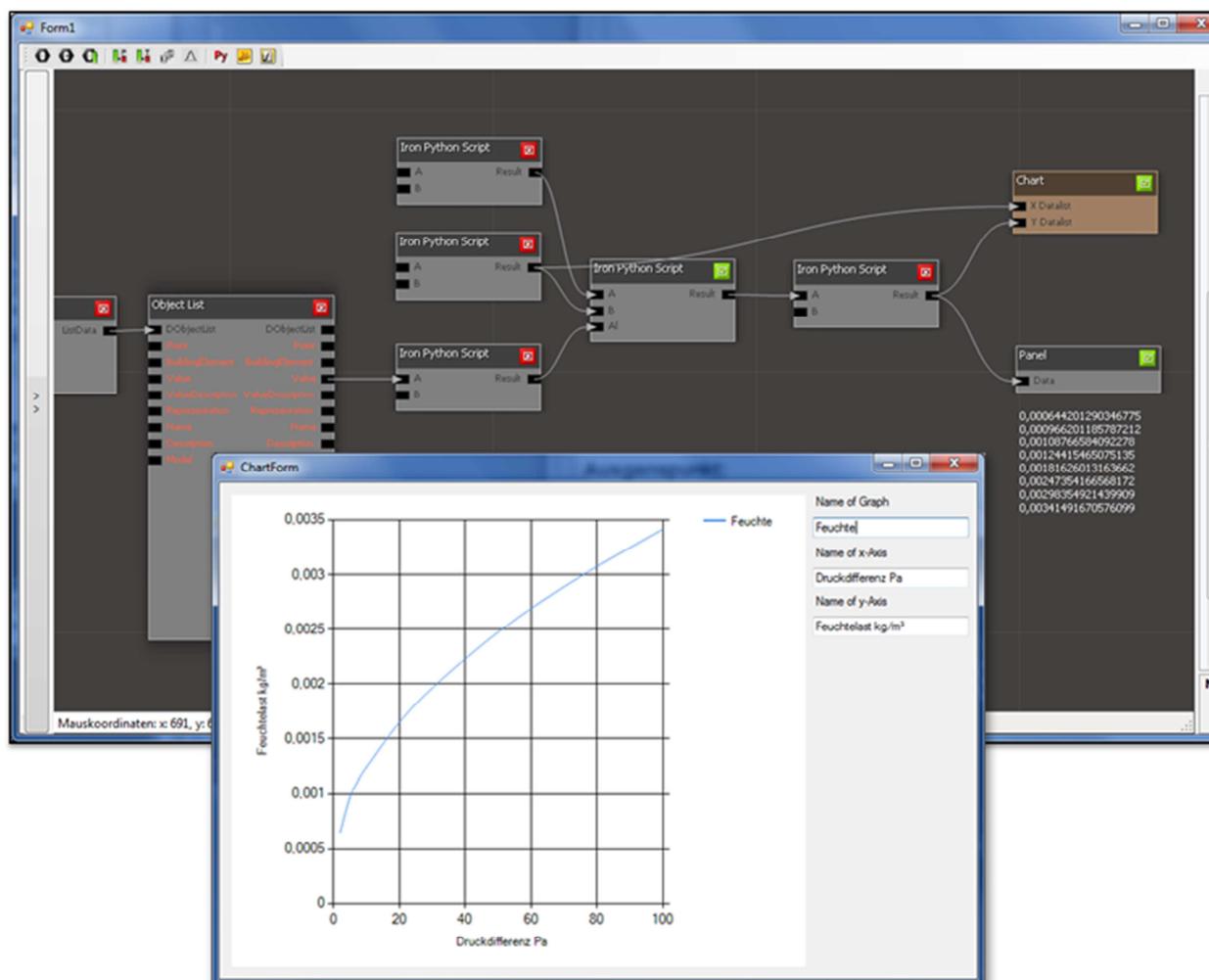


Abbildung 11: Screenshot des Node-based Script Editor. Als Beispiel ist die Berechnung der Feuchtelast in Abhängigkeit zur anstehenden Druckdifferenz an einer Leckagestelle dargestellt.

Dynamic Nodes

Die Dynamik des zugrunde liegenden Modellschemas muss auch in der Nutzeroberfläche des Script Editors berücksichtigt werden. Im Editor sind daher so genannte Dynamic Nodes vorgesehen, deren In- und Output-Connectors erst zur Laufzeit dynamisch angelegt werden.

Ein Beispiel hierfür ist der Object-Node. Dieser bietet dem Fachplaner Zugriff auf alle öffentlichen Inhalte eines spezifischen verteilten Objektes. Beim Anlegen des Nodes wird eine Reference (Link) zu einem verteilten Objekt erstellt und dessen Metadaten mittels des Reflection Mechanismus ausgelesen, sodass Objekt spezifische In- und Output-Connectors bereitgestellt werden. Durch den Zugriff auf die Metadaten des Objektes mittels Reflection können auch Nodes von den verteilten Objekten genutzt werden, deren Klassen erst zur Laufzeit des Projektes dem Modellschema hinzugefügt wurden. Im Prinzip stehen dem Fachplaner nun zur Laufzeit die gleichen Objekteigenschaften und Methoden zur Verfügung wie einem Programmierer. Somit hat er den vollständigen Zugriff auf die Inhalte des Bauwerksmodells und kann diese entsprechend seinen Anforderungen beliebig abfragen und verändern.

Weitere Beispiele für Dynamic Nodes sind der ObjectList-Node für den zeitgleichen Zugriff auf eine Liste von verteilten Objekten und der Class-Node als Repräsentation einer Klassendefinition eines verteilten Objektes.

Static Nodes

Im Gegensatz zu Dynamic Nodes sind statische Nodes in ihrer Anzahl und Funktion der Connectors fixiert. Die Nodes verarbeiten die eingehenden Datenströme in einer vordefinierten Weise und liefern einen oder mehrere Datenströme als Output. Als einfachstes Beispiel sei hier der Panel-Node erwähnt, welcher den eingehenden Datenstrom in Text konvertiert und im Editor darstellt. Weitere bisher implementierte Nodes sind der FilteredList- und FilteredTypeList-Node zum Filtern von Objektlisten, der Series-Node zur Erstellung von numerischen Reihen, der Chart-Node zur Darstellung eines zweidimensionalen Graphen aus zwei numerischen Reihen und der PythonScript-Node.

Der PythonScript-Node stellt dabei die flexibelste Variante des Zugriffes und der Manipulation von Daten des Bauwerksmodells dar. Er erlaubt das Erstellen und Ausführen von IronPython Programmcode zur Laufzeit. Die an den Input-Connectors anliegenden Daten können im Python-Code als Variablen verwendet werden, ebenso wie der Output-Connector. Da es sich bei IronPython um eine .NET Programmiersprache handelt, ist über den Node auch der Zugriff auf andere Programmbibliotheken, wie z. B. andere Teilmodelle, uneingeschränkt möglich.

Der FilteredList- und FilteredTypeList-Node erlaubt das Filtern einer Liste beliebiger verteilter Objekte anhand eines bestimmten Eigenschaftswertes beziehungsweise des Objekttypes. Realisiert wird dieser Filter durch eine weitere .NET Technologie, der sprachintegrierten Abfrage LINQ (Language-Integrated Query). LINQ stellt Programmentwicklern verschiedene Abfrageausdrücke zur Verfügung, um Datenstrukturen nach bestimmten Kriterien zu durchsuchen. Um eine dynamische Abfrage zu realisieren, dessen Kriterien erst zu Laufzeit durch den Nutzer festgelegt werden, wurde wiederum auf IronPython zurückgegriffen. Der Nutzer definiert über den FilteredListNode ein Abfragekriterium in Form eines booleschen IronPython Ausdrucks. Beim Durchlaufen der gegebenen Objektliste liefert dieser Ausdruck für jedes Element entweder wahr oder falsch zurück, sodass als Resultat eine gefilterte Liste am Output-Connector zur Verfügung steht.

Messraster am Beispiel des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens

Im Forschungsantrag des Projektes wurden für dieses Arbeitspaket folgende Meilensteine definiert:

Meilenstein 1 (lila) Mitte 2008:

„Die Erstellung des Geometriemodells mittels verschiedener Aufmaßtechniken ist Voraussetzung für die Entwicklung des Basisschemas und der Ordnungsstruktur des Gebäudes. Das funktionierende Einlesen der Aufmaßdaten in das Bauwerksmodell soll zu diesem Zeitpunkt für ausgewählte Messtechniken bereitgestellt werden. Ergebnis ist der erste Softwarebaustein zur Geometrieerfassung des Bestandes.“

Meilenstein 2 (pink) Mitte 2008:

„Für die Messrasterentwicklung muss einerseits die Möglichkeit gegeben sein, die geschädigten Bauteile den Anforderungen an den Detaillierungsgrad entsprechend auf zu messen, wie auch diese Geometriedaten im Gebäudemodell vorzuhalten. Im Unterpunkt 1.3 müssen die Anforderungen an das Messraster vorgegeben werden.“

Die beiden Meilensteine zielen auf einen wesentlichen Aspekt des Forschungsprojektes, die Abbildung beliebiger Messdaten in einem Modell und ihre geometrische Inbezugnahme. In der Bauaufnahme existieren unterschiedliche Aufmaßtechniken, um Geometrie erfassen zu können. Heute verfügbare Softwarelösungen unterstützen aufgrund der ihnen zugrunde liegenden mathematischen Ansätze entweder nur einzelne dieser Techniken oder / und schränken durch vorgegebene Vorgehensweisen den Aufnehmenden stark ein. Die Forderungen nach bestimmten Messungen und ihren Abläufen, bedingt durch die der Software zugrunde liegenden Algorithmen, lassen sich in der Realität oft so nicht ausführen. Somit bestimmt das System den Aufnehmenden und nicht umgekehrt. Was in der Praxis aber gerade benötigt wird, ist ein sehr einfach zu bedienendes System, das flexibel und immer mit dem geringsten Aufwand erlaubt, Messstellen zu erfassen und zu archivieren, gerade auch für Experten ihres Gebietes ohne geodätisches Hintergrundwissen.

Die beiden Meilensteine zielen darauf, Lösungen für dieses Defizit zu erarbeiten. Innerhalb des Forschungsprojektes erfolgt dies am Beispiel einer zerstörungsfreien, akustischen Untersuchungsmethode, der Durchschallung von Bauteilen mittels Ultraschall. Zwar handelt es sich um eine ausgesuchte Detailanwendung, welche allerdings auf die Evaluierung des Gesamtkonzeptes zielt und damit stellvertretend für andere Untersuchungsmethoden steht [BRA10a].

Bei der Durchschallung von Bauteilen wird auf einer Seite des Bauteils ein Ultraschallgeber platziert, auf der anderen Seite gegenüberliegend ein Ultraschallsensor. Nun wird ein Ultraschallimpuls vom Ultraschallgeber ausgelöst und vom -sensor erfasst. Durch die Kenntnis der Positionen von Ultraschallgeber und -sensor kann der Strecke zwischen diesen die Geschwindigkeit der Schallwelle zugewiesen werden. Diese gibt indirekt Auskunft über z. B. Festigkeitswerte. Wird eine Menge von Messungen in einem Raster ausgeführt, so ergibt sich allein über die Verteilung der Laufzeiten über das Bauteil ein Bild analog einer „Röntgenaufnahme“, welche die elastischen Eigenschaften im untersuchten Bereich des Baukörpers repräsentiert und beispielsweise dazu geeignet ist, Beziehungen zur Druckfestigkeit herzustellen und Problemstellen innerhalb des Bauteils aufzudecken und der geschulten Fachkraft erlaubt, gezielt weitere punktuelle Messungen wie Probebohrungen festzulegen.

Eine der wesentlichen Problemstellungen der Messtechnik liegt im Aufbau von zwei gegenüberliegenden Messrastern für den Ultraschallgeber und -sensor. Bisher wird dies manuell mit Wasserwaage und Zollstock durchgeführt. Neben dem hohen manuellen Aufwand stellt die Genauigkeit der Messmethode ein Problem dar. Gerade die Kenntnis des genauen Abstandes von Ultraschallgeber und -sensor ist wichtig, um aus der gemessenen Ultraschalllaufzeit ihre Geschwindigkeit berechnen zu können. Um diese Aufgabe besser zu lösen, sind Techniken erforderlich, welche immer wieder für Problemstellungen dieser Art notwendig sind:

1. Die Erfassung von Oberflächen und Messpunkten in einem gemeinsamen Geometriemodell
2. Die Projektion von Punkten, Rastern usw. auf Oberflächen, um ein Aufzeichnen mit Kreide usw. entweder zu vereinfachen oder sogar zu ersetzen
3. Die Bestimmung von Gerätestandorten zueinander, um ihre „lokalen Koordinatensysteme“ in ein gemeinsames Koordinatensystem umrechnen zu können und umgekehrt. Mit Geräten sind dabei sowohl Geräte zur Erfassung von Geometrien wie auch zu ihrer Projektion gemeint.

Für die ausgesuchte Aufgabenstellung wurde der Einsatz von motorisierten Tachymetern mit sichtbarem Laser gewählt. Sie erlauben sowohl die Erfassung der Bauteiloberflächen, die Projektion von Punktpositionen auf die Oberflächen (Projektion der Messraster) als auch die automatische Detektion und Positionserfassung von Ultraschallgeber und -sensor per Infrarot durch aufgeschraubte Miniprismen. Der Messablauf ist wie folgt zu beschreiben:

Zunächst werden auf den beiden Oberflächen des Bauwerkes die Motortachymeter aufgebaut. Wesentlich ist nun die Einmessung ihres Standortes zueinander beziehungsweise zum einheitlichen Geometriemodell des Bauwerkes insgesamt. Hierzu kann beliebig vorgegangen werden, es wird keine bestimmte Aufmaßtechnik erzwungen. Gerade dies ist ein wesentlicher Aspekt, da vor Ort die unterschiedlichsten Situationen vorliegen können, z. B. sich keine Tür in einer Wand befindet, welche untersucht werden soll. Realisiert ist diese Flexibilität wie später beschrieben.

Im nächsten Schritt werden die Oberflächen mittels der Tachymeter grob als planar angenommen erfasst. Es werden die beiden gegenüberliegenden Messraster berechnet. Die Tachymeter fahren die dabei jeweils zusammengehörigen Messpunktpositionen auf den beiden Seiten des Bauteils an. Die Aufnehmenden orientieren die Tastköpfe anhand des sichtbaren Lasers. An beiden Tastköpfen wird per Auslöseknopf ein Auslösesignal gegeben. Liegen bei beiden Tastköpfen die Auslösesignale vor, wird die eigentliche Messung gestartet. Ein Ultraschallgenerator liefert ein Leistungssignal zum Tastkopf mit Ultraschallgeber und gleichzeitig ein Signal zum Triggern einer Messkarte für den Ultraschallsensors am 2. Tastkopf. Gleichzeitig startet der Computer die Feinjustierung der Tachymeter. Diese schalten von sichtbarem Laser auf Infrarot um und erfassen an den Tastköpfen befindliche Miniprismen. Auf diese Weise ist es den Aufnehmenden möglich, sich bei z. B. Ausbrüchen an den Oberflächen nicht strikt an die vorgegebenen Rasterpositionen zu halten. Anschließend werden die genauen Positionen der Miniprismen durch die Tachymeter bestimmt (siehe Abbildung 12). Somit liegen die Positionen der Tastköpfe sowie der zeitliche Verlauf des Ultraschallsignals vor. Automatisch und wo erforderlich halbautomatisch wird im Ultraschallsignal nach dem Ersteinsatz der Ultraschallwelle gesucht. Aus der hierdurch bestimmten Laufzeit des Ultraschallsignals und dem Abstand der Tastköpfe wird die Ultraschallgeschwindigkeit bestimmt.

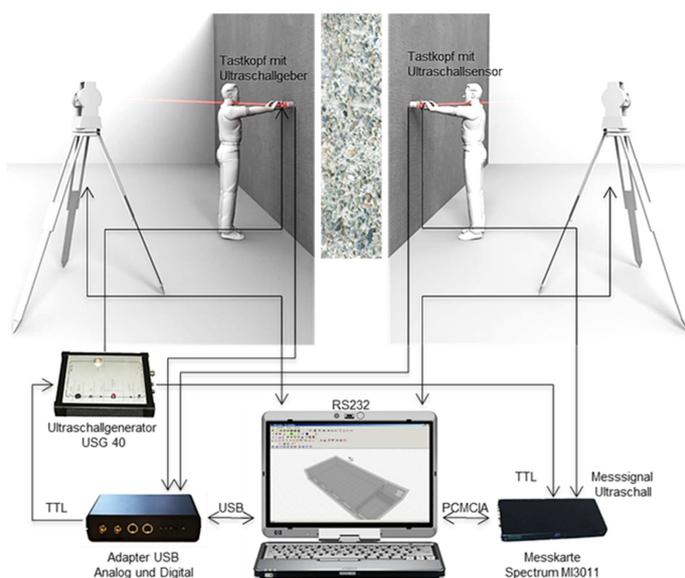


Abbildung 12: Systemübersicht automatisiertes taktiler Ultraschall-Transmissionsverfahren

Im Arbeitspaket 3.5 „Verifikation der Software-Testmuster“ wurde die Überprüfung der praktischen Einsatzfähigkeit des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens und die Überlagerung mit weiteren zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden anhand des digitalen Gebäudemodells vom Referenzobjekt Schloss Ponitz durchgeführt. Es wurden an einem monolithischen Unterzug aus Stahlbeton komplementäre, zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden innerhalb eines definierten Untersuchungsbereiches angewandt (siehe Abbildung 13). Damit ließ sich die Zielstellung zur automatisierten Messgittererstellung beziehungsweise Schallwegfassung zwischen gegenüberliegenden Sende- und Empfangspunkten an Bauwerksteilen verifizieren und die direkte Einbindung unterschiedlicher werkstoffdiagnostischer Methoden in digitale Gebäudemodelle exemplarisch demonstrieren [TON12c]. Die vorgestellte und prototypisch implementierte Vorgehensweise hat sich als praxistauglich erwiesen.

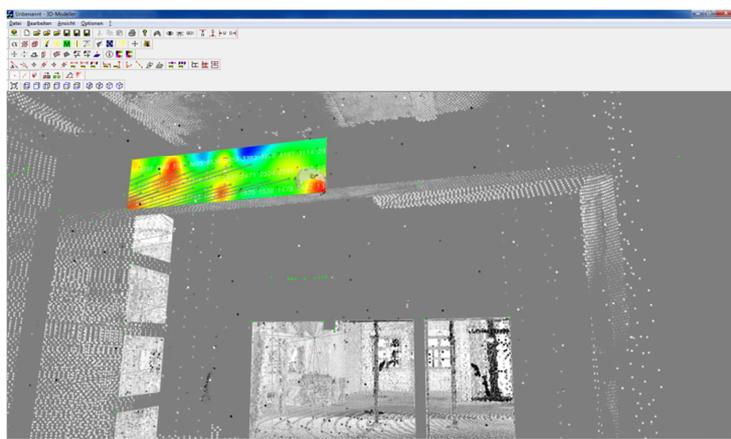


Abbildung 13: Ermittelte Schallgeschwindigkeit des taktilen Ultraschalltransmissionsverfahrens im digitalen Modell mit Laserscanning Punktwolke

Datenvisualisierung mit Volumenrendering

Neben der Datenerfassung ist ein weiterer wesentlicher Aspekt deren Visualisierung. Wesentlich ist, die Informationen dem Nutzer auf übersichtlichste Art gemeinsam darstellen zu können. Hierzu erfolgte die Integration von Voxelmodellen in die Experimentalplattform Freak zur Darstellung von Messwerten, die Volumen zugeordnet sind. Diese Methode der Datenvisualisierung erlaubt die Darstellung von bspw. Daten der Ultraschalltomografie, der taktilen Ultraschalluntersuchung sowie von Temperaturverläufen beziehungsweise Luftströmungen in Räumen jeweils in direktem Bezug zur Geometrie als Teil des Gesamtbauwerksmodells.

Volumenrendering ist in der Computergrafik ein etabliertes Verfahren, um große Volumendatensätze zu visualisieren [LEV88; DRE88]. Es wird besonders im Bereich der Medizin (MRT, CT) verwendet, um menschliches Gewebe räumlich darzustellen und zu untersuchen. Im Bereich der Gebäuediagnostik wird Volumenrendering ebenfalls schon für einzelne, abgetrennte Messverfahren eingesetzt (z. B. Ultraschalltomografie). Der Neuwert des entwickelten Verfahrens besteht in der kombinierten Visualisierung verschiedenster Ergebnisse und deren interaktiven Auswertung im Kontext des digitalen Gebäudemodells (Overlay) [TON12b]. Dieses Volumenrendering stellt vor allem die Möglichkeit bereit, mehrere Volumenmesswerte und andere bildgebende Messverfahren in einem Modell darzustellen, zu überlagern, um so dem Planer bessere Informationen über das Gebäudemodell zu geben.

Durch die Nutzung moderner Hardware-beschleunigter Rechenverfahren auf modernen Grafikkarten ist die Verwendung von Volumenrendering auf handelsüblichen Computern möglich geworden. Es war notwendig, im Softwareprototyp verschiedene Importer beziehungsweise Konverter zu implementieren, die sowohl verschiedene Voxel-Volumendatentypen als auch ungleichmäßige Datenpunktwolken einlesen können. Beim Volumendaten Import werden außerdem lokale Passpunkte des Volumendatensatzes mit globalen Passpunkten des Gebäudemodells in Korrespondenz gebracht, sodass die Volumendaten mit der korrekten Position, Rotation und Skalierung im Gebäudemodell dargestellt werden können. Die Grundlage zur Visualisierung der Volumendatenätze bildet das Raycasting Verfahren. Hierbei werden für jeden Pixel, ausgehend vom Betrachter der Szene, Sehstrahlen durch den Volumendatenatz geschickt. Das geschieht im Softwareprototyp auf der Grafikkarte mittels hardwarebeschleunigter GLSL-Shader. Es wurden im Softwareprototyp sieben verschiedene Shaderarten implementiert, welche die Volumendaten mittels verschiedener Parameter auf ihre Art und Weise darstellen.

Ein wichtiger Aspekt des Volumenrenderings ist die nutzerfreundliche Differenzierung der verschiedenen Volumendaten im Gebäudemodell. Gerade wenn mehrere Volumendatenätze überlagert werden sollen, ist eine eindeutige Unterscheidung notwendig. Die Masse an Daten muss dabei auf die für den Bearbeiter relevanten Informationen abstrahiert werden können. Hierfür gibt es verschiedene Methoden, von welchen hier nur die Gebräuchlichsten genannt werden sollen:

- die Kombination verschiedener Shaderarten (z. B. Schnitt- und Grenzflächenshader),
- das Clipping der Volumendatenätze an einstellbaren Grenzen, beziehungsweise das Clipping des Flächenmodells,
- die Verwendung von farbigen oder transparenten Transferfunktionen,
- die direkte Kombination der verschiedenen Volumenwerte mithilfe von Wertebereichen, welche eine Bedingung zur Darstellung eines anderen Volumens sein können
- und verschiedene Grenzwerte und Farben beim Grenzflächen-Shader.

Ein Beispiel aus der Evaluierung des taktilen Ultraschalltransmissionsverfahrens mittels Volumenrendering ist in Abbildung 14 dargestellt. Als Ergebnis des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens ist das Falschfarbenbild der gemessenen longitudinalen Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf der hinteren Unterzugslaubung visualisiert. Die Ergebnisse der Ultraschall-Scherwellen-Tomografie sind mit einer teilweisen transparenten Transferfunktion dargestellt, sodass ausschließlich Reflexionshorizonte definierter Intensität abgebildet werden. Zur Auswertung der Radarmessungen wurde ein Grenzflächen-Shader verwendet, der die Bewehrungsstäbe weiß erscheinen lässt.

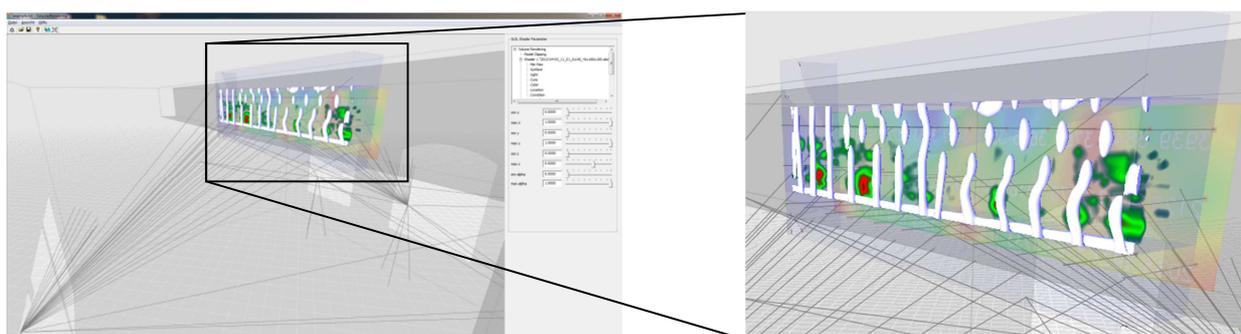


Abbildung 14: Überlagerung Ultraschall-Scherwellen-Tomografie – Radarverfahren – Taktiler Ultraschall-Transmissionsverfahren

Im Folgenden dienen die unterschiedlichen Forschungsergebnisse der einzelnen am Projekt beteiligten Professuren als Input für das digitale Gebäudemodell.

2.1.2 Bauphysikalische Methoden

Thermische Behaglichkeit

Im Rahmen des Projektes wurde zunächst umfassend auf die physiologischen Grundlagen der thermischen Behaglichkeit eingegangen, da diese für das Verständnis dieses Komplexes unabdingbar sind. Darauf aufbauend wurde ein Kompendium über die zahlreichen nationalen, europäischen und internationalen Normen und Richtlinien erarbeitet. Aus diesem geht hervor, dass die gegenwärtig zur Verfügung stehenden Ansätze zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit schnell an ihre Grenzen stoßen, woraus die bereits erwähnte Notwendigkeit neuer Methoden abgeleitet werden kann.

Zielstellung des Arbeitspaketes war daher die Entwicklung eines neuen Ansatzes, mit dem die thermische Behaglichkeit auch unter komplexen raumklimatischen Gegebenheiten bestimmt werden kann. Eine Möglichkeit bietet die Kopplung der Strömungssimulation (CFD) an ein numerisches Modell, welches die Thermophysik des menschlichen Körpers abbildet. Dabei werden zunächst mit Hilfe der Strömungssimulation die klimatischen Bedingungen ermittelt. Darauf basierend können durch das thermophysikologische Modell sowohl die Temperaturverteilung im menschlichen Körper als auch die daraus resultierende Wärmeabgabe bestimmt werden, woraus Rückschlüsse auf die thermische Behaglichkeit gezogen werden können. Mit diesem Ansatz lassen sich im Gegensatz zu den bisher üblichen Verfahren auch heterogene und teilweise instationäre Bedingungen in Gebäuden oder Verkehrsmitteln und ihre Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Nutzers abbilden. Dadurch werden zukünftig neue Lösungen für ein auf die Nutzungsanforderungen abgestimmtes, thermisch behagliches Raumklima unter Berücksichtigung der Energieeffizienz möglich.

Um die Genauigkeit der entwickelten Kopplung zu erhöhen, wurde eine umfangreiche Validierung der verwendeten Modelle durchgeführt. Zunächst wurde das im Rahmen dieses Arbeitspaketes verwendete Thermoregulations- und Komfortmodell *UC Berkeley Thermal Comfort Model*, welches das derzeit am weitesten entwickelte Modell ist, detailliert untersucht. Dafür wurden in der Fachliteratur dokumentierte, am Menschen durchgeführte Untersuchungen für einen umfangreichen Vergleich zwischen Simulation und Realität unter verschiedenen Bedingungen herangezogen. Dabei konnte festgestellt werden, dass das Modell mit guter Genauigkeit in der Lage ist, sowohl Kern- als auch Hauttemperaturen des menschlichen Körpers zu simulieren. Die Funktionsweise des Modells konnte nicht falsifiziert werden, womit das Modell für die untersuchten Randbedingungen als abgesichert bezeichnet werden kann.

Für die messtechnische Validierung der CFD-Simulationen wurde eine Klimakammer errichtet [VOE10d], [VOE11a]. Um den Einfluss des menschlichen Körpers auf die Temperatur- und Strömungsverhältnisse zu berücksichtigen, wurde ein so genanntes thermisches Manikin verwendet. Zur Erfassung der klimatischen Bedingungen wurden sowohl konventionelle als auch innovative Messverfahren eingesetzt. Zu letzterem zählt das so genannte Particle Streak Tracking (PST), welches die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung mit Hilfe von der Raumluft beigegebenen Partikeln ermittelt. Vorteil dieses Verfahrens ist sowohl die Visualisierung als auch die flächige Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit. Darüber hinaus ist

der Eingriff des Messaufbaus in die Strömung als gering zu betrachten. Als entscheidend stellte sich die Auswahl eines geeigneten Interpolationsalgorithmus heraus, da erst durch diese räumliche und zeitliche Mittelung eine Vergleichbarkeit mit der statistisch gemittelten Strömungssimulation geschaffen werden kann. Darüber hinaus ermöglicht die Interpolation die Darstellung der Messergebnisse in einem äquidistanten Gitter, was ebenfalls die Vergleichbarkeit verbessert.

Zur Visualisierung der thermischen Bedingungen des den menschlichen Körper umgebenden Mikroklimas wurde eine Thermografiekamera eingesetzt. Da mit diesem Verfahren lediglich Oberflächen-, jedoch nicht die Lufttemperaturen erfasst werden können, wurde eine Hilfsschicht um das thermische Manikin errichtet. Der Vorteil ist auch hier die flächige Messung im Gegensatz zu den genaueren, aber lediglich punktuell messenden Sensoren. Bei dieser Methode zu beachten sind der Emissionskoeffizient der Hilfsschicht sowie beeinflussende Strahlungseffekte durch umgebende Oberflächen. Letzteres gilt sowohl für die Absorption vor der Messung als auch für die Reflexion während der Messung. Im Zuge der Messungen erwies sich die Auswahl geeigneter Messstellen als wichtig, um den Strahlungsaustausch mit den umgebenden Flächen oder dem thermischen Manikin zu verringern.

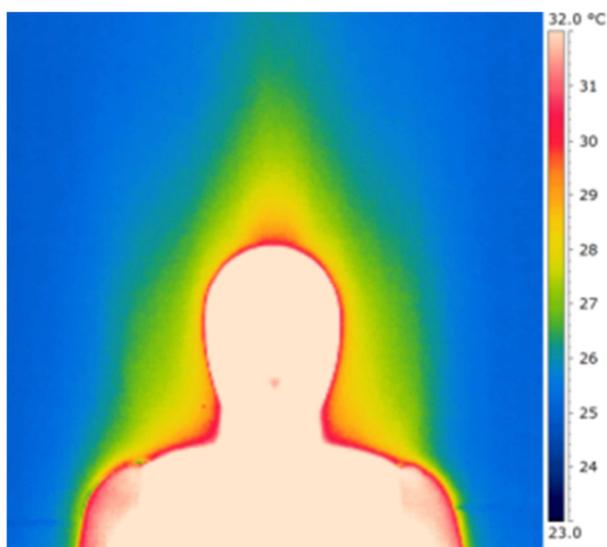


Abbildung 15: Thermografie der Hilfsebene



Abbildung 16: Sensorik bei der Untersuchung des Mikroklimas

Die beiden flächig messenden Verfahren Thermografie und PST haben sich als geeignet erwiesen. Beide Methoden sind unter Berücksichtigung kleinerer Einschränkungen für die messtechnische Erfassung des Raumklimas geeignet. Insbesondere die Thermografie mit Hilfe der vorgestellten Konstruktion weist kleinere Schwachstellen auf, da die Messung sowohl von den NTC-Messungen als auch von der CFD-Simulation abweichen. Ursache ist der bereits erwähnte Strahlungsaustausch mit den umgebenden Flächen, der die Messergebnisse bei ungünstigen Randbedingungen beeinflussen kann. Aus diesem Grund ist der Vergleich mit konventionellen Sensoren zur Steigerung der Aussagekraft notwendig. Aus diesem Grund wurde der Messaufbau um herkömmliche Sensoren (NTC, Anemometer) ergänzt. Auch hier erwies sich eine zeitliche Mittelung der Messungen aufgrund von Turbulenz und Instabilität der Strömung als sinnvoll.

Um die messtechnischen Untersuchungen mit der CFD-Simulation vergleichen zu können, wurde die Geometrie des Messaufbaus in die Simulation übertragen. Für ein möglichst exak-

tes Abbild des Messaufbaus wurde auf ein 3D-Laserscanning-Verfahren zur Implementierung der komplexen Geometrie des thermischen Manikins zurückgegriffen. Die durch die Implementierung des Scans erzielte Genauigkeit ermöglicht eine Ermittlung der segmentbezogenen raumklimatischen Bedingungen zur Bestimmung der lokalen thermischen Behaglichkeit sowie die Validierung der CFD-Simulation. Über die Verwendung in diesem Projekt hinaus soll der 3D-Laserscan an der UC Berkeley in das Strahlungsmodell des Thermoregulationsmodells integriert werden.

Fokus der anschließend durchgeführten Validierung war die Auswahl eines für die Anwendung geeigneten Turbulenzmodells. Im Zuge einer umfangreichen Literaturrecherche kristallisierten sich drei Turbulenzmodelle als für die Simulation der Raumluftströmung und das den Menschen umgebende Mikroklima geeignet heraus: (1) low-Reynolds $k-\epsilon$, (2) V2F und (3) $k-\omega$ SST. Die für die Simulation notwendige Diskretisierung des Raumes erfolgte mit Hilfe eines dreidimensionalen Polyedergitters, welches um den Bereich des menschlichen Körpers in Erwartung hoher Gradienten verfeinert wurde. Bestehend aus etwa 1,6 Millionen Zellen stellt das Gitter entsprechend hohe Anforderungen an die Rechentechnik.

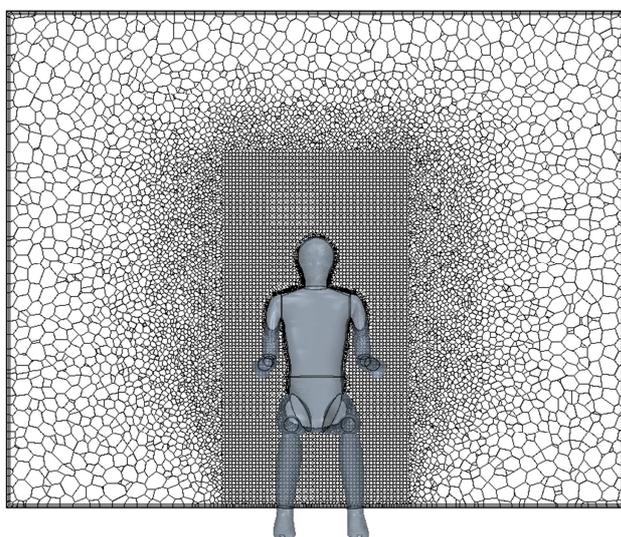


Abbildung 17: Gittergenerierung mit lokaler Verfeinerung im Bereich des Menschen

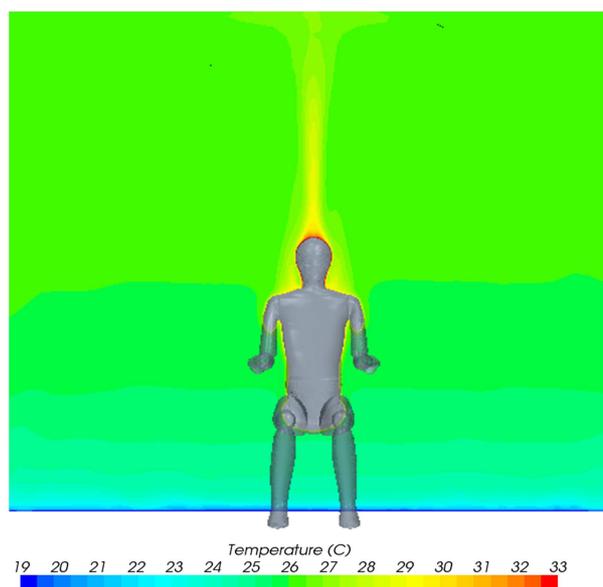


Abbildung 18: Simuliertes Temperatur- und Strömungsprofil bei Fußbodenkühlung

Da der Fehler einer CFD-Simulation in der Regel unbekannt ist, kann keine zuverlässige Fehlerabschätzung durchgeführt werden. Aus diesem Grund ist eine Validierung mit Hilfe von experimentellen Daten unerlässlich, weshalb nichtvalidierte CFD-Simulationen – wie leider viel zu häufig in der Fachliteratur zu finden – äußerst kritisch betrachtet werden sollten. Eine allumfassende Validierung eines CFD-Codes ist allerdings praktisch nicht durchführbar, sodass der jeweilige Einsatzbereich – in diesem Arbeitspaket (1) das Mikroklima sowie (2) das Raumklima unter dem Einfluss einer Fußbodenkühlung – mit Messungen systematisch verglichen wurde. Beim Vergleich der Ergebnisse der drei Turbulenzmodelle mit den Messungen zeigte sich, dass das $k-\omega$ -SST-Turbulenzmodell die beste Übereinstimmung aufwies. Ursache könnte die in diesem Modell implementierte Blending-Funktion sein, die im freien Raum das $k-\epsilon$ -Modell, in Wandnähe aber das $k-\omega$ -Modell verwendet. Aus diesem Grund wurden weitere, explizit mit diesem Modell unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführte Simulationen experimentell überprüft. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung liegen größtenteils unter der Messgenauigkeit. Lediglich an einzelnen Stellen, die

aber wie beispielsweise der Plume für die thermische Behaglichkeit nicht bedeutsam sind, gibt es kleinere Differenzen. Die Simulation der Lufttemperatur und der Strömungsgeschwindigkeit kann damit für die untersuchten Bereiche als abgesichert gelten, da das verwendete CFD-Modell nicht falsifiziert werden konnte.

Nach der erfolgreichen Validierung sowohl des Thermoregulations- als auch des CFD-Modells wurden beide über eine Schnittstelle miteinander gekoppelt [VOE12a]. Diese Kopplung verlangt zunächst die Eingabe des geometrischen Modells, der Randbedingungen sowie der Initialtemperaturen an der Oberfläche der menschlichen Geometrie, woraufhin die klimatischen Bedingungen mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation für jedes der durch das thermophysiologische Modell definierten Segmente des menschlichen Körpers bestimmt werden. Anschließend erfolgt die Übergabe dieser Daten an das thermophysiologische Modell, welches wiederum die Oberflächentemperatur der menschlichen Geometrie bestimmt. Da diese infolge der Wärmeabgabe das Raumklima beeinflusst, wird dieser Parameter anschließend wieder an die Strömungssimulation übergeben. Diese erstmalig entwickelte, automatisierte Kopplung stellt einen iterativen Prozess dar, welcher von einem definierten Abbruchkriterium beendet wird.

Ein Problem bei der Kopplung der beiden Modelle stellt die Ermittlung der klimatischen Parameter (z. B. Lufttemperatur an jedem Segment) aus der CFD-Simulation dar. Diese sind dem ungestörten Raumklima – aufgrund des Mikroklimas [VOE11d] also möglichst weit weg vom menschlichen Körper – zu entnehmen. Demgegenüber sollten die klimatischen Parameter jedoch möglichst nah am Segment abgegriffen werden, um sinnvoll die lokale thermische Behaglichkeit bestimmen zu können. Um diesen Widerspruch aufzulösen, ist die Kenntnis der Dicke des Mikroklimas nötig. Wie eigene Messungen und Simulationen gezeigt haben, sind die Eigenschaften des Mikroklimas stark von den Randbedingungen und dem jeweiligen Segment abhängig, sodass der Literatur zu entnehmende pauschale Abschätzungen der Dicke des Mikroklimas als unzureichend angesehen werden müssen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes verschiedene mathematisch-physikalische Ansätze entwickelt, die die Ermittlung der klimatischen Parameter ermöglichen. Dazu gehört die Approximation der simulierten Lufttemperatur durch eine Exponentialfunktion, über die der Übergang vom Mikroklima zum ungestörten Raumklima definiert werden kann. Die entwickelten Ansätze sind nur bedingt von den klimatischen Bedingungen oder dem Segment abhängig, sodass diese wesentlich allgemeingültiger als die bisherigen pauschalisierten Ansätzen sind.

Neben der Lufttemperatur wurde in bisherigen Vorarbeiten die Strömungsgeschwindigkeit an das Thermoregulationsmodell übergeben. Diese wird zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten benötigt, welche auf experimentellen Untersuchungen basieren. Dass diese in den Experimenten gegebenen Bedingungen nur bedingt pauschalisiert werden können, zeigen eigene Untersuchungen. Daher werden bei dem entwickelten Konzept die Wärmeübergangskoeffizienten direkt aus der CFD-Simulation entsprechend den jeweilig gegebenen klimatischen Bedingungen ermittelt, was die Genauigkeit des Verfahrens deutlich erhöht.

Die Fähigkeiten der entwickelten Kopplung wurden beispielhaft zur Untersuchung einer Fußbodenkühlung und dem daraus resultierenden heterogenen Raumklimas angewendet. Dabei zeigte sich, dass diese aus ökonomischer und energetischer Sicht viel versprechende Art der Raumklimatisierung die thermische Behaglichkeit gewährleisten kann. Dies gilt es weiterführend zu optimieren, wofür die gewonnenen Kenntnisse eine sehr gute Grundlage bilden. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Eignung der normierten Ansätze zur Bestimmung

der thermischen Behaglichkeit für solch komplexe Fragestellungen in Frage gestellt werden muss.

Zusammen mit dem 3D-Laserscan des menschlichen Körpers sowie der Validierung ist damit im Rahmen des Projektes ein belastbares Werkzeug entstanden, mit dem die thermische Behaglichkeit unter vielseitigen Bedingungen detailliert ermittelt werden kann. Dazu zählen neben der Anwendung in der Gebäudeplanung auch andere Bereiche mit komplexen klimatischen Gegebenheiten (z. B. Fahrzeugindustrie). Darüber hinaus können die neuen Kenntnisse über das Mikroklima nicht nur zur Kopplung zwischen CFD und der menschlichen Thermoregulation genutzt werden, sondern bieten auch Potential für zukünftige Forschungsthemen in anderen Bereichen (Luftqualität, Übertragung von Krankheitserregern, etc.)

Weiterführend wurde eine – basierend auf dem bisherigen Ansatz im UCB Model – deutlich erweiterte Modellierung des Wärme- und Feuchtetransports durch Textilien vorgestellt, die durch die Einbindung verschiedener Effekte eine höhere Genauigkeit bietet [VOE09d]. Zu den Weiterentwicklungen zählt unter anderem der Einfluss der Bewegung des Menschen sowie der Luft auf den sensiblen und latenten Wärmetransport durch die Kleidung. Des Weiteren wurde auf die Speicherung von Feuchtigkeit (Regain) in der Kleidung eingegangen, deren Wichtigkeit insbesondere unter extremen Randbedingungen nicht zu unterschätzen ist. Über die Weiterentwicklungen hinaus bietet die Modellierung des Wärme- und Feuchtetransports durch Textilien großes Potential für weitere Forschungsarbeiten.

Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes in situ

Ein weiteres Ziel der Forschungsarbeit war die experimentelle Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes einer Wand (U-Wert) im bestehenden Gebäude. Die Kenntnis dieses bauwerkspezifischen Wertes ist besonders wichtig für die energieeffiziente Sanierung des Gebäudes. Um den Wärmedurchlasswiderstand beziehungsweise die Wärmeleitfähigkeit einer Wand beziehungsweise eines Stoffes zu ermitteln, können verschiedene Verfahren angewendet werden [VOG09].

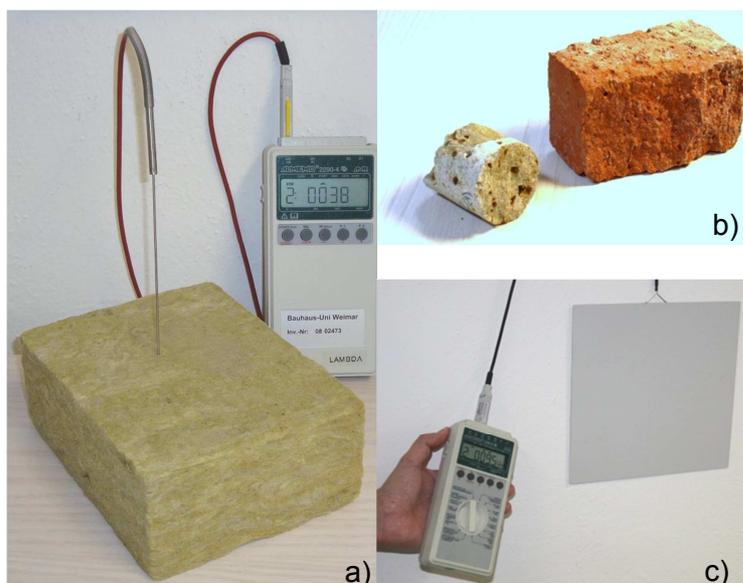


Abbildung 19: Methoden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit a) Lambdasonde, b) Dichtebestimmung - Materialdatenbank c) Messen von Wärmestrom und Oberflächentemperaturen

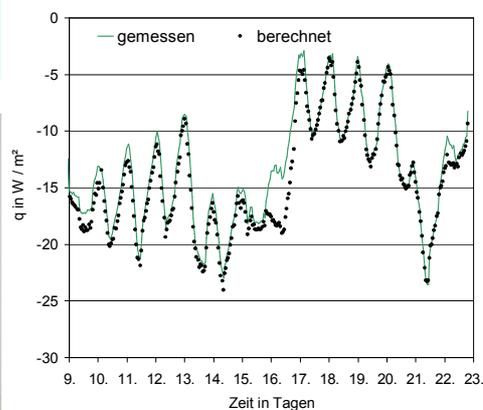


Abbildung 20: Vergleich gemessener und instationär errechneter Wärmestrom [VOG10]

Im Rahmen dieses Projektes steht die instationäre Mess- und Berechnungsweise im Fokus, was eine kontinuierliche Messung des Wärmestroms mit Wärmestrommessplatten und der Oberflächentemperaturen mit NTC- Widerstandssensoren an der Innen- und Außenwand erfordert. Für die Auswertung dieser Daten wurde ein Softwaretool zur instationären Berechnung der Wärmeleitfähigkeit entwickelt. In Abbildung 20 sind der gemessene und der instationär mit dem Berechnungstool berechnete Wärmestrom durch die Wand dargestellt.

Die in situ bestimmten Wärmeleitfähigkeiten beziehungsweise Wärmedurchlasswiderstände jedes untersuchten Bauteils werden dann in das digitale Gebäudemodell aufgenommen und dem entsprechenden Bauteil zugeordnet. Thermografieaufnahmen der untersuchten Bauteile beziehungsweise Gebäudefassaden komplettieren den Input in das Gebäudemodell (Abbildung 21) und ermöglichen eine schnelle qualitative und quantitative energetische Bewertung des interessierenden Bauteils und des gesamten Gebäudes.

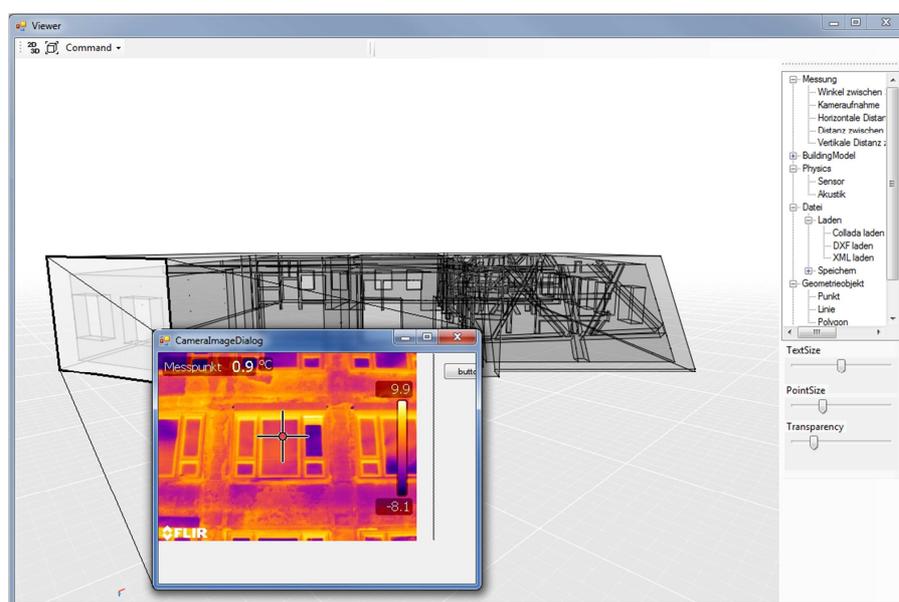


Abbildung 21: Einbindung von Thermografieaufnahmen in das digitale Gebäudemodell

Konvektiver Feuchtetransport

Der reale Differenzdruck zwischen Innenraum und Umgebung stellt das Potential dar, welches Ex- und Infiltrationen durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle bewirkt. Diese Strömungen können u.a. zu hygrischen Hüllflächeninfiltrationen und Energieverlusten führen. Die Entstehung von gesundheitsgefährdendem Schimmel und Wärmebrücken ist möglich.

Es gibt nur wenige veröffentlichte Messergebnisse zu realen Druckdifferenzen an der Gebäudehülle, welche sich infolge von Auftrieb und Wind zwischen Innenraum und Umgebung einstellen. Zumeist werden diese anhand von Windgeschwindigkeits- und richtungsmessungen nahegelegener Wetterstationen sowie örtlicher Messungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit hergeleitet. Daher wurden an der Hüllfläche ausgewählter Referenzobjekte in verschiedenen Regionen Deutschlands Differenzdruckmessungen durchgeführt. Um die bestehenden Modelle zur Berechnung des Differenzdrucks an der Gebäudehülle bewerten zu können, wurde an einem der Referenzobjekte zusätzlich ein Windgeschwindigkeits- und -richtungsmesser installiert. Zur Analyse des dichtebedingten Differenzdruckes wurden jeweils die Innenraum- und Umgebungstemperatur / -feuchte sowie der statische Druck aufgezeichnet. Zur Aus- und Bewertung der Untersuchungsergebnisse konnte für das

Referenzobjekt in Weimar auf die projekteigene Wetterstation zurückgegriffen werden. Für alle anderen Untersuchungen wurden die Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt. Bis auf ein Objekt entsprachen alle Untersuchungsobjekte den Luftdichtheitsanforderungen nach [DIN4108-7]. Wie dem bestehenden Berechnungsansatz von [MAT07] zur Leckagestromanalyse unter realen Druckdifferenzen zu entnehmen ist, können mehrere Eingangsparameter nicht hinreichend genau bestimmt werden, was Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen von ca. 40 % bedingt. Empirische Untersuchungen zur Entwicklung tabellierbarer Kenngrößen können zur Lösung des Problems beitragen. Aus diesem Grund wurde ein modularer Versuchsstand „MCMT“ (**M**easurement setup for research on **C**onvective **M**oisture **T**ransfer) entwickelt, in dem neben perforierten Wandbauteilen auch mehrschichtige perforierte Wandkonstruktionen auf ihre Durchströmung hin untersucht werden können. Im Januar 2012 wurde der Versuchsstand patentiert [BAU10]. Die Ergebnisse flossen in die Entwicklung eines analytischen Berechnungsmodells zur Bestimmung der hygri-schen Hüllflächeninfiltration ein.

Wie in [SCHM10a; SCHM08] dargestellt ist, führt Wind zu höheren Druckdifferenzen zwischen Innenraum und Umgebung, als es durch Dichteunterschiede zwischen diesen Orten möglich ist. Es konnten absolute Druckdifferenzen infolge Wind von bis zu 175 Pa gemessen werden. Für die Detektion sind die Fassadenausrichtung, die Lage beziehungsweise der Umbauungsgrad des Gebäudes, die Höhe des Messpunktes am Gebäude und die Länge des Messintervalls von entscheidendem Einfluss. Der Differenzdruck schwankt sekundlich sehr stark [SCHM10a]. Der Fehler der Mittelung von Differenzdruckmesswerten größer einem Messintervall von 1 s steigt mit der Länge des Messintervalls. In einer studentischen Arbeit zeigten die Berechnung des Differenzdruckes über die aus den Wetterdatensätzen ermittelten und mittels Druckabminderungswerten reduzierten Referenzwindgeschwindigkeiten nur geringe Übereinstimmungen mit den gemessenen Werten. Für die Differenzdruckhäufigkeiten zwischen Innenraum und Umgebung an allen von 2007 bis 2012 untersuchten Fassaden in der Heizperiode konnte eine Pearson-Verteilung entsprechend Abbildung 22 festgestellt werden. Diese Verteilungen dienen als Grundlage zur Berechnung des konvektiven Feuchteintrags durch Leckagen der Gebäudehülle [SCHM12a]. Abweichend von den Erwartungen wurden auf den untersuchten Ost- und Westseiten der Referenzobjekte zu-meist Überdrücke von außen gemessen. Auf den untersuchten Nordseiten lagen eher Überdrücke von innen vor. Es ist daher eine erhöhte Exfiltration durch Leckagen auf der Nord- und Südseite zu erwarten.

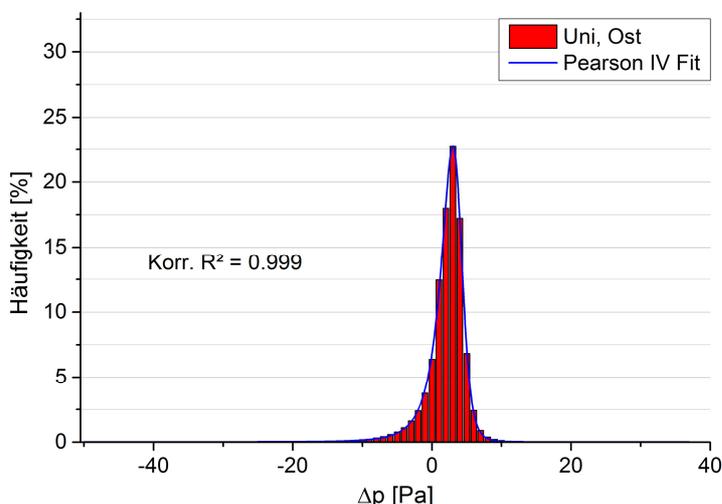


Abbildung 22: Häufigkeit der Druckdifferenz bei einem Messintervall von 1 min an einer Ostfassade in Weimar, 2008-2009

Am MCMT wurden im ersten Untersuchungsschritt Ausflussfaktoren von Einzelleckagen in der Luftdichtheitsschicht analysiert [SCHM10b]. Es zeigt sich, dass der Ausflussfaktor von der Form, der Randbeschaffenheit und dem Querschnitt der Leckage abhängig ist. Zusätzliche Verformungen, wie sie zum Beispiel bei fehlerhafter Installation der Dampfsperre möglich sind, können Konfusoreffekte nach sich ziehen. Demnach ist der Volumenstrom durch eine Einzelleckage von der anliegenden Druckdifferenz, der Art der Leckageöffnung und der Wölbfähigkeit der Luftdichtheitsschicht abhängig [SCHM10b].

Weiterhin wurde die Permeabilität mineralischer Dämmstoffe unter realen Druckdifferenzen an Dämmstoffproben untersucht. Es zeigte sich, dass gegenüber den Untersuchungen der Permeabilität des Dämmstoffs nach [DIN-EN29053] bis zu 30 % Abweichungen auftreten können. Entsprechend den Materialeigenschaften unterliegt dieser Materialparameter starken Schwankungen [SCHM12c].

Untersuchungen zur Ausbreitung des Luftstroms durch die Dämmung und einer perforierten Luftdichtheitsfolie, wurden mittels Thermografie- und Anemometeranalysen [SCHM12d] durchgeführt. In Abbildung 23 und Abbildung 24 ist erkennbar, dass sich der Luftstrom nach der Kontraktion durch die Leckage in der Luftdichtheitsebene im permeablen Dämmmaterial konisch aufweitet. Begründet durch den Strömungswiderstand der Dämmung nimmt die Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur des Luftstroms vom Zentrum in Richtung Kegelstumpfrand ab.

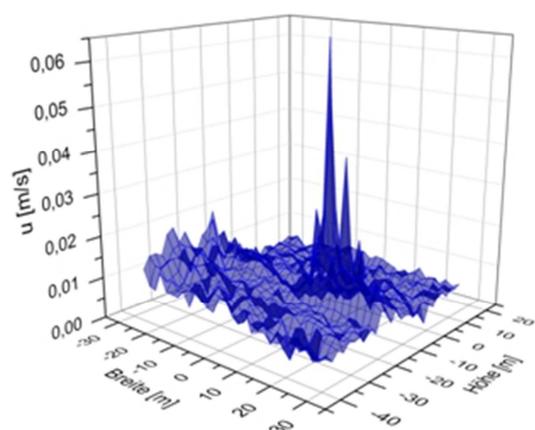


Abbildung 23: Geschwindigkeitsverteilung bei Durchströmung einer 10 cm² Leckage in einer Dampfsperrefolie vor 10 cm Steinwolle, $\Delta p = 150$ Pa

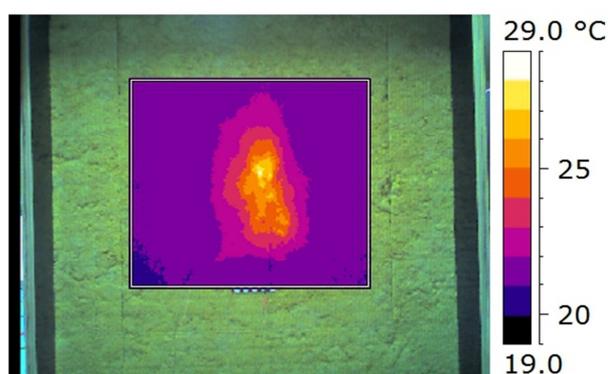


Abbildung 24: Thermografie der Oberflächentemperatur von Steinwolle ($\Delta p = 30$ Pa, Leck 1 cm², kreisrund, scharfkantig in der Dampfsperre)

Die bis zu diesem Punkt gewonnenen Ergebnisse wurden in ein analytisches Berechnungsmodell integriert [SCHM12a]. Das Berechnungsmodell ergibt sich aus grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Strömungslehre und spiegelt mit guter Näherung den Volumenstrom durch eine Holzleichtbaukonstruktion mit perforierter Luftdichtheitsschicht wider (Abbildung 25) [SCHM12c].

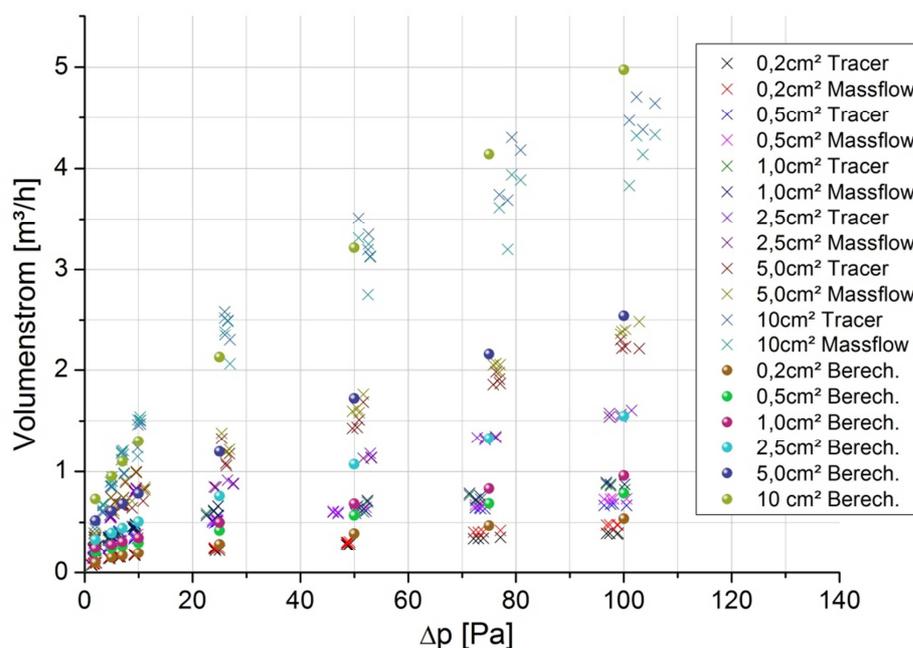


Abbildung 25: Vergleich von Berechnungen und Messungen des Volumenstroms bei unterschiedlichen Leckagequerschnitten

Mittels Wasserdampfkonzentrationsdifferenz wird es möglich, den konvektiven Feuchteeintrag entsprechend auftretender Differenzdruckhäufigkeiten zu berechnen. An einem Beispiel wird dies in [SCHM12a] verdeutlicht. Das Modell wurde exemplarisch mit Hilfe des Node-based Script Editors des Freac Frameworkes im digitalen Gebäudemodell implementiert [BRA12a] (siehe *Umsetzung auf Anwenderebene*). Dementsprechend kann das digitale Gebäudemodell auch zur Beurteilung der hygrischen Hüllflächeninfiltration von Einzelleckagen in Bestandsgebäuden genutzt werden.

Akustik

Arbeitspaket 1.2 – Entwicklung und Optimierung von Messverfahren zur Bestimmung bauphysikalischer Kennwerte – im Projektablaufplan beschäftigte sich unter anderem mit dem Themenkomplex der Körperschallquellencharakterisierung und der Prognose der Schallweiterleitung durch die Bauwerksstruktur. Dabei wurde der Fokus auf die akustische Sanierung von Bauwerken gelegt, was bei unzureichender Planung oft großen materiellen und finanziellen Aufwand im Nachgang bedeutet. Daher ist eine zielführende und nutzerorientierte Planung der akustischen Sanierungsmaßnahmen erforderlich. Speziell haustechnische Anlagen wie zum Beispiel Heizungsanlagen, Lüftungsanlagen, Klimageräte oder Pumpen sind bei der nachträglichen Installation als problematisch hinsichtlich der Einleitung von Körperschall in die vorhandene Baukörperstruktur zu betrachten. Die durchgeführten Untersuchungen liefern damit einen Beitrag zu einer Methode, akustische Störgeräusche bereits im Vorfeld während des Planungsprozesses prognostizieren und damit vermeiden zu können. In der Norm DIN EN 12354 Teil 1 und 5 sind keine eindeutigen Angaben zu einem Charakterisierungs- und Prognoseverfahren für Körperschallquellen aufgeführt, was die durchgeführte Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet der Akustik erforderlich macht.

Körperschallausbreitung in Gebäuden

Für die detaillierte Untersuchung der Körperschallausbreitung in Gebäuden (siehe Kapitel 1.4.) kamen die Messgeräte des Akustiklabors (siehe Kapitel 2.2.) in umfangreichen In-situ-Messungen in Gebäuden unterschiedlichsten Bautyps zum Einsatz. Bei diesen Untersu-

chungen wurde ein neues, an die Norm angelehntes Prognosekonzept zur Körperschallübertragung in Gebäuden erarbeitet. Abbildung 26 zeigt die möglichen Körperschallübertragungswege in Gebäuden bei einer Luft- oder Körperschallanregung der Bauteilstruktur durch haustechnische Anlagen oder anderen Schallquellen.

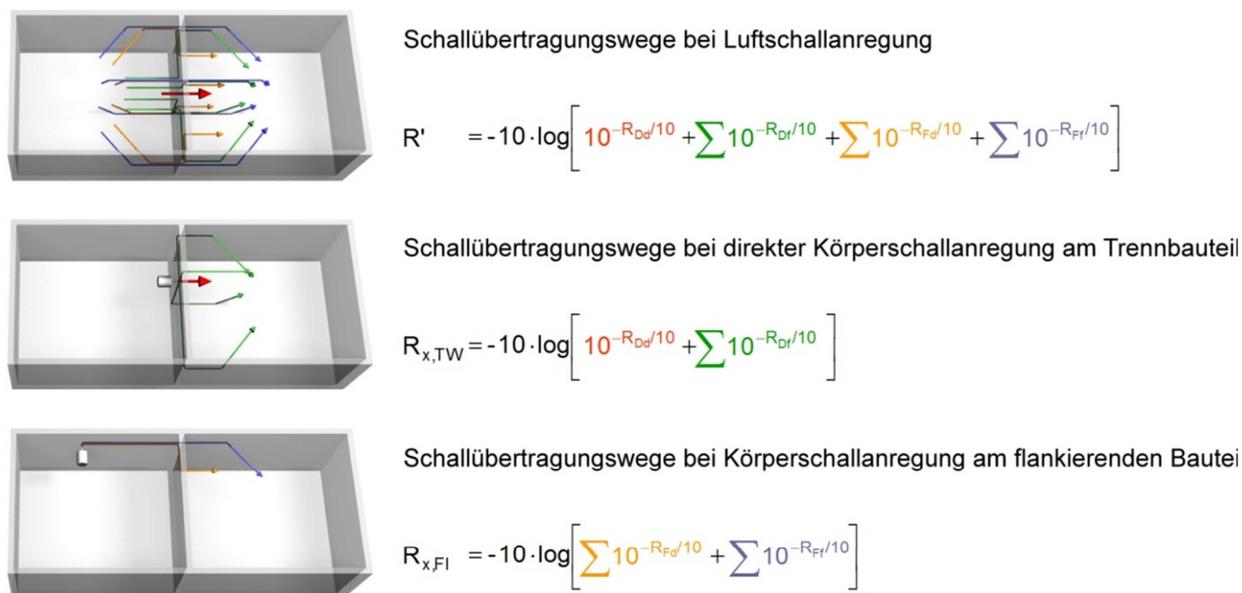


Abbildung 26: Körperschallübertragungswege in Gebäuden bei Luft und Körperschallanregung der Bauteilstruktur

Während der Projektlaufzeit konnten so verschiedene Gebäudestrukturen in ihrem bauakustischen Körperschallverhalten untersucht und eine Reihe von Körperschallquellen hinsichtlich ihrer Körperschalleistung analysiert werden. Anhand der gewonnenen Datengrundlage kann davon ausgegangen werden, dass mit dem neu entwickelten Prognoseverfahren Schalldruckpegel infolge von Körperschallquellen auch in inhomogenen Gebäudestrukturen prognostiziert werden können. Dafür lässt sich voraussichtlich das Prognoseverfahren der DIN EN 12354-5 derart modifizieren, wie in [ARN11; ARN12; KOR12] beschrieben.

Allerdings ist die während der Projektlaufzeit ermittelte Datenmenge noch nicht ausreichend, um hinreichend allgemeingültige Aussagen in dem modifizierten Modell zu implementieren. An dieser Stelle besteht großer Forschungsbedarf, der zukünftig zu bearbeiten ist und von Teilen der Forschergruppe bearbeitet werden soll.

Körperschallquellencharakterisierung

Bei vielen Sanierungsmaßnahmen werden Leicht- und Holzbaukonstruktionen als Wohnungstrennwände, Bürotrennwände oder aber auch als Außenwandbauteile verwendet. Die geringe Masse von Leichtbauwänden bewirkt ein größeres Schwingungsverhalten, was sich negativ auf die Schallübertragungseigenschaften auswirkt. Das bedeutet, dass sich schwere Wände aus z. B. Ziegel oder Beton auch schwerer zum Schwingen anregen lassen als leichte, wie z. B. Gipskarton oder Holzwerkstoffe. Dies gilt sowohl für die Luft- als auch für die Körperschallanregung durch haustechnische Anlagen, wie zum Beispiel Heizungs- und Lüftungsanlagen oder Pumpen jeglicher Art. Zur Vermeidung dieser Geräuschbelastung ist eine Planung für das Gebäude notwendig, die eine Prognose der zu erwartenden akustischen Belastungen beinhaltet. Für die Prognose der Körperschalleinleitung von haustechnischen Anlagen ist die genaue Kenntnis der charakteristischen, die Quellen beschreibenden Größen

erforderlich. Erst mit diesen Parametern ist die Berechnung der in Bauteile eingeleiteten Körperschalleistung möglich.

Im Folgenden wird die Anregung von leichten Wänden beziehungsweise plattenförmigen Bauelementen durch Körperschallquellen betrachtet. Ziel der beschriebenen Untersuchungen ist die Charakterisierung von Körperschallquellen durch die regulären Quellgrößen Quellimpedanz, freie Schnelle und Kurzschlusskraft. Sie stellen quellenspezifische, installationsunabhängige Größen dar und ermöglichen eine Prognose der von einer Körperschallquelle eingeleiteten Leistung in ein plattenförmiges Bauteil.

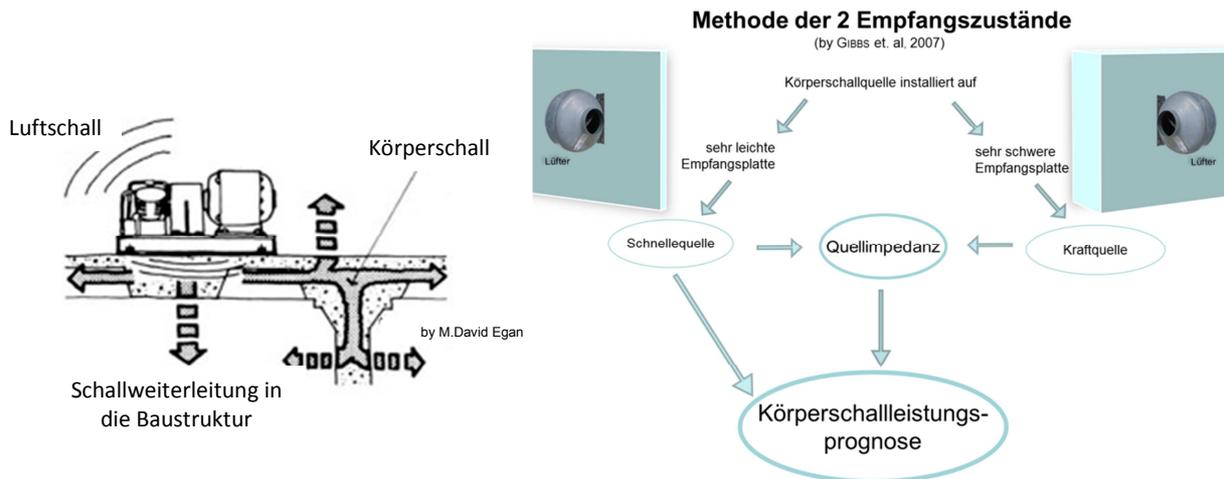


Abbildung 27: Körperschallentstehung und weiterleitung an haustechnischen Anlagen

Abbildung 28: Prinzipskizze Charakterisierungsmethode von Körperschallquellen [VOG12c]

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Quelle in ihrem späteren, eingebauten Zustand vermessen und charakterisiert wird. Das bedeutet, die Ankopplungselemente sind Teil der quellenspezifischen Charakterisierungsgrößen [VOG11]. Dies hat den Vorteil, dass bei dieser Methode auch komplizierte Ankopplungen vermessen werden können. Im Detail wurden mehrere plattenförmige Bauteile (Empfangsplatten) im Akustikprüfstand auf ihre Tauglichkeit als Empfänger für das Zwei-Plattenverfahren [VOG12a; VOG12b; VOG12c; GIB07] hin untersucht.

Als schwere Platten dienten dabei eine doppelte Gipsfaserplatte (160 kg, 2 m x 3 m) sowie eine Stahlplatte (190 kg, 1,2 m x 1,7 m). Empfangsplatten mittleren Gewichts waren aus verschiedenen Holzwerkstoffen verschiedener Dicken sowie dünnem Lochblech. Durch die Anregung der Platten mit daran installierten Körperschallquellen wurde die Empfangsplatte zu Schwingungen angeregt. Die sich einstellenden Oberflächenschnellen auf den Platten wurden mit zwei Messsystemen aufgenommen. Zum einen kam ein bildgebendes, berührungsloses Messverfahren zum Einsatz (3D-Laser-Doppler-Vibrometer, Abbildung 29), zum anderen eine Vielzahl von Beschleunigungssensoren (Abbildung 30). Der Unterschied zwischen beiden Verfahren besteht darin, dass direkt angekoppelte, mitschwingende Massen (die Beschleunigungssensoren) das Schwingungsverhalten von sehr leichten Empfangsplatten beeinflussen können, vor allem bei hohen Frequenzen. Zudem ließen sich anhand der sehr vielen Schnellmesspunkte Effekte der Plattenschwingung herausstellen, die mit der herkömmlichen Messmethode mit Beschleunigungssensoren in dem Maß nicht hätte charakterisiert werden können [VOG12a; VOG12b].

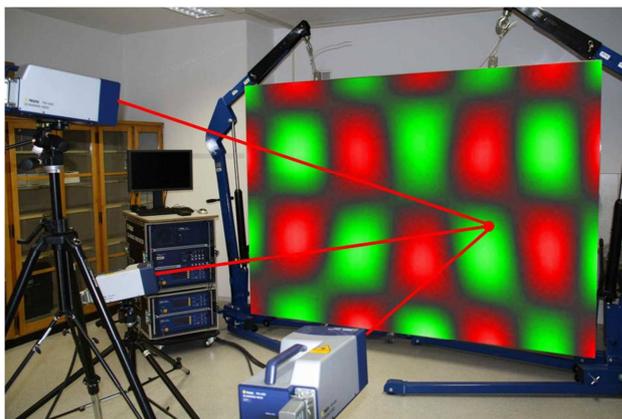


Abbildung 29: Körperschallprüfstand mit Laser-Doppler-Vibrometer, Darstellung der angeregten Eigenschwingung eines Empfangsbauteils

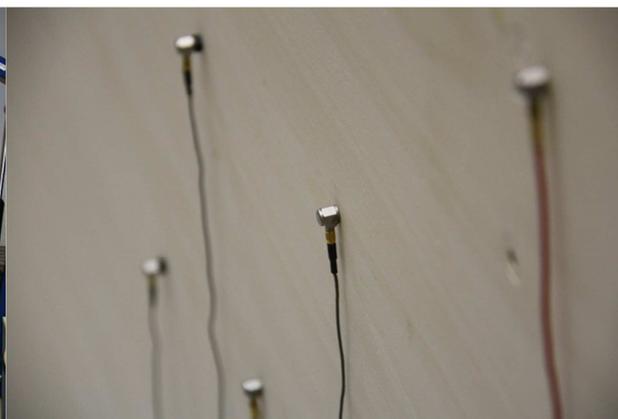


Abbildung 30: Beschleunigungssensoren auf dem Empfangsbauteil

Als Schwingerreger beziehungsweise Körperschallquellen dienen Lüfter, Kompressoren und elektrodynamische Shaker, welche jeweils an die Empfangsplatten installiert wurden. Die übertragenen Schwingungen in die Platte wurden anschließend auf der Plattenoberfläche mit den Beschleunigungssensoren und dem Laser-Doppler-Scanning Vibrometer gemessen. Die Oberflächenschnelle ist dabei ein Maß für die von der Quelle auf die Platten beziehungsweise in die Bauteilstrukturen übertragene Leistung. Im Ergebnis zeigte sich, dass das untersuchte Verfahren für kleine bis mittlere Körperschallquellen gut funktioniert [VOG12c]. Grenzen sind dem Verfahren durch die Stabilität leichter Empfangsplatten sowie der Plattenfläche gesetzt. Damit das Verfahren auch für niedrige Frequenzen hinreichend genau funktioniert, muss die Empfangsplatte eine Mindestgröße aufweisen. Je größer die Fläche der Empfangsplatte ist, desto tiefer kann die minimal zu charakterisierende Frequenz sein und entsprechend breiter kann das Frequenzspektrum der Körperschallquelle charakterisiert werden.

Ist die Eingangsimpedanz eines Bauteils beziehungsweise des späteren Installationspunktes eines Gerätes bekannt – oder aber im digitalen Gebäudemodell (Kapitel 2.1) hinterlegt – so kann mit den im Versuchsstand ermittelten charakteristischen Quellgrößen einer Körperschallquelle die in die angekoppelte Bauteilstruktur eingeleitete Leistung schon vor der Installation der Quelle berechnet werden. Ist nun ebenfalls das Übertragungsverhalten der gesamten Baukörperstruktur bekannt, kann der in angrenzenden Räumen resultierende Schalldruckpegel vorausberechnet werden. Wie die Darstellung von akustischen Kenngrößen im Bauwerksmodell aussehen kann, ist in Abbildung 31 anhand des bewerteten Bau-Schalldämmmaßes einer Wohnungstrennwand verdeutlicht.

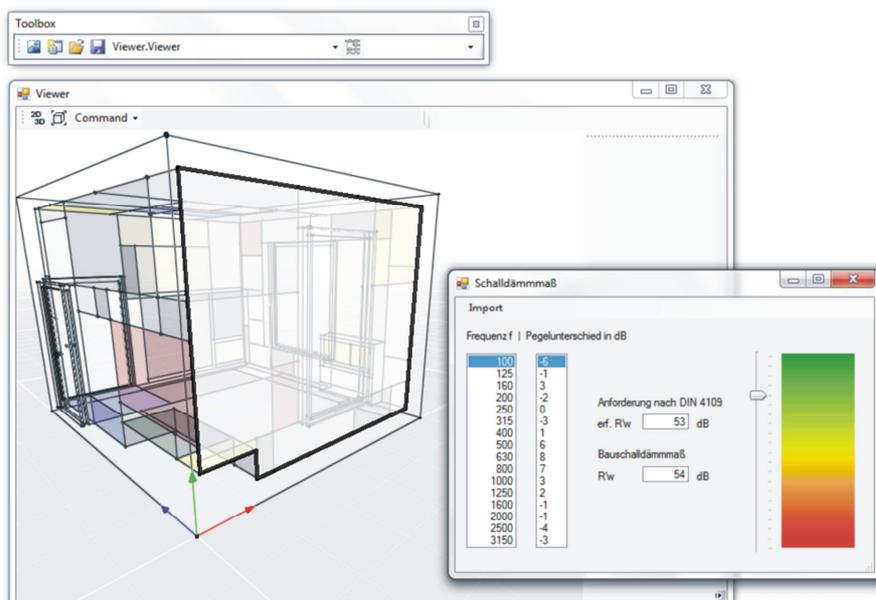


Abbildung 31: Visuelle Darstellung des Schalldämmmaßes einer Wand (exemplarisch), Pegelunterschiede im Diagramm ergeben sich aus Differenz von bewertetem Schalldämmmaß und der entsprechend verschobenen Normkurve nach EN ISO 717-1:1996 und stellen ein Maß für die Güte der Schalldämmung im entsprechenden Frequenzband dar

Das bewertete Bau-Schalldämmmaß R'_w gibt an, wie viel Schall ein Bauteil (Wand, Decke etc.) inklusive der flankierend angrenzenden Bauteile bei Luftschallanregung absorbiert. Für eine übersichtliche und leicht verständliche Darstellung des Schalldämmmaßes in Dezibel-Werten wurde eine grafische, farbige Darstellung gewählt. Sie erfolgt hier frequenz aufgelöst in Terzbändern, da die Schalldämmung stark von der Frequenz der einwirkenden Schallenergie abhängt und so eine nutzerspezifische Bewertung des Schalldämmmaßes möglich wird. Zur Vereinfachung lässt sich aus dem frequenzabhängigen Schalldämmmaß gemäß dem Bezugskurvenverfahren nach ISO 717-1:1996 ein Einzahlwert des Schalldämmmaßes berechnen. Dieser Einzahlwert - das bewertete Bau-Schalldämmmaß - lässt sich mit Anforderungen vergleichen. Als Anforderung für den Einzahlwert des Schalldämmmaßes wurde hier im Beispiel der Wert 53 dB für eine Wohnungstrennwand im Geschossbau nach DIN 4109:1989 gewählt. Die gewählte, nutzerfreundliche Darstellung des Schalldämmmaßes einer Wand im digitalen Gebäudemodell kann genauso für die Darstellung aller anderen Körperschall- und Luftschallprobleme verwendet werden, um für den Planer und Nutzer komplexe akustische Sachverhalte eindeutig und verständnisicher abzubilden.

Mit Hilfe des an der Bauhaus-Universität Weimar geschaffenen bauakustischen Prüfstandes für Körperschall sind umfangreiche Messungen durchgeführt und neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Bauakustik erzielt worden. Im Zuge der Messungen konnte die bestehende Kooperation mit der Physikalisch Technischen Bundesanstalt Braunschweig weiter ausgebaut werden. Mit dem Projekt nuBau konnte durch die Investition und Gerätefinanzierung an der Bauhaus-Universität Weimar ein akustisches Kompetenzzentrum geschaffen werden, welches in Mitteldeutschland einzigartig ist.

Nutzeranforderungen

Nahezu ausschließlich in Bürogebäuden wurden bisherige Studien zur Untersuchung der Anforderungen seitens der Nutzer durchgeführt. Repräsentative Untersuchungen, die sich mit den Nutzerbedürfnissen in Wohngebäuden beschäftigen, sind nicht bekannt. Zur Verbesserung der Datenlage wurden unter Berücksichtigung der menschlichen Bedürfnisse sowie bereits existierender Zertifizierungssysteme in einer Vorstudie elf Kriterien des nutzerorientierten Bauens identifiziert. Zu diesen Kriterien wurden die Parameter Wichtigkeit, Akzeptanz und Beeinträchtigung im Rahmen einer Post Occupancy Evaluation (POE) unter insgesamt 1.416 Wohnungsnutzern abgefragt. Die weitgehende Repräsentativität der Stichprobe konnte durch einen Vergleich mit der Gesamtheit bestätigt werden [VOE11b].

Auf der Grundlage der ermittelten Daten wurde, basierend auf den subjektiven Wichtigkeiten einzelner Kriterien, eine Rangordnung aus der Sicht des Nutzers abgeleitet [VOE12b], [VOE13a]. Dabei landeten die physiologischen Bedürfnisse wie Luftqualität und thermische Behaglichkeit, dicht gefolgt von den Energiekosten, auf den ersten Plätzen. Bei der Erhebung der Inakzeptanz gegenüber den einzelnen Parametern zeigte sich, dass die Gesundheit belastende Unzulänglichkeiten wie Schimmel oder schadstoffbelastete Bauteile nicht akzeptabel sind. Auch hier folgen hohe Heizkosten bereits auf Rang drei. Befragt nach der tatsächlichen Beeinträchtigung, geben Nutzer hohe Energiekosten, Lärm und Probleme mit der thermischen Behaglichkeit (Zugluft, kalte Wände, ...) an erster Stelle an. Das Verstehen dieser Rangfolgen ist beispielsweise für Vermieter bei der Entscheidungsfindung von Bedeutung.

Darüber hinaus wurden die Nutzer zu ihrer Zufriedenheit mit der derzeitigen Wohnsituation befragt. Daraus ergab sich, dass 70 % zufrieden bis sehr zufrieden sind, während lediglich rund 9 % als unzufrieden oder sehr unzufrieden eingestuft werden können. Darauf aufbauend wurde statistisch untersucht, inwiefern sich die ermittelten Konstrukte Wichtigkeit, Akzeptanz, Beeinträchtigung sowie Zufriedenheit beeinflussen. Ein diese Zusammenhänge erklärendes Modell wurde aufgestellt und konnte, basierend auf den erhobenen Daten, mittels Korrelations- und Regressionsanalyse erfolgreich validiert werden. Kernaussagen dieses Modells sind:

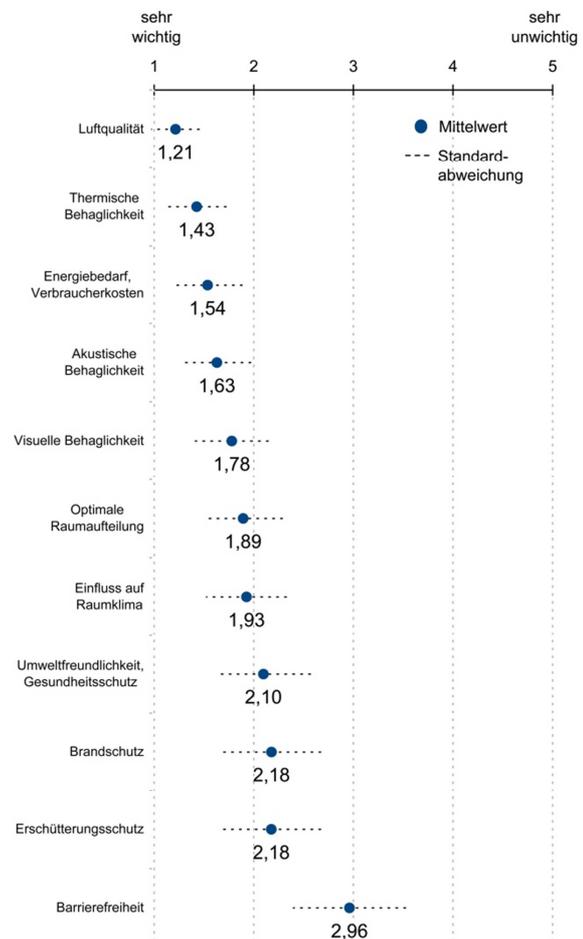


Abbildung 32: Rangliste der Kriterien nach Wichtigkeit

1. Zwischen der subjektiven Relevanz und der Mängelakzeptanz eines Kriteriums besteht ein negativer Zusammenhang.
2. Zwischen der subjektiven Relevanz eines Kriteriums und der empfundenen Beeinträchtigung durch dieses Merkmal besteht ein positiver Zusammenhang.
3. Zwischen der Mängelakzeptanz eines Kriteriums und der empfundenen Beeinträchtigung durch dieses Merkmal besteht ein Zusammenhang.
4. Zwischen der Gesamtzufriedenheit mit der Wohnsituation und der empfundenen Beeinträchtigung durch einzelne Merkmale besteht ein negativer Zusammenhang.

Diese Zusammenhänge zwischen Relevanz, Akzeptanz, Beeinträchtigung und Zufriedenheit können in der Vermietung hilfreich sein. So konnte beispielsweise nachgewiesen werden, dass Wichtigkeiten einzelner Kriterien auch mit derzeitigen Beeinträchtigungen zusammenhängen und nicht nur vorgeprägt sind. Daraus lässt sich zum Beispiel die Handlungsempfehlung ableiten, dass ein Vermieter eher unwichtige Kriterien wenigstens auf ein Mindestmaß bringt, damit diese nicht als beeinträchtigend empfunden werden und in der Relevanz des Mieters steigen.

Durch die neue Datenlage werden außerdem neue Grundlagen für die weitere Forschung gelegt. So könnte beispielsweise untersucht werden, inwieweit die subjektiven mit den tatsächlichen Beeinträchtigungen übereinstimmen. Auch eventuelle Rückkopplungseffekte von der Zufriedenheit des Nutzers auf die Relevanz könnten von Interesse sein. Darüber hinaus stellt die Implementierung der aus den jeweiligen Wohnverhältnissen resultierenden Verhaltensintentionen der Nutzer in das vorgestellte Modell einen theorie- und praxisrelevanten Ansatz dar.

2.1.3 Ergänzungsbaustoffe

Die Sanierung von Bauwerken geht häufig mit einer Umnutzung beziehungsweise Ertüchtigung einher. Daher ist der Einsatz angepasster und spezieller Baustoffe unumgänglich. Ziele der Forschergruppe waren einerseits die Untersuchung praktischer Verfahren, die z. B. eine Ergänzung von Holzbalken ermöglichen. Dazu wurden wesentliche Parameter bestimmt, die einerseits ein an die vorhandene Bausubstanz angepasstes Materialverhalten ermöglichen, andererseits für die Modellierung der Tragsysteme notwendig sind. Andererseits war die Untersuchung der gezielten Eigenschaftsverbesserung zementgebundener Baustoffe mit Zusatzmitteln und -stoffen ein wesentlicher Schwerpunkt. Dadurch sollten diese Baustoffe für spezielle Anwendungen in der Denkmalpflege angepasst werden. Bei beiden Schwerpunkten standen die Untersuchung des Haftverbundes zur Altsubstanz sowie der Alterung insbesondere der organischen Bestandteile im Vordergrund. Mit den gesammelten Daten ist eine Anwendungsmatrix erstellt worden, die dann in das digitale Gebäudemodell integriert wurde.

Zur Erreichung der Ziele des Arbeitspaketes 1.4 „Materialentwicklung zur Ergänzung und Sanierung geschädigter Bausubstanz“ wurde ein Rahmenversuchsprogramm entworfen, welches durch jederzeit integrierbare, kleinere Versuchsprogramme, resultierend aus speziellen Anforderungen anderer Bereiche, z. B. der weiteren Projektbeteiligten oder von Unternehmen, erweitert werden konnte. Das Rahmenversuchsprogramm wurde zu Beginn des nuBau-Projektes in drei Punkte gegliedert:

1. Untersuchung des Einflusses der Sieblinie der Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Ergänzungsbaustoffen am Bsp. von PC (Polymer Concrete)
→ Ziel: verarbeitbare Mörtelsysteme mit dem minimal möglichen Bindemittelanteil
2. Untersuchung des Haftverbundes von Ergänzungsbaustoffen zu verschiedenen Materialien (Untergründe) in Abhängigkeit von der Sieblinie, den Lagerungsbedingungen und der mechanischen Belastung
→ Ziel: Parameterfestlegung für die Anwendungsmatrix
3. Untersuchungen zur Alterung und Dauerhaftigkeit polymerer Bindemittelsysteme
→ Ziel: Aussagen zum Einfluss von z. B. Temperaturwechseln auf die Alterung polymerer Bindemittel

Im ersten Schritt wurden intensive Kontakte zu verschiedenen Firmen geknüpft, um die geplanten Untersuchungen auf ihre praktische Relevanz zu prüfen. Hervorzuheben sind in der Startphase des Projektes die Kontakte zu den Firmen Bennert GmbH, Desoi GmbH und Dynapox GmbH. In zahlreichen Gesprächen konnten Erfahrungen ausgetauscht, das Forschungspotential ergründet und Zusammenarbeiten vereinbart werden. Die Untersuchungspläne konnten damit konkretisiert und auf allgemeingültige Anforderungen der Praxis abgestimmt werden. Speziell die konkreten Vorstellungen der Firmen Desoi GmbH und Dynapox GmbH führten dazu, dass kleinere Versuchsprogramme zur Modifikation zementgebundener Baustoffe mit polymeren Zusatzmitteln und Zusatzstoffen entwickelt und in den Rahmenversuchsplan zur Parameteridentifikation integriert werden konnten.

Im Versuchsprogramm „Untersuchungen zur Reduktion des E-Moduls und gleichzeitiger Anpassung der Verarbeitbarkeit werksgemischter Trockenbetonsysteme“ wurden zwei verschiedene Werk trockenbetone hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit, der Festigkeitsentwicklung, der Längenänderung und der E-Modulentwicklung charakterisiert. Anschließend wurden Maßnahmen untersucht, die einerseits zu einer Verflüssigung der Frischbetone, andererseits zu einer Senkung des E-Moduls dieser Betone führen, da bei Instandsetzungsmaßnahmen sowohl eine gute und anpassbare Verarbeitbarkeit als auch gutmütige Verformungseigenschaften zur Anpassung an vorhandene Baustoffe gefordert werden. Dazu wurden zwei verschiedene Polymerdispersionen in unterschiedlichen Dosierungen zugegeben sowie die Wasserzugabe variiert. Weiterhin wurde untersucht, wie sich die Zugabe künstlicher Luftporen auf die Reduktion des E-Moduls auswirkt. Als Vergleichsmischung wurde ein polymermodifizierter selbstverdichtender Beton (PSCC) verwendet.

Die besten Ergebnisse lieferten die Rezepturen mit einer deutlich überhöhten Polymerzugabe bei gleichzeitig hohen Wasserzugaben. Diese Rezepturen sind jedoch nicht vorbehaltlos einsetzbar, da mit erheblichen Dauerhaftigkeitsproblemen gerechnet werden muss. Aufgrund der Unkenntnis der genauen Trockenbetonzusammensetzung sind Werk trockenbetone also nicht ohne Weiteres mit anderen Zusatzstoffen modifizierbar. Bei der PSCC-Mischung konnte naturgemäß eine sehr gute Verarbeitbarkeit erreicht werden bei gleichzeitig sehr geringem E-Modul. Zurückzuführen ist dies wesentlich auf die hinsichtlich Kornabstufung und E-Modul abgestimmten Gesteinskomponenten.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden weiterhin das Längenänderungsverhalten, der Einfluss anderer Zementsorten (CEM II und CEM III) sowie die Dauerhaftigkeit in umfangreichen Untersuchungen betrachtet.

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde eine selbstverdichtende polymermodifizierte Betonrezeptur zur denkmalgerechten Instandsetzung von Betonfassaden designt und das Untersuchungsprogramm „Untersuchungen an polymermodifizierten SCC für dünne Instandsetzungsschichten“ aufgestellt. Die ersten Musterflächen mit dieser Rezeptur wurden auf dem Werksgelände der Firma Dynapox GmbH an einer Betonwand unter Baustellenbedingungen angelegt (Abbildung 33). Dabei wurde insbesondere die Technologie des Einbringens des PSCC, die optische Wirkung der entschalteten Flächen sowie der Haftverbund geprüft.



Abbildung 33: Anlegen von Musterflächen bei der Firma Dynapox GmbH

Nach Bewertung der bis dahin mit der PSCC-Rezeptur erzielten Ergebnisse und der Vorstellung dieser im Rahmen der 17. Internationalen Tagung *ibausil* in Weimar stellte sich heraus, dass diese Rezeptur ein wirtschaftliches Potential aufwies und auf allgemeines Interesse stieß. Deshalb wurde dieser polymermodifizierte selbstverdichtende Beton (PSCC) zum Patent unter dem Titel „Selbstverdichtender Beton, Verfahren zu dessen Herstellung und Verfahren zur Herstellung einer Betonschicht“ beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht, welches später auch erteilt wurde.

Im Weiteren erfolgte eine detaillierte Charakterisierung dieser speziellen Rezeptur hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften (Abbildung 34 bis Abbildung 36), der Dauerhaftigkeit (Abbildung 37) und dabei speziell der Alterung. Insbesondere wurden thermische und hygri-sche Parameter, wie z. B. der thermische Ausdehnungskoeffizient, der Wärmedurchlasswiderstand, die Wärmekapazität und das Benetzungsverhalten, bestimmt. Diese Parameter wurden den Projektbeteiligten für weitere Berechnungen sowie als Objektdaten zur Integration in ein erstes digitales Gebäudemodell zur Verfügung gestellt. Die Eigenschaftsparameter fließen außerdem in die Datenbasis der Anwendungsmatrix ein.

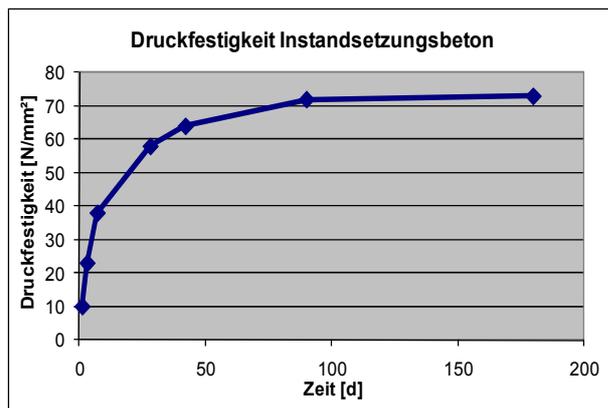


Abbildung 34: Druckfestigkeitsentwicklung eines PSCC

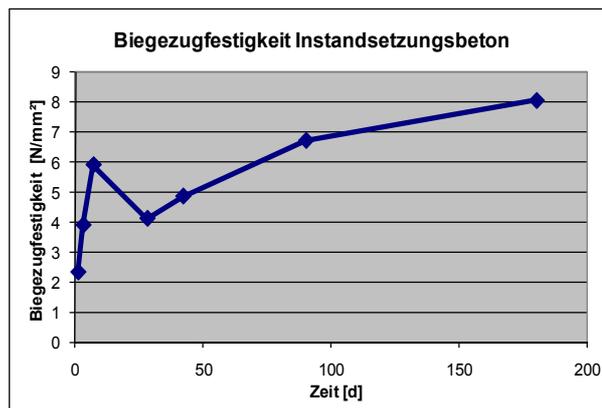


Abbildung 35: Biegezugfestigkeitsentwicklung eines PSCC

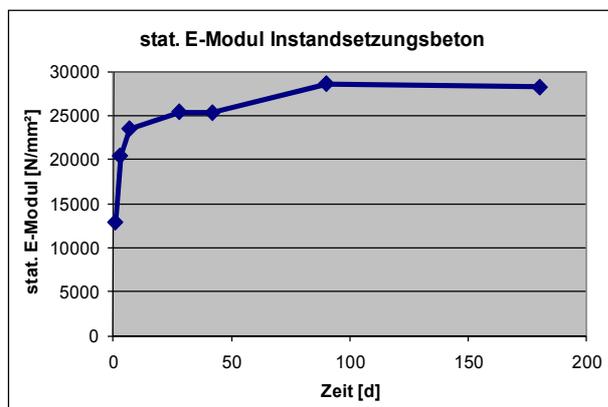


Abbildung 36: E-Modulentwicklung eines PSCC

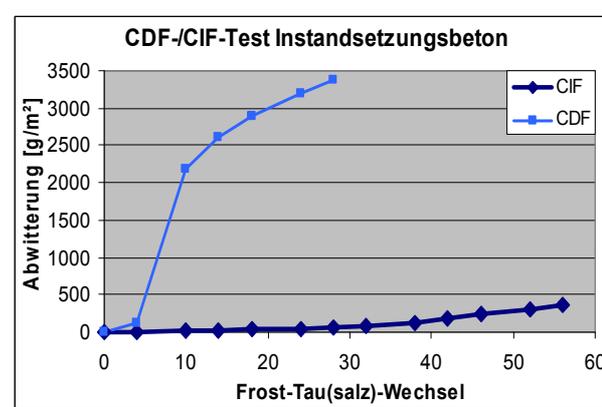


Abbildung 37: Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit von PSCC

Im Folgenden wurden weitere Zemente in die Untersuchungen einbezogen, um eine für die Baustelle geeignete Robustheit der allgemeinen Rezeptur hinsichtlich Schwankungen der Ausgangsstoffe abzusichern. Diese Parameter wurden in eine Erweiterung der bereits erfolgten Patentanmeldung eingearbeitet. Das daraus resultierende zweite Patent wurde unter dem Titel „Selbstverdichtender Beton, Verfahren zu dessen Herstellung und Verwendung des selbstverdichtenden Betons zur Herstellung einer Betonschicht“ eingereicht und ebenfalls erteilt. Um auch international die Rechte an PSCC zu sichern, wurde anschließend das internationale Patent „Self-compressing concrete, method for the production thereof, and use of the self-compressing concrete for producing a concrete layer“ angemeldet und erteilt.

Die hohe Aufmerksamkeit dieser Aktivitäten führte dazu, dass sich mehrere regionale und überregionale Unternehmen für eine Zusammenarbeit an einem gemeinsamen Verifikationsobjekt, dem Glockenturm der Weißfrauenkirche in Frankfurt/Main (Abbildung 38), interessierten. Durch die freundliche Unterstützung des Architekturbüros Sichau & Walter (Architekten BDA, Fulda/Dresden), welches mit der Planung der Sanierung beauftragt wurde, dem Ingenieurbüro Trabert + Partner (Geisa), der Dynapox GmbH (Weimar), der RIBA GmbH (Alzenau) sowie mit Genehmigung des Landesamtes für Denkmalpflege Hessen und des Diakonischen Werkes Frankfurt wurden an diesem Verifikationsobjekt insgesamt sechs Musterflächen mit unterschiedlichen Zielstellungen angelegt.

Bei der ersten Musterfläche stand die Beurteilung der Wirkung des Materials im Vergleich zum Originalbeton im Vordergrund. Es wurde sowohl die Einfärbbarkeit als auch die Abbil-

dungstreue von Schalstrukturen demonstriert. Darüber hinaus wurden Erkenntnisse zum Haftverbund und zur Dauerhaftigkeit gewonnen.

Die zweite Musterfläche diente insbesondere der Demonstration der Verarbeitbarkeit des polymermodifizierten SVB. Dazu wurde eine Schalung über Eck angebracht, welche eine Schenkelbreite > 50 cm und eine Einfüllhöhe von > 100 cm hatte. Der PSCC wurde lediglich auf einer Seite eingefüllt und floss selbstständig um die Ecke (Abbildung 39). Das Material füllte die Schalung komplett aus und nivellierte sich nahezu vollständig. Sedimentationserscheinungen konnten nicht beobachtet werden, was sich an größeren Gesteinskörnern an der Oberkante der gesamten Musterfläche zeigte.

Beim Anlegen der weiteren Musterflächen durch das Baustellenfachpersonal stellte sich dann das Einfüllen des PSCC mittels Eimern als nicht dauerhaft praktikabel heraus. Diese Methode setzt ein kontinuierliches Anmischen auch großer Mengen voraus, die dann sicher in den engen Zwischenraum verfüllt werden müssen.

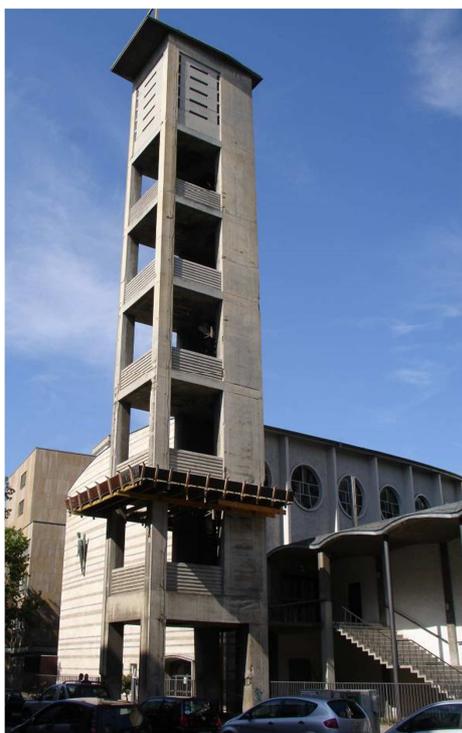


Abbildung 38: Glockenturm der Weißfrauenkirche



Abbildung 39: Musterfläche Eckschalung

Zum Ende des Förderzeitraumes wurden noch Versuche am gemeinsamen Verifikationsobjekt „Renaissanceschloss Ponitz“ durchgeführt, welches entsprechend dem Meilenstein 7 das Realobjekt für das Gesamttestmuster darstellt. Dabei stellte sich heraus, dass das Material der Schalungsoberfläche einen deutlich größeren Einfluss auf die Struktur der fertigen Betonoberfläche hat, als bisher angenommen. Offenbar wird durch Wechselwirkungen der Oberfläche mit den polymeren Partikeln beziehungsweise Aufgrund der Oberflächenspannung des PSCC bei ungünstigen Verhältnissen ein Entweichen der Luft behindert, sodass die Betonoberfläche porig ist. Dadurch werden die Dichtigkeit und insbesondere der im Denkmalbereich wichtige optische Eindruck negativ beeinflusst. Daneben erfolgten weitere Untersuchungen zur Modifikation des PSCC mit anderen Polymeren. Die Ergebnisse dieser Thematik wurden mehrfach veröffentlicht u.a. in [BOD09c; BOD09e; BOD10c; BOD11b; BOD12a; BOD12d; DIM12].

Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Versuchsprogramms wurde bereits während der Projektlaufzeit ein AiF-ZIM-Forschungsprojekt initiiert, in welchem die Eignung polymermodifizierter selbstverdichtender Betone (PSCC) für Maschinengestelle untersucht wird. Dieses Forschungsprojekt wird mit der TU Ilmenau sowie einem regionalen Unternehmen, der TET-RA GmbH aus Ilmenau, und einem überregionalen Unternehmen, der Bögel/Reitz GmbH aus Alzenau, durchgeführt (KF 2155719LK1, Laufzeit 09/2011 – 01/2014). Ein weiteres Forschungsprojekt mit der TU Ilmenau zur Eignung von PSCC für Präzisionsoberflächen im Maschinenbau ist in der Beantragung. Weiterhin sollen u. a. die noch zu lösenden Problem- und Fragestellungen, wie z. B. der Einfluss des Schalungsmaterials, die Technologie des wirtschaftlichen Einbringens des PSCC in die Schalung sowie die Entwicklung einer Trockenbetonvariante, in einem IP-Transfer-Projekt bearbeitet werden.

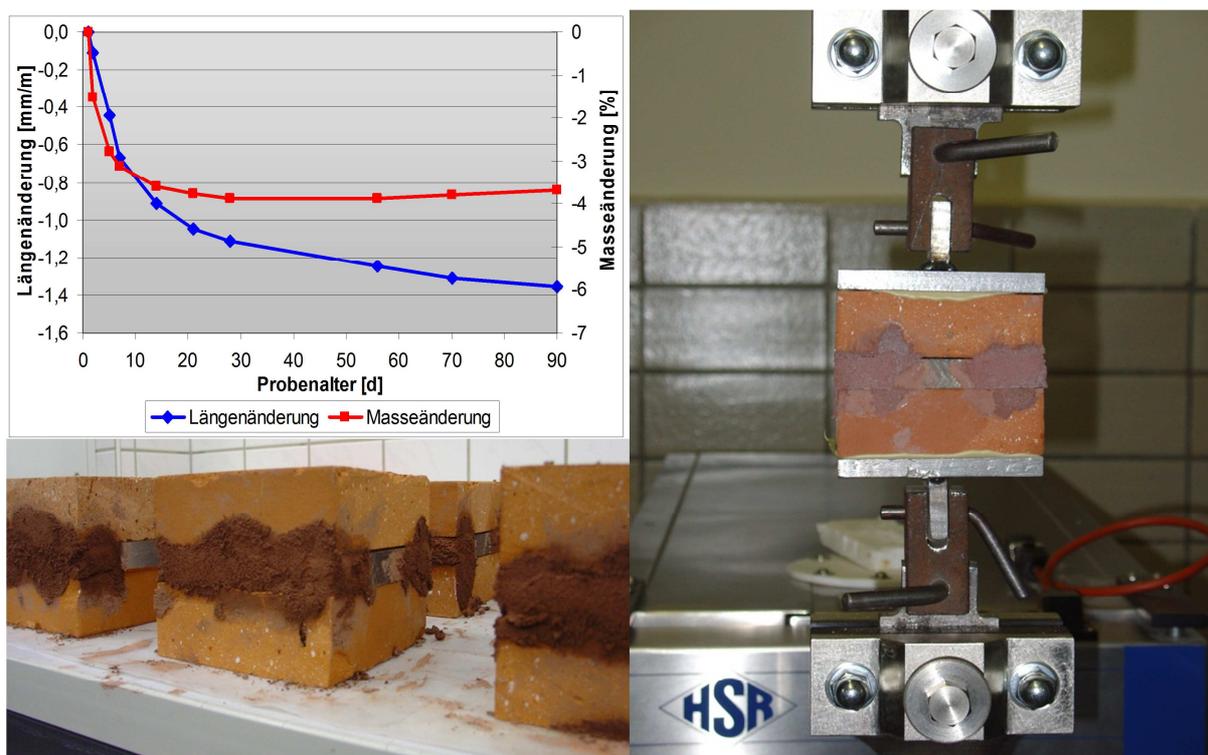


Abbildung 40: Bestimmung des Schwindens (Diagramm) und Proben zur Bestimmung des Haftverbundes

Ein weiteres in den Rahmenversuchsplan integriertes Versuchsprogramm wurde zum Thema „Untersuchungen zu Möglichkeiten der einfachen Schwindreduzierung von Werk trockenmörteln und die Auswirkungen auf den Haftverbund“ durchgeführt. Es wurde untersucht, wie das Schwindverhalten eines handelsüblichen Werk trockenmörtels mit einfachen Mitteln baustellenseitig reduziert werden kann. Als Varianten wurden die Zugabe eines handelsüblichen Schwindreduziers, eines Quellzementes und einer Polymerdispersion untersucht. Maßgeblich dabei war, dass der Instandsetzungsmörtel aufgrund des Schwindens nicht den Haftverbund zur umgebenden Bausubstanz, in den meisten Fällen Ziegelmauerwerk, verlieren darf. Dementsprechend wurde außerdem die Wirkung des Aufbringens einer Grundierung auf den Untergrund untersucht. Neben der klassischen Bestimmung des Längenänderungsverhaltens wurde der Haftverbund des Mörtels zu Ziegelproben im Zugversuch bestimmt (Abbildung 40).

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass mit dem Quellzement das Schwinden am deutlichsten reduziert werden kann. Aufgrund der Dosierempfindlichkeit ist dieser jedoch für die nachträg-

liche Zugabe auf der Baustelle ungeeignet und sollte nur bei der Herstellung des Trockenmörtels zugegeben werden. Der Schwindreduzierer reagiert unempfindlicher gegenüber Dosienschwankungen und kann daher auch auf der Baustelle zugesetzt werden. Die Zugabe der Polymerdispersion erscheint jedoch am ehesten geeignet zu sein, da hier trotz einer nur geringen Änderung des Schwindverhaltens insbesondere der Haftverbund des Mörtels deutlich gesteigert werden konnte. Bei Verwendung der gleichen Dispersion als zusätzliche Grundierung ist der Haftverbund am höchsten, sodass die Reduktion des Schwindens nicht mehr im Vordergrund stehen muss. Es konnte gezeigt werden, dass durch das dosierte Hinzufügen einer Polymerdispersion auf der Baustelle eine gezielte Verbesserung spezieller Eigenschaften eines werksgemischten Trockenmörtels möglich ist.

Eine wesentliche Grundlage der Datenbasis für die Anwendungsmatrix bildeten die „Untersuchungen zur Anpassbarkeit der Festigkeit von PC-Mörteln durch Sieblinienvariationen“. Hier wurden Sieblinienextreme, eine Ausfallkörnung 2 – 4 mm und eine stetige Sieblinie mit 0 - 4 mm, hinsichtlich ihres Einflusses auf die Festigkeit bei extremen Bindemittelgehalten untersucht. Einerseits wurde die Gesteinskörnung nur oberflächlich benetzt, also ein haufwerksporiges Gefüge (of) hergestellt. Andererseits wurde eine voll gefüllte Rezepturvariante (hg) konzipiert, bei der alle Hohlräume mit Bindemittel gefüllt waren. Als Bindemittel wurde einerseits ein Epoxidharzsystem (PC) verwendet, da es sich bei diesen untersuchten Mörteln lediglich um Zweistoffsysteme handelt, bei denen die Stoffe auch in der Mikroskopie klar zu unterscheiden waren (Abbildung 41). Andererseits wurde ein Zementleim (CC) verwendet, um Rückschlüsse auf die Wirkung bei rein mineralischen Systemen ziehen zu können (Abbildung 42). Es wurden die Druck- und Biegezugfestigkeiten bei -20 °C, 20 °C und 60 °C sowie die Elastizitätsmoduln bei 20 °C an Mörtelprismen verglichen. Eine wirtschaftliche Betrachtung hinsichtlich des Erreichens der optimalen Festigkeit bei geringem finanziellem Aufwand für Material und Verarbeitung wurde ebenfalls durchgeführt.

Die haufwerksporigen PC-Mörtel der Ausfallkörnung zeigen keine erhebliche Temperaturabhängigkeit der Festigkeitseigenschaften, bedingt durch den sehr geringen Bindemittelgehalt. Die Festigkeit der übrigen PC-Mörtel sinkt dagegen mit zunehmender Temperatur (Abbildung 43 und Abbildung 44). Bei der Druckfestigkeit ist eine deutliche Reduktion von 20 °C zu 60 °C zu erkennen. Der Bindemittelanteil ist demnach die bestimmende Komponente. Insgesamt sind erwartungsgemäß die Festigkeiten der haufwerksporigen Systeme deutlich geringer als die der gefüllten.

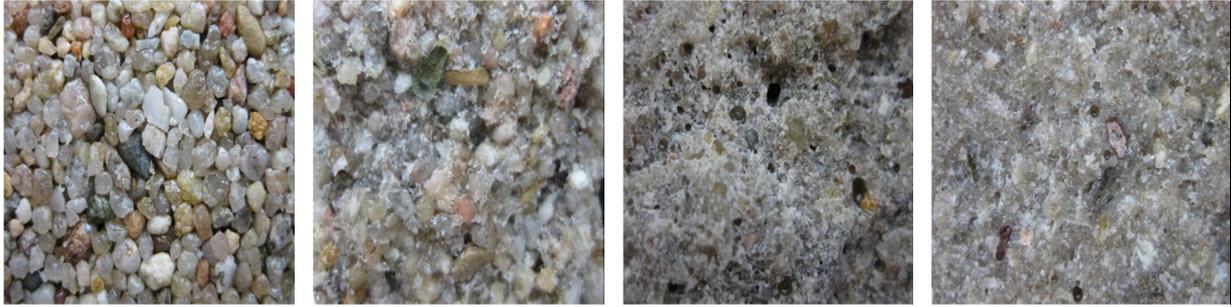


Abbildung 41: PC-Gefüge v. l. n. r.: haufwerksporige Ausfallkörnung, haufwerksporige stetige Sieblinie, hoch gefüllte Ausfallkörnung, hoch gefüllte stetige Sieblinie



Abbildung 42: CC-Gefüge v. l. n. r.: haufwerksporige Ausfallkörnung, haufwerksporige stetige Sieblinie, hoch gefüllte Ausfallkörnung, hoch gefüllte stetige Sieblinie

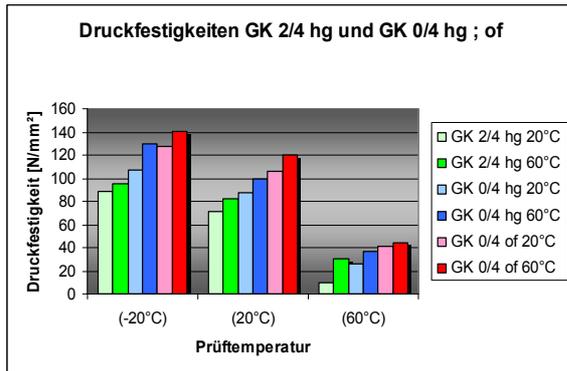


Abbildung 43: Druckfestigkeiten der PC-Systeme

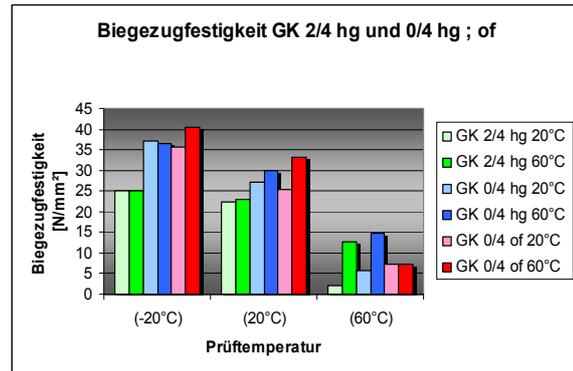


Abbildung 44: Biegezugfestigkeiten der PC-Systeme

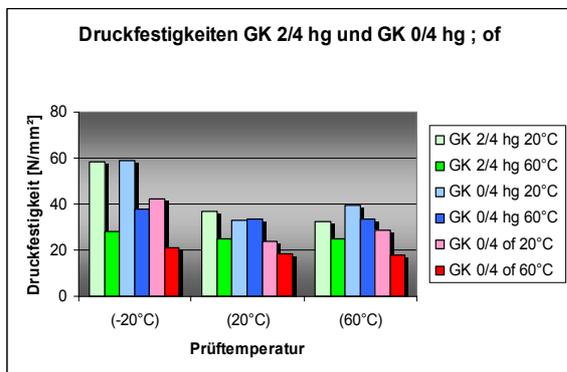


Abbildung 45: Druckfestigkeiten der CC-Systeme

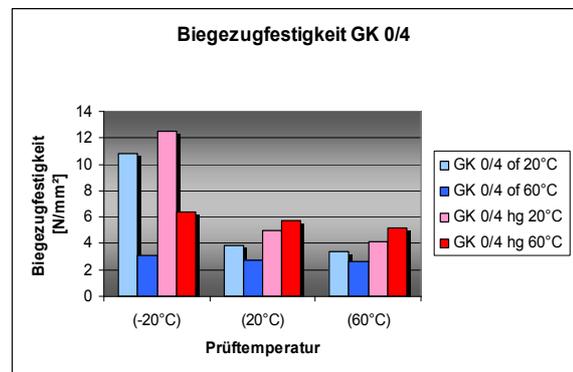


Abbildung 46: Biegezugfestigkeiten der CC-Systeme

Bei den zementgebundenen Systemen ist dagegen keine deutliche Temperaturabhängigkeit der Festigkeiten im untersuchten Temperaturbereich festzustellen (Abbildung 45 und Abbil-

dung 46). Lediglich die Werte bei -20 °C sind teilweise höher, bedingt durch Eisbildung aufgrund der vorhandenen Probenfeuchtigkeit.

Die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Rezepturen wurde anhand der Materialkosten betrachtet. Es zeigten sich deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Art und der Menge des verwendeten Bindemittels. Eine differenzierte Betrachtung ist jedoch vom Anwendungsfall und der sich daraus ergebenden Eigenschaftsanforderungen abhängig. Insgesamt stellte sich jedoch heraus, dass sowohl bei den Epoxidharzmörteln als auch bei den Zementmörteln die oberflächenbenetzte Rezeptur (geringer Bindemittelgehalt) mit einer abgestuften Gesteinskörnung von 0 bis 4 mm den günstigsten Kompromiss zwischen guten Eigenschaften und geringen Kosten darstellt. Eng mit dem letztgenannten Versuchsprogramm verknüpft war die „Bestimmung der Eigenschaften von Reaktionsharzbindemitteln in Abhängigkeit von der Temperatur“. Hier wurde exemplarisch das im vorherig beschriebenen Programm verwendete Epoxidharzsystem mittels DSC / SDT charakterisiert. Es galt, die Auswirkungen der Alterung des organischen Bindemittels auf die Eigenschaften der Mörtel zu untersuchen. Dem vorangegangen waren bereits Untersuchungen mittels DSC an anderen Polymeren zur Charakterisierung der Alterung.

Ein weiteres Versuchsprogramm wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Protecta aus Simmern durchgeführt. Dabei ist die Dauerhaftigkeit, speziell der „Oberflächenbeschaffenheit polymermodifizierter Betone unter extremen chemischen Beaufschlagungen“ untersucht worden. Dafür wurden unterschiedliche polymermodifizierte Betone hergestellt und nach 28 Tagen mit verschiedenen starken Säuren und einer Lauge für 72 Stunden beaufschlagt. Es wurde untersucht, inwieweit sich die Polymermodifikation positiv auf die Oberflächenbeständigkeit während des chemischen Angriffs auswirkt (Abbildung 47). Im Ergebnis wurden Tendenzen festgestellt, die zeigen, dass mittels Polymermodifikation eine Abschwächung der Oberflächenschädigung erreichbar ist. Der angestrebte Idealfall, dass die Oberflächen überhaupt nicht angegriffen werden, ist so jedoch nicht möglich. Nach dem Säureangriff ist der Austausch der geschädigten Betonschichten in jedem Fall erforderlich.



Abbildung 47: Einwirkung von Salzsäure in unterschiedlicher Konzentration auf verschiedene Zemente

Ausgehend von Diskussionen mit dem projektbeteiligten Unternehmen Ingenieur- und Sachverständigenbüro materials & technology consulting Prof. Dr.-Ing. Rolf P. Gieler wurde das Versuchsprogramm zur „Bestimmung der Schädigungsfront brandbelasteter Betone“ durchgeführt. Die Zielstellung war, den Einfluss von Polymermodifikationen auf das Brandverhalten von Beton allgemein zu untersuchen, da dies aufgrund der Polymere in der Regel als nachteilig angesehen wird. Dazu wurden verschiedene, teilweise mit Polymeren sowie Polymerfasern versetzte Betonrezepturen hergestellt. Daraus hergestellte Probekörper wurden auf einem eigens entworfenen Beflammungsprüfstand (Abbildung 48) einseitig mit einer ca. 650 °C heißen Gasflamme beaufschlagt. So konnten die Proben während der Beflammung beobachtet und fotografisch dokumentiert werden. Zur Bewertung der Schädigungen wurden die Betone visuell begutachtet sowie verschiedene analytische Untersuchungen wie Masse-, Festigkeits- und Porositätsvergleiche vor und nach der Beflammung durchgeführt. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe zerstörungsfreie Prüfverfahren wurde mittels Laserultraschalltechnik die innere Schädigung von Betonprobekörpern nach einer einseitigen Brandbelastung erfasst (Abbildung 49). Zur generellen Bewertung des Temperaturverhaltens wurden von den Betonen und den Kunststoffen zusätzlich jeweils simultane Thermoanalysen (SDT) durchgeführt.



Abbildung 48: Versuchsaufbau mit Hockerkocher und Temperaturmessung

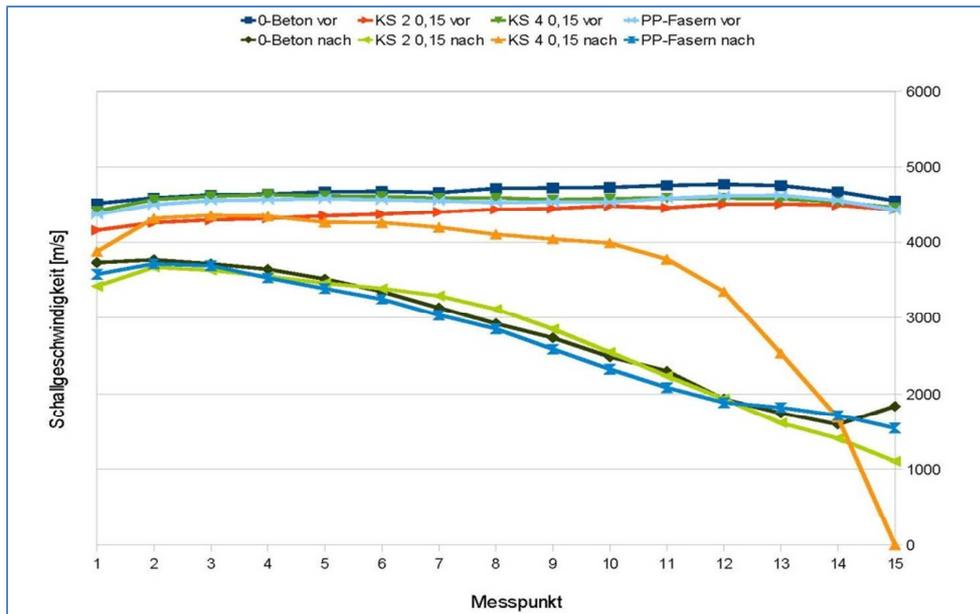


Abbildung 49: Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass polymermodifizierte hinsichtlich mechanischer Kennwerte und Schädigungstiefe kein bedeutend schlechteres Brandverhalten als Normalbeton oder Faserbeton aufweisen. Jedoch ist grundsätzlich von einer Beeinflussung des Materialverhaltens von Betonen mit Kunststoffmodifikationen durch einen Brand auszugehen. Der Grad der Beeinflussung scheint dabei wesentlich von der Kunststoffart und der eingesetzten Menge abzuhängen. So wiesen die polymermodifizierten Betone unterschiedlich starke Schädigungen auf, abhängig vom eingesetzten Polymer. Zudem wurde eine geringe brandverstärkende beziehungsweise brandverlängernde Wirkung durch die Polymere festgestellt (Abbildung 50), da sich nach Abstellen der Beflammung Gase der zersetzten Polymere auf der Oberfläche der Proben entzündeten und einen Moment weiterbrannten. Allerdings ist naheliegend, dass nicht nur die Kunststoffe selbst, sondern auch die durch die Kunststoffe hervorgerufenen Veränderungen des Betongefüges ausschlaggebend für die Beständigkeit des Betons sind. Zusammenfassend konnte die allgemeine Vermutung, dass polymermodifizierte Betone durch eine Brandbelastung deutlich größere Verluste ihrer (mechanischen) Eigenschaften einbüßen als unmodifizierte Betone, nicht bestätigt werden.

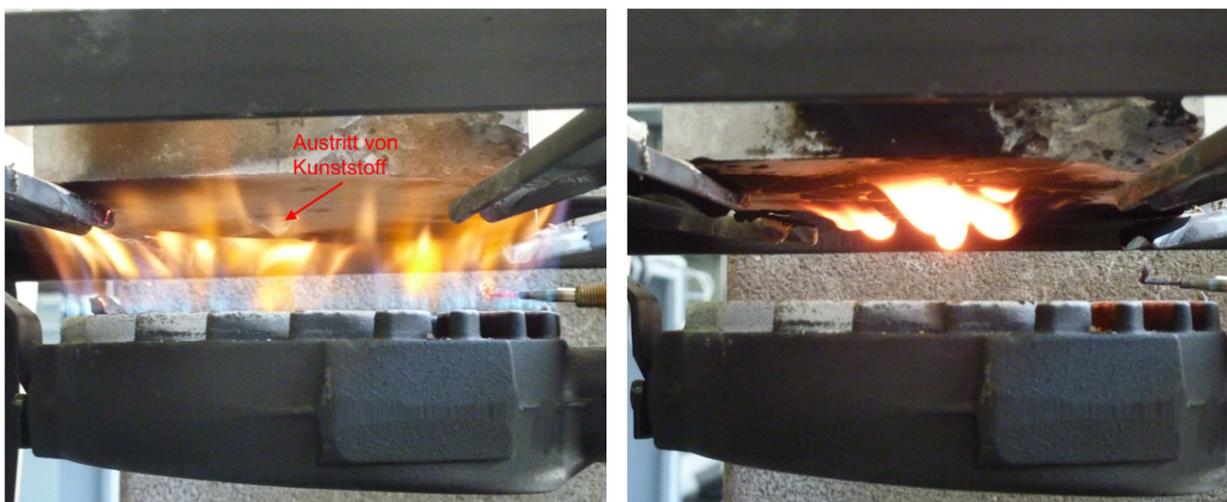


Abbildung 50: Austritt von Kunststoff beziehungsweise Weiterbrennen von Kunststoff nach Flammabschaltung

Ein letztes, wesentliches Versuchsprogramm, welches erst gegen Ende des Gesamtprojektes begonnen wurde, beschäftigte sich mit dem Thema „Holzergänzungsmaterial“. Aufbauend auf den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungsprogramme wurde ein Material entwickelt, welches eine originalgetreue Oberflächenstrukturierung ermöglicht, einen guten Haftverbund zum Altholz aufweist sowie die Möglichkeit der Nutzung üblicher Holzverbindungsmittel, wie z. B. Nägel, bietet. Es wurden verschiedene polymere Bindemittel sowie unterschiedliche Füllstoffe getestet. Anhand verschiedener, ermittelter charakteristischer Kennwerte wurde eine Rezeptur mit einem flexibilisierten Epoxidharz und einer Blähglaskörnung für die weiteren Untersuchungen favorisiert. Mit dieser Rezeptur wurden verschiedene Modellprobekörper zur Ermittlung von Haftverbund und Festigkeitsbeeinflussung hergestellt und geprüft (Abbildung 51).

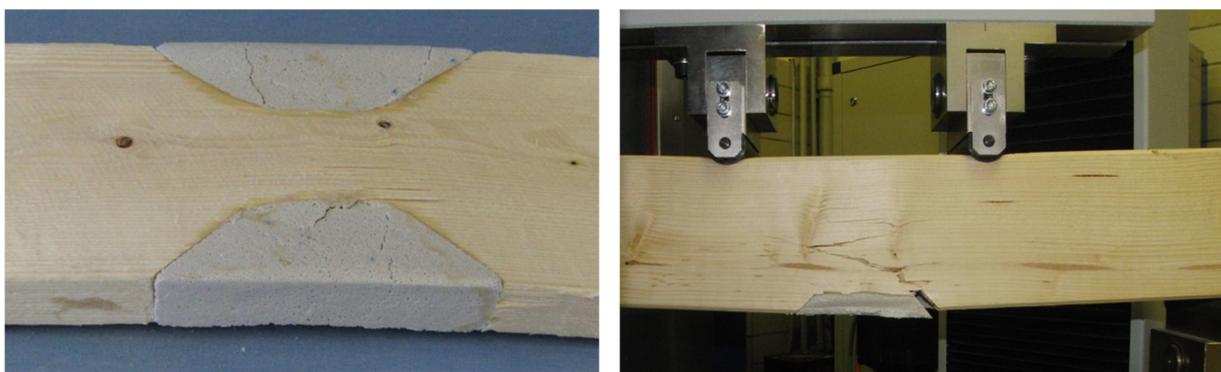


Abbildung 51: Modellprobekörper für Holzergänzungsmörtel

Den derzeitigen Abschluss bildet das Herstellen von Musterflächen im Verifikationsobjekt Schloss Ponitz. Dort konnte ein Teil eines durch Holzschädlinge geschädigten Balkens reprofiliert werden (Abbildung 52). Das Material sollte dabei keine konstruktiven Aufgaben übernehmen. Es sollen im derzeitigen Entwicklungsstadium lediglich die vorher abgeheilten Stellen reprofiliert und später optisch der originalen Holzbemalung angepasst werden. Voraussetzung für dieses Verfahren ist die ausreichende Resttragfähigkeit des abgeheilten Balkens.



Abbildung 52: Stufen der Reprofilierung eines Holzbalkenabschnittes mit Holzergänzungsmörtel

Die Weiterführung dieser sowie weiterer Untersuchungen soll in Zusammenarbeit mit verschiedenen regionalen Unternehmen im geplanten IP-Transfer-Projekt erfolgen.

Die erzielten Ergebnisse der einzelnen Versuchsprogramme bildeten die Basis zur Erstellung einer Anwendungsmatrix zur Integration in das digitale Gebäudemodell. Allerdings musste festgestellt werden, dass die Datenvielfalt aufgrund der vielgestaltigen Problemstellungen bei der Bausanierung immens groß ist. Daher wurden drei prinzipielle Vorgehensweisen exemplarisch ausgewählt und als Szenario 1 im Folgenden beschrieben:

- Holzbalken in einem Dachstuhl, der partiell durch Schädlingsbefall geschädigt ist und reprofiliert werden soll
- Außenwand in Mischbauweise aus Hochlochziegel und Stahlbeton, welche zur Stabilisierung auf der Innenseite verstärkt werden soll
- Sandsteinfassade, an der partiell verwitterte Stellen zur Verbesserung des optischen Eindruckes ausgebessert werden sollen

Die Darstellung erfolgte als Organigramm (Abbildung 53). Dies kann an der entsprechenden Stelle im digitalen Gebäudemodell als Objekt angehängt werden und unterstützt den Nutzer

bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Auswahl geeigneter Materialien beziehungsweise Methoden für die Bausanierung.

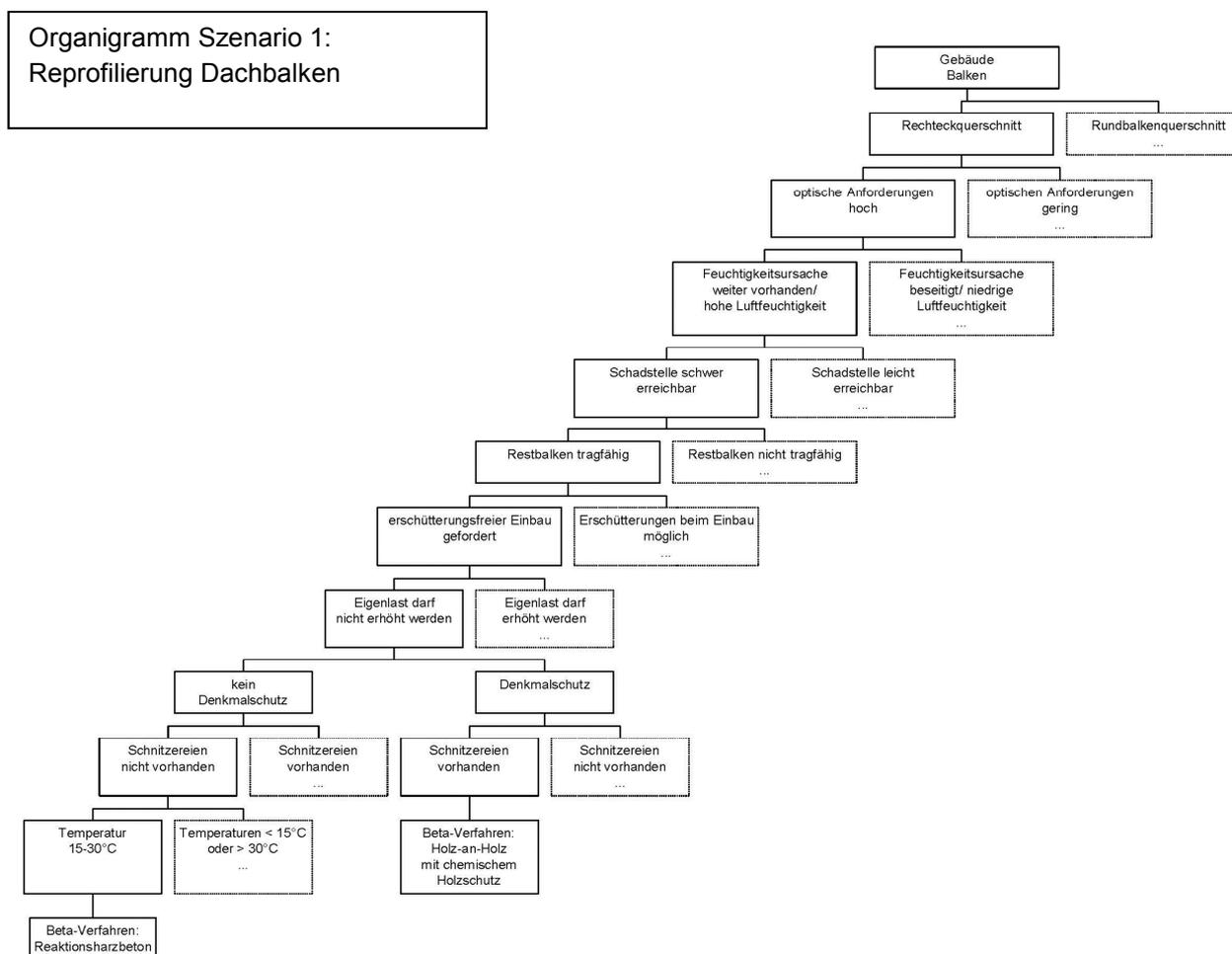


Abbildung 53: Organigramm exemplarisch zum Szenario 1

2.1.4 Zerstörungsfreie Prüfmethoden

Arbeitspaket 1.3 – „Entwicklung und Adaption von Messverfahren zur Erfassung von Schäden in Bauteilen“ beinhaltet den gezielten Einsatz und die Adaption zerstörungsfreier Prüfverfahren für die speziellen Fragestellungen der Bausanierung zur Bewertung von Bauwerksteilen in Bestandsgebäuden sowie zur Charakterisierung neuer Baustoffe und Ergänzungsmaterialien.

Im Folgenden wird die Verwendung der beantragten Geräte und der erzielten Ergebnisse anhand der relevanten Unterpunkte des Projektantrags beziehungsweise des Antrags auf Nachinvestitionen dargestellt.

Diagnosesystem zur zerstörungsfreien Prüfung - Digitales Einpunkt-Vibrometer

Auf der Grundlage von Vibrometersystemen lassen sich laserbasiert und berührungslos strukturdynamische und vibroakustische Fragestellungen bearbeiten. Aus dem optischen Charakter des Messverfahrens ergibt sich eine Reihe von Vorteilen, die auf dem rückwirkungsfreien Erfassen von Strukturschwingungen beruhen. Aus diesen Gründen werden Laser-Doppler-Vibrometer zunehmend als berührungslose Sensoren für die Untersuchung von

Baustoffen eingesetzt. Das im Zuge der Nachinvestitionen beschaffte digitale Einpunkt-Vibrometer repräsentiert gegenüber analogen Systemen eine völlig neue Gerätegeneration mit deutlich verbesserten Eigenschaften im Hinblick auf die Signalerfassung und die Mobilität.

Zu Beginn des Projektzeitraums wurden in Kooperation mit den beteiligten Partnerunternehmen und dem Projektbereich Ergänzungsbaustoffe nachfolgende ungelöste Prüfaufgaben (PA) mit dringender baupraktischer Relevanz identifiziert:

1. Untersuchung der dynamischen Eigenschaften (Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen) von Bauwerksteilen in-situ, Bewertung des Sanierungserfolgs von lokalen Schäden im Verankerungsbereich
2. Laserbasierte, zeit- und orts aufgelöste Bewertung der Strukturbildung, Homogenität und Sedimentationsstabilität mineralischer Bindemittel im Rahmen von Rezepturentwicklungen und -modifikation von Ergänzungsbaustoffen (vgl. Arbeitspaket 1.4)

Im Projektzeitraum konnte das beschaffte Vibrometersystem, abweichend von den geplanten Zielen, nicht für berührungslose Messaufgaben im Hinblick auf das dynamische Verhalten von Bauwerken eingesetzt werden. Infolgedessen wurde der Schwerpunkt des Geräteinsatzes zu laborbasierten Anwendungen des berührungslosen Messsystems gesetzt. Die geleisteten Vorarbeiten zur Entwicklung eines berührungslosen, laserbasierten Ultraschall-Transmissionsverfahrens [TAT06a; TAT06b; ERF06] wurden im Hinblick auf die angeführten speziellen Fragestellungen der Bausanierung adaptiert und auf stofflich relevante Fragestellungen angewandt (vgl. PA 2). Für diesen Schwerpunkt des Arbeitspaketes wurde die in den Nachinvestitionen beantragte Rechentechnik eingesetzt.

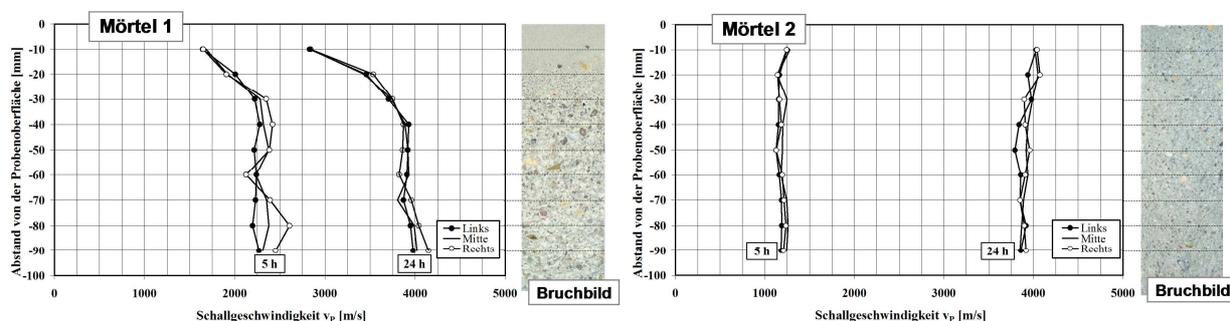


Abbildung 54: Beispielergebnis des laserbasierten Ultraschall-Transmissionsverfahrens zur Strukturbildung und Sedimentationsstabilität zementgebundener Baustoffe

Es konnte gezeigt werden, dass digitale gegenüber analogen Demodulationstechniken wesentliche Vorteile im Hinblick auf die Ersteinsatzdetektion von Ultraschallsignalen im Zeitbereich bieten. Das Versuchsprogramm umfasste grundsätzliche Untersuchungen zur Signalqualität und Datenmittelung sowie experimentelle Untersuchungen an Zementleimen, selbstverdichtenden Mörteln, Betonen und Bauteilen. Im Ergebnis der vorgenommenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich die Strukturbildung, Homogenität und Sedimentationsstabilität von Ergänzungsbaustoffen anhand der zeitlichen und örtlichen Variation der Ultraschallparameter berührungslos bewerten lässt. Damit sind Rückschlüsse auf die geeignete Zusammensetzung und Herstellung mineralischer Bindemittel möglich, die für Rezepturoptimierungen herangezogen werden können. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse wurden in projektbezogenen Publikationen veröffentlicht (vgl. 2.6) und flossen in die Dissertationsschrift eines Nachwuchswissenschaftlers ein.

Diagnosesystem zur zerstörungsfreien Prüfung – Ultraschall-Prüfkopfsystem CELplus

Das im Rahmen der Nachinvestitionen erworbene Ultraschall-Prüfkopfsystem CELplus ist gezielt auf die Untersuchung erstarrender und erhärtender Systeme abgestimmt und zeichnet sich durch eine hohe Empfindlichkeit stark dämpfender Versuchsmischungen aus.

Innerhalb des Forschungsvorhabens nuBau erfolgte eine intensive Kooperation der einzelnen Projektbereiche. Der Projektbereich Zerstörungsfreie Prüfung hat in Zusammenarbeit mit dem Projektbereich Ergänzungsbaustoffe innerhalb der Arbeitspakete 1.3 und 1.4 zerstörungsfreie Untersuchungen an erstarrenden / erhärtenden Ergänzungsmaterialien vorgenommen. Die Untersuchungen zielten darauf ab, das Erstarrungs- beziehungsweise Erhärtungsverhalten neu entwickelter Rezepturen zu bestimmen und Rezepturen entsprechend zu modifizieren. In zementgebundenen Systemen wirken sich insbesondere zugesetzte Polymere in der Regel unterschiedlich verzögernd auf den Hydratationsverlauf auf. Weiterhin wird das Abbindeverhalten wesentlich von der jeweils vorliegenden Kombination Polymer-Zusatzmittel-Zement bestimmt und kann bei vergleichbaren Ausgangsstoffen deutlich variieren. Wesentliche Kriterien bei der Anwendung von Ergänzungsmaterialien in der baupraktischen Verwendung, beispielsweise für Betonergänzungen oder zur Traglastverstärkung von Holzbalkendecken, sind die Verarbeitungs- und die Erstarrungszeiten sowie der Erhärtungsfortschritt. Diese Parameter bestimmen maßgeblich den Bauablauf und die zugrunde liegende Bautechnologie.

Es hat sich gezeigt, dass die Anwendung akustischer Untersuchungsmethoden wesentliche Vorteile bei der Erfassung der Verfestigungsvorgänge zementgebundener Zementleime und Mörtel sowie auch reaktionsharzgebundener Systeme (EP-Bindemittel) bietet. Konventionelle Prüfverfahren, wie die Erstarrungsprüfung nach VICAT oder die Bestimmung der Druckfestigkeit, können lediglich zu diskreten Zeitpunkten Informationen über das zeitliche Verhalten und die Eigenschaften des Baustoffs liefern. Unter Anwendung des Ultraschall-Transmissionsverfahrens lässt sich eine zerstörungsfreie und kontinuierliche Charakterisierung der Strukturbildung und der Frühfestigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Erhärtungsbedingungen erreichen. Insbesondere stellt das Gewinnen kontinuierlicher Informationen über den gesamten Bereich des Ansteifens, Erstarrens und Erhärtens einen wesentlichen Vorteil dar. Dies ist die Voraussetzung für die passgenaue Abstimmung der Materialeigenschaften an die gestellten Anforderungen der Bausanierung.

Im Projektzeitraum wurde der Versuchsaufbau und Auswertalgorithmen (vgl. 2.6.) zur Erfassung

- der Strukturbildung und Abschätzung der Festigkeitsentwicklung kunststoffmodifizierter Ergänzungsmaterialien in Abhängigkeit von der Mischungszusammensetzung und den Erhärtungsbedingungen und
- zur Verifikation der Auswahl und der Rezepturoptimierung von Ergänzungsmaterialien für entsprechende Anwendungsgebiete komplettiert.

Der für das taktile Ultraschallverfahren [BRA10a; TAT10] entwickelte Algorithmus zur Ansteuerung der Messkarte (A/D-Konverter) und zur Datenerfassung konnte für diesen Zweck modifiziert werden. Zudem kommt ein Algorithmus zur Ersteinsatzdetektion von Longitudinalwellen [SCHS10] zum Einsatz, der im Rahmen des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens zur Auswertung der Impulslaufzeit an Bauwerksteilen eingesetzt wird. Die in den Nachinvestitionen beantragte Rechentechnik wurde für diesen Schwerpunkt des Arbeitspaketes eingesetzt.

Das Anwendungsbeispiel in Abbildung 55 zeigt exemplarisch mit dem Versuchsaufbau gewonnene Ergebnisse am Beispiel von Steinerfüllmassen für die Restaurierung. Durch die Entwicklung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wird die Beurteilung des zeitlich unterschiedlich verlaufenden Ansteifens, Erstarrens und der weiteren Festigkeitsentwicklung beider Proben ermöglicht (li.). Die Strukturbildungsrate ($re.$) verdeutlicht unterschiedlich schnell ablaufende Prozesse während der ersten strukturellen Änderungen, die zur Erstarrung der Proben führen. Dies ist insbesondere für die Verarbeitungszeit beziehungsweise die weitere Überarbeitung wesentlich. Im Projektzeitraum wurde das Messsystem übereinstimmend mit dem Projektantrag für die Untersuchung und Rezepturoptimierung von reaktionsharzgebundenen Mörteln (EP-Bindemittel) zur Ausbesserungen sowie für die Traglastverstärkung von Holzbalkendecken eingesetzt.

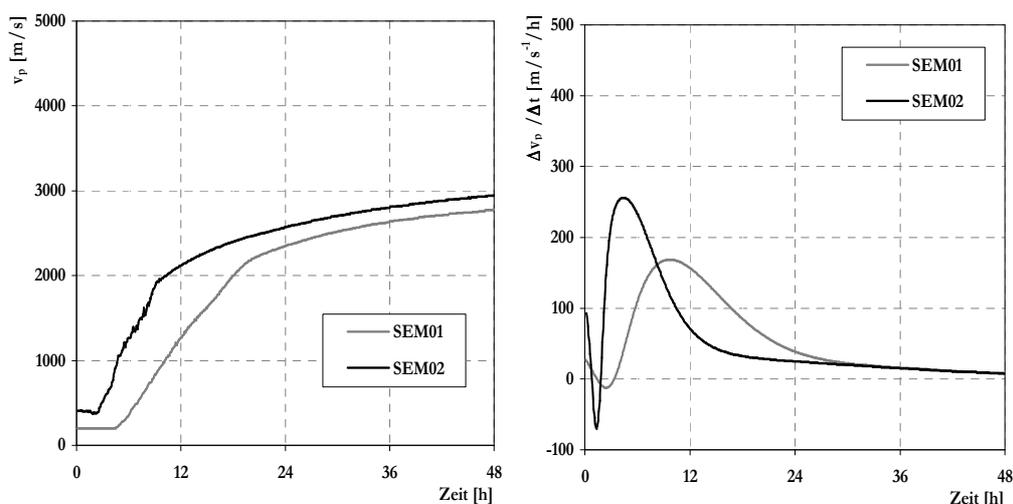


Abbildung 55: Entwicklung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle (li.) und Strukturbildungsrate ($re.$) zwei zeitlich unterschiedlich reagierender Steinerfüllmassen für die Restaurierung

Ultraschall-Scherwellen-Tomografie

Die Ultraschall-Scherwellen-Tomografie wurde primär zur Bewertung der inneren Struktur von Bauwerksteilen herangezogen. Zu Beginn des Projektzeitraums wurde ein Ultraschall-Scherwellen-Tomograf beschafft und in Betrieb genommen. Das Gerät ist seit Anfang 2008 auf dem Markt erhältlich und basiert auf neuartigen Ansätzen zur zerstörungsfreien Bewertung von Bauwerksteilen. Unter Verwendung eines Prüfkopf-Linienarrays werden Scherwellen einseitig auf das Bauwerksteil übertragen. An Grenzflächen, die sich hinsichtlich der Dichte und Ausbreitungsgeschwindigkeit unterscheiden, erfolgt die Reflexion der Wellenfelder. Durch die messtechnische Erfassung in Verbindung mit tomografischen Rekonstruktionsrechnungen (SAFT) wurden auf diese Weise im Bauteilinneren Unterschiede hinsichtlich der elastischen Eigenschaften registriert und in Schnittebenen visualisiert. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt war die Bewertung der Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen der Messmethodik und der eingesetzten Messtechnik für die speziellen Problemstellungen und Gegebenheiten der Bausanierung. Dazu wurden zu Beginn des Projektzeitraums in Kooperation mit den beteiligten Partnerunternehmen ungelöste Prüfaufgaben mit dringender baupraktischer Relevanz identifiziert:

- Strukturanalyse von Bauwerksteilen aus Beton / Sichtbeton im Rahmen der Qualitätssicherung und der Bauzustandsanalyse - Erfassung von Gefügestörungen (z. B. Kiesnester, Risse), Einbauteilen und Hohlstellen
- Bewertung des Sanierungserfolgs von Betonbauteilen - Detektion von Hohllagen, Beurteilung des Verbundes von Betonergänzungen und der Qualität von Verpressungen
- Bewertung von Naturstein und Mauerwerk hinsichtlich Homogenität und Fehlstellen

In Übereinstimmung mit dem Projektantrag wurden zur Überführung der angeführten Prüfaufgaben in die angewandte Forschung entsprechende Referenzobjekte in Kooperation mit den Unternehmen ausgewählt. An diesen wurde die prinzipielle Lösbarkeit der genannten Problemstellungen bewertet. Dazu wurden im Projektzeitraum Untersuchungen an Bauwerksteilen nachfolgender Objekte vorgenommen:

- Dillinger Hütte (Detektierbarkeit von Gefügefahstellen u. Einbauteilen in Stahlbetonwänden)
- Gasfaulbehälter, Klärwerk Erfurt (Detektierbarkeit von Gefügefahstellen u. Einbauteilen, Bewertung des Verbundes von Betonergänzungen)
- Absetzbecken, Elbingerode (Verbundeigenschaften von Betonergänzungen)
- Fundament einer Windenergieanlage, Perwez / Belgien (Detektierbarkeit der Lage von Einbauteilen und Gefügefahstellen)
- Schloss Ponitz (Stahlbeton-Unterzug, Homogenität von Betonbauteilen, Detektierbarkeit von Gefügefahstellen u. Einbauteilen)
- Brückenträger aus Spannbeton, Kirchheim (Homogenität, Wanddicke, Rissverlauf)
- Natursteinobjekte (Fehlstellen)

Die jeweiligen Zielstellungen wurden während der Bearbeitung in Abstimmung mit den Unternehmen weiter konkretisiert. Im Ergebnis der vorgenommenen Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die Ultraschall-Scherwellen-Tomografie zur Lösung der sanierungspezifischen Prüfaufgaben prinzipiell gut geeignet ist. Weiterer Forschungsbedarf bestand vor allem hinsichtlich der sicheren Interpretation der gewonnenen Messergebnisse und der Einsatzgrenzen dieser zerstörungsfreien Untersuchungsmethode. Zur schrittweisen Verbesserung der Aussagekraft wurden im Projektzeitraum Untersuchungen an eigens gefertigten Modellprobekörpern aus Stahlbeton vorgenommen. Dazu wurden Studierende einbezogen und studentische Arbeiten betreut. Es wurden typische Fragestellungen der Bausanierung untersucht, charakteristische Fehlstellen beziehungsweise Einbauteile modelliert und hinsichtlich der Ausdehnung und Tiefenlage variiert. Im Ergebnis der tomografischen Untersuchung wurden deren Detektierbarkeit und damit die Verfahrensgrenzen bewertet. Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse wurden in Workshops beziehungsweise Tagung nuBau gemeinsam mit den Partnerunternehmen diskutiert und in projektbezogenen Publikationen publiziert (vgl. 2.6.).

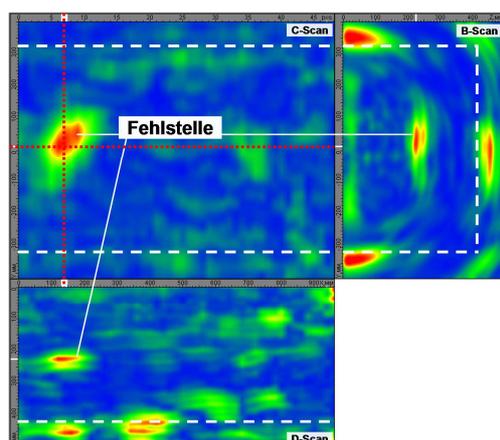


Abbildung 56: Beispielergebnis der Ultraschall-Scherwellen-Tomografie an einem Natursteinquader aus Travertin

Diagnosesystem zur zerstörungsfreien Prüfung – Radarprüfsystem SIR 3000

Das für Baustoff- und Bauwerksuntersuchungen angeschaffte Radarprüfsystem soll in den nachfolgenden Ausführungen kurz vorgestellt und die wichtigsten Anwendungen beschrieben werden. Erworben wurde das Radarprüfsystem SIR 3000 der Firma GSSI, um für Bauwerksuntersuchungen eine möglichst hohe Mobilität zu erreichen. Die ausgewählten Antennen im Frequenzbereich von 900 MHz bis 2,6 GHz sollen neben einer praktikablen Handhabung zum Abfahren großflächiger Untersuchungsbereiche eine dem derzeitigen Entwicklungsstand entsprechende, maximale Auflösung gewährleisten. Die Führung der Antennen (z. B. mit einem Handwagen) ermöglicht eine automatisierte Wegregistrierung, so dass eine örtliche Zuordnung der Messdaten in der Messspur gegeben ist. Die Software *Radan* erlaubt eine komfortable Weiterbearbeitung der gewonnenen Messdaten am PC.

Die Anwendung von Georadar als elektromagnetisches Verfahren zielt im Wesentlichen auf folgende Anwendungen ab:

- Ergänzung der gewonnenen Informationen akustischer Messverfahren der zFP durch Verfahrenskombination mit dem Georadar, um durch grafische Überlagerung von Bilddaten (siehe Untersuchungsergebnisse Unterzug Schloss Ponitz) einen höheren Informationsgehalt zum Untersuchungsgegenstand zu erhalten
- Strukturanalyse von Bauwerksteilen beziehungsweise Detektion von Einbauteilen aus Metall (z. B. Bewehrung, Zuganker)
- Untersuchung von durchfeuchteten Mauerwerk; qualitative Aussagen zur Ausbreitung der Feuchtigkeit im Mauerwerk (Lage des Feuchtehorizontes)
- Untersuchung des oberflächennahen Bereiches (Betondeckung, 1. Bewehrungslage) von Bauwerksteilen aus Beton zur qualitativen Erfassung der Feuchte- und Salzverteilung unter Einbeziehung von Kalibrierdaten einer festgelegten Betonqualität. Am Beispiel der Untersuchung eines unbeschichteten Betons für die Verwendung in Parkhäusern soll die Vorgehensweise erläutert werden.

In Parkhäusern werden Standplätze und Auffahrtsrampen oft durch Bohrkern- oder Bohrmehlentnahmen beprobt, um die Migration von Chloriden in die Betondeckung zu erfassen. Diese Maßnahmen sind erforderlich, um einer Bewehrungsstahlkorrosion rechtzeitig entgegenwirken zu können. Für ein Lebensdauermanagement für Parkhäuser wäre die Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren dringend erforderlich. Zur schrittweisen Lösung der Aufgabenstellung bietet sich eine Verfahrenskombination zerstörungsfreier Prüfmetho-

bestehend aus dem Ferroscan von Hilti und dem Impuls-Georadar-Verfahren an. In einem ersten Untersuchungsschritt wurde die Abhängigkeit der Radarwellengeschwindigkeit von unterschiedlichen Feuchtegehalten im Beton untersucht. Mit einer hochfrequenten 2,6 GHz Antenne wurde eine Betonplatte mit 4,5 cm Betondeckung in der Austrocknungsphase nach der Betonherstellung, nach der Trocknung im Wärmeschrank und nach der Wasserlagerung in einem definierten Messraster die Radarlaufzeiten gemessen. Die für die Berechnung der Radarwellengeschwindigkeit erforderliche Wegmessung erfolgte mit dem Ferroscan. Vernachlässigt wurde in den weiteren Berechnungen vorerst die Signaldämpfung innerhalb der Betondeckung. In den weiteren Berechnungen wurde der Realteil der komplexen Dielektrizitätszahl ϵ'_r zu jedem Messzeitpunkt berechnet und mit dem entsprechenden Feuchtegehalt des Betonprobekörpers korreliert. In der Abbildung 57 (a und b) wird die Handhabung der Messgeräte und in Abbildung 58 werden die erzielten Untersuchungsergebnisse exemplarisch an einem Modellbeton, der in seiner Zusammensetzung einem C35/45 entspricht, dargestellt. Zu erkennen ist ein linearer Zusammenhang zwischen ϵ'_r und dem Feuchtegehalt. Der ermittelte funktionale Zusammenhang ist aufgrund des hohen Bestimmtheitsmaßes geeignet, als Kalibrierkurve für den untersuchten Beton zu fungieren, die auch für eine quantitative Bestimmung des Feuchtegehaltes herangezogen werden kann.

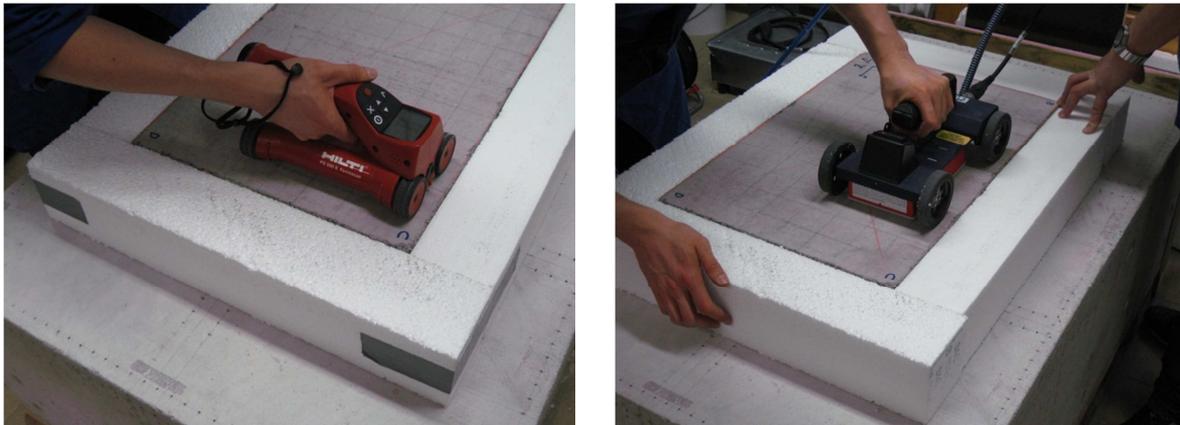


Abbildung 57 (a und b): Messung der Betondeckung mit Ferroscan (li.) und Radarlaufzeiten im vorgegebenen Messraster (re.)

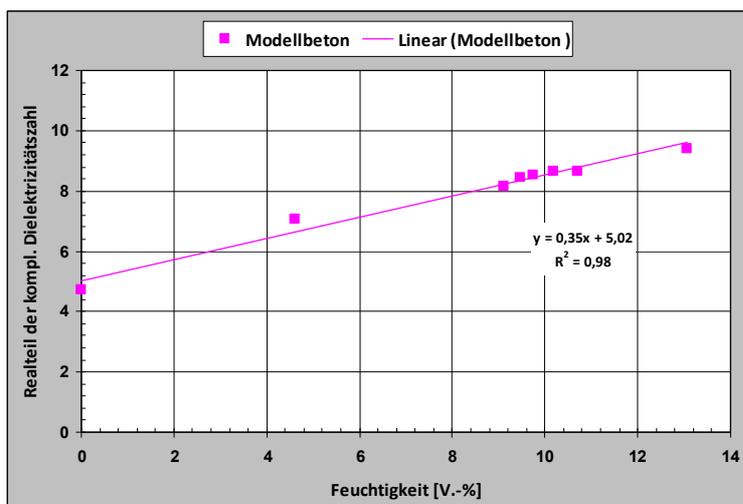


Abbildung 58: Darstellung der Abhängigkeit des Realteils der komplexen Dielektrizitätszahl vom Feuchtegehalt

Diagnosesystem zur zerstörungsfreien Prüfung – Schichtdickenmessgerät USN 58 L VGA

Zentrale Arbeitsschwerpunkte, die zur Anschaffung des Messgerätes führten, beinhalteten die zerstörungsfreie Messung der Schichtdicke von 2K-Sprühabdichtungen (z. B. Polyurethan, Polyurea) sowie ableitfähiger Beläge aus ESD (electro-static-discharge) und Isolierbeschichtungen. Die Vorgehensweise war von der Anfertigung von Musterplatten mit vergleichbarem Schichtaufbau sowie in der Bereitstellung von Spritzgut in kompakter Form geprägt, um durch Transmissionsmessungen Kalibrierwerte für die Schallgeschwindigkeit separat zu gewinnen. Zur Bewertung des Reflexionshorizontes an der Grenzfläche Beschichtung/Untergrund (Feinspachtel) wurde durch Anwendung von kontinuierlichen Ultraschall-Transmissionsmessungen die Entwicklung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Hydratation (0 bis 48 h) aufgezeichnet, sodass aus den Schallkennimpedanzen des Beschichtungsmaterials Z_1 und des Feinspachtels Z_2 eine Berechnung des Reflexionsfaktors erfolgen konnte. Zur Darstellung der Gefügestruktur des jeweiligen Spritzgutes entstanden Untersuchungen am Elektronenmikroskop. Referenzmessungen zu den Schichtdicken erfolgten an Vertikalschnitten, die mit einer Präzisionssäge angefertigt wurden, am digitalen Mikroskop Keyence VHX 600 [ERF11]. Abbildung 59 zeigt die Durchführung von Schichtdickenmessungen an einer vertikal aufgebrachten 2K-Sprühabdichtung auf der Basis von Polyurethan. Aus Abbildung 60 sind der Schichtaufbau (Kratzspachtel/Graphitbelag/ESD-Deckschicht) sowie die ausgemessenen Schichtdicken der ESD-Deckschicht ersichtlich.

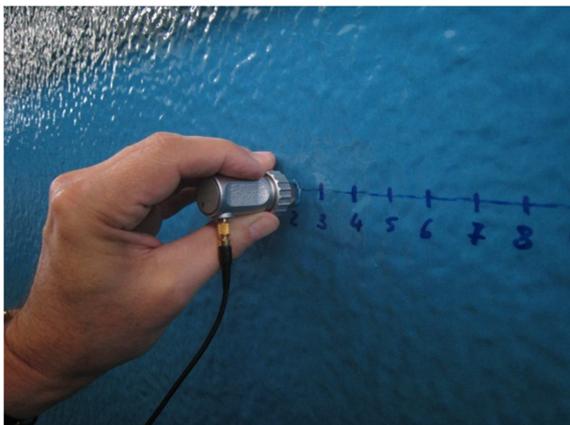


Abbildung 59: Zerstörungsfreie Schichtdickenmessung einer PUR-Beschichtung am Bauwerk

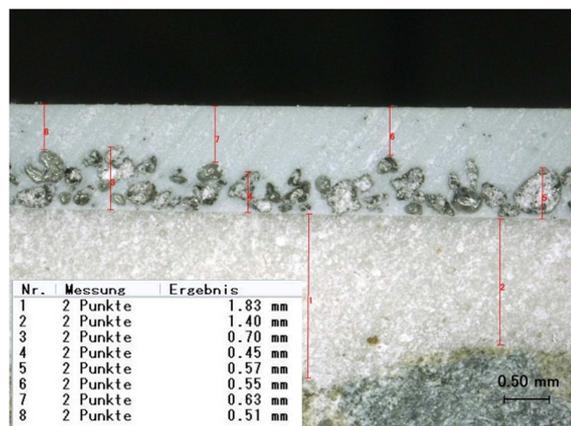


Abbildung 60: Vertikalschnitt durch eine ESD-Beschichtung, aufgenommen mit dem Keyence VHX 600

Diagnosesystem zur zerstörungsfreien Prüfung – Digitales Mikroskop Keyence VHX

Der Arbeitsplatz für das portable Digitalmikroskop *Keyence VHX 600* mit Endoskopiefunktion wurde für den stationären Betrieb im Arbeitsbereich Lichtmikroskopie an der Professur Werkstoffe des Bauens aufgebaut Abbildung 61 (li.). Neben der stationären Anwendung wurden lichtmikroskopische Untersuchungen am Bauwerk bis in den Bereich 100-facher Vergrößerung sowie der Einsatz mit dem adaptierbaren flexiblen Endoskop in schwer zugänglichen Bereichen durchgeführt. Mit der Integration dieser Untersuchungsmethoden in das Konzept der Bauwerksdiagnose erfolgte eine Erweiterung der Datengrundlage der mit zerstörungsfreien Prüfverfahren diagnostizierten Schadensbereiche. So können Rissweiten $< 0,1$ mm messtechnisch sicher erfasst und dokumentiert werden. Die bisherigen Verfahren (Rissbreitenabschätzung mit Schablone, Messlupe) führen in ihrer Anwendung zu einem subjektiven Fehleranteil und lassen eine objektive Dokumentation nicht zu. In der Abbildung

61 (re.) werden exemplarisch gemessene Rissweiten im Bereich von 0, 1 mm an einer Wand aufgezeigt.

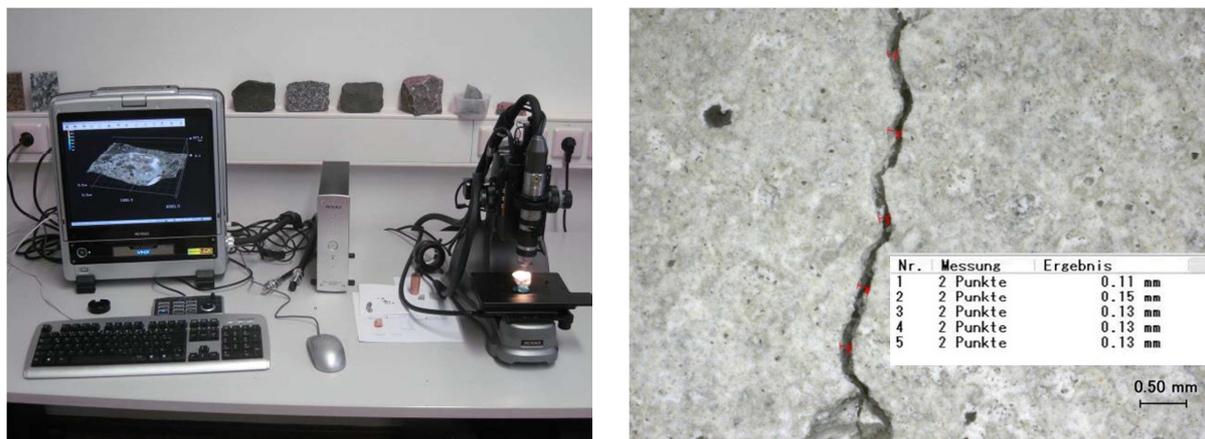


Abbildung 61: Keyence VHX 600 (li.); Rissweitenmessung (re.)

Direkte Integration von zerstörungsfreien Prüfverfahren in digitale Bauwerksmodelle – Taktiles Ultraschall-Transmissionsverfahren

Das taktile Ultraschall-Transmissionsverfahren erlaubt die Bestimmung von elastischen Kennwerten zwischen gegenüberliegenden Messpunktpaaren und lässt sich dadurch zur globalen Zustandsbewertung von Bauwerksteilen einsetzen. Dazu wird die Ultraschalllaufzeit durch mechanische Ankopplung der Schallwandler gemessen und die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle unter Einbeziehung des Schallweges berechnet. Die zerstörungsfrei gewonnenen Werte lassen sich unter Einbeziehung der Rohdichte und der dynamischen Querdehnzahl des Betons direkt zur Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls heranziehen. Durch die globale Sicht auf das Bauwerksteil werden relevante Untersuchungsgebiete weiterer auch zerstörungsbehafteter Untersuchungsmethoden der Bauzustandsanalyse gezielt identifiziert [ERF06]. Innerhalb des Projektes lag die primäre Zielstellung der baupraktischen Adaption und Anwendung des Verfahrens in der Gewinnung eines globalen Abbildes von monolithischen Bauwerksteilen durch die zerstörungsfreie Bestimmung der Verteilung von elastischen Parametern. Das taktile Ultraschall-Transmissionsverfahren birgt aufgrund des manuellen Charakters der Messmethode verbunden mit der mechanischen Ankopplung der Schallwandler eine Reihe von Nachteilen, die das Verfahren dann besonders aufwendig gestalten, wenn eine große Anzahl von Messpunktpaaren untersucht wird, die Bauwerksteile eine komplexe Geometrie (z. B. Ausbrüche) aufweisen oder Öffnungen zum Abgleich von Referenzpunkten weit auseinander liegen [TAT05].

Ein wesentliches Ziel des Gesamtvorhabens war daher die Verknüpfung von Methoden der digitalen Bauaufnahme mit den Werkzeugen und Untersuchungsmethoden der Bauzustandsanalyse. Dies sollte dazu dienen, die Geometriedaten relevanter Bauwerksteile und gewonnene Messdaten zusammenzuführen und anhand einer allgemeinen Darstellungskomponente innerhalb digitaler Bauwerksmodelle zu visualisieren. Ein wesentlicher Aspekt ist die direkte Kopplung der entsprechenden Untersuchungsmethoden bereits während des Messablaufs. Prototypisch wurde dazu der Messablauf des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens zur Bewertung der Homogenität von Bauwerksteilen als Modul in das digitale Bauwerksmodell aufgenommen. Diese prototypische Anbindung bildet die Grundlage zur Integration weiterer zerstörungsfreier und zerstörender Methoden der Bauzu-

standserfassung entsprechend dem Projektantrag. Es wird damit möglich weitere zerstörungsfreie Methoden der Bauzustandsanalyse zukünftige Implementierungen in einheitlicher und transparenter Form zu integrieren (vgl. Arbeitspaket 2.3).

Zur Lösung dieser Problemstellung wurde der Einsatz von motorisierten Tachymetern mit sichtbarem Laserstrahl gewählt Abbildung 62 (li.). Diese erlauben sowohl die Erfassung der Bauteiloberflächen, die Projektion von Punktpositionen auf die Oberflächen (Projektion der Messraster) als auch die automatische Detektion und Positionserfassung von Ultraschallgeber und -empfänger per Infrarot. Hierfür wurde vom Projektbereich Zerstörungsfreie Prüfung eine Ankoppelvorrichtung Abbildung 62 (re.) entworfen, die mit einem Miniprisma zur automatischen Detektion mit einem Tachymeter versehen wurde. Der Messvorgang erfolgt halbautomatisch. Das Umsetzen der Ankoppelvorrichtungen mit den Ultraschallsensoren wird manuell vorgenommen. Die Tachymeter geben die Messpunktpositionen vor und bestimmen die Entfernung zu den Ultraschallsensoren. Nach dem Messvorgang werden die gewonnenen Daten im Bauwerksmodell (BIM) abgelegt, analysiert und visualisiert.

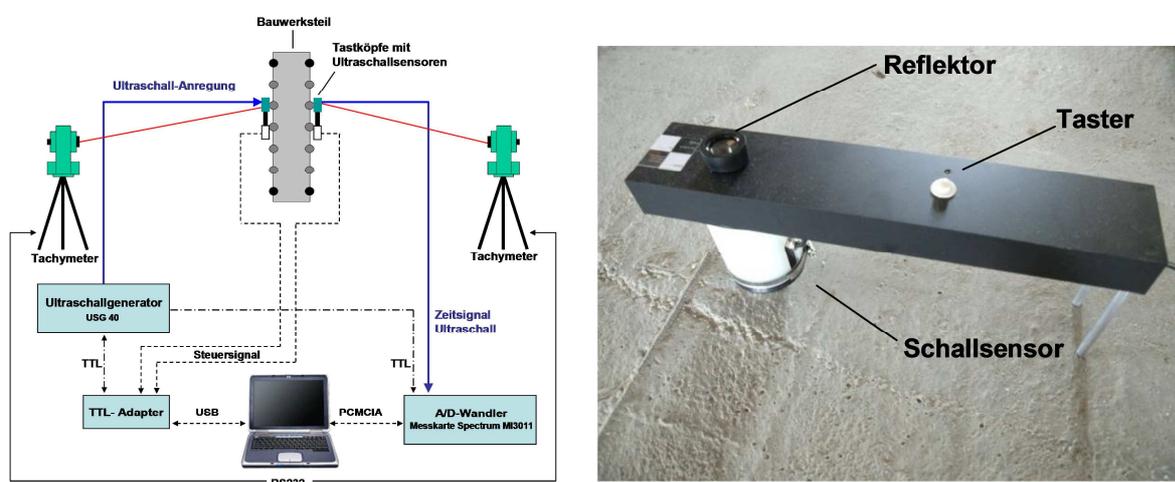


Abbildung 62: Taktiles Ultraschall-Transmissionsverfahren – Kooperation mit dem Projektbereich Informatik in der Architektur (InfAR) – Versuchsanordnung (li.) und Ankoppelvorrichtung (Tastkopf) mit Reflektor (Miniprisma), Ultraschallsensoren und Taster (re.)

Nach erfolgter Implementierung wurde die prototypische Anbindung an praktische Aufgabenstellungen validiert. Die Programmierung in C++-Bibliotheken zur freien modulweisen Bindung an verschiedene Applikationen (Messen, Darstellung, Auswertung, Speichern) wurde mit der Zielstellung durchgeführt, den Messprozess zu steuern. Für die erforderliche automatisierte Auswertung der Zeitsignale wurde ein komplexer Auswertalgorithmus [SCHS10] entwickelt, der selbst bei schlechten Signal/Rauschverhältnissen gute, reproduzierbare Ergebnisse liefert. Zusätzliche Qualitätskriterien zur Nachkontrolle der automatisierten Auswertung stellen vor allem bei Baustellenmessungen mit stark schwankender Signalqualität ein Qualitätssicherungssystem dar. Die vorgenommenen Untersuchungen offenbarten verschiedene Anforderungen, welche im Rahmen von Bauwerksmessung ergeben. Die prototypische Anbindung wurde dahingehend angepasst. Weiterhin wurde die Interaktivität zur Bestimmung von Parametern am Bauwerk grundlegend überarbeitet, um den Anforderungen einer praxisnahen Bauwerksmessung gerecht zu werden. Die Umgebungssituationen sind für jeden Messaufbau verschieden. Damit ändern sich für jede Messung die Randbedingungen. Jegliche Versuchsaufbauten, welche mehr oder weniger direkt mit dem Bauwerksmodell verbunden sind, müssen diesem Umstand Rechnung tragen. Die Versuchsaufbauten und die Behandlung der Messdaten sind folglich robust gegenüber der veränderlichen Umwelt zu

gestalten. Dies erfordert Möglichkeiten zur nachträglichen Auswertung direkt am Bauwerk gewonnener Messdaten. Dies kann zum Beispiel durch begrenzte Räumlichkeiten, Wetterbedingungen oder auch das Zeitfenster zum Messen erforderlich werden. Die prototypische Anbindung stellt Möglichkeiten zur umgehenden und auch zur späteren Auswertung zur Verfügung. Dazu werden die notwendigen Rohdaten im Bauwerksmodell gespeichert und das Nachmessen, Überschreiben und Ergänzen der Auswertungen ermöglicht. Weiterhin ist es notwendig, den Anwender auf fehlerbehaftete Messungen hinzuweisen. Dies kann sich beim taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahren beispielsweise aus ungünstigen Ankopplungsbedingungen der Ultraschallsensoren an das Bauwerksteil ergeben. Die damit verbundenen Fehlmessungen führen zur vermeidbaren Reduzierung der Datendichte. Aus diesen Gründen wurde der Auswertalgorithmus dahingehend erweitert, eine unzureichende Signalqualität im Hinblick auf das Signal-Rausch-Verhältnis zu detektieren. Auf dieser Basis wurde die Brauchbarkeit der Signale in der überwiegenden Mehrheit durchgeführter Laboruntersuchungen richtig bewertet. Die Signalqualität lässt sich weiterhin durch Signalstapelung von Mehrfachausführungen deutlich verbessern. Dies stellt die wesentliche Voraussetzung zur Durchführung von Bauwerksmessungen dar. Neben der Signalqualität wird auch die Messdauer beeinflusst. Dementsprechend wurden Untersuchungen zur optimalen Anzahl von Wiederholungen vorgenommen.

Die Messdurchführung der konzipierten Messmethode erfolgt nach folgender Verfahrensweise: Im ersten Schritt werden die zwei Tachymeter so positioniert, dass ein verdeckungsfreier, visueller Zugang zu den gegenüberliegenden Flächen des Untersuchungsbereiches besteht. Anschließend werden die Tachymeter im digitalen Bauwerksmodell über Passpunkte und den Bezug zu den vorhandenen Gebäudeoberflächen durch geodätische Ausgleichsrechnung so kalibriert, dass ihre Position im digitalen Modell mit der realen Position im Gebäude übereinstimmt. Anschließend werden die beiden gegenüberliegenden Flächen des Untersuchungsbereiches in der Software ausgewählt. Nun wird mit einem der beiden Tachymeter der Messrasterbereich definiert. Dazu werden auf einer Seite des Bauwerkteils mit dem sichtbaren Laser des Tachymeters zwei diagonal gegenüberliegende Eckpunkte des Messbereiches eingemessen. Die Software spannt in diesem Bereich mit einer frei wählbaren Spalten und Zeilenanzahl ein lotrechtes Messraster auf. Zur Kontrolle des Messrasters werden die Messpunktpositionen beidseitig mit dem sichtbaren Laser der Tachymeter punktweise projiziert und gegebenenfalls für weitere Messverfahren markiert. Nach der Definition des Messrasters erfolgt der eigentliche Messvorgang. Zur Positionierung der Ankoppelvorrückung zeigt der sichtbare Laser beider Tachymeter an den jeweiligen Messpunkt. Diese Positionsanzeige berücksichtigt, dass die Messmarke durch die Höhe des Geräts oberhalb der selektierten Wandfläche liegt. Von den Bearbeitern werden die Ankoppelvorrückungen auf beiden Seiten des Bauteils in Position gebracht und die Ultraschallsensoren angekoppelt. Durch die beidseitige Bestätigung des Ankoppelvorgangs durch ein ausgehendes Steuersignal wird der Messvorgang für dieses Messpunktpaar gestartet. Die Tachymeter schalten in den Infrarot Messmodus und suchen automatisch in einem definierten Winkelbereich (15°) nach den Miniprismen der Messgeräte. Da die Miniprismen direkt auf der Achse des Ultraschallsenders beziehungsweise Empfängers liegen, ist es auch dann möglich die Messposition genau zu bestimmen, wenn von der mit dem sichtbaren Laser angezeigten Position abgewichen wurde (z. B. bei Oberflächenschäden). An der jeweiligen Messpunktposition erfolgt die Ultraschalltransmission durch das Bauwerksteil. Der Ersteinsatz der Longitudinalwelle wird automatisch bestimmt und die zugehörige Zeitreihe sowie gemessenen Punktpositionen der Miniprismen werden im digitalen Bauwerksmodell abgelegt, und der Schallweg wird berechnet. Nach dem Erfassen aller Messpunktpositionen der gegenüberlie-

genden Messgitter kann jede Zeitreihe nachbewertet und falls notwendig die automatische Ersteinsatzsuche korrigiert werden (Ultraschallassistent, Abbildung 63). Das Ergebnis der auf der Basis des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens gewonnenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten ist im Auswertefenster (Messergebnis, Abbildung 63) dargestellt.

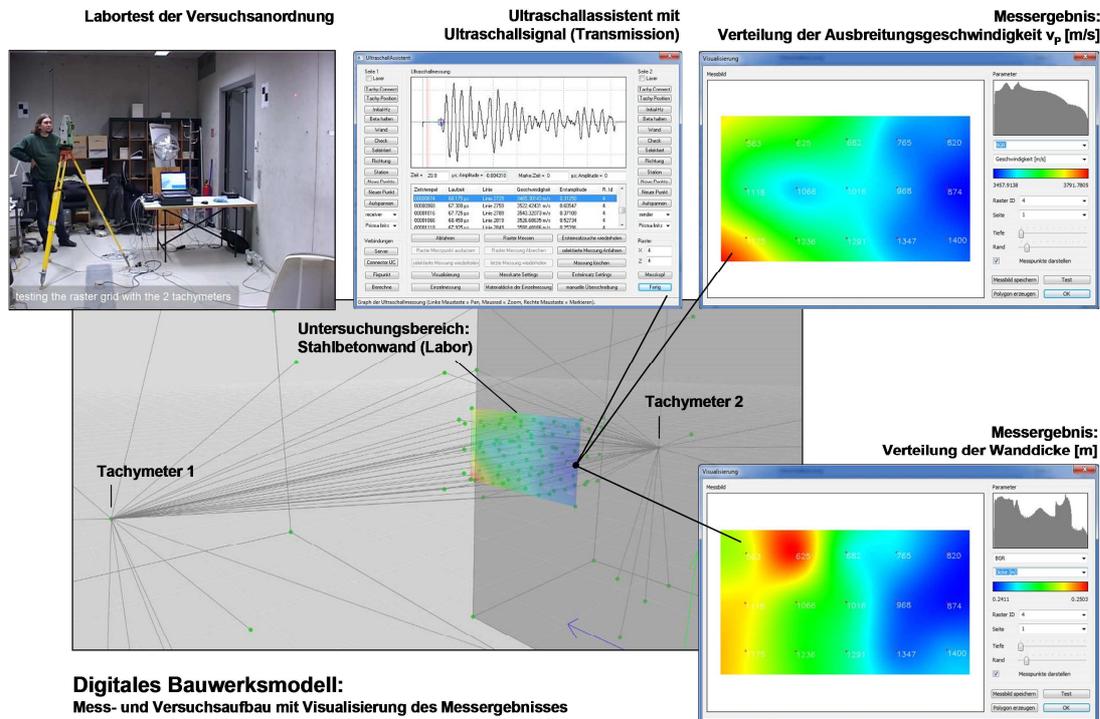


Abbildung 63: Verknüpfung des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens mit digitalen Methoden der Bauaufnahme und Visualisierung der Messdaten im digitalen Bauwerksmodell

Abbildung 63 zeigt den Versuchsaufbau und die gewonnenen Messergebnisse des entwickelten taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens im Rahmen von Labormessungen. Die Validierung der entwickelten Vorgehensweise zur Unterstützung des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens durch Techniken der Bauaufnahme, die integrierte Messdatenerfassung und Überführung der gewonnenen Messdaten in digitale Bauwerksmodelle unter praxisnahen Bedingungen erfolgten am Referenzobjekt Schloss Ponitz (vgl. Arbeitspaket 2.3).

Arbeitspaket 2.3 - Einbindung von Methoden der Bauzustandsanalyse

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Integration direkt am Bauwerk gewonnener Materialkenndaten unterschiedlichster Methoden der Bauzustandsanalyse in digitale Bauwerksmodelle, um die Messdaten verschiedener Verfahren zusammenzuführen. Dies zielt darauf ab, die Interpretierbarkeit des Bauzustandes durch Redundanz und damit durch das Nutzen der Vorteile der unterschiedlichen Messverfahren durch Verfahrenskombination zu erhöhen.

Zur Realisierung des Meilensteins 2 wurden verschiedene Verfahren der Bauzustandsanalyse klassifiziert und Anforderungen an deren Messgitter definiert. Die Visualisierung im Bauwerksmodell erfolgt in Abhängigkeit von den zu erwartenden Messdatensätzen. Die Anforderungen an den Detailgrad hinsichtlich Beprobungsstellen und Messgitterdichte können in Abhängigkeit von den Erfordernissen für jede Methode und für jeden Untersuchungsbereich im Bauwerksmodell vorgegeben werden.

Die angestrebte umfangreiche Auswertung erfordert die Erfassung unterschiedlicher Kennwerte und deren Kombination. Zur Integration von Messdatensätzen wurden während der Projektlaufzeit drei unterschiedliche Verfahrensweisen entwickelt:

1. direkte Integration von Messverfahren
2. API-Integration für bekannte Messdatenformate
3. Austauschformat

Die direkte Integration von Messverfahren wurde exemplarisch in Arbeitspaket 1.3 vorgenommen. Diese ist in Folge der starken Heterogenität verschiedener Verfahren und Messgeräteanschlüsse nicht in allen Fällen sinnvoll und umsetzbar. Der vergleichsweise große Entwicklungsaufwand der direkten Integration erschwert ein flexibles wissenschaftliches Arbeiten und Erforschen neuer Auswertelgorithmen. In der praktischen Anwendung wurde festgestellt, dass unterschiedliche, von Bauunternehmen genutzte Tools, einfach und ökonomisch eingebunden werden müssen. Für die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methodik ist das nachträgliche Einfügen von Messdaten in digitale Bauwerksmodelle eine weitere, wesentliche Voraussetzung. Zur Unterstützung unterschiedlicher Untersuchungsstrategien, welche nicht über die direkte Integration eingebunden sind, wurde ein Austauschformat (Metaformat, Abbildung 64) entwickelt. Dies bietet den Vorteil, durch Einzelmessungen entstandene Datensätze zu kombinieren und als Standardformat auszugeben. Durch das beschriebene Vorgehen können alternative Auswerteverfahren und Darstellungsweisen im Bauwerksmodell genutzt werden. Zur einfachen Erweiterung um neue Schnittstellen, das können neue Messverfahren, aber auch Darstellungsmöglichkeiten sein, existiert eine API. Damit ist es sehr einfach und auch im praktischen Gebrauch sehr leicht zu realisieren, Messdaten in das Bauwerksmodell zu überführen. Dieses flexible Integrieren vereinfacht somit auch wissenschaftliche Arbeit und ermöglicht die schnelle Entwicklung und Überprüfung neuer Ansätze.

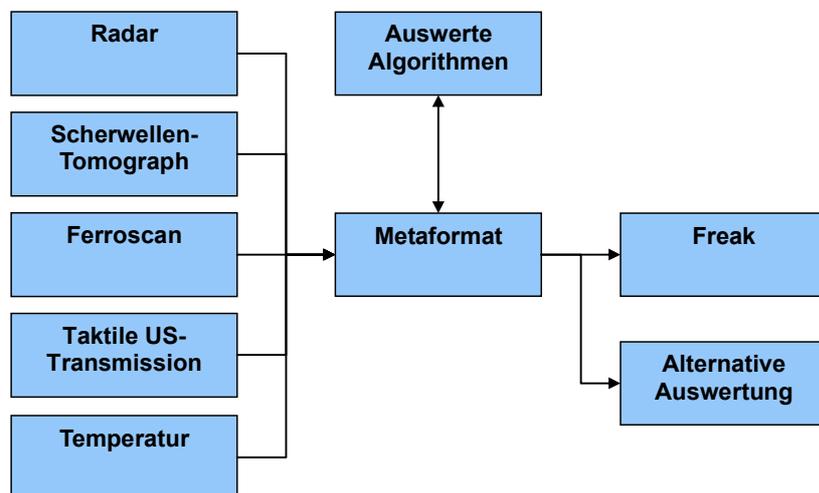


Abbildung 64: Schematische Übersicht zur Integration unterschiedlicher Methoden der Bauzustandsanalyse über ein entwickeltes Metaformat

Zusätzlich zum entwickelten Metaformat wurden API's für die Daten häufig verwendeter Messgeräte entwickelt. Diese stehen damit zwischen vollautomatischer (direkter) Integration und manueller Anbindung per Metaformat. Mit diesem semi-automatischem Vorgehen wird es sicherer und einfacher, Daten oft benutzter Verfahren in Bauwerksmodelle zu integrieren. Die praktische Anwendbarkeit zur Durchführung von Bauwerksmessungen in Verbindung mit

digitalen Bauwerksmodellen wurde dadurch erheblich gesteigert. Weiterhin wurden Möglichkeiten dazu geschaffen, die Messdaten mit zusätzlichen, detaillierten Angaben zu versehen. Neben Messzeit und Messbedingungen werden auch die Einstellungen der Messgeräte im Bauwerksmodell gespeichert. Durch sinnvolle Dialoge, welche zu jedem integrierten Datensatz angelegt werden können, wird der Anwender automatisch zu einer effizienten Qualitätssicherung und zur Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse angehalten.

Die Daten der Messgeräte liegen in lokalen Koordinatensystemen vor. Zur Überführung der Messdaten in das globale Koordinatensystem des digitalen Bauwerksmodells wurden sowohl das Metaformat als auch die semi-automatischen Anbindungen um Passpunkte erweitert. Damit wird es möglich, zu jedem Datensatz eine Anzahl an lokalen Punkten anzugeben, deren Ort im globalen System bekannt ist. Dies stellt die Grundlage zur lagerichtigen Darstellung von Datensätzen unterschiedlicher Methoden der Bauzustandsanalyse innerhalb des digitalen Bauwerksmodells dar.

Die Validierung der Einbindung komplementärer, zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden in digitale Bauwerksmodelle wurde an einem monolithischen Bauwerksteil aus Stahlbeton am Referenzobjekt Ponitz vorgenommen. Die Führung der Sensoren erfolgte manuell innerhalb eines definierten Untersuchungsbereiches. Dies gewährleistet die notwendige Flexibilität für praxisnahe Untersuchungen an unterschiedlichen Bauwerksteilen beziehungsweise -geometrien. Die Kombination beliebiger Volumen-, Bild- und Flächenmodellldaten in einer überlagerten grafischen Darstellung erfolgte auf der Grundlage von Volumenrendering. Zur lagerichtigen Visualisierung der gewonnenen Datensätze innerhalb des digitalen Bauwerksmodells wurde der Geometriebezug der jeweiligen Untersuchungsbereiche genutzt.

Die Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen exemplarisch die Kombination und überlagerte Visualisierung von Datensätzen der zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden taktiles Ultraschall-Transmissionsverfahren, Georadar und Ultraschall-Scherwellen-Tomografie am Referenzobjekt Ponitz. Die aus der Untersuchung des Betonunterzuges gewonnenen Messergebnisse lassen neben der Lage der Bewehrung und deren Betonüberdeckung erwartungsgemäß ein weitestgehend homogenes Betongefüge ohne wesentliche Inhomogenitäten erkennen.

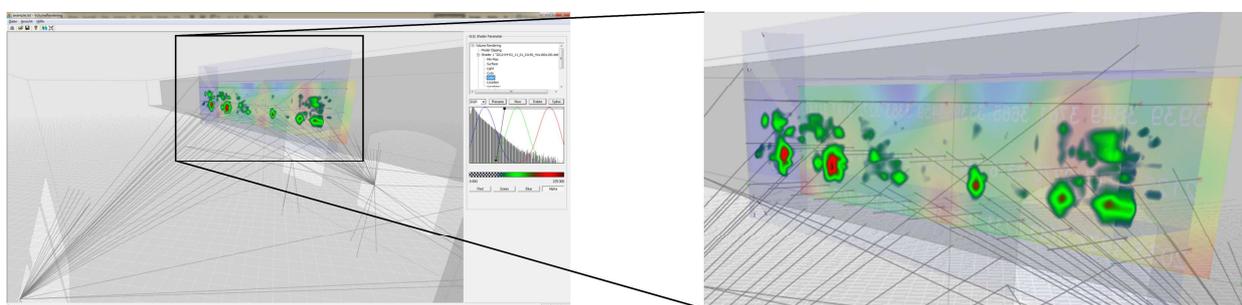


Abbildung 65: Überlagerung Ultraschall-Scherwellen-Tomografie – Taktiles Ultraschall-Transmissionsverfahren und Visualisierung als 3D-Volumenrendering im digitalen Bauwerksmodell [TON12b]

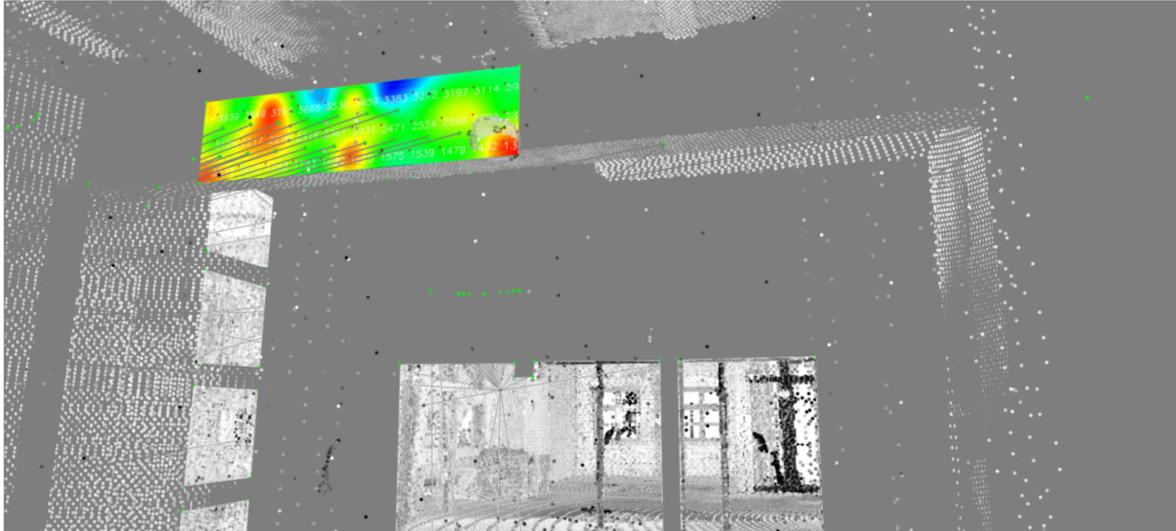


Abbildung 66: Ergebnisse des Taktile Ultraschall-Transmissionsverfahrens im digitalen Bauwerksmodell mit Gebäudegeometrie aus Laserscanning Punktwolke [TON12b]

Die entsprechend des Projektantrages entwickelte und prototypisch implementierte Vorgehensweise hat sich als praxistauglich erwiesen. Durch die Unterstützung von unterschiedlichen Untersuchungsstrategien wird eine wesentlich wirtschaftlichere Messdatenerfassung erreicht. Dies ermöglicht Fachplanern eine sinnvolle Interpretation komplementärer Messergebnisse und leistet einen wesentlichen Beitrag zur umfassenden Beurteilung von Bauwerksteilen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nach Abschluss des Projektes ist eine Übersicht über die gesamten Ausgaben des Projektes möglich (Abbildung 67). Von den bewilligten Mitteln in Höhe von 3.870.507 € wurden 3.668.515 € ausgegeben (entspricht 94,8%). Die Unterschreitung ist vor allem auf die geringeren Personalkosten zurückzuführen.

KG	Bezeichnung	bewilligt	verbraucht	%
812 817	Personal	1,906,631 €	1,779,430 €	93.3%
822	Stud. Hilfskräfte	240,300 €	230,224 €	95.8%
831	Geräte <410€	948 €	0 €	0.0%
835	Externe Aufträge	69,500 €	15,541 €	22.4%
843	Verbrauchsmaterial	65,800 €	77,670 €	118.0%
846	Reisekosten	90,108 €	71,508 €	79.4%
850	Geräte >410€	1,497,220 €	1,494,142 €	99.8%
	Gesamt	3,870,507 €	3,668,515 €	94.8%

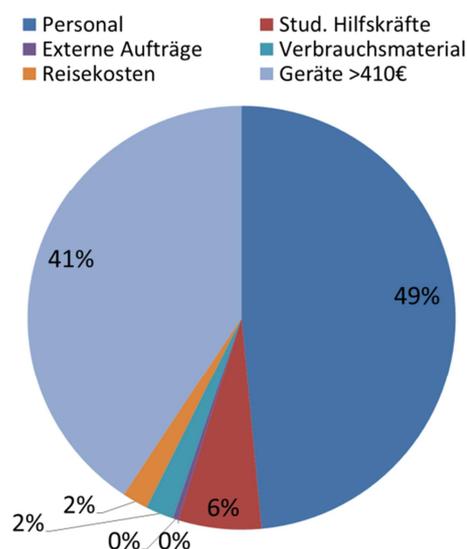


Abbildung 67: Ausgabenverteilung der gesamten Projektlaufzeit

2.2.1 Digitales Gebäudemodell und Aufmaßtechniken

Laserscanner

Als Ergänzung zu den bisherigen im Projekt eingesetzten Verfahren der geometrischen Bauaufnahme (Handaufmaß, Tachymetrie, Photogrammetrie) im Zuge der Nachinvestitionen ein Laserscanner FARO Photon LS 120 inklusive Rechnerhardware und Auswertesoftware angeschafft.

Das Verfahren des Laserscannings beruht auf dem schrittweisen dreidimensionalen Abtasten von Oberflächen. Im Ergebnis liegt eine Punktwolke von mehreren Millionen Punkten vor, welche die erfassten Oberflächen repräsentieren. Das Verfahren eignet sich insbesondere dort, wo komplexe Geometrie mit einer hohen Auflösung erfasst (bspw. bei der Aufnahme von Sakralbauten) sowie die Verweildauer vor Ort reduziert werden soll.

Innerhalb der Projektlaufzeit kam der Laserscanner in zahlreichen Projekten zum Einsatz. Gemeinsam mit der Professur Denkmalpflege und Baugeschichte wurde der Scanner insgesamt in drei Semestern in der Seminarreihe „Seid vermessen! – Techniken der Digitalen Bestandserfassung“ Studenten der Architektur nähergebracht. Als Referenzobjekte für diese Seminarreihe dienten unter anderem die Oberkirche in Arnstadt, die Kirche Sankt Peter und Paul in Weimar (Herderkirche) und das Renaissanceschloss Ponitz. Die Scans am Referenzobjekt Schloss Ponitz dienten neben der Vermittlung von Lehrinhalten zugleich der Grund-

lagenerfassung als Vorbereitung für die Evaluation verschiedener nuBau Forschungsergebnisse.

Des Weiteren wurden mehrere Scanprojekte gemeinsam mit dem Praxispartner bauwerk durchgeführt. Ziel war es, die Technik an konkreten Aufgabenstellungen aus der Praxis zu evaluieren, um auch Grenzen ausloten zu können. An folgenden Objekten kam der Scanner gemeinsam mit der Firma b.a.u.werk zum Einsatz: Georgenkirche Eisenach, Wartburg Eisenach, Lutherkirche Wittenberg und Wittumspalais Weimar. Neben den praktischen Erfahrungen beim Scanner, die die Nachwuchsforschungsgruppe sammeln konnte, wurde der Partner b.a.u.werk auch in der neuen Technik geschult, sodass die Firma mittlerweile das Aufgabenfeld des Laserscannings für sich gewinnen konnte und eigene Projekte bearbeitet.

Kooperationsplattform

Um den zentralen Aspekt der Zusammenarbeit zwischen den Partnerunternehmen und den Nachwuchsforschern des Projektes zu fördern, muss das virtuelle Gebäudemodell anschaulich dargestellt und mit diesem interagiert werden können. Hierzu wurde im Rahmen der Nachinvestitionen eine Kooperationsplattform in Form eines interaktiven Tisches mit Multi-Touch Display angeschafft.

Im Rahmen von Workshops und Seminaren wurde mit Studierenden der Fachrichtung Architektur und Medien Projekte durchgeführt, um die neuen Möglichkeiten der Interaktion und Präsentation von digitalem Content auf dem Tisch zu ergründen. Im Mittelpunkt standen insbesondere Multiuser-Szenarien im Entwurfs und Präsentationskontext. Dabei wurde u.a. folgende Fragestellungen behandelt: Wie kann der Entwurfsprozess durch einfache und anschauliche Interaktionsformen unterstützt beziehungsweise erweitert werden? Vereinfachen solche Techniken die synchrone, dislokale Zusammenarbeit, also das gemeinsame Gestalten an verschiedenen Orten? Oder liegt das Potential eher in der Nutzung für Präsentationen?

Darüber hinaus entstand die Master Arbeit „Augmented Urban Model“ der MediaArchitecture Studentin Katja Knecht mit Hilfe der Techniken des Tisches. Thema der Arbeit war die Verknüpfung von physischen und digitalen Bauwerksmodelle bei der Evaluation von Entwürfen durch computergestützte Analyse- und Simulationstechniken.

Entwicklung einer neuen Aufmaß-Gerätekonfiguration (EasyTachy)

Die Erfassung der Geometrie im Bereich der Bauaufnahme ist aus Sicht der Autoren bis heute ungenügend unterstützt. Auf der einen Seite existieren heute sehr genaue und teure Vermessungsgeräte mit komplexer Bedienung, mit welchen Vermesser sehr genaue Geometriemodelle von Bauwerken erstellen können. Ihnen fehlt jedoch in der Regel das architekturenspezifische Fachwissen. Auf der anderen Seite erfassen Fachplaner wie Statiker, Trockenbauer etc. lieber selbst die Geometrie, da sie selbst Verantwortung für ihre Planungsarbeiten übernehmen müssen. Dabei werden in der Regel einfachste Hilfsmittel zur Geometrieerfassung genutzt, wie etwa Gliedermaßstab und Wasserwaage. Man kann von einer „geteilten Welt“ der beiden Extreme sprechen. In der Vergangenheit konnte keine Resonanz bei Herstellern von Tachymetern bezüglich des Wunsches von vereinfachten Tachymetern registriert werden.

Im Rahmen des Antrages auf Nachinvestitionen wurde daher das Arbeitspaket 1.5 „Entwicklung einer neuen Aufmaß-Gerätekonzeption“ ergänzt, welches zum Ziel hat, den Fachplanern ein Werkzeug in die Hand zu geben, welches ihnen ermöglicht, schneller und exakter

die Geometrie zu ermitteln. Es muss einfach in der Anwendung und Bedienung sein, robust für den Einsatz vor Ort und darf einen gewissen Kostenrahmen nicht sprengen. Die zugrundeliegenden Ideen für das vereinfachte Tachymeter waren:

1. Reduzierung der Zeit für die Stationierung:

Dies soll mehrfach erreicht werden. Die Stehachse soll nicht mehr ausgerichtet werden müssen, sondern stattdessen soll in einem großen Wertebereich die Neigung der Stehachse mittels Neigungssensor bestimmt werden. Das Gerät wird auch nicht mehr bei den Messungen berührt, sondern ausschließlich mit Fernbedienung gesteuert. Es kann dadurch leichter ausfallen. Es besitzt kein Fernrohr, sondern stattdessen eine Motorzoomkamera. Somit muss nicht die Höhe des Messkopfes auf den Aufnehmenden eingerichtet werden. Durch all diese Punkte kann das Gerät als eine Einheit gebaut und als solche bei der Stationierung umgesetzt werden. Es wird nur das Verfahren der freien Stationierung genutzt.

2. Vereinfachung des Messvorgangs:

Im Bauaufmaß werden mittels Tachymeter vorrangig Punkte auf Raum- und Bauteiloberflächen reflektorlos erfasst. Die Punkte liegen meist weiter voneinander entfernt. In der Praxis erweist es sich dabei schwierig, den kleinen sichtbaren Ausschnitt beim Blick durch ein Fernrohr bei klassischen Tachymetern oder auf einem Display bei fernbedienten Tachymetern mit der Realität abzugleichen. Oft werden daher Tachymeter mit sichtbarem Laser erst durch direktes Drehen per Hand am Messkopf grob ausgerichtet und dann erfolgt erst bei Bedarf die genaue Ausrichtung per Fernrohr. Dabei muss jedoch das Tachymeter eine gewisse Eigenmasse besitzen, um am Standort stabil zu bleiben. Des Weiteren bereiten bestimmte Böden aufgrund des Eigengewichtes des Aufnehmenden Probleme durch Durchbiegung. Gerade bei diesen Arten von Böden sollte ein größerer Abstand zwischen Gerät und Aufnehmenden gehalten werden, da allein die Gewichtsverlagerung des Aufnehmenden in Gerätenähe bereits die Stehachse stark verändert. Dieses Problem ist bei rein fernbedienten Varianten nicht gegeben, aber die Grobausrichtung ist hierdurch entsprechend schwieriger und zeitaufwendiger. Daher wird ein anderes Verfahren zur Grobausrichtung vorgeschlagen, die Steuerung mittels eines grünen Lasers. Der Aufnehmende nutzt eine Art Laserpointer mit für das menschliche Auge besonders gut sichtbarem grünem Laser und zeigt mit diesem auf den Oberflächenpunkt, der erfasst werden soll. Mittels eines Doppelpunktschalters kann der Laser in der 1. Stufe eingeschaltet und mit der 2. Stufe die Messung ausgelöst werden (siehe Abbildung 68).

Somit wurde ein stark vereinfachtes Tachymeter entworfen. Das Tachymeter besteht nur noch aus einem motorisiertem Schwenk-Neige-Kopf mit Motorzoomkamera und Laserdistanzmesser sowie einem Verband von 5 einfachen unbeweglichen Kameras mit Weitwinkelobjektiven zur Laserpunkterfassung. Hinzu kommen eine Fernbedienung sowie ein Steuerungsgerät (z. B. Notebook, TabletPC etc., vorzugsweise mit Touchdisplay oder Stiftbedienung).

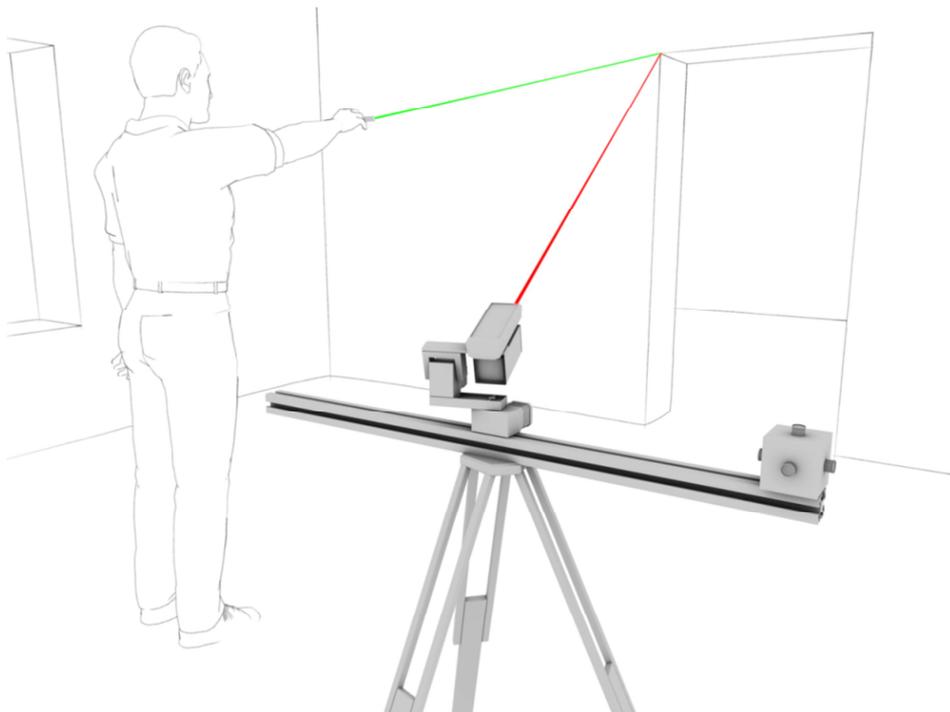


Abbildung 68: Arbeitsablauf: Der zu messende Punkt wird mittels grünem Laserpunkt vorgegeben, vom Kameraverbund erfasst und sofort vom Messkopf angefahren.

Derzeit wird an der Hard- und Software des vereinfachten Tachymeters gearbeitet. Abbildung 69 zeigt die derzeitige Hardware, bestehend aus Stativ, Schwenk-Neige-Kopf, Kamerarray, Motorzoomkamera, Distanzmesser und Laserfernsteuerung. Im Hintergrund ist die GUI einer Testanwendung zum Test der Lasererkennung zu sehen.

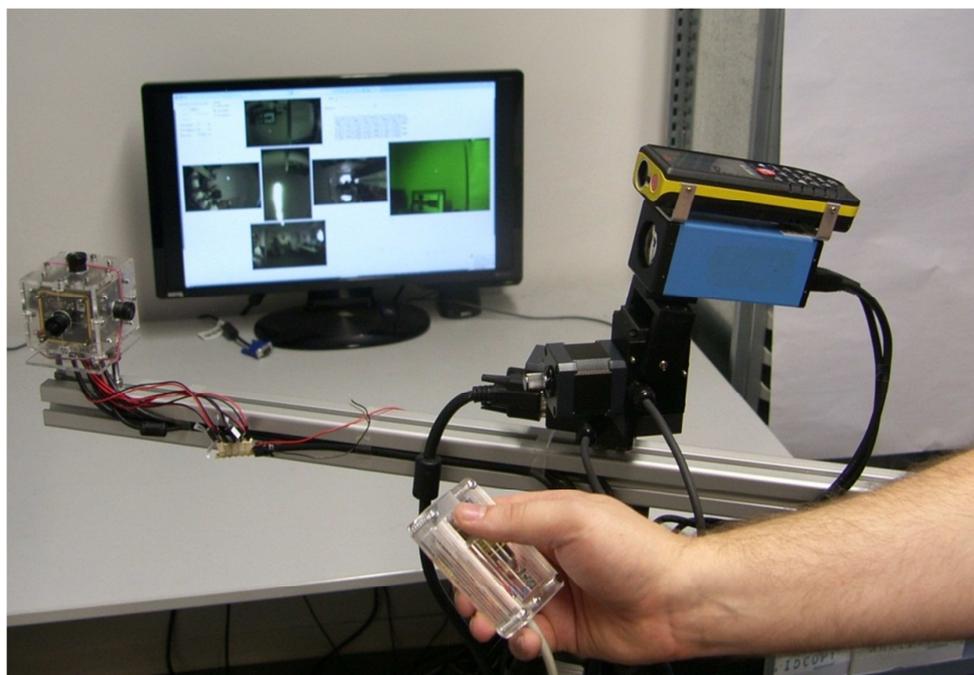


Abbildung 69: Versuchsaufbau: Schwenk-Neige-Einheit mit Messkopf (rechts), Kameraverbund (links) und Fernbedienung mit Laserpointer (vorn)

Ein wesentlicher Arbeitspunkt ist die robuste Erkennung dieses Laserpunktes auf Bauwerks-oberflächen durch die Kameras. Der Testaufbau ist von Seiten der Hardware von der Wunschkonfiguration noch weit entfernt. Während der Entstehung des Prototypen kam von

Leica Geosystems das Produkt 3D Disto auf den Markt, welches viele der genannten Eigenschaften mitbringt. Die Bedienung des Gerätes erfolgt durch Fernsteuerung per IR-Fernbedienung („Joystick“-Ansatz) oder per Display. Ideal wäre aus Sicht der Autoren eine Ergänzung dieses Systems um die Lasersteuerung. Daher konzentriert sich die derzeitige Arbeit auf diese Teilaufgabe.

2.2.2 Bauphysikalische Methoden

Akustischer Prüfstand

Die im Rahmen des Projektes angeschaffte akustische Messtechnik fand in zwei Einsatzbereichen Anwendung. Zum einen konnten bau-, raum- und psychoakustische Kenngrößen messtechnisch ermittelt werden. Zum anderen konnte Körperschall an schwingenden Gebäudeteilen gemessen werden. Für die Bau-, und Raumakustik kommen ein 4-kanaliges Akustikmesssystem „Soundbook“ sowie mehrere Messmikrofone zum Einsatz. Das Messsystem misst Luftschall in Gebäuden, hervorgerufen durch Luftschallquellen. Als Luftschallerreger dienen hier eine Kugelschallquelle sowie ein Subwoofer.

In der Bau- und Raumakustik kam das 4-kanalige Messsystem „Soundbook“ inklusive verschiedener Messmikrofone zum Einsatz. Mit diesem Messsystem kann der in Gebäuden emittierte Luftschall, hervorgerufen durch Luft- oder Körperschallquellen, gemessen und bewertet werden. Zur Bestimmung bauakustischer Kenngrößen der Luftschallübertragung diente als Luftschallerreger sowohl eine Kugelschallquelle als auch ein separater Subwoofer zur Erzeugung tieffrequenter Schallsignale. Komplettiert wurde die Messtechnik durch die Software Bastian zur Berechnung der Schallübertragung in Gebäuden.

Für Untersuchungen spezieller raumakustischer Parameter (zum Beispiel zur Beschreibung der Verständlichkeit gesprochener Worte) wurde eine Luftschallquelle mit der Richtcharakteristik und den Abstrahleigenschaften eines menschlichen Sprechers angeschafft. Zusätzlich dient ein akustischer Messkunstkopf zur binauralen Erfassung der raumakustischen Kenngrößen.

Zur Untersuchung und Charakterisierung von Körperschallquellen wurde im Rahmen des Projektes ein Messstand entwickelt. Dieser beinhaltet ein 32-kanaliges Schwingungsmesssystem zur messtechnischen Erfassung von verschiedenen Schwingungsparametern. Verschiedene, wandartige Plattenbauteile konnten hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Körperschallempfänger untersucht werden. Als Körperschallquellen dienten Impedanzhämmer sowie zwei elektrodynamische Shaker. Zur Erfassung der Strukturschwingungen dienten 1- und 3-dimensionale Beschleunigungssensoren.

Die Mess- und Analysegeräte der verschiedenen Hersteller wurden in den Arbeitspaketen 1.2 eingesetzt. Dabei sind einerseits In-situ-Messungen in verschiedenen Gebäuden vorgenommen wurden, um den Ist-Zustand mittels raum-sowie bauakustischer Parameter und Kenngrößen zu erfassen sowie die Schwingeeigenschaften von verschiedenen Bauteilen in unterschiedlichsten Gebäudetypen.

Klimalabor

Zur Validierung des Strömungssimulationsmodells wurde im Rahmen des Projektes ein Klimalabor eingerichtet. Mit den Abmessungen 3 x 3 x 2,44 m (L x B x H) eignet sich dieses zur Untersuchung üblicher Raumsituationen unter verschiedenen Randbedingungen, aber auch zur Erforschung von Detailfragen wie beispielsweise das den Menschen umgebende Mikro-

klima. Alle Oberflächen sowie die Lüftungsanlage sind separat ansteuerbar. Um den Einfluss des menschlichen Körpers zu berücksichtigen, wurde auf ein so genanntes thermisches Manikin zurückgegriffen. Dieses ist durch unter der Oberfläche verlaufende Heizdrähte in der Lage, eine dem Menschen ähnliche Hauttemperatur zu simulieren. Bei Bedarf kann zusätzlich eine künstliche, mittels Pumpen gesteuerte Atmung erzeugt werden. Zur Erfassung der Geschwindigkeit der Raumluftströmung wurde auf das zweidimensionale Verfahren Particle Streak Tracking (PST) zurückgegriffen. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die flächige Erfassung und Visualisierung der Strömungsgeschwindigkeit. Darüber hinaus ist der Eingriff in die Strömung durch den Messaufbau gering. Zur Visualisierung der Strömung leitet ein spezieller Generator Partikel (Blasen) in die Klimakammer. Die Kompensation der Masse der Blasenhaut erfolgt durch eine Heliumfüllung, was zur Gewichtsneutralität der etwa 3 mm großen Blasen und einem guten Folgeverhalten gegenüber der Luft führt. Das Strömungsfeld wird durch so genannte Lichtschnitte in einer Ebene gleichmäßig ausgeleuchtet. Um Streu- und Reflexionslicht zu verringern, wurde der den Lichtschnitt umgebende Bereich schwarz abgedeckt. Wird dieses Licht gepulst, ergeben die Tracerpartikel charakteristische Muster, die mit einer hochauflösenden Kamera festgehalten wurden. Abschließend erfolgt die Partikelspanalyse, bei der aus den Bildspuren respektive aus dem Abstand der Mittelpunkte zweier Spuren und Pulszeit die Partikelgeschwindigkeit berechnet wird.

Eine Thermografiekamera wurde zur Visualisierung der thermischen Bedingungen des den Körper umgebenden Mikroklimas angewendet, wofür eine Hilfsschicht in Form einer Schablone um das thermische Manikin errichtet wurde. Vorteil ist auch hier, wie beim bereits beschriebenen PST-Verfahren, die flächige Messung im Gegensatz zu genauen, aber lediglich punktuell messenden Sensoren.

Zur Messung der Lufttemperatur wurden NTC Sensorelemente eingesetzt. Diese stehen in Ergänzung zu den thermografischen Untersuchungen, deren Genauigkeit nur schwer beziffert werden kann. Des Weiteren konnte mit diesen Sensoren die Lufttemperatur an Stellen außerhalb der Schablone erfasst werden. Ergänzend zu den PST-Messungen wurde die Strömungsgeschwindigkeit mit bis zu neun Anemometern aufgezeichnet.

2.2.3 Ergänzungsbaustoffe

Mit dem FT-IR Mikroskop Nicolet iN10 und dem externen ATR-Modul Nicolet iS10 (Abbildung 70) ist die stoffliche Charakterisierung von Bau- und Werkstoffen möglich. Mittels der aufgenommenen Infra-Rot-Spektren können Bau- und Werkstoffe, insbesondere organische Stoffe anhand ihrer funktionellen Gruppen, identifiziert und analysiert werden. Daneben können aber auch beispielsweise die Reaktionskinetik (Reaktionsverlauf und Aushärtungsgrad) von Polymeren mit dieser Methode beschrieben werden. Ebenso ist die Bestimmung der Eindringtiefe von Bestandteilen der Ergänzungsmaterialien (z.B. Grundierungen) in einen Untergrund möglich. Den Haftverbund von Ergänzungsmaterialien beeinflussende Substanzen (z. B. Schalöle oder Salze) können mit dieser Methode ebenfalls detektiert, identifiziert sowie visualisiert werden. Mit dem IR-Mikroskop ist es möglich, einen ausgewählten Bereich einer Probe zu mikroskopieren und von einem darin markierten Teil ein IR-Spektrum aufzunehmen. Die mikroskopierten Probenanteile und deren Spektren werden gemeinsam digital gespeichert und ermöglichen so eine eindeutige Zuordnung. Zahlreiche Funktionen, wie z. B. Partikelanalysen, Mapping- oder Linescan-Funktionen sowie statistische Auswerterroutinen vervollständigen die Analysemöglichkeiten. Mittels der ATR-Einheit können Spektren ohne

aufwendige Probenpräparation einfach und schnell erstellt werden. Der Abgleich mit verschiedenen kommerziellen Datenbanken (z. B. Hummel und Aldrich) sowie mit eigenen Datenbanken ermöglicht die Identifikation eines Materials.



Abbildung 70: FT-IR Mikroskop Nicolet iN10 und dem externen ATR-Modul Nicolet iS10

Das VibroMet2 der Firma Buehler stellt einen äußerst wichtigen Baustein bei der Probenvorbereitung dar. Es können Proben für die Begutachtung im Lichtmikroskop, im REM und E-SEM sowie für das geplante FTIR-Mikroskop präpariert werden. Durch die kräftigen Schwingungen mit einstellbarer Amplitude sind in einigen Stunden perfekt polierte Oberflächen ohne weiteres Zutun herstellbar.



Abbildung 71: VibroMet2, Vibrationspoliergerät



Abbildung 72: Haftzugprüfgerät mit Prüfstempel, Bohrkronen und Akku-Bohrhammer

Das Haftzugmessgerät der Firma Freundl dient der Charakterisierung der Tragfähigkeit von Untergründen sowie der Bestimmung der Haftung von Ergänzungsmaterialien auf diversen Untergründen in Laborversuchen sowie an Verifikationsflächen realer Bauwerke. Dieses Gerät ist besonders handlich und wird über einen integrierten Akku betrieben, so dass das Vor-

handensein einer Stromquelle für die Nutzung vor Ort nicht notwendig ist. Zudem kann mit diesem Gerät bspw. problemlos auf Gerüsten hantiert werden. Bei diesem Haftzugmessgerät ist lediglich eine bedienende Person erforderlich. Definierte Laststeigerungsgeschwindigkeiten sind für die wissenschaftliche Auswertung dieser Kennwerte notwendig und mit diesem Gerät variabel einstellbar. Die maximal auf-bringbare Last beträgt 15 kN, wobei das Gerät ab 1/10 dieser Last in der Genauigkeitsklasse 1 arbeitet. Die Prüfung der Haftzugfestigkeit erfolgt vorwiegend an kreisrunden Prüfstempeln mit einem Durchmesser von 50 mm. Es können jedoch auch weiterhin quadratische und Stempel mit anderen Durchmessern verwendet werden. Ergänzt wird das Messgerät durch einen Akku-Bohrhammer, mit dem die erforderlichen Ringnuten auf der zu prüfenden Oberfläche hergestellt werden können. Dadurch wird die Netzunabhängigkeit des gesamten Messsystems gewährleistet.

Mit dem Particle Charge Detector (PCD) der Firma BTG Instruments AB bietet sich die Möglichkeit, das bereits vorhandene komplexe Messsystem zur Charakterisierung von Polymer/Zusatzmittel-Zement-Wechselwirkungen (DT 1200) sinnvoll zu ergänzen. Damit können erweiterte Untersuchungen zu den Polymer-Zement-Wechselwirkungen durchgeführt werden, um Reaktionen im frühen Stadium der Erhärtung zementgebundener Ergänzungsmaterialien eindeutig interpretieren zu können. Mit dem PCD können Oberflächenladungen von Partikeln in Polymerdispersionen sowie die Ladungsdichte der Flüssigphase ermittelt werden. Hiermit sollen die Stabilität und das Adsorptions- bzw. Agglomerationsverhalten von Polymerdispersionen in zementgebundenen Mörteln und Betonen beurteilt und zusätzliche Informationen zur Eigenschaftsentwicklung von PCC gewonnen werden.

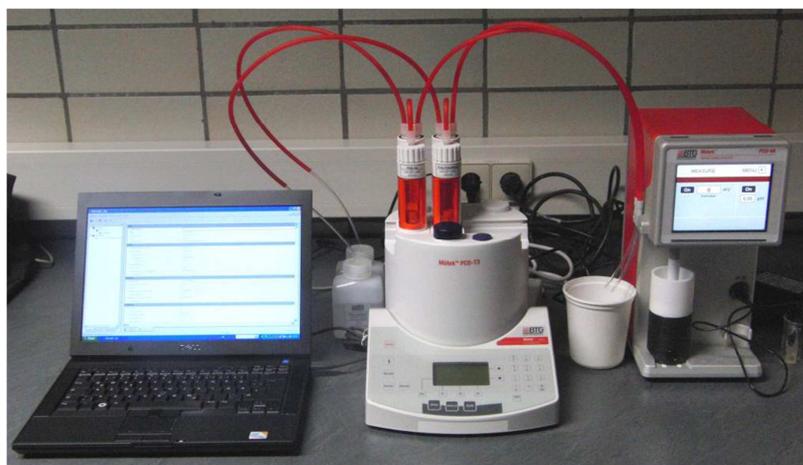


Abbildung 73: Particle Charge Detector (PCD) mit Auswerteeinheit



Abbildung 74: Fahrbarer Mischer Collomix XM-2

Der fahrbare Baustellenmischer "Collomix XM-2" (Abbildung 74) ist geeignet, Kleinmengen bis 25 l von Zement- und Reaktionsharzbeton anzumischen. Durch seine kleinen Abmessungen und sein geringes Gewicht ist er sehr gut geeignet, auf die Baustelle transportiert zu werden. Im Projekt wird er einerseits für das reproduzierbare Mischen beim Anlegen von Musterflächen an Verifikationsobjekten, andererseits zum Anmischen von Reaktionsharzbeton im Labor verwendet.

2.2.4 Zerstörungsfreie Prüfmethoden

Ultraschall-Scherwellen-Tomograf A 1040 (Abbildung 75)

Der Ultraschall-Scherwellen-Tomograf wurde in seiner Funktionsweise bereits vorgestellt und die an Bauwerksteilen durchgeführten Untersuchungen beschrieben. Entsprechende Publikationen sind zu finden: z. B. [ERF09] und [ERF11] sowie in den Tagungsbänden der nuBau-Tagungen. Abbildung 75 vermittelt einen Überblick zur Gerätetechnik, die aufgrund der drahtlosen Übertragung der Messdaten auf den Messrechner während des Messvorganges am Bauwerk eine praktikable Vorgehensweise ermöglicht.

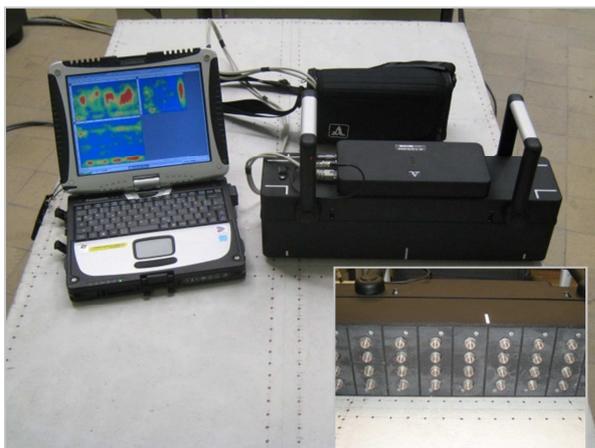


Abbildung 75: Ultraschall-Scherwellen-Tomograf: Messrechner, WLAN-Modul, Prüfkopffarray mit Detailansicht

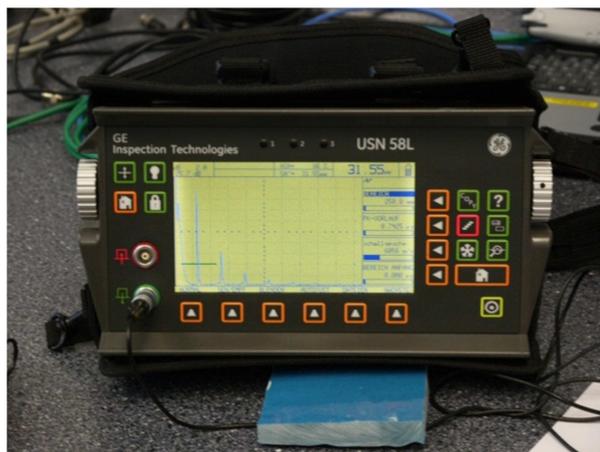


Abbildung 76: Schichtdickenmessung mit USN 58 L

Schichtdickenmessgerät USN 58 L (Abbildung 76)

Mit der Anschaffung des Ultraschallmessgerätes USN 58 L ausgestattet mit Prüfköpfen im Frequenzbereich von 2 bis 5 MHz wurde auf eine Prüfaufgabe mit dringender baupraktischer Relevanz seitens der ortsansässigen KMU reagiert. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zur Messmethode wurde als Aufgabenstellung für eine studentische Abschlussarbeit lehrstuhlübergreifend vergeben. Die Anschaffung des Messgerätes erfolgte im Rahmen der Nachinvestitionen, die Kosten betragen etwa 7 % der gesamten Investitionssumme.

Impuls-Georadar (Abbildung 77)

Neben der Anschaffung des Ultraschall-Scherwellen-Tomografen und der Weiterentwicklung des taktilen Ultraschall-Transmissionsverfahrens stellt das Georadar das wichtigste komplementäre Messverfahren für die Bauwerksdiagnose dar, um die Aufgabenstellung zur grafischen Überlagerung von Messdaten im digitalen Bauwerksmodell schrittweise zu lösen. Die Anschaffung des Messsystems wurde im Rahmen der Nachinvestition vorgenommen, der Kostenumfang beträgt etwa 24 % der gesamten Investitionssumme. In der Abbildung 77 links wird die Datenaufnahme mit einer 2,6 GHz-Antenne im Untersuchungsbereich eines Parkhausstellplatzes durch Abfahren eines Referenzmessgitters demonstriert, rechts in der Abbildung 77 erfolgt detailliert die Darstellung der Radarantenne mit Handwagen sowie das Datenmanagementsystem mit Monitor.

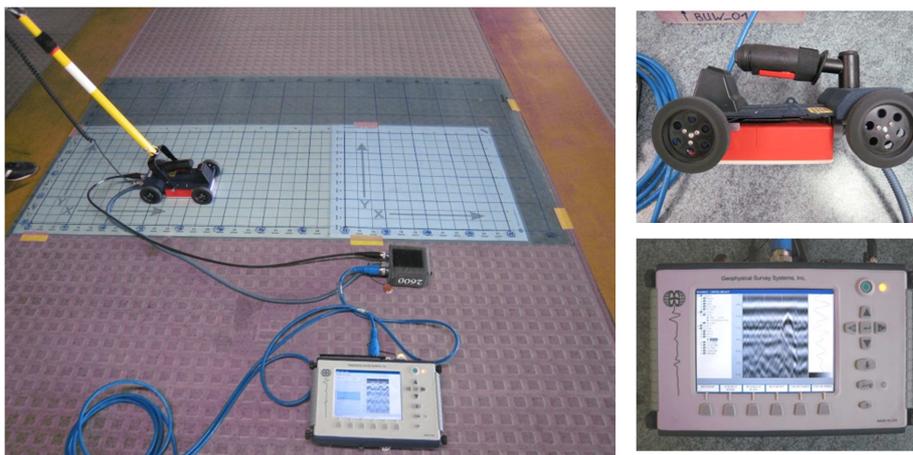


Abbildung 77: Impuls-Georadar, SIR 3000 mit Antenne 2,6 GHz und Datenerfassung (li.), Detailaufnahmen (re.)

Digitales Mikroskop Keyence VHX 600 mit Endoskopie-Funktion (Abbildung 77, li.)

Die Anschaffung des Keyence VHX 600 erfolgte im Rahmen der Nachinvestition, der Kostenumfang beträgt etwa 23 % der gesamten Investitionssumme. Dieses digitale Mikroskop stellt einen festen Bestandteil für Forschung und Lehre dar. Neben der stationären Anwendung im Labor (Abbildung 77, li.) ist aufgrund der hohen Mobilität des Messsystems und der vorhandenen Endoskopiefunktion eine gute Eignung für die Anwendung in der Bauwerksdiagnose gegeben.

Digitales Einpunkt-Vibrometer-System OFV-2500/OFV-505 + portabler PC von ACME (Abbildung 78 li. und re.)

Die praktizierten Anwendungen für das digitale Einpunkt-Vibrometer-System wurden im Arbeitspaket 1.3 behandelt. Die Anschaffungskosten betragen etwa 29 % der im Rahmen der Nachinvestitionen geplanten finanziellen Mittel.



Abbildung 78: Vibrometerkopf OFV 505 mit Stativ (li.) und Controller OFV 5000 (re.)

2.3 Verwendung der Geräte nach Auslaufen der Förderung

Die im Rahmen des Projektes angeschafften Geräte verbleiben in ihrer Gesamtheit an der Bauhaus-Universität Weimar. Viele Untersuchungsgeräte und entwickelten Messstände sind

schon jetzt Teil von Folgeprojekten bzw. Teil von Forschungsanträgen, die ohne das Vorhandensein der Geräte an der BUW nicht möglich gewesen wäre.

Alle angeschafften Geräte werden nach dem Förderzeitraum sowohl für weitere Forschungsvorhaben also auch für die Lehre an der Bauhaus-Universität Weimar eingesetzt, vor allem in den nuBau-initiierten Studiengängen. Es ist nicht geplant Geräte oder Teile von Geräte dem Bund oder Dritten zu überlassen.

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

2.4.1 Digitales Gebäudemodell

Die Arbeit von Fachplanern innerhalb eines Sanierungsprozesses ist zunehmend geprägt durch den Einsatz digitaler Techniken. Angefangen von der Erfassung des Ist-Zustandes mittels digitaler Messgeräte und TabletPC bis hin zu Planungs- und Simulationssoftware. Die Notwendigkeit der Zusammenführung der gewonnenen Daten in einem logischen Verbund wird somit immer größer. Innerhalb des Projektes wurde diese Fragestellung aufgegriffen und informationstechnische Methoden und Lösungen hierfür entwickelt und in Testmustern umgesetzt.

2.4.2 Bauphysikalische Methoden

Das derzeit einzige vorhandene Prognosekonzept zur Berechnung von Schalldruckpegeln infolge einer Körperschallanregung gemäß DIN EN 12354, Teil 5 ist in der aktuellen Form für Bauplaner nicht direkt nutzbar. Die Erstellung eines handhabbaren und damit auch für den Bauplaner nutzbaren Konzeptes ist zwingend erforderlich, da die Prognose derartige Schalldruckpegel aus bauaufsichtlicher Sicht gefordert ist. Messgeräte und Personal zur Erstellung eines solchen Verfahrens waren in Bezug auf das Forschungsvorhanden angemessen und notwendig.

Ein Vorhersagemodell zur Bestimmung der in ein Bauteil eingetragenen Feuchte ist notwendig, da durch Luftkonvektion bedeutend mehr Feuchtigkeit in eine Konstruktion eingetragen werden kann als durch Diffusion. Durch einen zu hohen Feuchtigkeitseintrag können aber Feuchteschäden entstehen. Dabei sind Holzleichtbaukonstruktionen besonders gefährdet. Die Untersuchungen in diesem Umfang sind notwendig, um Schäden mit Hilfe von genauen Prognosen vermeidbar zu machen.

Die Ansprüche sowohl des Nutzers als auch der Normung bezüglich der thermischen Behaglichkeit sind stark gestiegen. Die daraus resultierenden Anforderungen an das Raumklima, das sich verändernde Außenklima sowie das Ziel der Energieeffizienz stellen Fachplaner vor komplexe Aufgaben. Diesen Ansprüchen werden die bisher verwendeten Modelle und Ansätze zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit aus verschiedenen Gründen häufig nicht gerecht. Deutlich wird dies beispielsweise anhand von Beschwerde-Statistiken, welche einen Verbesserungsbedarf der klimatischen Verhältnisse in Gebäuden offen legen. Eine Verbesserung dieser Zustände würde nicht nur zu einer höheren Wohn- und Arbeitsqualität führen, sondern auch einen ökonomischen Nutzen durch einen geringeren Krankenstand, Einsparung von Kosten im Gesundheitssystem und eine erhöhte Produktivität haben.

2.4.3 Ergänzungsbaustoffe

Die in Abschnitt 2.1 genannten Ergebnisse, insbesondere deren Vielfältigkeit hinsichtlich der verschiedenen Forschungsschwerpunkte, konnten so nur durch die umfangreiche Förderung

durch die Initiative „InnoProfile“ erzielt werden. Die Unterschiedlichkeit der o.g. bearbeiteten Themen ergab sich aus den vielfältigen von KMU an die Nachwuchsforschergruppe herangetragenen Fragestellungen. Die Bearbeitung dieser oftmals neuen aus der Praxis stammenden Fragestellungen war nur im Rahmen des nuBau-Projektes möglich und führte in vielen Fällen zu neuen Forschungsansätzen.

Sowohl die Forschungsergebnisse als auch die Investitionen (bspw. Geräteanschaffung) wurden in die vorhandene Infrastruktur aufgenommen und finden in Forschung und Lehre Anwendung. Insbesondere das Profil und Erscheinungsbild der Bauhaus-Universität Weimar wurde durch die Arbeiten zu den Ergänzungsbaustoffen innerhalb und außerhalb gestärkt. Vor allem durch die im Rahmen des Projektes möglich gemachte umfangreiche Anschaffung von Geräten zur Herstellung und Untersuchung von Baustoff-Proben sowie analytischer Geräte wird die Bauhaus-Universität Weimar von KMU und Ingenieurbüros zunehmend als Dienstleister für baustoffliche Untersuchungen und Schadensanalysen wahrgenommen. Die angeschafften Geräte wurden und werden umfassend genutzt und tragen zusammen mit dem durch Forschung und Gerätenutzung gewonnenen Wissen weiter zur Profilbildung der Bauhaus-Universität Weimar bei.

2.4.4 Zerstörungsfreie Prüfmethoden

Die Anforderungen zur Bewältigung der einzelnen Teilaufgaben im Bereich der zerstörungsfreien Prüfmethoden waren hierbei sehr hoch gestellt, so dass die beantragten materiellen und finanziellen Ressourcen zur Bearbeitung und Lösung der einzelnen Arbeitspakete notwendig und angemessen waren.

Die Arbeit aller Beteiligten an einem Gesamtmodell und damit die Zusammenführung aller relevanten Daten führt nicht nur zu einer effektiveren Arbeitsweise, sondern allen voran zu mehr Planungssicherheit.

2.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

2.5.1 Digitales Gebäudemodell und Aufmaßtechniken

Die im Projekt gewonnenen wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse haben bereits zu folgenden Ergebnissen geführt beziehungsweise weiter hierzu beitragen:

- Nutzung neuer Techniken und Methoden im Gebäudeaufmaß seitens eines Praxispartners
- Fortführung der Entwicklung an der Experimentalplattform Freac im Rahmen der aus dem Projekt heraus gegründeten Firma „Decoding Spaces“, welche auch weiterhin eng mit der Bauhaus-Universität in anderen Forschungsprojekten (aktuell Fogeb) zusammenarbeiten wird.
- Mitarbeiter- und Wissenstransfer zu einem Praxispartner und damit Fortführung von Forschungsinhalten mit dem Ziel der Produktentwicklung und Markteinführung

2.5.2 Bauphysikalische Methoden

Während der Projektlaufzeit wurden Grundlagen und Ansätze für ein neues, an die DIN EN ISO 12354-5 angelehntes Prognosekonzept zur Ermittlung von Schalldruckpegeln infolge einer Körperschallanregung erarbeitet. Die aktuell vorhandene Datenmenge ist allerdings

noch nicht ausreichend, um ein hinreichend aussagekräftiges Modell zu erstellen. Um die bisherigen Daten zu verifizieren und das Prognosemodell anwendungsfähig auszubauen, sind noch weitere Untersuchungen geplant. Sobald ausreichend Messdaten zur Verfügung stehen, um daraus ein allgemeines Prognosekonzept abzuleiten, wird es erstmals möglich sein, dass dem Bauplaner ein Werkzeug zur Verfügung steht, mit dem Schalldruckpegel infolge von Körperschallquellen in Gebäuden prognostiziert werden können. Insbesondere bei Sanierungsmaßnahmen ist der Bedarf eines solchen Planungswerkzeuges gegeben, denn einerseits finden sich hier meist inhomogene Bauteilaufbauten und andererseits besteht gerade bei Sanierungsmaßnahmen der Bedarf, moderne technische Geräte im Gebäude nachzurüsten und zu installieren.

Das entwickelte Berechnungsmodell für den konvektiven Feuchtetransport ist ein praxisnahes Verfahren zur Bestimmung des konvektiven Feuchtetransportes durch Einzelleckagen. Damit werden die Auswirkungen von Einzelleckagen berechenbar und der Feuchteintrag in die Bauteilstruktur prognostizierbar. Das Berechnungsmodell kann nun zur Vorhersage beziehungsweise Vermeidung von Schäden (Schimmel, Energieverluste) genutzt werden. Weiterhin kann das Berechnungsmodell in bauphysikalischer Software wie z. B. WUFI, Delphin, HAM2D eingebunden werden. Das entwickelte Modell kann außerdem als Grundlage für Energieverlust- und weitere Hüllflächeninfiltrationsbilanzierungen durch Einzelleckagen verwendet werden

Der entwickelte und patentierte Prüfstand kann zur Charakterisierung und Prüfung von neuen Baumaterialien und Gebäudehüllkonstruktionen hinsichtlich der Luftdichtheit genutzt werden. Aber auch die Untersuchung von baufremden Materialien wie z. B. Textilien zur Bekleidung oder innovativen Membranstrukturen ist mit dem Prüfstand möglich.

2.5.3 Ergänzungsbaustoffe

Ziel der Arbeitsgruppe Materialentwicklung und -prüfung war die nutzerorientierte Entwicklung von Ergänzungsbaustoffen für die Instandsetzung von denkmalgeschützten Betonbauwerken und die Ergänzung von geschädigten Holzbauteilen.

Zunächst ist hier die Entwicklung eines polymermodifizierten selbstverdichtenden Betons (PSCC) zu nennen, welcher zur Instandsetzung insbesondere vertikaler Sichtbetonflächen an z. T. auch denkmalgeschützten Betonbauwerken eingesetzt wird. Mit diesem Material lässt sich insofern eine Marktlücke schließen, da bisherige Methoden und Instandsetzungsmörtel insbesondere dann an ihre Grenzen stoßen, wenn auch optische Anforderungen wie Schalungstexturen und Anpassungen an die Farbe des Originalbetons erfüllt werden müssen. Dies ist vor allem in der Denkmalpflege von Bedeutung.

Folgende Patente wurden für das Instandsetzungsmaterial „polymermodifizierter selbstverdichtender Beton“ erteilt:

- Bauhaus-Universität Weimar, Erfinder: K. A. Bode, A. Flohr, A. Dimmig-Osburg: Selbstverdichtender Beton, Verfahren zu dessen Herstellung und dessen Verwendung. Patentschrift DE 10 2010 011 713 B4 2011.12.08
- Bauhaus-Universität Weimar, Erfinder: K. A. Bode, A. Flohr, A. Dimmig-Osburg: Selbstverdichtende Betone, Verfahren zu deren Herstellung und Verwendung der selbstverdichtenden Betone zur Herstellung einer Betonschicht. Patentschrift DE 10 2010 061 818 B3 2011.12.29

- Bauhaus-Universität Weimar, Erfinder: K. A. Bode, A. Flohr, A. Dimmig-Osburg: Self-compressing concrete, method for the production thereof, and use of the self-compressing concrete for production a concrete layer. Internationale Patentanmeldung WO 2011/113694 A1, 09/2011

Von Seiten der Bauhaus-Universität Weimar besteht ein deutliches Vermarktungsinteresse, weshalb derzeit Verhandlungen mit verschiedenen potentiellen Verwertern geführt werden. Hinsichtlich Verarbeitung, Güteüberwachung und Prüfung des Materials wird bei erfolgreicher Patentverwertung von den Arbeitsgruppenmitgliedern ein großes wirtschaftliches Potential auch über die Projektlaufzeit hinaus gesehen.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse zum selbstverdichtenden polymermodifizierten Beton konnte bereits während der Projektlaufzeit ein weiteres AiF-ZIM-Verbundforschungsprojekt mit der TU-Ilmenau, der Tetra GmbH (Ilmenau) und der Bögel/Reitz GmbH (Alzenau) initiiert werden. Dabei geht es um die weiteren Anwendungsmöglichkeiten für selbstverdichtenden polymermodifizierten Beton, z. B. als Maschinenfundamente.

Ein weiteres AiF-ZIM-Projekt konnte aufgrund des u. a. durch das nuBau-Projekt erworbenen guten Rufes sowie der professionellen Geräteausstattung eingeworben werden. Dabei wird mit der regionalen Firma PolyCare GmbH aus Gehlberg die Entwicklung von Bauteilen aus Polymerbeton wissenschaftlich unterstützt.

Im Bearbeitungszeitraum des Projektes „Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung“ wurde an der Fakultät Bauingenieurwesen u. a. der Studiengang „Baustoffingenieurwissenschaft“ und der weiterbildende Studiengang „Sanierung und Rekonstruktion von Bauwerken“ entwickelt und etabliert. Die im Projekt erzielten Forschungsergebnisse fließen in den Lehrbetrieb ein. Es wird so dafür gesorgt, dass die Wissensvermittlung auf dem neuesten Stand ist und so eine sehr gute Nachwuchsqualifizierung gesichert werden kann. Die von Studierenden des o. g. Studienganges angefertigten Arbeiten trugen zum Erkenntnisgewinn des Projektes bei und führten darüber hinaus auch zu neuen Forschungsansätzen, worauf neue Projektanträge sowie Zusammenarbeiten mit KMU aufbauen.

Aufbauend auf die im Projekt erzielten Ergebnisse und gewonnenen Erfahrungen werden Zuwendungen im Förderprogramm „InnoProfile-Transfer“ beantragt. Neben der weiteren gezielten Anpassung der Instandsetzungsmaterialien an einzelne Anforderungen soll es dabei vor allem auch um angrenzende Bereiche wie vereinfachte Herstellungsmethoden sowie Verarbeitungsmethoden gehen. Auch hier ist der enge Kontakt zu KMU erforderlich, da solche Entwicklungen i.d.R. schrittweise und in enger Zusammenarbeit von Materialentwickler und Gerätehersteller ablaufen. Da im Rahmen der Initiative „InnoProfile-Transfer“ besonders auf solche Symbiosen Wert gelegt wird, kann auch hier wieder von positiven Auswirkungen für beide Seiten ausgegangen werden. Bestandserfassung und digitales Gebäudemodell.

2.5.4 Zerstörungsfreie Prüfmethoden

Die im Projekt gewonnenen wissenschaftlich-technischen Ergebnisse, insbesondere die Anwendung marktüblicher Geräte, die auf neuartigen Ansätzen der zerstörungsfreien Prüfung (zFP) beruhen, können wesentlich dazu beitragen:

- zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden zielführend für die speziellen Fragestellungen der Baustoffuntersuchung und Bausanierung einzusetzen

- die Leistungsgrenzen der zfP für die Erfüllung öffentlicher Aufgaben zu bewerten, beispielsweise für die Anwendung im Rahmen der objektbezogenen Schadensanalyse (O-SA)
- Kenntnisse über Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen am Standort Weimar zu etablieren und den Einsatz von zfP-Verfahren regional zu fördern
- die neuen Gerätetechnik und Erkenntnisse in Forschung und Lehre sowie in die Aus- und Weiterbildung von Sachverständigen einzubeziehen
- die gewonnenen Erkenntnisse zur Erfassung von Verfestigungsvorgängen zementgebundener Zementleime und Mörtel im Rahmen des Forschungsvorhabens zum Thema: „Erstarrungsverzögerer für die Waschbetonbauweise“ (Anwendung für Fahrbahndeckenbetone) gefördert von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) anzuwenden.

Als herausragendes Resultat kann die am Bauwerk verifizierte grafische Überlagerung von Untersuchungsergebnissen komplementärer Messverfahren (z. B. Ultraschall und Georadar) gewertet werden (siehe auch 2. nuBau-Tagung, Vortrag Tonn, Chr.; Tatarin, R.; Erfurt, W.; Schneider, D.: Verknüpfung zerstörungsfreier Methoden der Bauzustandsanalyse mit einem digitalen Gebäudemodell).

2.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

In dem Wissenschaftsbereich, der sich mit dem digitalen Gebäudemodell beschäftigt, ist von Seiten des Softwareherstellers Graphisoft als Bestandteil der CAAD-Software Archicad ein BIM-Server vorgestellt worden, welcher die parallele Bearbeitung eines zentral verwalteten Gebäudemodells von verschiedenen Clients ermöglicht. Der Arbeitsablauf ähnelt dabei dem des Client-Server Prinzips der im Projekt entwickelten Experimentalplattform FREAC.

Der Graphisoft BIM-Server stellt zentral ein digitales Gebäudemodell auf einem Server bereit. Die Clients greifen dezentral über LAN darauf zu und verwalten eine Referenz des Modells lokal auf dem Client-Rechner. Die Archicad Teamwork Funktionen sorgt bei Änderungen des Modellinhaltes für einen stetigen Abgleich mit dem zentralen Modell, indem jeweils nur die Änderungen übertragen werden. Alle weiteren verbundenen Clients werden über Modelländerungen informiert. Die Aktualisierung auf dem Client-Rechner erfolgt anschließend manuell. FREAC verfolgt einen ähnlichen Ansatz, indem zentral ein gemeinsam genutztes Modell auf einem Server vorgehalten wird. Im Gegensatz zum Archicad Teamwork erfolgt aber die Modellaktualisierung automatisch bei jedem Client ohne manuelles Zutun. Jeder Client „sieht“ ständig den aktuellen Modellzustand. Hinzu kommen Funktionalitäten der Verwaltung von Versionen und Varianten, welche beim Graphisoft BIM-Server nicht gegeben sind. Des Weiteren handelt es sich bei FREAC um ein dynamisches Konzept, welches es erlaubt, stetig neue Teilmodelle zu ergänzen beziehungsweise bestehende Teilmodelle anzupassen. Ein ähnliches Konzept wie der Graphisoft BIM-Server ist mittlerweile auch für das BIM-System Autodesk Revit verfügbar.

Das FREAC-Modell ist im Vergleich zu dem Graphisoft BIM-Server weiterentwickelt und weitaus nutzerfreundlicher. Seine automatische Varianten- und Versionskontrolle und vor

allem seine Systemoffenheit (Kompatibilität zu anderen System und Softwaremodulen) machen es gegenüber anderen Produkten am Markt einzigartig.

Bei der Konferenz „Erhaltung von Bauwerken“ 2011 verstärkte sich die Wahrnehmung, dass insbesondere die Erzeugung von Messrastern, das Einmessen von Messpunkten und die geometrische wie topologische Inbezugsetzung von Messdaten zum Bauwerk und zu Messdaten anderer Messverfahren ein bisher unbefriedigend gelöstes Aufgabengebiet darstellt. Dies bestärkte die weitere Konzentration auf dieses Aufgabengebiet.

Im Bereich der Bauphysik/Akustik wird die Problematik der Ermittlung von Schalldruckpegeln infolge einer Körperschallanregung in Gebäuden in Leichtbaukonstruktion auch am Institut Technologique FCBA in Bordeaux bearbeitet. Diese Forschergruppe versucht die Übertragung der Schwingungsenergie über die verschiedenen beteiligten Übertragungswege wesentlich tiefer im Detail zu untersuchen, als es gemäß dem Prognosekonzept nach DIN EN ISO 12354-5 gemacht wird. Dafür wurde ein SEA-Modell der Gebäudestruktur entwickelt, bei dem die Modellparameter sozusagen rückwärts aus Messdaten gewonnen werden. Dafür sind für jede denkbare Gebäudestruktur (Bautyp) sehr aufwendige Messungen notwendig, wofür ein eigens erstellter Messalgorithmus entwickelt wurde. Diese Forschergruppe kann damit sehr genau die verschiedenen Anteile der übertragenen Schalleistungen/Schallenergien für eine bestimmte Konstruktion angeben [KOU12]. Da der Ansatz dieser Forschergruppe allerdings wesentlich komplexer ist als das bisher verfügbare Prognosekonzept, ist dieses Modell aus baupraktischer Sicht für Bauplaner nicht anwendbar. Der Ansatz einer Vereinfachung der Herangehensweise, um für Planer in der Praxis einen handhabbares Werkzeug zu haben, verfolgt derzeit keine andere Forschungseinrichtung. Im Bereich des konvektiven Feuchtetransportes wird aktuell in Luxemburg an einem ähnlichen Versuchsstand zur Untersuchung von Fugen in Stahlbauhallen geforscht.

Für die weiteren Forschungsbereiche der Forschergruppe gilt, dass sich bei allen durchgeführten Recherchen keine Hinweise auf die Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung oder des Lösungsweges mit der gleichen beabsichtigten Zielstellung in einem anderen Forschungsvorhaben ergaben. An anderen Einrichtungen gewonnene Ergebnisse zu Möglichkeiten, Anwendungsgebieten und Einsatzgrenzen der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen wurden in die Bearbeitung der Aufgabenstellung einbezogen.

2.7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

2.7.1 Veröffentlichungen

- [ARN10] Arnold, J.; Kornadt, O.: Messtechnische Ermittlung von Übertragungsfunktionen in Massivbauten; in: proceedings DAGA 2011, Düsseldorf, 2011
- [ARN12] Arnold, J.; Wittstock, V.; Kornadt, O.: Charakterisierung von Gebäuden mittels Übertragungsfunktionen; in: proceedings DAGA 2012, Darmstadt, 2012
- [BAL12] Baldy, F.; Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Innovative Ergänzungsbaustoffe; 18. Ibausil, 12. - 15. September 2012, ISBN 978-3-00-034075-8, Weimar, S. 2-1214 - 2-1221, 2012
- [BAU10] Bauhaus-Universität Weimar, Erfinder: Schmidt J. und Kornadt O.: Verfahren und Untersuchungsvorrichtung zur Untersuchung eines konvektiven Feuchtetransports in einem Bauelement; Patent: DE102010031141, Germany, 09.07.2010
- [BER10a] Berg, M.; Bernau, R.; Erbe, T.; Bode, K. A.; Theska, R.: Primary shaping of smooth and level guideway planes for high precision applications; 10th International Conference euspen, Delft (Netherlands), 2010
- [BER10b] Berg, M.; Erbe, T.; Bernau, R.; Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.; Theska, R.: Realisierung von aerostatischen Führungsflächen auf hydraulisch gebundenem Beton durch Urformen; Thüringer Werkstofftag, TU Ilmenau, S. 200, 2010
- [BOD08a] Bode, K. A.: Baustoffe für die nutzerorientierte Bausanierung; nuBau - 1. Workshop, Weimar, CD, 2008
- [BOD08b] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Polymers in Cementitious Mixtures - More than an Adhesive between Aggregates and Cement Stone; Third Symposium on Durability of Sealants and Adhesives, 25.-26. June, Denver, CO (USA), 2008
- [BOD09a] Bode, K. A.: Aspekte der kohäsiven und adhäsiven Eigenschaften von PCC; Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2009
- [BOD09b] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Untersuchungen zu einfachen Möglichkeiten der Schwindreduzierung von Werk trockenmörteln und die Auswirkungen auf den Haftverbund; 17. Ibausil, 23.-26. September, ISBN 978-3-00-027265-3, Weimar, S. 2-1075 - 2-1080, 2009
- [BOD09c] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.; Flohr, A.; Pleißner, J.: Untersuchungen an polymermodifizierten SCC für dünne Instandsetzungsschichten: 17. Ibausil, ISBN 978-3-00-027265-3, Weimar, S. 2-0663 - 2-0668, 2009
- [BOD09d] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Untersuchungen zum Einfluss einer Salzbelastung auf den Haftverbund von PCC; Tagung Bauchemie, Freiberg, GdCh-Monographie Bd. 41, ISBN 978-936028-57-7, S. 215 – 216, 2009

- [BOD09e] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Polymermodifizierter SVB - Einsatz in der Betoninstandsetzung 1. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Weimar, ISBN 978-3-86068-421-4, Seite 131 - 137, 2010
- [BOD10a] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Zur Adhäsion und Kohäsion von PCC - Zusammenfassung von Untersuchungsergebnissen; 17. Ibausil, ISBN 978-3-00-027265-3, Weimar, S. 2-0143 - 2-0149, 2009
- [BOD10b] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Shrinkage properties of polymer-modified cement mortars (PCM); 13. International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC), 10.-12. February, Madeira Islands (Portugal), ISBN 978-972-99179-4-3, S. 89 - 95, 2010
- [BOD10c] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Polymermodifizierter selbstverdichtender Beton für die denkmalgerechte Betoninstandsetzung; Posterbeitrag, GDCH-Tagung Bauchemie, Dortmund, 2010
- [BOD11a] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Usage of polymers for polymer-modified self-compacting concrete (PSCC); 16th International Conference on Composite Structures - ICCS16, 28. - 30. June, Porto, Portugal, 2011
- [BOD11b] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Polymermodifizierter selbstverdichtender Beton in der Instandsetzung; in: WTA Schriftenreihe Heft 35, ISBN 978-3-937066-20-2, S. 135 – 152, 2011
- [BOD11c] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Shrinkage Properties of Polymer-Modified Cement Mortars (PCM); in: Key Engineering Materials Vol. 466 - Polymers in Concrete, Trans Tech Publications Ltd, Stafa-Zürich, Schweiz, ISBN 978-3-03785-008-4, S. 29 – 36, 2011
- [BOD11d] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.; Flohr, A.: Polymermodifizierter selbstverdichtender Beton für die denkmalgerechte Betoninstandsetzung; Posterbeitrag, Thüringer Werkstofftag 2011, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2011
- [BOD12a] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Polymer-modified Self-Compacting Concrete (PSCC) for Concrete repair; in: Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), ISBN 978-0-415-89952-9, Cape Town, South Africa, S. 333 - 334, 2012
- [BOD12b] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Einfluss von Polymermodifikationen auf das Brandverhalten von Beton; 18. ibausil, ISBN 978-3-00-034075-8, Weimar, S. 2-0735 - 2-0738, 2012
- [BOD12c] Bode, K. A.; Dimmig-Osburg, A.: Polymermodifizierter selbstverdichtender Beton (PSCC) - Eine Herausforderung, die weitreichende Chancen bietet. Beton 62, Heft 6, S. 216 – 221, 2012
- [BOD12d] Bode, K. A.; Baldy, F.; Dimmig-Osburg, A.: Entwicklung und Validierung von Ergänzungsbaustoffen 2. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Weimar, ISBN 978-3-86068-481-8, Seite 89 - 94, 2012

- [BRA09] Braunes, J.: nuBau – Methoden der nutzerorientierten Bausanierung; in: Forum Bauinformatik, Institut für Industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe, S. 237-245, 2009
- [BRA10a] Braunes, J.; Tatarin, R.; Thurow, T.: Mehr als Geometrie - Kombination von Bauwerkserfassung und Bauwerksdiagnostik auf Basis eines digitalen Gebäudemodells; in: Interdisziplinäres Kolloquium - Von Handaufmaß bis High Tech III, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2010
- [BRA10b] Braunes, J.: Laserscanner und Co in der Architekturausbildung - eine Anwenderstory, BauScan 2010, Hochschule Magdeburg – Stendal, 2010
- [BRA11] Braunes, J.; Thurow, T.: Ein dynamisches Bauwerksmodell für die Baudiagnostik; in: 2.Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Technische Akademie Esslingen, S. 265-270, 2011
- [BRA12a] Braunes J.; Thurow, T.: Dynamische Erweiterbarkeit von verteilten Bauwerksmodellen in Freac; in: 2. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Weimar, S. 133–137, ISBN / EAN 9783860684818, 2012
- [BRA12b] Braunes, J.: Erfahrungsbericht Laserscanning im Kontext des Forschungsprojektes nuBau; 5. Anwenderforum Projektbezogene Auswertestrategien beim Terrestrischen Laserscanning - Software, Methoden, Lösungen, Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2012
- [BUC09] Buchwald, A.; Tatarin, R.; Stephan, D.: Reaction progress of alkaline-activated metakaolin-ground granulated blast furnace slag blends; Journal of Materials Science 44, S. 5609–5617, 2009
- [DIM08] Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.; Flohr, A.: Investigations on the PCC-Microstructure after Mechanical Load; Restoration of Buildings and Monuments - Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege; Vol. 14; No. 2, S. 117 – 130, 2008
- [DIM09] Dimmig-Osburg, A.: Mikroskopie in der Schadensdiagnose an Beispielen aus dem Bereich Beton und Beschichtung; WTA-Schriftenreihe, Heft 31, ISBN 978-3-937066-11-0, S. 163 - 180, 2009
- [DIM10] Dimmig-Osburg, A.: Polymermodifizierte Mörtel (PCC) für die Sanierung; Europäischer Sanierungskalender 2010, Bauwerksdiagnostik und Sanierung, Beuth Verlag, 5, ISBN 978-3-410-17521-6, S. 255 - 268, 2010
- [DIM12] Dimmig-Osburg, A.: Innovationen mit polymermodifiziertem Beton (PCC); 18. ibausil, ISBN 978-3-00-034075-8, Weimar, 2012, S. 1-1177 - 1-1188, 2012
- [DON08a] Donath, D., Braunes, J., Fehlhaber, D., Tauscher, H.: Ein IFC Gebäudemodell für die CAAD integrierte Planung im Bestand; in: Forum Bauinformatik 2008 - Junge Wissenschaftler forschen, Institut für Bauinformatik, Fakultät Bauingenieurwesen, TU Dresden, S. 19-26, 2008
- [DON08b] Donath, D., Braunes, J., Fehlhaber, D., Tauscher, H.: Sketch-based building information capture for cost and risk assessment in the early stages of plan-

- ning in existing built contexts; in: Architecture 'in computro' - eCAADe conference, Antwerp, Belgium, S. 109-116, 2008
- [DON08c] Donath, D., Tauscher, H., Kornadt, O., Hoffmann, S.: A building information model - Coupling geometric information and building simulation in the early design stages of retrofitting; in: Computer Aided Building Physical Modeling, Proceedings of the Central European Regional IBPSA Conference, Bratislava 5 June, ISBN 978-80-227-2888-1, S. 26-29, 2008
- [ERF09] Erfurt, W.; Tatarin, R.: Bauwerksdiagnose unter Anwendung der Scherwellentomografie; in: Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung IBAUSIL, Weimar, 2009
- [ERF11] Erfurt, W.; Tatarin, R.; Ludwig, H.-M.: Antworten auf Fragestellungen zur Bauwerksdiagnose; in: 2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 2011
- [FLO08] Flohr, A.; Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.: Investigations on the PCC-Microstructure after Mechanical Load; 2. International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting - ICCRRR; Cape Town, South Africa, ISBN-13 978-0-415-46850-3, 2008
- [GOE09] Göttig, R., Braunes, J.: Building survey in combination with building information modelling for the architectural planning process; Proceedings of 27th eCAADe, Istanbul, Turkey, 2009
- [KOE10a] König R., Thurow T., Braunes J., Tonn C., Donath D., Schneider S.: Technische Einführung in FREAC: A Framework for Enhancing Research in Architectural Design and Communication; Arbeitspapier Informatik in der Architektur 02, Weimar, 2010
- [KOE10b] König, R., Thurow, T., Braunes, J., Tonn, C., Donath, D., Schneider, S.: FREAC: A Technical Introduction to a Framework for Enhancing Research in Architectural Design and Communication, eCAADe 2010, Zürich, Schweiz, 2010
- [KOR09] Kornadt, O.; Vogel, A.: Wärmeschutz und Wärmeversorgung von Bauwerken auf dem Mond; LunarBase - Bauen für ein Leben auf dem Mond, Kaiserslautern, 2009
- [KOR12] Kornadt, O.; Arnold, J.; Wittstock, V.; Scholl, W.: Prediction of the sound pressure level caused by technical equipment in buildings by analyzing transfer functions; in: proceedings INTERNOISE.2012, New York, 2012
- [NAC10] Nachwuchsforschergruppe "nuBau", ed.: Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung; Zwischenbericht, Weimar, 2010
- [PET03] Petzold, F., Wender, K., Donath, D., Weferling, U.: Das Bauwerk als Informationscontainer in den frühen Phasen der Bauaufnahme – Ausgangspunkt für die Projektentwicklung und Entwurfsformulierung; in: Proceedings of the International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering (IKM 2003), Weimar, 2003

- [SAL11] Salandin, A.; Arnold, J.; Kornadt, O.: Noise in an intensive care unit; in: Journal of the Acoustical Society of America 130, iss.6, p.3754-3760, 2010
- [SCHD10] Schneider, D.; Tatarin, R.; Erfurt, W.: Algorithmus zur automatischen Detektion des Ersteinsatzes von Ultraschallsignalen; in: 1. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Bauhaus-Universität Weimar, 2010
- [SCHM08] Schmidt J.; Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport in Bauteilen; 1. Workshop Nutzerorientierte Bausanierung, Bauhaus-Universität Weimar, 2008
- [SCHM10a] Schmidt J.; Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport durch Bauteilleckagen in Bestandsgebäuden; in: Nutzerorientierte Bausanierung, Weimar, S. 109–116, ISBN / EAN 9783860684214, 2010
- [SCHM10b] Schmidt J.; Kornadt O.: Convective Moisture Transfer through Walls and Wall Components; in: Aquametry 2010 Incl. Feuchtetag 2010, Weimar, S. 527–534, 2010
- [SCHM12a] Schmidt J.; Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport und daraus resultierende Bauschäden; Der Bausachverständige, issue 6, S. 22–28, 2012
- [SCHM12b] Schmidt J.; Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport durch die Gebäudehülle – neuartiges Messsystem zur Klärung relevanter Fragen. Der Bausachverständige, issue 4, S. 29–33, 2012
- [SCHM12c] Schmidt J.: Konvektiver Feuchtetransport und daraus resultierende Bauschäden; in: 2. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Weimar, 2012, S. 77–83, ISBN / EAN 9783860684818
- [SCHM12d] Schmidt J.; Kornadt O.: Convection through light weight timber constructions with mineral wool; in: World Academy of Science, Engineering and Technology, Stockholm, 67th ed, S. 731–738, ISBN / EAN 2010376X., 2012
- [SCHM12e] Schmidt J.; Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport durch Wände und Wandbauteile; Weimar, http://www.uni-weimar.de/cms/fileadmin/bauing/files/professuren/bauphysik/Poster/Plakat_Feuchtetransport.pdf, 2012
- [SCHM12f] Schmidt J.; Bode K. A.; Braunes J.; Thurow T.; Tatarin R.; Völker C.; Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung; Bausubstanz, 3rd, issue 1, S. 60–65, 2012
- [SCHS11] Schneider S.; Braunes J.; Thurow, T.; Koenig, R.; Tonn, C.: Entwerfen Versionieren: Probleme und Lösungsansätze für die Organisation verteilter Entwurfsprozesse; Arbeitspapiere Informatik in der Architektur 05, Weimar, 2011
- [TAT08a] Tatarin, R.; Erfurt, W.: Zerstörungsfreie Untersuchung von Bauwerksteilen mit akustischen Untersuchungsmethoden im Rahmen der Bauzustandsanalyse und bei der Sanierung von Bestandsbauwerken; in: Tagungsband zum ersten Workshop im Rahmen des Projektes InnoProfile nuBau, Weimar, CD-ROM, 2008

- [TAT08b] Tatarin, R.; Erfurt, W.: Beton verstehen - Untersuchungen mit Laser-Ultraschall während der Hydratation zementgebundener Baustoffe; Polytec InFocus – Magazin für Optische Messsysteme, Polytec GmbH Waldbronn, 2008
- [TAT08c] Tatarin, R.; Erfurt, W.: See Through Concrete – Laser-Based Ultrasonic Evaluation of Cement Hydration. Polytec InFocus – Optical Measurement Solutions, Polytec GmbH Waldbronn, 2008
- [TAT09] Tatarin, R.; Erfurt, W.: Zerstörungsfreie, berührungslose Untersuchung von zementgebundenen Baustoffen mit Laser-Ultraschall; in Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung ibausil, Weimar, 2009
- [TAT10] Tatarin, R.; Erfurt, W.: Ausgewählte zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden der Bauwerksdiagnose im Rahmen des Forschungsvorhabens nuBau; in: 1. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Bauhaus-Universität Weimar, 2010
- [THU10] Thurow, T.; Braunes, J.: Ein mitwachsendes Bauwerksmodell für die Bauaufnahme und Baudiagnostik; in: Nutzerorientierte Bausanierung. ISBN 978-3-86068-421-4, Verlag der Bauhaus-Universität Weimar, S. 15-19, 2010
- [TON08] Tonn, C.; Petzold, F.; Donath, D.: Put on Your Glasses and Press Right Mouse Button; AR-Based User Interaction Using Laser Pointer Tracking; in: Architecture 'in computro' - eCAADe conference; Antwerp, Belgium, S. 201-208, 2008
- [TON12a] Tonn, C.; Tatarin R.: Volumen Rendering in der Architektur: Überlagerung und Kombination von 3D Voxel Volumendaten mit 3D Gebäudemodellen; Arbeitspapiere Informatik in der Architektur 13, Weimar, 2012
- [TON12b] Tonn, C.; Tatarin, R.: FREAC: Volume Rendering in Architecture: Overlapping and combining 3d voxel volume data with 3d building models; eCAADe, Prag, 2012
- [TON12c] Tonn, C.; Tatarin, R.; Erfurt, W.; Schneider, D.: Verknüpfung zerstörungsfreier Methoden der Bauzustandsanalyse mit einem digitalen Gebäudemodell; in: 2. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Bauhaus-Universität Weimar, 2012
- [TON12d] Tonn, C.; Tatarin, R.; Schneider, D.; Erfurt, W.: Verknüpfung zerstörungsfreier Methoden der Bauzustandsanalyse mit einem digitalen Gebäudemodell; in: 18. Internationale Baustofftagung ibausil, Weimar, Tagungsband auf CD-ROM, 2012
- [VOE08] Voelker, C.; Kornadt, O.; Ostry, M.: Temperature reduction due to the application of phase change materials; Energy and Buildings 40 (5, S. 937-944), 2008
- [VOE09a] Voelker, C.; Kornadt, O.; Zhang, H.; Arens, E.: Thermal comfort in rooms with radiant cooling; in: Roomvent, Busan, Südkorea, S. 1035-1042, 2009

- [VOE09b] Voelker, C.; Kornadt, O.: Assessing thermal comfort using CFD along with a numerical thermal manikin; in: 4th IBPC, Istanbul, Türkei, S. 799-806, ISBN: 978-975-561-350-5, 2009
- [VOE09c] Voelker, C.; Kornadt, O.: Nutzerorientiertes Verfahren zur Bestimmung thermischer Behaglichkeit am Beispiel der Flächentemperierung; in: 6. Weimarer Bauphysiktag 2009, Weimar, 2009
- [VOE09d] Voelker, C.; Hoffmann, S.; Kornadt, O.; Arens, E.; Zhang, H.; Huizenga, C.: Heat and moisture transfer through clothing; in: Building Simulation 2009, Glasgow, Schottland, S. 1360-1366, 2009
- [VOE09e] Voelker, C.; Kornadt, O.: User-oriented analysis of thermal comfort using a computational manikin; in: XII. International Scientific Conference 2009, Brno, Tschechien, S. 191-194, ISBN: 978-80-7204-629-4, 2009
- [VOE10a] Voelker, C.: Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung; in: Nutzerorientierte Bausanierung 2010, Verlag der Bauhaus-Universität Weimar, S. 7-11. ISBN: 978-3-86068-421-4, 2010
- [VOE10b] Voelker, C.; Kornadt, O.: Indoor climate and thermal comfort with radiant floor cooling; in: clima, Antalya, Türkei, ISBN: 978-975-6907-14-6, 2010
- [VOE10c] Voelker, C.; Kornadt, O.: Simulation der thermischen Behaglichkeit; in: BauSim, Wien, S. 234-240, ISBN: 978-3-85437-314-8, 2010
- [VOE10d] Voelker, C.; Kornadt, O.: Simulation und Messung der thermischen Behaglichkeit; Bauphysik 32 (6), S. 365-372, 2010
- [VOE11a] Voelker, C.; Kornadt, O.: Thermal comfort – simulation and measurement using a thermal manikin; in: Roomvent, Trondheim, Norwegen, ISBN: 978-82-519-2812-0, 2011
- [VOE11b] Voelker, C.; Beckmann, J.; Kornadt, O.: Ergebnisse einer Großstudie über Nutzeranforderungen an Wohngebäude; Bauphysik 33 (3), S. 167-176, 2011
- [VOE11c] Voelker, C.; Kornadt, O.: Thermische Behaglichkeit - Simulation und Messung mit einem thermischen Manikin; in: Weimarer Bauphysiktagung, S. 47-49, ISBN: 978-3-86068-421-4, 2011
- [VOE11d] Voelker, C.; Kornadt, O.: Human body's micro-climate: Measurement and simulation; in: Building Simulation 2011, Sydney, Australien, S. 2048-2054. ISBN: 978-0-646-56510-1, 2011
- [VOE11e] Voelker, C.; Kornadt, O.: Simulation and measurement of thermal comfort and sensation; in: Indoor Air 2011, Austin (Tx), USA, ISBN: 978-0-9846855-0-9, 2011
- [VOE12a] Voelker, C.; Kornadt, O.: Automated coupling of CFD and human thermoregulation modelling considering local climatic parameters; in: 4th IBPC, Kyoto, Japan, 2012, S. 945-951, 2012

- [VOE12b] Voelker, C.; Kornadt, O.: User requirements for residential buildings: Results from a large scale study for the implementation into building certification systems; in: International Conference on Building Sustainability Assessment, Porto, Portugal, S. 165-173, ISBN: 978-989-95671-7-7, 2012
- [VOE13a] Voelker, C.; Beckmann, J.; Koehlmann, S.; Kornadt, O.: Occupant requirements in residential buildings – an empirical study and a theoretical model; Advances in Building Energy Research, doi: 10.1080/17512549.2012.749808., 2013
- [VOG09] Vogel, A.; Kornadt, O.: Bauphysikalische Diagnosemethoden; 2.Workshop im Rahmen des Projektes InnoProfile „nuBau“, Weimar, 2009
- [VOG10] Vogel, A.; Kornadt, O.: Bestimmung des U-Wertes in Bestandsgebäuden. 1. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Weimar, 2010
- [VOG11] Vogel, A.; Kornadt, O.; Wittstock, V.: Charakterisierung von Körperschallquellen Tauglichkeit der regulären Quellgrößen zur Anwendung der Körperschallprognose in plattenförmigen Strukturen; in: proceedings DAGA, Düsseldorf, 2011
- [VOG12a] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.: Zur Messung der Körperschalleistung auf Empfangsplatten; in: proceedings DAGA, Darmstadt, 2012
- [VOG12b] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.; Scholl, W.: Measurement and prediction of structure-borne sound power in plate-shaped building elements; in: proceedings INTERNOISE, New York, USA, 2012
- [VOG12c] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.; Scholl, W.: On the Measurement of Sound Power on Reception Plates; in: proceedings 19. ICSV, Vilnius, Litauen, 2012
- [VOG13] Vogel, A.; Wittstock, V.; Kornadt, O.; Scholl, W. (submitted): Application of the two-stage method on the characterization of different structure-borne sound sources and a moment actor, in proceedings INTERNOISE, Innsbruck, Austria, 2013

2.7.2 Studentische Abschlussarbeiten

- Albrecht, C.: Auswirkung von Sanierungsmaßnahmen an Innen- und Außenwänden auf den nach DIN EN 12354 berechneten Schallschutz. Bachelorarbeit, 2011
- Babilon, K.: Implementierung des Prognoseverfahrens nach DIN EN 12354-5 infolge der Körperschallanregung durch haustechnische Anlagen in ein Berechnungstool zur Ermittlung der Einflussbreite der Eingangsparameter auf das schallübertragungsverhalten von Massivbauten. Masterarbeit, 2012
- Bellmann, A.: Messtechnische Bestimmung akustischer Übertragungsfunktionen in Leichtbaukonstruktionen zur Kategorisierung von Konstruktionsweisen hinsichtlich typischer Übertragungsfunktionen. Masterarbeit, 2012
- Bergelt, S.; Frey J.; Köhlmann, S.; Köppe, C.; Lindner, S.: Kriterien der nutzerorientierten Bausanierung. Bachelorprojekt, 2010
- Bergelt, S: Wirkungsanalyse eines Forschungsprojektes, Masterarbeit, 2013
- Doose, S.: Untersuchungen zur Wirksamkeit eines schwindreduzierenden Zusatzmittels. Studienarbeit, 2012
- Eckart, C.; Heidrich, E.; Hufenreiter A.; Leinweber, J.; Ufermann, N.: Analyse zur Art, Verteilung und Häufigkeit von Schäden an Bodenbeschichtungen, Bachelorprojekt 2013
- Evers, L.; Heldt, N.: Noise Reduction – Vibrationen und Körperschall von Maschinen reduzieren. Studienprojekt, 2012
- Flemming, S.: Tracer-Gas-Technologie, Möglichkeiten der Leckageortung in Gebäuden unter Berücksichtigung nationaler und internationaler Normen. Bachelorarbeit, 2009
- Flemming, S.: Vergleichende Untersuchungen zur Kraffeinleitung bei der Messung akustischer Übertragungsfunktionen in Massivbauten. Studienarbeit, 2011
- Fröb, H.: Raumakustische Untersuchung, Bewertung und Verbesserung der Kirche St. Georg Jevenstedt. Masterarbeit, 2011
- Günther, Chr.: Evaluation eines laufenden Forschungsprojektes, Bachelorarbeit, 2010
- Günther, Chr.: Untersuchung von Vermarktungschancen der Dienstleistung "Zerstörungsfreie Prüfung der Schichtdicke von Kunststoffbeschichtungen auf Beton". Studienarbeit, 2011
- Günther, Chr.: Analyse der Kooperation von Unternehmen und Universität im Bereich FuE am Beispiel des Forschungsprojekts nuBau, Masterarbeit, 2013
- Hahn, S.: Beurteilung der Wirksamkeit von Oberflächenschutzsystemen mittels Kontaktwinkelmessung. Bachelorarbeit, 2010
- Hampe, M.: Optimierung eines PCC hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit für den Einsatz nach WHG. Diplomarbeit, 2009
- Hegner, T.: Energetische Sanierung eines Wohngebäudes von 1860, Bachelorarbeit, 2010

- Hofmann, A.: Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Blasenbildung von Beschichtungen auf Beton. Diplomarbeit, 2010
- Hofmann, M.: Untersuchungen des Raumklimas in Wohngebäuden im jahreszeitlichen Verlauf. Diplomarbeit, 2008
- Jung, C.: Vergleichende Betrachtung der Schalldämmwirkung thermoaktivierter Deckensysteme durch rechnerische und messtechnische Bestimmung des Trittschalldämmmaßes. Bachelorarbeit, 2009
- Jung, C.: Vergleichende Untersuchungen zur Messrichtung bei der Bestimmung akustischer Übertragungsfunktionen in Massivbauten. Studienarbeit, 2011
- Kelm, V.: Bestimmung des Austrocknungsverhaltens von PCC. Studienarbeit, 2012
- Kessel J.S: Vom Schutzrecht zur Marktreife. Ansätze für eine erfolgreiche Vermarktung universitärer Forschung am Beispiel des Patents „Verfahren und Untersuchungsvorrichtung zur Untersuchung eines konvektiven Feuchtetransports in einem Bauwerkelement, Bachelorarbeit, Prof. BWL im Bauwesen, 2012
- Kirsten, T.: Quantifizierung einer stofflichen und geometrischen Wärmebrücke. Studienarbeit, 2010
- Kleine, C.: Entwicklung eines Materials zur Ergänzung von Holzkonstruktionen. Kollegarbeit, 2012
- Kleine, C.: Untersuchungen zum Lösungsdruck bei osmotischer Blasenbildung von Beschichtungen auf Beton, Masterarbeit 2012.
- Koziczinski, B.: Modellierung des Wärme- und Feuchtigkeitstransports durch Kleidung, Masterarbeit, 2012
- Krischker, S.: Untersuchungen des Haftverbundes unterschiedlich hergestellter PCC-Sandwichelemente im Hinblick auf eine konstruktive Nutzung. Kollegarbeit, 2010
- Landmann, M.: Optimierung der Gesteinskörnungszusammensetzung polymer modifizierter Betone. Diplomarbeit, 2010
- Lichtenheld, T.: Untersuchung zum Einsatz von solaren Brauchwasseranlagen bei der Bestandssanierung. Bachelorarbeit, 2008
- Lichtenheld, T.: Messtechnische Untersuchung des Raumklimas bei Flächenkühlung. Masterarbeit, 2011
- Lüttkopf M., Entwicklung eines Leckagekatalogs. Bachelorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Prof. Bauphysik, 2012
- Lüttkopf M.: Pressure differences on building facades – A validation of existing pressure difference models. Studienarbeit, 2013
- Mämpel, S.: Messtechnische Untersuchung des den menschlichen Körper umgebenden Mikroklimas, Masterarbeit, 2010

- Mämpel, S.: Thermische Behaglichkeit in Gebäuden - thermophysiologische Beschreibung des Menschen unter besonderer Berücksichtigung des Blutkreislaufes und verschiedener thermischer Komfortkriterien. Bachelorarbeit, 2008
- Meglin, R.: Bestimmung der Schädigungsfront brandbelasteter Betone. Kollegiarbeit, 2011
- Meglin, R.: Bewertung der thermischen Behaglichkeit unter verschiedenen Raumkühlverfahren mittels CFD-Simulation. Bachelorarbeit, 2009
- Meglin, R.: Einfluss von Polymermodifikationen auf das Brandverhalten von Beton. Masterarbeit, 2011
- Müller, T.: Berechnung akustisch optimierter passivhausgeeigneter Wände in Brettstapelbauweise hinsichtlich tiefer Frequenzen. Masterarbeit, 2011
- Münster, J.: Kriterien der nutzerorientierten Bausanierung. Bachelorarbeit, 2009
- Nöppel, F.: Bestimmung des Einflusses von Holzergänzungsmörtel auf die Tragfähigkeit von Holzbalken, Studienarbeit 2013.
- Pankratz, M.: Charakterisierung mineralischer Baustoffe und polymerer Dispersionen mittels Zetapotentials. Bachelorarbeit, 2010
- Rachowski, T.: Charakterisierung von silikatischen und polymeren Baustoffen mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) und Thermogravimetrische Analyse (TGA). Studienarbeit, 2010
- Russow, R.: Embedded Systems Development. Forschungsprojekt, 2011
- Salbach, U.: Interaktion von Modelldispersionen mit Phasen der Zementklinker und der Zusatzstoffe. Masterarbeit, 2011
- Salbach, U.: Untersuchung der Wechselwirkung von reinen Phasen und Polymeren mittels Messung des Zetapotentials und der Leitfähigkeit. Kollegiarbeit, 2011
- Schellenberg, A.: Bruch- und Verformungseigenschaften modifizierter Betone für offene, stark frequentierte Tragkonstruktionen (Parkhäuser). Diplomarbeit, 2012
- Schirmer, U.: Charakterisierung der Alterung verschiedener Kunststoffe mittels dynamischer Differenzkalorimetrie. Bachelorarbeit, 2009
- Schmidt, R.: Vergleichende Untersuchung zwischen messtechnisch bestimmten Übertragungsfunktionen und dem Berechnungsmodell nach DIN EN 12354-5 hinsichtlich prognostizierter Schalldruckpegel infolge haustechnischer Anlagen. Masterarbeit 2011
- Schmoltdt, M.: Vergleichende Analyse thermischer Messprinzipien zur Volumenstrombestimmung in Rohrleitungen unterschiedlicher Querschnitte. Bachelorarbeit, 2008
- Schneider, S.: Entwerfen am Computer? Eine virtuelle Entwurfsplattform zur Erleichterung des Umgangs mit digitalen Werkzeugen. Diplomarbeit, 2009
- Schrader, C.: Marktanalyse und Marketingstrategie für die im Rahmen des Projektes nuBau entwickelten Verfahren zur Messung der Behaglichkeit. Masterarbeit, 2011

- Sommer, J.: Erstellung einer Matrix zur systematischen Material- und Methodenauswahl für die Instandsetzung von Bauteilen auf Basis von Literaturdaten, Bachelorarbeit 2012.
- Stöckigt, M.: Untersuchung zu Detektierbarkeit von Fehlstellen und Einbauteilen in Modellprobekörpern aus Beton unter Anwendung der Ultraschall-Schwerwellentomografie. Wissenschaftliches Kolleg "Eigenschaften und Beständigkeit von Bau- und Werkstoffen" 2008/09
- Sulze, M.: Erstellung eines bauphysikalischen Sanierungskataloges hinsichtlich sinnvoller energetischer Sanierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung des Schallschutzes. Diplomarbeit, 2008
- Ulrich, M.: Bruch und Verformungseigenschaften modifizierter Betone bei Zugbeanspruchung. Bachelorarbeit, 2011
- Ulrich, R.: Untersuchungen zur Beschichtungsfähigkeit frischer Betonoberflächen. Bachelorarbeit, 2011
- Vogel, A.: Beurteilung von In-situ-Messverfahren zur Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes einer Wand. Diplomarbeit, 2008
- Wieland, S.: Präzisionstraversierung als Ansteuerungsmethode eines Laser-Doppler-Anemometers bei der Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten im Rohr. Bachelorarbeit, 2009

2.7.3 Fremdliteratur

- [BUN91] Bunke, N.: Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 422, 1991
- [BOR10] Borsch-Laaks R., Radovic B., Schwaner K.: Akute Einsturzgefahr! Ein Feuchteschaden bei einem flach geneigten Dach mit Begrünung. Holzbau die neue quadriga, vol. 4, pp. 49–52, 2010
- [COS09] Costola D., Blocken B., and Hensen J.L.M.: Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. Building and Environment, 44(10):2027–2036, 2009.
- [DAH07] Dahms, A.; Rank, R.; Müller, D.: Enhanced Particle Streak Tracking system (PST) for two dimensional airflow pattern measurements in large planes. Roomvent, Helsinki, Finland, 2007
- [DIE02] Diederichs, U.; Haroske, G.; Krüger, W.; Mertzsch, O.: Tragelemente aus Polymerbeton. In: Bautechnik 79, Berlin: Ernst & Sohn, Heft 5, 2002
- [DIM05] Dimmig-Osburg, A.: Aspekte der Modellierung und ein neues Modell der Ausbildung der Mikrostruktur kunststoffmodifizierter Mörtel. New model for the formation of the microstructure of polymermodified mortar. BFT 71, Heft 10, S. 26 – 36, 2005
- [DIM06a] Dimmig-Osburg, A.; Pietsch, I.; Pakusch, J.: Polymerzusätze und ihr Einfluss auf die Zement-Mikrostruktur im frühen Stadium der Erhärtung, ZKG International 9, Heft 5, 2006
- [DIM06b] Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.: Polymer Cement Concrete (PCC) – Baustoffe mit Zukunft?! Beton 56, Heft 5, S. 194 – 197, 2006
- [DIM06c] Dimmig-Osburg, A., Kämpfer, W., Beck, P.: Neues Beschichtungssystem für die Ertüchtigung von Abwasserbauwerken. New coating system for upgrading sewer structures. In: BFT, S. 52 – 60, 2006
- [DIM07] Dimmig-Osburg, A.: Mikrostruktur von PCC - Einflüsse von Polymerkomponenten und Additiven. 6. Internationales Kolloquium Industrieböden, S. 655 – 667, 2007
- [DGFZP08] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung: B 10 - Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. Fassung Februar 2008
- [DIN1946-6] DIN 1946-6: Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- [DIN4108-7] DIN 4108-7: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011

- [DIN 4109] DIN 4109 Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise; Beuth Verlag GmbH, Berlin 1989
- [DIN-EN832] DIN EN 832: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs - Wohngebäude. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003
- [DIN EN 12354-5] DIN EN 12354 Teil 5: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 5: Installationsgeräusche. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009
- [DIN EN 12354-1] DIN EN 12354 Teil 1: Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000
- [DIN-EN13829] DIN EN 13829: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, Differenzdruckverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- [DIN-EN29053] DIN EN 29053 ISO 9053: Materialien für akustische Anwendungen. Bestimmung des Strömungswiderstandes. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993
- [DRE88] Drebin, R.A.; Carpenter, L.; Hanrahan, P.: Volume Rendering, Computer Graphics. SIGGRAPH88; New York, 1988
- [EIC05] Eicke-Hennig W.; Krönig, U.: 07 Energiesparinformation Hessen: Wind- und Luftdichtigkeit bei geneigten Dächern. Wissenswertes über die Luftdichtigkeit von Dächern. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden, 2005
- [ERF98] Erfurt, W.; Köhler, W.: Homogenitätsuntersuchungen an Betonbauwerken mittels Ultraschall. In: Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der BUW 44, Nr. 1/2, S. 127-132, 1998
- [ERF02] Erfurt, W.: Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit. Bauhaus-Universität Weimar, Finger-Institut für Baustoffkunde, Dissertation, 2002
- [ERF06] Erfurt, W.; Thurow, T.; Tatarin, R.: Untersuchungen zur Homogenität von Bauwerksteilen mit Lasertechniken. Bautechnik 83, Heft 1, S. 46-49, 2006
- [ERL04] Erler, K.: Verstärkung von Holzbalkendecken mit Polymerbeton. In: Tagungsband „Holz-Beton-Verbund“, HTWK Leipzig, DGfH München, Berlin: Bauwerk Verlag, 2004
- [FIS06] Fischer, H.M.; Späh, M.: Messung und Prognose der von Sanitäröbekten ausgehenden Körperschallübertragung. In: Abschlussbericht Bau- und Wohnforschung 2477, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 3-8167-7032-0, 2006
- [GEV00] Geving St., Uvsløkk S.: Moisture conditions in timber frame roof and wall structures. Test house measurements for verification of heat-, air and moisture transfer models. In: Project report 273 - 2000, Oslo, pp. 1-52, ISBN / EAN 8253607008, 2000

- [GIB07] Gibbs, B.M.; Qi, N.; Moorhouse, A.T.: A Practical Characterisation for Vibro-Acoustic Sources in Buildings. In: Acta Acoustica united with Acoustica, Vol.93, S.84-93, 2007
- [GRO00] Großkinsky Th., Gottschling H., Sedelbauer K., Leimer H.-P.: Durchfeuchtungsgefahr bei nicht ausgebauten Dachgeschossen," IPB-Mitteilung, 27th ed., vol. 379, pp. 1–2, 2000
- [GRO05] Große, C.U: Akustische Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Baustoffen und Bauteilen. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart, 2005
- [HAG08] Hagentoft C.-E., Kalagasidis A.S., Nilsson S.F., Thorin M.: Mould growth control in cold attics through adaptive ventilation. In: NSB2008, Brinellvägen, 2008
- [HAG04] Hagentoft C.-E. et. al.: Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components. Benchmarks for One-dimensional Cases. In: Journal of Thermal Envelope and Building Science, 27th ed., vol. 4, pp. 326–352, 2004
- [HÄU97] Häupl P.; Grunewald J.; Fechner H.; Stopp H.: Coupled heat air and moisture transfer in building structures; International Journal of Heat and Mass Transfer, 40th ed., vol. 7, S. 1633–1642, 1997
- [HENS08] Hens H., "Building Physics -- Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises," Ernst Sohn, ISBN / EAN 3433018413, 2008
- [HOF08] Hoffmann, S.; Kornadt, O.; Arens, E.; Zhang, H.; Huizenga, C.: Simulationssoftware zur Berechnung der lokalen Behaglichkeit in einem Raum. BauSim, Kassel, S. 44-46, 2008
- [JOK08] Jokisalo J., Kalamees T., Kurnitski J., Eskola L., Jokiranta K., Vinha J. A: Comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. Journal of Building Physics, 32(67):67–89, 2008.
- [JOK09] Jokisalo J., Kurnitski J., Korpi M., Kalamees T. and Vinha J.: Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. Building and Environment, 44nd ed., vol. 2, pp. 377–387, 2009
- [JUN07] Jung D.: Dichte Gebäudehülle, Thermografie und Wohnungslüftung. Die Luftdichtheit von Reinnräumen – Planung und Messung im klinischen Bereich. In: 2. Europäisches BlowerDoor–Symposium, 2007
- [KOH04] Kohl, C.: Krause, M.; Maierhofer, Ch.; Wöstmann, J.; Wiggenhauser, H.: Datenfusion komplementärer Impuls-Echo Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen. In: Tagungsband In: DACH-Jahrestagung 2004, Salzburg, Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), CD-ROM, V76, 2004

- [KOU12] Kouyoumji, J.-L.: Vibro-Acoustic Prediction of Flanking Transmission in light-weight timber framed construction using SEA. in: proceedings INTERNOISE, New York, 2012
- [HUG10] Hughes L.: Meeting residential space heating demand with wind-generated electricity. *Renewable Energy*, 35th ed., vol. 8, pp. 1765–1772, 2010
- [LEV88] Levoy, M.: Display of Surfaces from Volume Data. *IEEE CG&A*, 1988
- [LUH06] Luhmann, T.; Müller, Ch. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2006
- [LOG07] Logan P.: Final report on potential breaches of biosecurity at the Pirbright site. HSE Health and Safety Executive, Bootle, 2007
- [MAT07] Mattsson B.: Studies on Building Air Leakage - a transient pressurisation method, measurement and modeling. Dissertation, Göteborg, Chalmers University of Technology, 2007
- [MON11] Montoya M.I., Pastor E. and Planas E.: Air infiltration in Catalan dwellings and sealed rooms: An experimental study. *Building and Environment*, 46nd ed., vol. 10, pp. 2003–2011, 2011
- [MOR07] Moriske H.-J.: Schimmel, Fogging und weitere Innenraumprobleme. Können wir in Zukunft noch "gesund" wohnen und arbeiten? Fraunhofer IRB Verl., Stuttgart, ISBN / EAN 9783816771692, 2007
- [OHA95] Ohama, Y.: Handbook of Polymer-Modified Concrete and Mortars, Properties and Process Technology. Noyes Publication, 1995
- [ORM01] Orme M.: Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures. *Energy and Buildings*, 33rd, vol. 3, pp. 199–205, 2001
- [PET03] Petzold, F.; Wender, K.; Donath, D.; Weferling, U.: Das Bauwerk als Informationscontainer in den frühen Phasen der Bauaufnahme – Ausgangspunkt für die Projektentwicklung und Entwurfsformulierung. In: Gürlebeck, K.; Hempel, L.; Könke, C. (Hrsg.), Proceedings of the International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering (IKM 2003) June 10 - 12, Weimar, 2003
- [RIE04] Riesner K., Hagentoft C.-E. and Mainka G.W.: Condensation Risk within Loose Fill Insulation Due to Natural Convection in Vertical Cavities. In: Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX, International Conference, 2004
- [RIE09] Riesner K.: Vermeidungsstrategien für Tauwasser- und Schimmelpilzrisiken in Außenwandgefachen, verursacht durch natürliche Konvektion in der Dämmung. Abschlussbericht, Universität Rostock, 2009

- [ROL07] Rolfsmeier S.: Dichte Gebäudehülle, Thermografie und Wohnungslüftung. Luftdichtheitsmessungen in Laborräumen zur Sicherstellung geringer Feinstaubbelastungen. 2. Europäisches BlowerDoor-Symposium, Springe, 2007
- [SAM06] Samokrutov, A.; Shevaldykin, V.; Bobrov, V.; Kozlov, V.: Development of acoustic methods and production of modern digital devices and technologies for ultrasonic non-destructive testing. ULTRAGARSAS, Nr.4(61), 2006
- [SCHE07] Scherer, M.: Forschungsprojekt TOTAL. Bochum, www.ruhr-uni-bochum.de/geodaesie, 2007
- [SCHO09] Schoch T.: EnEV 2009 und DIN V 18599 - Nichtwohnbau. Kompaktdarstellung, Kommentar, Praxisbeispiele; Bauwerk, Berlin, ISBN/EAN 9783899321364, 2009
- [SCHOB05] K. U. Schober, K. Rautenstrauch, A. Dimmig-Osburg: Upgrading and Repair of Timber Structures with Polymer Concrete Facing and Strengthening. International Symposium on Wood Science and Technologies 50th Anniversary of The Japan Wood Research Society Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, November 27-30, 2005
- [SHA80] Shaw C.Y. Wind and temperatur induced pressure differentials and an equivalent pressure difference model for predicting air infiltration in schools. Ashrae Transactions, Vol. 86(Part 1):268–279, 1980.
- [SIN12] Sinnott D. and Dyer M., "Air-tightness field data for dwellings in Ireland," Building and Environment, 51st, pp. 269–275, 2012
- [STA10] CD-adapco: STAR-CCM+. Version 5.02.009, 2010
- [STI05] Schneider S.; Braunes J.; Thurow, T.; Koenig, R.; Tonn, C.: Entwerfen Versionieren: Probleme und Lösungsansätze für die Organisation verteilter Entwurfsprozesse; Arbeitspapiere Informatik in der Architektur 05, Weimar, 2011
- [SWA88] Swami M.V., Chandra S.: Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. Ashrae Transactions, 94:243–266, 1988
- [TAT05] Tatarin, R.; Thurow, T.; Erfurt, W.: Automatisierte Schallwegerfassung bei der Durchschallung von Bauwerksteilen. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 117, S. 73-79, 2005
- [TAT06a] Tatarin, R.; Erfurt, W.; Stark, J.: Untersuchungen mit Laser-Ultraschall während der Hydratation zementgebundener Baustoffe. In Tagungsband: 16. Internationale Baustofftagung IBAUSIL, Weimar, 2006
- [TAT06b] Tatarin, R.; Erfurt, W.: Laser-Based Ultrasonic Evaluation of Cement Hydration. In Proceedings: Advanced testing of fresh cementitious materials, Stuttgart, Germany, Reinhardt, H.-W. (Hrsg.) CD-ROM, 2006

- [THU02] Thurow, T.; Donath, D.; Weferling, U.; Petzold, P: Visionen einen mitwachsenden Geometriemodells für die computergestützte Bauaufnahme; in: Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Veröffentlichungen des SFB 524 "Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken", 2. Förderperiode, S. 159 – 167, 2003
- [THU04] Thurow, T.: Digitaler Architekturbestand – Untersuchungen zur computergestützten, schrittweisen Erfassung und Abbildung der Geometrie von Gebäuden im Kontext der planungsrelevanten Bauaufnahme; Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2004
- [VOE06] Voelker, C.; Kornadt, O.: Experimentelle und numerische Untersuchung zur Reduktion sommerlicher Überhitzung durch Phasenübergangsmaterialien; wksb (56), S.3-9, 2006
- [WIG06] Wiggerhauser, H.: Bauwerksdiagnose mit zerstörungsfreien Prüfverfahren – Einführung und neue Entwicklungen. Fachtagung Bauwerksdiagnose, Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, Berlin, 2006
- [YIJ02] Yi J.; Qingyan Ch.: Effect of wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation; Building and Environment, 37th ed., S. 379–386, 2002
- [YOU12] Younes Ch., Shdid C.A., Bitsuamlak G.: Air infiltration through building envelopes: A review. Journal of Building Physics, 35th ed., vol. 3, pp. 267–302, 2012
- [ZIR09] Zirkelbach D., Künzel H.M., Schafaczek B., Borsch-Laaks R.: Dampfkongvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. In: 4th International Symposium on Building and Ductwork Air tightness, 30th AIVC Conference Trends in High Performance Buildings and the Role of Ventilation. Berlin, 2009