



**Kurzbericht für das Forschungsvorhaben:**

## **Maßgefertigte Vakuum-Dämmelemente für das Bauen im Bestand**

### **Forschungsstelle:**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter  
Arcisstraße 21  
80333 München

### **Projektleitung:**

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Klaudius Henke  
Dipl.-Ing. Jörg Schaffrath

### **unterstützt durch:**

Variotec GmbH & Co. KG  
Weißmarterstraße 3-5  
92318 Neumarkt

### **gefördert von:**

Forschungsinitiative Zukunft Bau  
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
Deichmanns Aue 31-37  
53179 Bonn

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.  
(Aktenzeichen: Z6-10.08.18.7-07.19/II2-F20-07-29)  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München, 30. November 2009

## 1 Ziel der Forschungsaufgabe

Das Bauen im Bestand hat sich in den letzten Jahren zu einem der wichtigsten Märkte der Bauwirtschaft in Deutschland entwickelt. Von einem verstärkten Einsatz von Vorfertigung in diesem Sektor kann eine deutliche Steigerung der Effektivität erwartet werden. Voraussetzung hierfür ist eine präzise und wirtschaftliche Messtechnik, die Bestandsdaten in einer für die digitale Prozesskette kompatiblen Form zur Verfügung stellt.

Anders als im Bauwesen sind moderne Verfahren für eine aufmaßbasierte und automatisierte Fertigung in vielen anderen technischen Bereichen bereits tägliche Praxis. Beispiele sind etwa die Maßanfertigung von Kleidungsstücken oder die passgenaue Fertigung von Zahnprothesen. Mit optoelektronischen Messgeräten werden hier Geometriedaten in digitaler Form erhoben und bei der computergesteuerten Fertigung der jeweiligen Passteile verwendet.

Der Grundgedanke des hier beschriebenen Forschungsvorhabens liegt darin, die Übertragbarkeit dieser Methodik auf das Bauwesen zu untersuchen: Ist es möglich, auf der Grundlage eines digitalen Aufmaßes passgenaue Fertigteile für Bestandsbauten zu produzieren?

Anhand eines geeigneten Baumaterials sollte exemplarisch gezeigt werden, wie durch den Einsatz von bereits verfügbaren Messtechniken in Verbindung mit spezieller Auswertesoftware eine computergestützte Planung und Vorfertigung beim Bauen im Bestand realisiert werden kann. Als Baumaterial wurden Vakuum-Dämmelemente (Vacuum Insulation Panels, VIP) gewählt, deren Verwendung zwingend eine Vorfertigung verlangt: Die einmal erstellte luftdichte Hülle darf nicht verletzt werden, eine Anpassung oder Nachbearbeitung auf der Baustelle ist nicht möglich. Wegen ihrer äußerst geringen Wärmeleitfähigkeiten von bis zu 0,004 W/mK stellen sie beim Bauen im Bestand oft die einzige Alternative dar, wenn herkömmliche Dämmstoffe aufgrund ihrer Dämmstoffstärke nicht sinnvoll eingesetzt werden können.

## 2 Durchführung der Forschungsaufgabe

### 2.1 Auswahl von Versuchsobjekten

Für die Forschungsarbeit wurden auf dem Stammgelände der Technischen Universität München drei Versuchsobjekte ausgewählt, die die typischen Einbausituationen von Vakuum-Dämmelementen gut repräsentieren und die Bandbreite möglicher Messsituationen weitestgehend abdecken. Die Wahl fiel auf eine Fassade, eine Hallendecke und einen Kellerraum (Abbildung 1). Die Versuchsobjekte wurden mit verschiedenen Messtechniken geometrisch erfasst und für eines der Objekte Dämmelemente auf der Basis dieser Daten passgenau vorgefertigt und montiert.



Abbildung 1: Versuchsobjekte (von links nach rechts) Fassade Vorhoelzer-Bau (zwei Bilder), Deckenfeld Meyer-Jens-Halle, Kellerraum Gabelsbergerstraße

## 2.2 eingesetzte Messmethoden

Es wurden 3D-Laserscanning, Einzelbild-Photogrammetrie und Mehrbild-Photogrammetrie eingesetzt. Das 3D-Laserscanning kombiniert Winkel- und Entfernungsmessungen. Indem der Laserstrahl automatisch schrittweise geschwenkt bzw. geneigt wird, wird die gesamte Oberfläche des Objektes mit einem engen Netz aus Messpunkten überzogen. Das Ergebnis sind die Raumkoordinaten einer großen Zahl von Punkten (sogenannte Punktwolke, siehe Abbildung 2), welche die Oberflächentopologie des Objektes räumlich beschreiben. Mit einem einzelnen Scan können nur die Objektpunkte erfasst werden, welche vom jeweiligen Standpunkt des Scanners aus durch den Laserstrahl erreicht werden können. Es ist deshalb meist nötig, ein Objekt von mehreren Standorten aus aufzunehmen und die Einzelaufnahmen zu einer Gesamtpunktwolke zusammenzusetzen. Die Erfassung eines baulichen Objektes mit 3D-Laserscanning nimmt je nach Schwierigkeitsgrad wenige Stunden bis einige Tage in Anspruch. Der Punktwolke können Maße entnommen werden, Visualisierungen können angefertigt und Kollisionsprüfungen durchgeführt werden. Für die Anfertigung von Plänen und CAD-Modellen ist hingegen eine meist sehr aufwendige Modellierung erforderlich.

Mit den Methoden der *Photogrammetrie* (Abbildung 5) können Objektmaße aus Messungen in Fotos gewonnen werden. Heute werden hierfür in der Regel digitale Kameras in Kombination mit spezieller Bildauswertesoftware eingesetzt. Die Erfassungszeit am Objekt ist extrem kurz. Anders als beim 3D-Laserscanning sind Bewegungen des Aufnahmeapparates während der Erfassung nicht zwangsläufig problematisch; das ermöglicht die Arbeit von Hub- oder Fluggeräten aus. Voraussetzung für photogrammetrische Aufnahmen sind ausreichend gute Lichtverhältnisse. Die sozusagen als Nebenprodukt mitgelieferten Bild- und Farbinformationen sind oft von großem Wert für Auswertung und Interpretation. In Hinblick auf die Anwendungen im Bauwesen kann die Photogrammetrie in zwei Gruppen eingeteilt werden: Bei der *Einzelbild-Photogrammetrie* wird ausschließlich in einer einzelnen Ebene (z.B. einer Fassade) des Objektes gemessen. Hierfür wird das Foto so transformiert, dass Elemente, die in dieser Ebene liegen, unverzerrt und maßstäblich erscheinen. Mehrere entzernte Bilder können zu einem Bildplan zusammengesetzt werden. Mithilfe

der *Mehrbild-Photogrammetrie* werden aus mehreren Fotos desselben Objektes die Raumkoordinaten diskreter Objektpunkte ermittelt. Ein aus den gemessenen Punkten modelliertes Flächenmodell kann mit den Bildinformationen der Fotos texturiert werden.

### 2.3 Erfassung der Versuchsobjekte mit 3D-Laserscanning

Die drei Versuchsobjekte „Fassade Vorhoelzer-Bau“, „Deckenfeld Meyer-Jens-Halle“ und „Kellerraum Gabelsbergerstraße“ wurden mit fünf verschiedenen 3D-Laserscannern aufgenommen. Neben einem Impulslaufzeit- und zwei Phasendifferenz-Laserscannern wurden eine intelligente Totalstation, die ein Tachymeter mit der Scanfunktion eines Laserscanners vereint, und ein handgeführter Laserlichtschnittscanner verwendet.

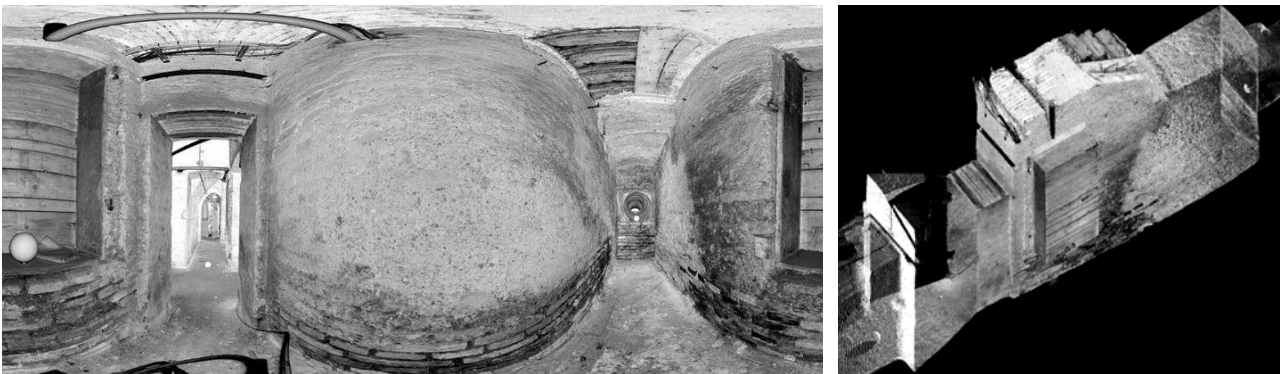


Abbildung 2: Kellerraum Gabelsbergerstraße, Punktwolke als Panoramabild und Axonometrie

Die bei den Aufnahmen erzeugten Punktwolken waren von unterschiedlicher Qualität. Die Qualitätsunterschiede ergaben sich in erster Linie durch die Anzahl der verwendeten Laserscanner-Standorte und die gewählte Punktdichte. Eine hohe Anzahl an Standpunkten hilft Verschattungen zu vermeiden und ermöglicht ein Objekt mit allen Ecken, Kanten, Vor- und Rücksprüngen gänzlich zu erfassen. Insbesondere Kleinteile und filigrane Bauteile erfordern eine allseitig hohe Punktdichte für eine objektgetreue Auswertung.

Für die Auswertung der Daten wurden eine nicht-kommerzielle und verschiedene kommerzielle Softwarelösungen eingesetzt. Bei der Modellierung kamen zwei unterschiedliche Methoden zur Anwendung. Die Umwandlung der Punktwolke in ein vermaschtes Polygonnetz einerseits und das Modellieren von geometrischen Primitiven (Ebenen, Zylinder etc.) aus der Punktwolke andererseits (Abbildung 3). Bei letzterem Verfahren wurden durch das Verschneiden von Ebenen Kanten oder Ecken erzeugt und anschließend zu einem Kantenmodell verbunden.

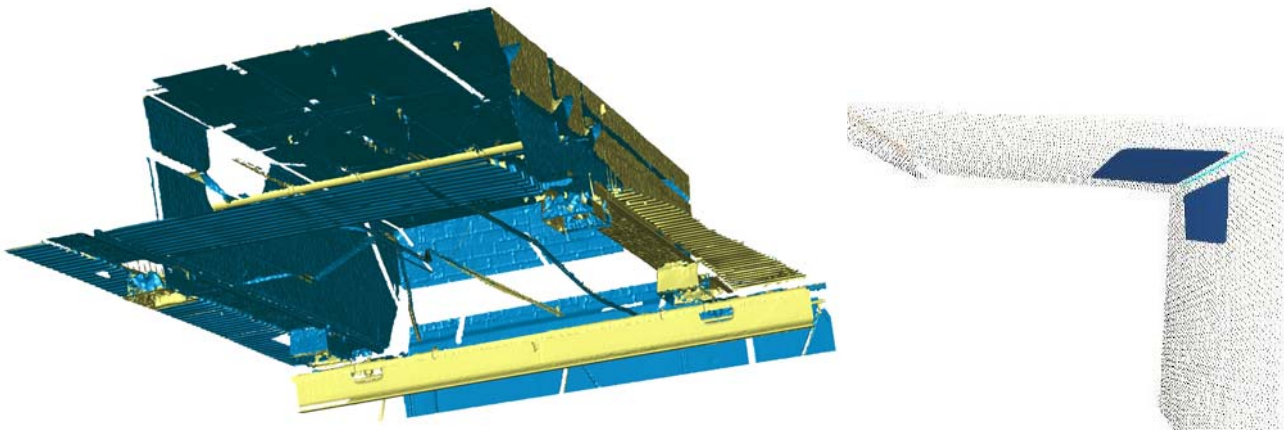


Abbildung 3: Polygonnetz Deckenfeld Meyer-Jens-Halle (links), Modellieren von Kanten (rechts)

Die Zielvorgabe für die Auswertung des Objektes „Fassade Vorhoelzer-Bau“ lautete, aus den Messdaten ein möglichst genaues Modell zu generieren, auf dessen Basis die Vakuum-Dämmelemente gefertigt und anschließend vor Ort als Muster montiert werden konnten. Aufgrund von Verschattungen waren Löcher in der Punktwolke vorhanden, die im Modell durch Interpretation der existierenden Daten geschlossen wurden. Bei diesem Vorgehen besteht zweifellos die Gefahr, Ungenauigkeiten zu erzeugen. Am Beispiel eines Fensterpfeilers zeigt Abbildung 4 (links) die bereichsweise fehlenden Messdaten einer Punktwolke.

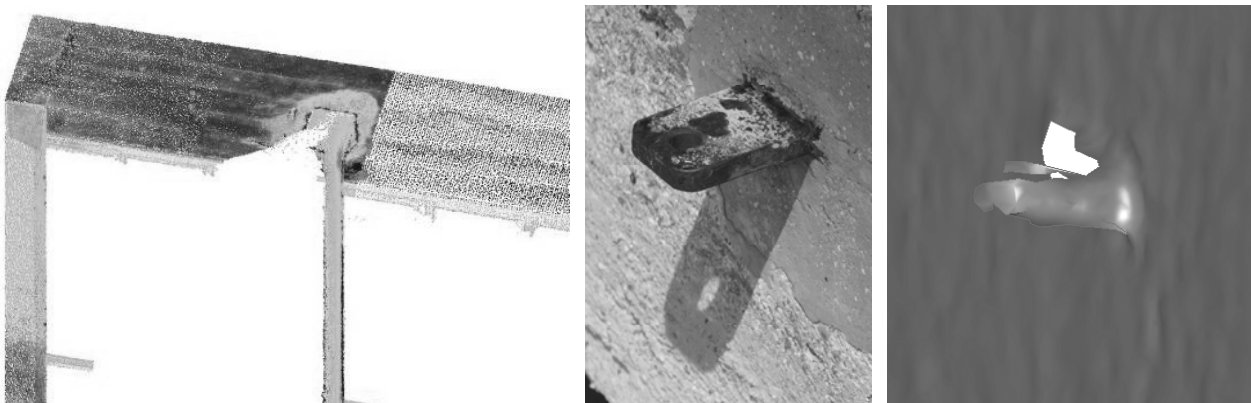


Abbildung 4: Fassade Vorhoelzer-Bau, Verschattungen Fensterpfeiler (links), ungenügend vermaschter Detailpunkt (rechts)

Für die Modellierung der Details, wie z.B. Metallaschen, zeigte sich die Notwendigkeit einer hohen Punktdichte, eine zu geringe Punktzahl führte zu unbefriedigenden Ergebnissen (Abbildung 4, rechts).

Aus den Punktwolken der einzelnen Laserscanner wurden mit unterschiedlichen Auswerteprogrammen verschiedene Netz- und Kantenmodelle erstellt. Zur Evaluierung der entstandenen Modelle wurden zwei unterschiedliche Methoden eingesetzt. Erstens wurden mittels grafischer Darstellung und statistischer Auswertungen der Punktabweichungen die

Modelle sowohl mit der Punktwolke als auch untereinander verglichen. Zweitens wurden in den Modellen diskrete Strecken gemessen und sowohl einander und als auch einem Handaufmaß gegenübergestellt.

Dabei wurde nicht die Messgenauigkeit der Laserscanner evaluiert, sondern allgemein die Qualität der aufgenommenen Punktwolken und der daraus generierten Modelle überprüft. Erwartungsgemäß stimmten die Netzmodelle mit dem Punktwolken nahezu hundertprozentig überein. Lediglich in den kritischen Bereichen einer unzureichenden Punktwolke waren deutliche Abweichungen zum Netzmodell sichtbar. Um die Kantenmodelle mit den Punktwolken zu vergleichen, wurden Ebenen zwischen den Kanten aufgespannt. Die Unebenheit der Fassade konnte auf diese Weise dargestellt werden. Bei dem Vergleich diskreter Messstrecken wurde zum einen der Mittelwert und zum anderen ein Handaufmaß als Referenzwert gewählt. Die Abweichungen vom gemeinsamen Mittelwert waren beim überwiegenden Anteil der Messdaten geringer als 10 Millimeter, beim Vergleich zum Handaufmaß ergaben sich etwas ungünstigere Werte. Allgemein zeigten die Daten insbesondere dort hohe Abweichungen von den Referenzwerten, wo Verschattungen in der Punktwolke das Modellieren erschwerten.

Die im „Kellerraum Gabelsbergerstraße“ aufgenommenen Laserscans waren trotz der räumlichen Beengtheit von hoher Qualität (Abbildung 2). Die für eine Vorplanung notwendigen Raumdaten konnten ohne hohen Nachbearbeitungsaufwand sehr schnell innerhalb der Punktwolke ermittelt werden.

Bei der Auswertung der Messdaten „Deckenfeld Meyer-Jens-Halle“ erfolgte ein automatisches Modellieren von Trägern, Öffnungen und Rohrleitungen noch nicht problemlos. Als eine Ursache sind die Verschattungen innerhalb der Punktwolke zu nennen.

## 2.4 Erfassung der Versuchsobjekte mit Photogrammetrie

Die Bilder für die photogrammetrische Erfassung der Versuchsobjekte wurden mit kalibrierten digitalen Spiegelreflexkameras aufgenommen. Umfangreiche Auswertungen und Analysen wurden für das Versuchsobjekt Fassade Vorhoelzer-Bau vorgenommen.

Es wurden vier Softwareprodukte für Einzelbild-Photogrammetrie und zwei für Mehrbild-Photogrammetrie eingesetzt. Bei der photogrammetrischen Auswertung der Messbilder kamen vier photogrammetrische Verfahren zur Anwendung: Entzerrung über Passpunkte, Entzerrung über parallele Linien, Entzerrung über Orientierungsdaten aus Mehrbildphotogrammetrie und die Mehrbildphotogrammetrie selbst.

Die geringsten Abweichungen der Messergebnisse von dem Handaufmaß konnten mit der Mehrbildphotogrammetrie erzielt werden. Sehr gute Ergebnisse lieferte auch die Entzerrung über Orientierungsdaten. Hierbei handelt es sich aber um ein vergleichsweise aufwendiges Mischverfahren aus Einzel- und Mehrbildphotogrammetrie. Bei den reinen Einzelbildentzerrungsmethoden konnten die besten Ergebnisse mit der Entzerrung über

Passpunkte mit mehreren mosaikierten Bildern erzielt werden. Die größten Abweichungen ergaben sich bei der Entzerrung über parallele Linien.

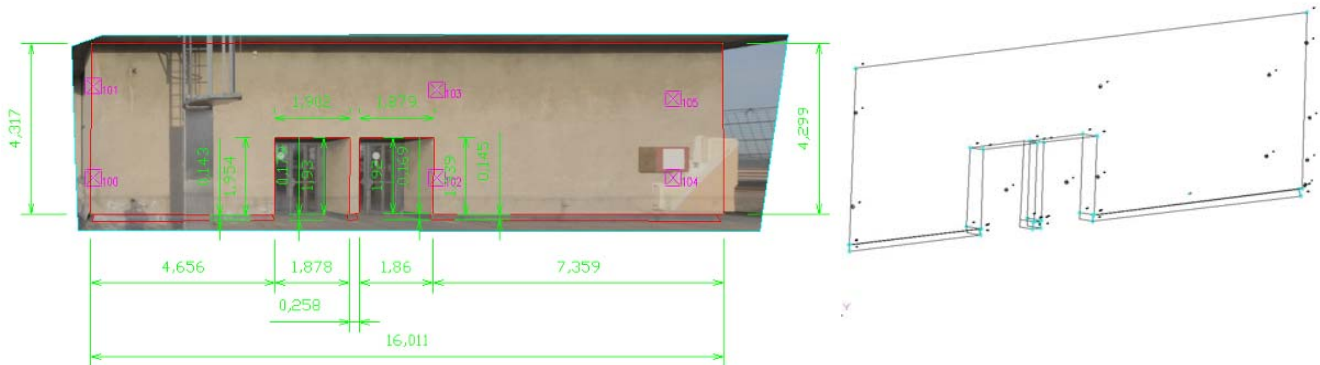


Abbildung 5: entzerrtes und bemaßtes Foto in der Einzelbild-Photogrammetrie (links) und Kantenmodell aus Mehrbild-Photogrammetrie (rechts)

Die Messverfahren 3D-Laserscanning und Photogrammetrie wurden anhand sechs ausgewählter Referenzmaße der Fassade Vorhoelzer-Bau verglichen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass vor allem mit der Mehrbildphotogrammetrie und dem 3D-Laserscanning vergleichbar gute Ergebnisse erzielt wurden. Die beiden Verfahren weisen allerdings stark unterschiedliche Charakteristika bei der geometrischen Bestandserfassung auf. Dies macht es erforderlich, vor Beginn des Aufmaßes genau zu untersuchen, welche Technik für die jeweilige Aufgabe geeignet ist.

## 2.5 Montage vorgefertigter Dämmelemente am Versuchsobjekt Fassade Vorhoelzer-Bau

Den Abschluss der Forschungsarbeit bildete die Montage einer auf der Grundlage digitaler Bestandsdaten passgenau vorgefertigten Musterfläche aus Dämmelementen. Die Musterfläche wurde an der Südseite des 5. OG des Vorhoelzer-Baus angebracht und hat eine Fläche von ca. 23 m<sup>2</sup>. Sie besteht aus Vakuum-Dämmelementen mit einer Ummantelung aus Polystyrolschaum. Als Grundlage für die Anfertigung der Dämmelemente wurde der Firma Variotec eine CAD-Datei zur Verfügung gestellt. Die Datei beinhaltet die Abwicklung der Fassade als 2D-Modell. Als Basis diente ein 3D-Modell aus den Daten einer Laserscanner-Aufnahme, das durch Verschneiden von Ebenen in ein Kantenmodell überführt worden war. Auf eine Bemaßung wurde bewusst verzichtet.

Alles in Allem zeigte sich die angewandte Methodik als sehr erfolgreich. Die Montage der passgenau gefertigten Elemente konnte ohne weiteres Aufmaß vor Ort erfolgen. Die bislang praktizierte nachträgliche Fertigung von Passstücken konnte entfallen. Auf diese Weise ist eine wirtschaftlichere und schnellere Arbeitsweise möglich. Als positiv wurde auch die Möglichkeit einer Ebenheitsanalyse der Fassade bewertet. Möglicherweise notwendige Vorarbeiten (z.B. das Beseitigen zu großer Unebenheiten durch Entfernen oder Hinzufügen von Putz) können so besser geplant und kalkuliert werden.



*Abbildung 6: Musterfassade während und unmittelbar nach der Montage*

Auf der Grundlage der im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Vorgehensweise für Projekte mit vorgefertigten Elementen für das Bauen im Bestand erarbeitet. Der Vorschlag beschreibt eine zweistufige Vorgehensweise, die für Angebots- und Ausführungsphase jeweils unterschiedliche Messstrategien vorsieht.

### **3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Mit der Forschungsarbeit „Maßgefertigte Vakuum-Dämmelemente für das Bauen im Bestand“ wurde gezeigt, dass mit der bereits verfügbaren Messtechnik digitale Bestandsdaten auf hohem Genauigkeitsniveau für die Vorfertigung von passgenauen Bauteilen erhoben werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse werden bereits in verschiedenen Pilotprojekten bzw. Forschungsprojekten angewendet und vertieft.

Bei der Wahl des jeweils am besten geeigneten Verfahrens sind dessen Besonderheiten zu berücksichtigen. So ist z.B. das 3D-Laserscanning das Verfahren, welches das Oberflächenrelief des Objektes am besten abbilden kann und somit prädestiniert, wenn eine Untersuchung der Ebenheit benötigt wird. Die Photogrammetrie liefert mit vergleichsweise geringem Aufwand Maße und Bildinformationen ebener Objekte. Die Schwächen der einzelnen Messverfahren lassen sich weitgehend kompensieren, wenn mehrere Verfahren miteinander kombiniert werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden sind selbstverständlich nicht auf das Anwendungsgebiet Vakuum-Dämmelemente beschränkt. Ganz allgemein lassen sich die optoelektronischen Messmethoden im Rahmen einer lückenlosen digitalen Prozesskette von der Aufnahme vor Ort bis hin zur computergestützten Fertigung (CAM) und Montage besonders effektiv einsetzen. Dies gilt umso mehr, wenn künftig die einzelnen Schritte in der Kette weiter automatisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass in zunehmendem Maße Vorfertigung auf der Basis digitaler Bestandsdaten eingesetzt werden wird. Hiervon sind neue Impulse für die Weiterentwicklung dieser Technologie von einer Ausnahmerecheinung hin zur Standardlösung zu erwarten.