

derivation of the matrix layer calculation, American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers Transactions 100 (1) (1994) 1065–1072.

- [12] Roos, A., Polato, P., van Nijnatten, P. A., Hutchins, M. G., Olive, F., Anderson, C., Angular-dependent optical properties of low-e and solar control windows: Simulations versus measurements, Solar Energy 69, Supplement 6 (0) (2001), 15 – 26.
- [13] McNeil, A., Jonsson, C., Appelfeld, D., Ward, G., Lee, E., A validation of a ray-tracing tool used to generate bi-directional scattering distribution functions for complex fenestration systems, Solar Energy 98, Part C (0) (2013), 404 – 414.
- [14] Bueno, B., Cejudo-Lopez, J.M., Kuhn, T.E., A general method for the evaluation of the thermal impact of complex fenestration systems in building zones, Energy and Buildings 155 (2017), 43–53.

Kontakt:

Fraunhofer ISE
Energy-Efficient Buildings

Dr. Helen Rose Wilson
helen.rose.wilson@ise.fraunhofer.de

Dr. Bruno Bueno
bruno.bueno@ise.fraunhofer.de

DITF
Technologieintegration

Dipl.-Ing. Bastian Baesch
Bastian.Baesch@ditf.de

Dipl.-Ing. (FH) Holger Illg
Holger.Illg@ditf.de

4.7 Kurzzeitmessung: Gtom – Energetische Analyse von Gebäudehüllen

Die energetische Bewertung von Bestandsgebäuden erfolgt in der Praxis heute in der Regel mithilfe der Begehung eines Gebäudes durch einen Experten. Er erfasst dabei die Bauteile sowie zentrale Eigenschaften der Gebäudetechnik und ordnet statische Nutzungskennwerte zu. Die bauphysikalischen Eigenschaften, wie die Lambda- oder U-Werte, werden in der Regel unter der Verwendung von Tabellenwerten oder einer Typologie ermittelt. Im Wohngebäudebereich ist hierfür die TABULA-Typologie weit verbreitet. Darüber hinaus werden Materialdatenbanken und Erfahrungswerte für die Schätzung der genauen Wandaufbauten verwendet. Die Nutzung von Typologiewerten ist ein schnelles und günstiges Verfahren, das auch die energetische Bewertung einer größeren Anzahl an Gebäuden in kurzer Zeit ermöglicht, erfasst aber nicht die individuellen Eigenschaften eines zu sanierenden Gebäudes. Begehungen mit weitergehenden Untersuchungen bedeuten insbesondere bei größeren Gebäuden einen hohen Zeit- sowie Personalaufwand und dadurch hohe Kosten. Die Qualität der energetischen Bewertung ist dabei stark von der Erfahrung des jeweiligen Experten sowie der bauwerksindividuellen Diskrepanz zwischen Planung und Ausführung abhängig. Ferner können zerstörungsfrei kaum detailliertere Informationen über nicht zugängliche Strukturen gewonnen werden.

Im Projekt Gtom werden daher Messverfahren erprobt und weiterentwickelt, die dazu dienen sollen, in kurzer Zeit die bauwerksindividuellen geometri-

schen, physikalischen und strukturellen Eigenschaften eines Gebäudes zu erfassen. Auf diese Weise soll zu überschaubaren Kosten eine wesentlich besser auf das individuelle Bauwerk angepasste Sanierungsplanung durchgeführt werden können. Perspektivisch können dieselben Messverfahren auch zur Qualitätskontrolle nach Sanierungen und bei Neubauten eingesetzt werden.

4.7.1 Merkmale der Testmethode

Die im Projekt Gtom angewendeten und weiterentwickelten Messverfahren haben gemeinsam, dass sie berührungslos und zerstörungsfrei arbeiten. Sie werden zum Teil seit vielen Jahren und Jahrzehnten im Bereich der Fernerkundung und Sicherheitstechnik entwickelt, aber auch neue Verfahren für diese Anwendung werden erforscht. In diesem Projekt werden sie nun zusammengebracht und darauf untersucht, welche Informationen sie über bautechnisch und energetisch relevante Eigenschaften von Gebäudehüllen liefern können. Die Vielzahl von Verfahren reicht von Photogrammetrie basierend auf Luft- oder Satellitenaufnahmen über thermische Infrarotmessungen zu terrestrischem Radar.

Mit diesen Messverfahren kann zunächst einmal die Geometrie von einzelnen Gebäuden, aber auch von sämtlichen Gebäuden eines Quartiers ermittelt werden. Darüber hinaus werden bauphysikalische Eigenschaften (insbes. U-Werte) bestimmt. Auch Informationen über die genaue Struktur der Gebäudehülle, wie den Schichtaufbau der Wände und ihre Materialien, lassen sich ableiten.

Daten aus den verschiedenen Messverfahren wer-

den in einem digitalen Gebäude- oder Quartiersmodell zusammengeführt. Dieses kann zur weiteren Sanierungsplanung genutzt werden. So entsteht ein Werkzeugkasten an Messmethoden, die zentrale Informationen für die Energieberatung liefern. Sie können darüber hinaus auch von Handwerksbetrieben genutzt werden, um ihre Leistungen planen und anbieten zu können. Letztendlich dienen sie dazu, qualitativ hochwertige Informationen über existierende Gebäude zu liefern, die an verschiedenen Stellen im Sanierungsprozess benötigt werden, und sollen so auch die Verwendung digitaler Werkzeuge sowie die Anwendung von BIM im Bestand stärken.

4.7.2 Arbeitsschritte im Projekt

Im Projekt werden eine Vielzahl Ansätze zur Nutzung von Fernerkundungsmethoden für die energetische Charakterisierung von Gebäudehüllen untersucht. Die Ergebnisse werden mit konventionellen Messmethoden, durchgeführt vom Solar-Institut Jülich, verglichen. Im Folgenden werden einige dieser Ansätze im Detail vorgestellt.

3D-Rekonstruktion der Gebäudehülle

Sowohl für ein großstädtisches Quartier als auch für ein Versuchsgebäude, das ein freistehendes Einfamilienhaus ist, wurden im Projekt Arbeitsabläufe und Algorithmen getestet, um aus Luftbildern 3D-Modelle im CityGML-Format zu generieren. Die zugrundeliegenden Luftbilder wurden für das Quartier aus einem Kleinflugzeug und für das Einfamilienhaus mit einem UAV (unbemanntes Luftfahrzeug) aufgenommen. Abb. 4.7-1 zeigt beispielhaft die Er-

gebnisse. Hierbei wird in einem ersten Schritt aus den Luftbildern photogrammetrisch eine Punktwolke erzeugt. Dies kann mithilfe vom DLR entwickelter oder kommerzieller Software erfolgen. Der daran anschließende vollautomatische Arbeitsablauf nutzt komplett vom DLR entwickelte Programme. Mit Algorithmen zu Projektion, Verschneidung und Flächenwachstum [1] wird zunächst die Geometrie der Gebäudehülle rekonstruiert und das Dach einschließlich Dachüberständen von den Fassaden unterschieden. Nach verschiedenen Kriterien wird außerdem für jede Fassade das Luftbild ausgewählt, das die beste Darstellung der Fassade beinhaltet. Hierauf können mit Segmentierungsverfahren ähnlich dem in [2] oder mit künstlichen neuronalen Netzen Fenster und Türen erkannt werden.

Am untersuchten Einzelgebäude, das eine sehr einfache Geometrie und Konstellation an Fenstern aufweist, wurde die derzeitige Genauigkeit des Ansatzes untersucht. Als Referenz wurde ein terrestrischer Laserscan des Gebäudes durchgeführt. Dieser hat für die Nordwand eine Länge von 9,48 m und eine Neigung von $90,27^\circ$ ergeben. Führt man eine bekannte Referenzlänge ein, kann eine Punktwolke erzeugt werden, die eine Länge von 9,46 m für die Nordwand und eine Neigung von $90,35^\circ$ ergibt. Die Fenstererkennung lieferte eine Erkennungsrate von 79 %, wobei aber keine unkorrekten Deklarationen von Fenstern vorkamen. Dass nicht alle Fenster korrekt erkannt wurden, liegt an einer teilweisen Verdeckung durch die Dachüberstände auf den aufgenommenen Luftbildern [3].

Für das Quartier ist eine solche quantitative Genauigkeitsanalyse nur stichprobenartig möglich. Es

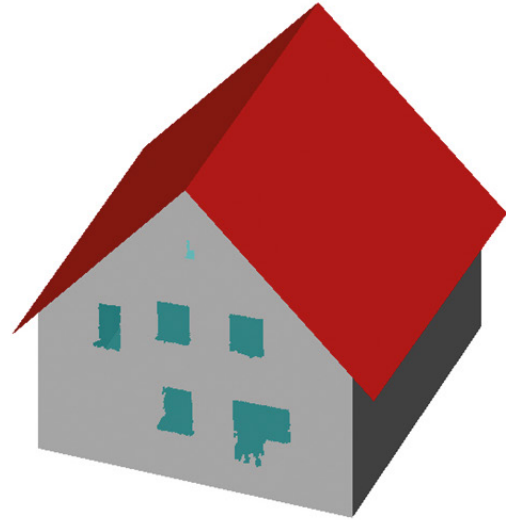
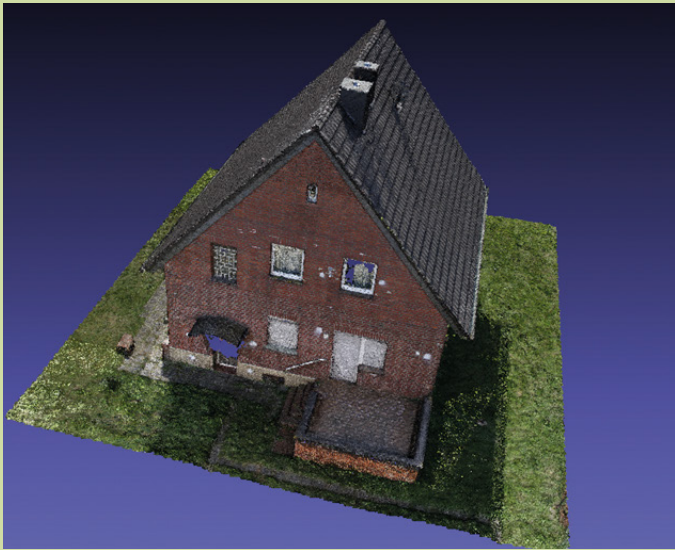


Abb. 4.7-1: Links: Photogrammetrisch erzeugte Punktwolke; rechts: Daraus errechnetes 3D-Flächenmodell [DLR]

zeigt sich, dass bei Gebäuden mit komplexen Geometrien, insbesondere Dachaufbauten, die geometrische Rekonstruktion z. T. noch fehlerhaft ist. Die Fenstererkennung funktioniert nicht bei allen Fassaden gleich gut, liefert allerdings ähnliche Ergebnisse wie eine manuelle Messung in GoogleEarth. Fehler in der Fenstererkennung liegen hier insbesondere an der Verdeckung von Fassaden und Fassadenteilen durch Vegetation sowie die geringere Auflösung der Aufnahmen aus größerer Höhe als aus niedriger Höhe mit der Drohne. Einige Elemente wie Dachterrassen und -fenster werden durch den Rekonstruktionsalgorithmus bisher nicht erfasst. Parallel dazu wurde gezeigt, dass ein solches Modell im noch weiter eingeschränkten Detailgrad LoD1 (nur Grundriss und Höhe der Gebäude) auch aus optischen Satellitendaten erzeugt werden kann.

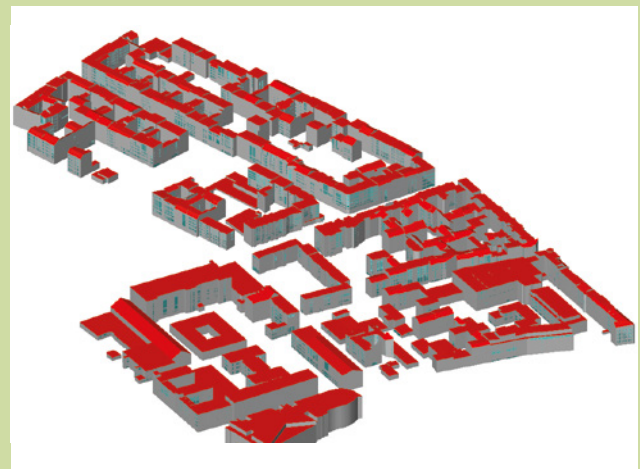


Abb. 4.7-2: 3D-Modell für ein Stadtquartier [DLR]

Quantitative Infrarotthermographie

Infrarotthermographie ist ein weit verbreitetes Verfahren, um qualitativ Wärmebrücken zu finden und den Bedarf von Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle anschaulich zu machen. Quantitative Infrarotthermographie zur Bestimmung von U-Werten wird nach aktuellem Stand der Technik meist von innen durchgeführt. Dabei wird in den meisten Fällen ein Mittelungsverfahren verwendet, in dem über mehrere Tage Daten mit einer Infrarotkamera und Lufttemperatursensoren aufgenommen und gemittelt werden. Der U-Wert wird dann errechnet unter der Annahme, dass ein stationärer Zustand für die Wärmeflüsse und Temperaturen angesetzt werden kann. In der Literatur werden Abweichungen von etwa 20 % zwischen diesem Verfahren und Referenzverfahren beschrieben. Ein Ziel von Gtom ist es, ein Verfahren zu finden, das Messungen von außen ermöglicht und in kürzerer Zeit durchgeführt werden kann – bei mindestens ebenso hoher Genauigkeit. Hierzu wurde zunächst eine systematische Unsicherheitsanalyse des Verfahrens nach dem Stand der Technik durchgeführt. Während beispielsweise die Innenraumtemperatur bei einer Messung von außen vergleichsweise geringe Einflüsse hat, ist die Messung der Wandtemperatur und der Umgebungstrahlung mit der Infrarotkamera von außen der dominierende Einfluss, sofern tatsächlich von einem stationären Zustand ausgegangen werden kann [4]. Als Alternative dazu wird in Gtom ein Verfahren entwickelt, das ohne die Annahme eines stationären Zustands auskommt. Dies verspricht eine deutlich kürzere Messdauer als beim gängigen Mittelungsverfahren.

Dichtheitsprüfung mittels akustischer Messverfahren

Die Analyse der Luftdichtheit einer Gebäudehülle spielt eine wichtige Rolle bei der energetischen Bewertung von Gebäuden. Undichte Stellen der Gebäudehülle tragen zu einem höheren Energieverbrauch bei und können zudem Schäden in den Wandzwischenräumen durch Kondensation von Wasser verursachen oder die Leistung bestehender Belüftungssysteme im Gebäude erheblich beeinträchtigen.

Das am weitesten verbreitete Verfahren zur Bestimmung der Luftdichtheit ist das sogenannte Differenzdruck-Messverfahren, auch Blower-Door-Test genannt. Dieses Verfahren ist in seiner Durchführung allerdings aufwendig und zeitintensiv. Zudem ist das Auffinden einzelner Lecks in der Gebäudehülle mit diesem Messverfahren schwierig und die Quantifizierung des Einflusses einzelner Lecks auf die Luftaustauschrate des gesamten Gebäudes ist nahezu unmöglich.

Im Rahmen dieses Projektes wird an der Entwicklung eines Messverfahrens gearbeitet, um einzelne Leckagen in der Gebäudehülle besser quantifizieren zu können. Die Verwendung von akustischen Messmethoden scheint dahingehend ein vielversprechender Ansatz zu sein. Der verwendete Frequenzbereich konzentriert sich in diesem Projekt besonders auf den Ultraschallbereich (bis ca. 100 kHz). Der Einsatz von Ultraschall bietet den Vorteil, dass das Messsystem außerhalb des menschlichen Hörvermögens arbeitet und somit das Leben und die Arbeit innerhalb eines Gebäudes nur geringfügig beeinträchtigt. Zudem liegt die Länge der

Schallwellen bei diesen Frequenzen in den gleichen Größenordnungen wie die Abmessungen möglicher Leckagen in der Gebäudehülle. Bis 100 kHz ist auch die Dämpfung der Schallwellen innerhalb der Medien noch vertretbar gering.

Um verschiedene Leckage-Arten und -Größen untersuchen zu können, wurde eine Testkammer entwickelt, die aus zwei Räumen besteht. Beide Räume sind durch eine Wand getrennt, in der realistische Lecks nachgebildet werden können. Es wurden unterschiedliche Wanddicken, Materialien und Isolationen, sowie variierende Leck-Größen, -Längen und Formen angefertigt und getestet. Mit diesem Aufbau konnten für die verschiedenen nachgebildeten Lecks jeweils die frequenz aufgelöste Schalltransmission mit Hilfe von Impulsantworten ermittelt werden. Weiterhin konnten Differenzdruck-Messungen im gleichen Testaufbau durchgeführt werden, um das herkömmliche Verfahren mit dem akustischen Verfahren unter gleichen Randbedingungen vergleichen zu können. Ziel dieser Untersuchungen ist es, zu prüfen, inwieweit aus den frequenz aufgelösten Impulsantworten Rückschlüsse auf die Lecks gezogen werden können und diese mit Luftaustauschraten korreliert werden können. Erste Ergebnisse wurden in [5] und [6] veröffentlicht.

Radar

Beim Radarverfahren wird Mikrowellenstrahlung in einem breiten Frequenzband in eine Wand eingestrahlt und die Reflexion gemessen. Die Strahlung dringt in die Wand ein und wird an jeder Grenzschicht partiell reflektiert. Die Dämpfung des Signals und die Ausbreitungsgeschwindigkeit in den Wand-

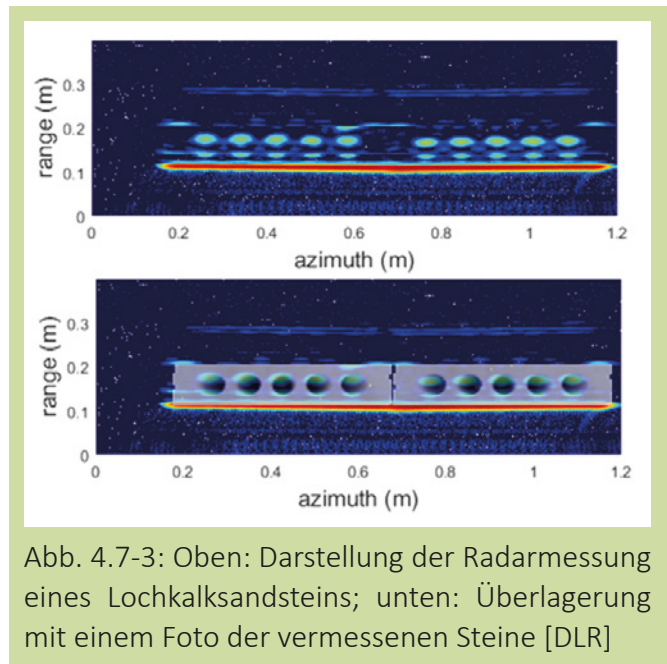


Abb. 4.7-3: Oben: Darstellung der Radarmessung eines Lochkalksandsteins; unten: Überlagerung mit einem Foto der vermessenen Steine [DLR]

schichten hängen von der elektromagnetischen Permittivität der jeweiligen Schicht ab. Maxima im Reflexionsprofil, die zu unterschiedlichen Zeiten beobachtet werden, deuten daher auf Schichtgrenzen hin. Nebeneinanderliegende Profile, die durch ein Abfahren der Wand mit dem Radar erzeugt werden, können über spezielle Verfahren – die Radarprozessierung – auch in zwei- oder sogar dreidimensionale Bilder der Reflexionsverteilung umgeformt werden. In einer Vielzahl von Laborexperimenten wurden unterschiedliche Wandaufbauten untersucht und verschiedene Prozessierungsverfahren erprobt. So wurde u. a. gezeigt, dass für unterschiedliche Varianten die Schichtzahlen, die Permittivitäten und sogar die inneren Strukturen der Wände sowie z. B. Steinarten ermittelt werden können [7]. Abb. 4.7-3 zeigt dies beispielhaft für einen Lochkalksandstein.

Die Ergebnisse einer Messkampagne an Versuchswänden unter realen Wetterbedingungen sowie an demselben Versuchsgebäude, an dem auch die geometrische Rekonstruktion erprobt wurde, befinden sich zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Artikels noch in der Auswertung. Im Rahmen von Gtom sind gleichzeitig Verfahren entwickelt worden, um aus solchen Messungen die Permittivitäten der verschiedenen Schichten zu bestimmen. In einer Messkampagne an knapp 60 Proben aus dem Mauerwerk abgerissener Gebäude wurde parallel untersucht, ob eine Korrelation zwischen der Permittivität und thermischen Eigenschaften, wie der Wärmeleitfähigkeit der Steine, hergestellt werden kann. Es zeigt sich, dass für einen großen Teil der Proben ein nahezu linearer Zusammenhang vorliegt. Allein Kalksandsteine scheinen diesen Zusammenhang nicht zu erfüllen.

4.7.3 Ergebnisse / Schlussfolgerung

Im Projekt Gtom hat sich das große Potenzial verschiedener Fernerkundungsmethoden für die energetische Charakterisierung von Gebäudehüllen und insbesondere deren kombinierte Verwertung bestätigt. Es wurden in mehreren Messkampagnen die verschiedenen Messverfahren getestet, ihre Ergebnisse ausgewertet und zusammengeführt. Das so entstandene Gebäudemodell enthält – auf der Ebene des Einzelgebäudes – bereits sämtliche Geometrieinformationen mit einer Genauigkeit, die eine energetische Simulation des Gebäudes ermöglicht. Die Bestimmung bauphysikalischer Größen befindet sich noch auf einem früheren Entwicklungslevel.

Sowohl die quantitative Infrarotthermographie als auch Radarmessungen liefern allerdings sehr vielversprechende Ergebnisse. Das Projekt hat sein Ziel, vielversprechende Methoden für einen Werkzeugkasten für die schnelle, genaue und berührungslose energetische Vermessung von Gebäuden zu identifizieren, daher bereits erreicht.

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung (FKZ 03ET1405A/B), bei der Senatsverwaltung Berlin für die Unterstützung bei der Auswahl des Testquartiers in Berlin und bei RWE für die Bereitstellung des Versuchsgebäudes.