

Felix Kübel-Heising, Isabel Medina, Wilhelmina Katzschmann und Matthias Rädle

# Nicht-invasives optisches Messverfahren zur exakten Lokalisation von Wasserschäden in Mauerwerken von Gebäuden

*Zur Bauschadensanalyse von Gebäuden wurde ein bildanalytisches Messverfahren entwickelt, das sich der Nah- und Mittelinfrarottechnik bedient. Der entwickelte Messaufbau wird beschrieben und dessen Funktionalität an zwei realen Schadensfällen aufgezeigt.*

## 1 Ausgangssituation

Laut dem »Zweiten DEKRA-Bericht zu Baumängeln an Wohngebäuden« von 2006/2007 liegen die jährlichen Kosten zur Mängelbeseitigung der Schäden bei rund 1,4 Milliarden € in Deutschland [1]. Davon entfallen über 20 % auf Feuchteschäden [2]. Werden »neben den Wohngebäuden alle anderen Gebäude, beispielsweise für Verwaltung, Gewerbe und Industrie, mitberücksichtigt« [1], so würden sich die Kosten auf rund 2,8 Milliarden € für den betrachteten Zeitraum belaufen. Diese Zahlen beziehen sich allerdings nur auf die beseitigten Mängel und geben keinen Aufschluss über die theoretischen gesamten Kosten zur Beseitigung aller vorhandenen Mängel. In allen Berichten wird die Vermutung zum Ausdruck gebracht, dass Schäden durch Feuchtigkeit, teilweise wegen mangelnder und ungenauer Messverfahren, lange unerkannt bleiben und dadurch erhebliche Folgeschäden verursachen, die zeitlich verzögert, dafür aber einen weitaus höheren wirtschaftlichen Schaden anrichten.

Heutzutage kommen zur Analyse von Feuchtigkeit in Mauerwerken unterschiedliche Messsysteme zum Einsatz, die i.d.R. punktuell sind und nur eine geringe Aussagekraft über die Herkunft der Feuchtigkeit bieten. Ein klassisches Verfahren ist die zerstörende Messung. Hierbei wird ein Feuchtesensor in ein zuvor gebohrtes Loch eingebracht. Zur fachgerechten Bewertung sind mehrere Bohrungen erforderlich, was mit einem hohen Aufwand und mit einer großen Belastung für die Nutzer gerade im Innenbereich verbunden ist. Daneben ist die Darstellung von Kältebrücken mit Hilfe von Wärmebildkameras und damit indirekt die Messung von Feuchtigkeit in Wänden möglich. Dieses Verfahren hat den Nachteil, dass die zu vermessenden Flächen keine einheitliche Infrarot-Emission aufweisen und die gewonnenen Aufnahmen daher einen großen Spielraum für Fehlinterpretationen zulassen. Weiterhin gibt es noch dielektrische, zerstörungsfreie Feuchtesensoren, die allerdings nur punktuell und zwar maximal 40 mm tief in Wänden messen können, was zur

Analyse von modern gedämmten Gebäuden unzureichend ist. Ein anderes Verfahren stellt die Isotopenanalyse dar. Hierbei kann das Schadwasser hinsichtlich seiner Herkunft (z. B. Regen-, Leitungs- oder Kondenswasser) bestimmt werden, wie in [3] dargestellt. Aber auch bei dieser Methode ist eine invasive Probenahme nicht ausgeschlossen. In [4] ist ein alternatives, invasives Verfahren beschrieben. Hierbei sind unterschiedliche Proben des Mauerwerks im Schadensbereich zu nehmen. Anhand dieser lässt sich anschließend die Feuchtebilanz erstellen und mittels quantitativer, photometrischer Messung der Ionengehalt von Chlorid, Nitrat, Sulfat und Magnesium bestimmen. Anhand dieser vorangegangenen Analysen kann eine Aussage über die Herkunft des Wassers getroffen werden. Zur Beurteilung und Auswertung solcher Messinformationen ist in den meisten Fällen langjähriges Expertenwissen notwendig.

In dem hier vorgestellten Beitrag steht die Lokalisation der Schadensursache durch Feuchteeinwirkung in Mauerwerken von Gebäuden durch den Einsatz eines speziell entwickelten optischen Messsystems im Vordergrund, welches sich der Nah- und Mittelinfrarotkameratechnologie bedient [5].

## 2 Theoretische Grundlagen

Die hier verwendeten Messtechnologien zur Bauschadensanalyse basieren auf der Nah- und Mittelinfrarottechnik. Die Mittel- und Nahinfrarotspektroskopie wurden in der Vergangenheit zur direkten Bestimmung von Wasserdampf in der Luft eingesetzt. Die Nahinfrarotspektroskopie dient seit vielen Jahren zur Messung des Feuchtigkeitsgehalts in Materialien. Der Grund dafür ist, dass Wasser leicht in diesem Bereich zu analysieren ist, da es eine relativ starke Absorption bei einer Wellenlänge von 1450 nm besitzt [6].

Eine optimale spektrale Analyse einer Substanz und hierfür die Auswahl des Spektralbereichs hängen von der molekularen Struktur der Probe ab. Um unterschiedliche Stoffe voneinander unterscheiden zu können, ist insbesondere die Untersuchung von Infrarotabsorptionsbanden nützlich, hervorgerufen durch Schwingungsübergänge der Moleküle. Die Mittelinfrarottechnik wird gerne bei Anwendungen wie Thermografie verwendet. Die Nahinfrarottechnik ist bei der chemischen Prozessanalyse besser geeignet, da die Übergänge OH-, CH- und NHx-Gruppen für

die Analyse von Polymeren und organischen Verbindungen in diesem Bereich sehr ausgeprägt sind. Dieser Aspekt und die Verfügbarkeit von Detektoren, optischen Komponenten und Lichtquellen sind für diese Technik von großem Vorteil.

Der Nahinfrarotbereich (NIR) beginnt bei ca. 750 nm und reicht bis 2500 nm. Für die Analyse in diesem Bereich ist die Kompatibilität zwischen der spektralen Emission der Lichtquelle, der Empfindlichkeit des Sensors und die Absorbanz des zu untersuchenden Stoffes entscheidend. Auf Silizium basierende Kameras, wie die bekannten CCD-Kameras, sind bis zu einer Wellenlänge von 1000 nm anwendbar. Für den sichtbaren Wellenlängenbereich (VIS) und darüber hinauskommen Kameras mit Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs)-Chip mit einem Arbeitsbereich von 1000 bis 1700 nm zum Einsatz [7].

Die Identifikation eines Stoffes im Nahinfrarotbereich kann durch die Abschwächung eines Lichtstrahls beim Durchtritt durch eine Probensubstanz () erfolgen. Der Zusammenhang wird durch das Lambert Beer'schen Gesetz (Gl. (1)) über die dimensionslose Messgröße Extinktion E erklärt. Diese ist direkt proportional zu der Konzentration, der Schichtdicke des absorbierenden Stoffes und zu dem molaren Extinktionskoeffizienten des Materials [8].

**Formel 1:**

$$E = \log_{10} \left( \frac{I_0}{I} \right) = \epsilon_{\lambda} \cdot c \cdot d$$

Wasser zeigt in einem Bereich der Wellenlängen um 1450 nm eine für die Oberflächenfeuchte günstige Extinktion. Als Lichtquellen für die Nahinfrarottechnik stehen Halogenstrahler oder Leuchtdioden zur Verfügung. Halogenstrahler bieten sich bei größeren Objekten aufgrund höherer Leistung und damit großflächigerer Ausleuchtung gegenüber Dioden an. Wegen des breiten Spektrums ist in diesem Fall jedoch der Einsatz von Bandpassfiltern zur Auswahl der gewünschten Spektralbereiche notwendig.

Die Infrarotthermografie ist eine nicht zerstörende Messtechnik, die die Oberflächentemperatur von Objekten, die von der Intensität der Infrarotstrahlung eines Punktes berechnet wird, bestimmt [9]. Im Gegensatz zur Nahinfrarottechnik ist keine externe Lichtquelle notwendig, weil alle Objekte mit einer Temperatur über 0 K elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums emittieren. Die Thermografie arbeitet im Mittelinfrarotbereich (MIR) bei Wellenlängen zwischen 2,5 und 12 µm [10].

Zum besseren Verständnis des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Strahlung werden die grundlegende Theorie und die fundamentalen Gleichungen kurz beschrieben. Der sogenannte schwarze Körper ist ein idealer Strahler, der alle einfallenden Strahlungen absorbiert und ein kontinuierliches Spektrum nach dem Planck'schen Gesetz abgibt. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz integriert das Planck'sche Gesetz über die Frequenz. Entsprechend des Stefan-Boltzmann-Gesetzes ist die maximal abgestrahlte Wärmestromdichte proportional zur vierten Potenz der Temperatur. Somit gilt:

**Formel 2:**

$$\dot{q}_s = \sigma \cdot T^4$$

Es enthält die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$

**Formel 3:**

$$\sigma = (5,67040 \pm 0,00004) \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$$

Für die reale flächenspezifische Ausstrahlung technisch relevanter Objekte wird ein Korrekturfaktor  $\epsilon(T)$  benötigt.

**Formel 4:**

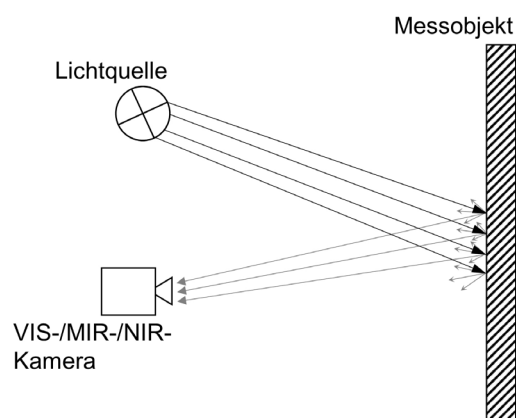
$$\dot{q}_s = \epsilon(T) \cdot \sigma \cdot T^4$$

Dieser Faktor definiert damit eine Materialeigenschaft, den Emissionsgrad  $\epsilon(T) \leq 1$  des Strahlers. Der Emissionsgrad hängt vom Material und vom Zustand der Oberfläche ab [11].

### 3 Messsystem

#### 3.1 Aufbau und Funktion

Die Messanordnung ist, wie aus Abb. 1 schematisch hervorgeht, für alle drei Kameras identisch.



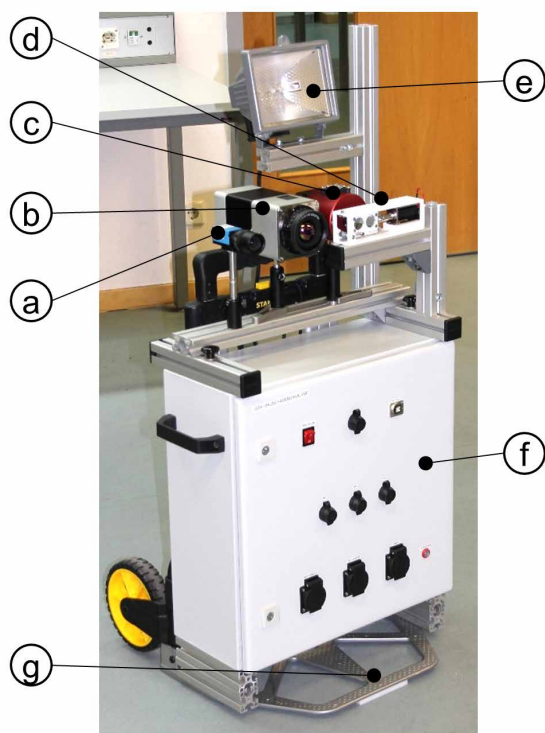
**Abb 1:** Schematische Messanordnung der MIR-, NIR- und VIS-Messung

Die Kameras befinden sich in einem definierten Abstand zum Messobjekt: Je nach Brennweite der eingesetzten Objektive ergibt sich die Größe der zu vermessenden Fläche. Die Lichtquelle ist im gleichen Abstand zum Objekt wie die Kameras installiert. Bei der VIS- und NIR-Kamera handelt es sich um Remissionsmessungen. Hierbei sendet die Lichtquelle im entsprechenden Wellenlängenbereich elektromagnetische Strahlung aus, welche teilweise vom Messobjekt absorbiert oder remittiert. Der remittierte Anteil wird von der jeweiligen Kamera detektiert. Bei der Messung mit der MIR-Kamera ist die Lichtquelle nicht erforderlich, denn hierbei wird nur die Eigenstrahlung des Objekts eingefangen, sprich seine Wärmestrahlung.

Das entwickelte optische Messsystem ist als modularer mobiler Prototyp ausgeführt, wie in Abb. 2 dargestellt.

Das System, welches zur Bauschadensanalyse und speziell zur Vermessung von Wandflächen bzw. Mauerwerken dient, besteht aus den folgenden Komponenten: einer VIS-Kamera (a), einer MIR-Kamera (b), einer NIR-Kamera (c), einem NIR-Filterlineal (d), einer Lichtquelle (e), einem Schaltschrank (f) und einer Transporteinheit (g). Des Weiteren gehören zu dem System ein Laptop mit Software und ein Luftfeuchtesensor mit integriertem Temperatursensor (nicht abgebildet).

Die drei Kameras sind nebeneinander auf dem Schaltschrank angebracht. Die VIS-Kamera dient zur Aufnahme der zu analysierenden Wandfläche im sichtbaren Wellenlängenbereich für Dokumentationszwecke. Die Oberflächentemperatur wird mit Hilfe der MIR-Kamera ermittelt. Mit der NIR-Kamera lässt sich



**Abb 2:** Mobiles Messsystem (Prototyp). (a) VIS-Kamera, (b) MIR-Kamera, (c) NIR-Kamera, (d) NIR-Filterlineal, (e) Lichtquelle, (f) Schaltschrank, (g) Transporteinheit

die qualitative Feuchteverteilung des Wandbereichs bestimmen. Die Spezifikationen der drei Kameras sind in Tabelle 1 übersichtlich dargestellt.

Für die Feuchtebestimmung im Nahinfraroten ist die Messung bei zwei verschiedenen Wellenlängen notwendig, was mit Hilfe eines vor der Kamera vorgeschalteten Filterlineals realisiert ist. Dieses verfügt über zwei Bandpassfilter mit den umschaltbaren Zentralwellenlängen 1300(±25) und 1450(±25) nm. Der Filterwechsel erfolgt über das Schalten eines elektrischen Hubmagnets mit Rückholfeder. Die über den Kameras angebrachte Lichtquelle mit Halogenleuchtmittel emittiert elektromagnetische Strahlung vom sichtbaren über den nahinfraroten bis zum mittelinfraroten Wellenlängenbereich. Der Schaltschrank dient zur elektrischen Versorgung und zur Datenanbindung. Der Laptop mit eigens entwickelter Software dient zur Ansteuerung der Lichtquelle und des Filterlineals, zur Bildaufnahme und zur anschließenden Bildauswertung. Zusätzlich wird ein Luftfeuchte-

**Tabelle 1:** Spezifikationen der eingesetzten Kameras [12]

	VIS-Kamera	MIR-Kamera	NIR-Kamera
<b>Auflösung</b>	640 x 480	640 x 480	320 x 256
<b>Brennweite / mm</b>	4...10	30	25
<b>Spektralbereich / μm</b>	0,4...0,7(1,0)	7,5...14	0,9...1,7
<b>Sensor</b>	CCD (siliziumbasiert)	Ungekühlter Mikrobolometer	InGaAs
<b>Bildrate / fps</b>	120	60	118
<b>Bittiefe / bit</b>	24 (RGB)	16 (Grauwerte)	12 (Grauwerte)

sensor mit integriertem Temperaturfühler für die Messung der relativen Umgebungs- bzw. Raumluftfeuchte und der Lufttemperatur benötigt. Für einen mobilen Einsatz befindet sich die Messvorrichtung auf einer Transporteinheit mit Rädern. Allerdings ist die Anbindung des Systems an das 230 V-Stromnetz in dieser Ausführungsform notwendig.

### 3.2 Software

Die für das Messsystem entwickelte Software setzt sich aus zwei Teilen zusammen: der Bildaufnahme und der Bildanalyse.

Die Bildaufnahme weist die Funktionalitäten Livebildanzeige aller Kameras, die Einstellung der Belichtungsdauer, Anzahl der Aufnahmen und Anzahl der Bildmittlungen und eine gleichzeitige Bildaufnahme aller drei Kameras auf. Während der Bildaufnahme findet bei der Nahinfrarotmessung ein Filterwechsel statt und zusätzlich wird die Lichtquelle ein- und ausgeschaltet, um eine automatische Bildaufnahme im belichteten und unbelichteten Zustand zu ermöglichen. Zwischen den einzelnen Dunkel- und Hell-Messungen sollte eine geringe Zeit liegen, damit sich das betrachtete Objekt so wenig wie möglich verändert.

Für eine Auswertung werden sechs Bilder benötigt. Ein VIS-Bild dient als Dokumentation, vier Nahinfrarotbilder bei 1300 und 1450 nm (jeweils eine Hell- und eine Dunkelaufnahme) und ein Mittelinfrarotbild.

Das häufige bei der Bildanalyse auftretende Shading aufgrund inhomogener Bestrahlung mit der Lichtquelle stellt bei den hier durchgeführten NIR-Aufnahmen kein Problem dar, da die Inhomogenitäten durch die Aufnahme im Referenzwellenlängenbereich von 1300 nm durch Verrechnung mit der Aufnahme im Bereich von 1450 nm eliminiert werden.

Die Bildanalyse dient im Wesentlichen zur Auswertung des Wassergehaltes im Nahinfrarotbereich. Die Extinktion wird pixelweise aus der erfassten Intensität bei den Wellenlängen 1300 und 1450 nm berechnet (Formel (5)). Für die Auswertung werden vier Bilder verwendet. Zwei davon sind die Dunkelaufnahmen, die von den Hellaufnahmen abgezogen werden und als Korrektur dienen. Aus dieser Berechnung ist nur der Messeffekt als Ergebnis anzuwenden.

#### Formel 5:

$$\text{Extinktion } E = \log_{10} \frac{I_0(1300 \text{ nm})}{I(1450 \text{ nm})} = \log_{10} \frac{I_{0,\text{hell}}(1300 \text{ nm}) - I_{0,\text{dunkel}}(1300 \text{ nm})}{I_{\text{hell}}(1450 \text{ nm}) - I_{\text{dunkel}}(1450 \text{ nm})}$$

Zur Auswertung der Temperatur im Mittelinfrarotbereich wird die Darstellung des Grauwertbilds bzw. das Ergebnis als Falschfarbenbild mit Temperaturskala gezeigt.

Zum Schluss werden alle drei Bilder VIS, NIR und MIR für denselben Bildausschnitt zugeschnitten. Der Zuschnitt kann zu Anfang, aber auch nach der eigentlichen Bildauswertung, unter Kenntnis des Arbeitsabstands zwischen Sensorebene und dem zu vermessenden Objekt geschehen.

## 4 Untersuchungen

### 4.1 Labor

Zur Analyse realer Schadensfälle waren Voruntersuchungen im nahinfraroten Wellenlängenbereich im Labor notwendig. Die Thermografie ist ein bekanntes Messverfahren zur flächigen Bestimmung der Oberflächentemperatur von Objekten. Daher sind mit diesem im Mittelinfraroten keine Voruntersuchungen erfolgt.

Um die Machbarkeit der NIR-Messung zur Wasserdetektion in Mauerwerken bzw. Wänden zu überprüfen, wurden an verschiedenen Proben Voruntersuchungen durchgeführt.

Zunächst wurde eine spektrometrische Messung im Nahinfraroten an einer Betonprobe angewendet, um herauszufinden, ob der zuvor genannte Spektralbereich die nötige Information liefert. Für diese Untersuchung wurde die Probe im trockenen, raumtrockenen und feuchten Zustand vermessen. Mit einem Spektrometer ist keine flächige Messung möglich, sondern lediglich punktförmig [12]. Allerdings ist mit diesem eine wellenlängen-selektive Analyse im gesamten Wellenlängenbereich zwischen 900 und 2000 nm möglich. Die Ergebnisse dieser punktförmigen Vermessung der drei Proben sind in Abb. 3 dargestellt.

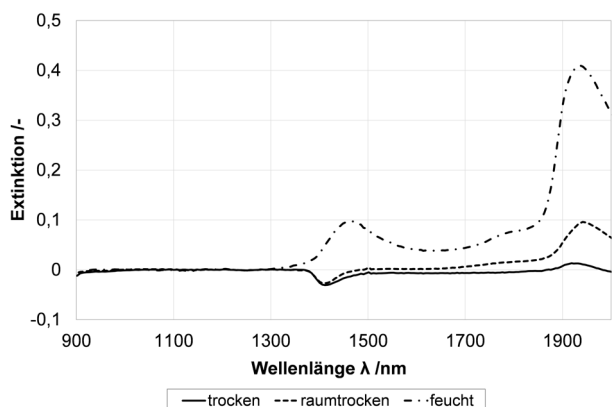


Abb. 3: Nahinfrarotspektrum einer trockenen, raumfeuchten und feuchten Betonprobe

Aus Abb. 3 geht hervor, dass die feuchte Betonprobe das charakteristische Absorptionsverhalten von Wasser um 1450 nm mit einer maximalen Extinktion von 0,1 aufweist und damit ist ein deutlicher Unterschied zwischen der feuchten und trockenen bzw. raumtrockenen Probe gegeben. Wegen des spektralen Messbereichs der NIR-Kamera ist nur dieser Wellenlängenbereich von Interesse und nicht der oberhalb von 1900 nm, welcher eine deutlich höhere Absorption aufweist. Die NIR-Kamera sollte daher unter Verwendung des 1450 nm Bandpassfilters eine flächige Information über die Feuchteverteilung einer Wand bzw. Mauer liefern. Um dies zu prüfen, wurde ein Ausschnitt einer Rigipsplatte mit 13 mm Stärke verwendet, die stellenweise mit Wasser benetzt wurde. Nach einer gewissen Einwirkzeit wurde das übrige Wasser entfernt, sodass sich kein Wasser mehr auf der Platte befand. In Abb. 4 ist links die Aufnahme mit dem Bandpassfilter 1450 nm (Abb. 4a) und rechts die ausgewertete Aufnahme (Abb. 4b) dargestellt.

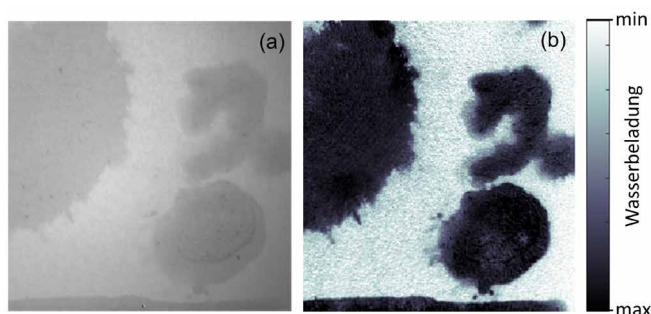


Abb 4: (a) NIR-Aufnahme im Rohformat, (b) NIR-Aufnahme nach der Bildverarbeitung



Abb. 5: Nasse Wandfläche mit Schimmel im Kellergeschoss eines Mehrfamilienhauses

Aus Abb. 4a ist anhand der Grauwertaufnahme Wasser ersichtlich: Je heller der Pixelwert ist, desto geringer ist die Wasserbeladung und umgekehrt. In Abb. 4b ist das Rohbild nach der Bildverarbeitung mit Farbskala zur Darstellung der qualitativen Wasserbeladung abgebildet. In dieser Darstellungsart sind die Konzentrationsverläufe gerade in den Randbereichen besser erkennbar als bei der Aufnahme im Rohformat. Damit ist eine flächige Detektion von Wasser in Wänden mittels NIR-Kameratechnik möglich.

#### 4.2 Reale Schadensfälle

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche reale Schadensfälle untersucht, um das Gesamtmesssystem zu testen und bewerten zu können.

Der erste Schadensfall, der hier vorgestellt wird, ist ein nasser Wandbereich mit Schimmelbefall im Kellergeschoss eines Mehrfamilienhauses, wie in Abb. 5 zu erkennen ist. Bei der Wand handelt es sich um eine Außenwand mit aufgeschüttetem Erdreich von außen, wie schematisch in Abb. 6 dargestellt. In dieser Wand verläuft keine Rohrleitung.

Die Messapparatur liefert die folgenden Aufnahmen im Rohformat eines Teilbereichs der nassen Wandfläche (Abb. 7). Aus den MIR-Aufnahmen geht hervor, dass die Wandfläche eine Temperatur zwischen 6,3 und 8,6 °C besitzt. Die Taupunkttemperatur liegt bei gegebener Raumlufttemperatur und relativer Luftfeuchte von 10,5 °C und 65,4 % bei 3,7 °C. Damit ist eine Kondensation der Raumfeuchte von innen ausgeschlossen.

Aus den NIR-Aufnahmen resultiert eine Feuchteverteilung, wie in Abb. 8 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Wand

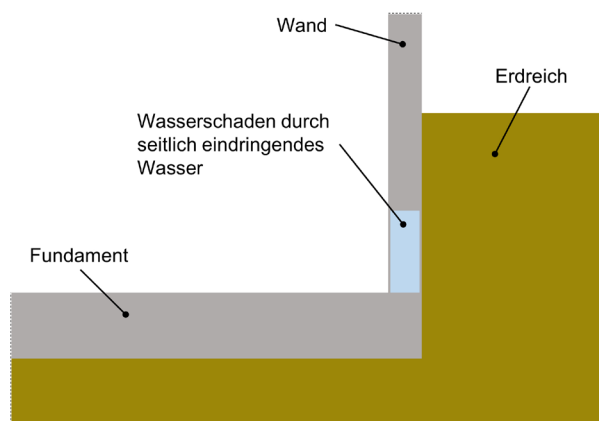
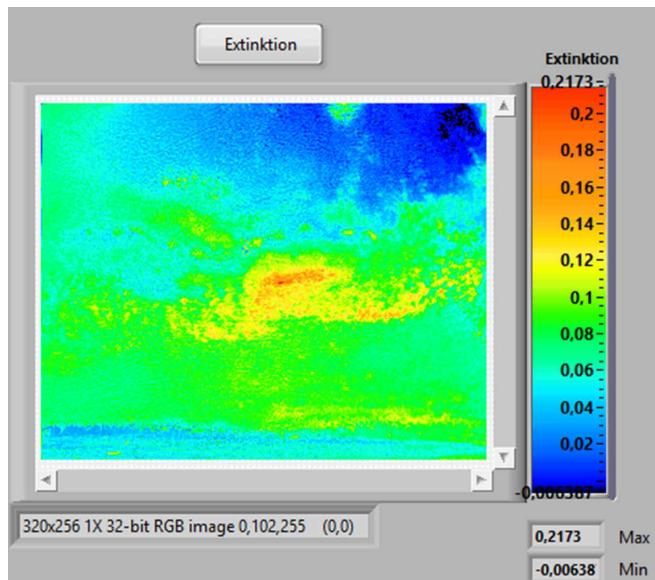


Abb. 6: Schematische Darstellung der betroffenen Wand



**Abb. 7:** (a) MIR-, (b) NIR- und (c) VIS-Aufnahme im Rohformat der Wand im Kellergeschoss



**Abb. 8:** Feuchteverteilung in der Wandfläche des Kellergeschoss in Falschfarbendarstellung

nur unterhalb des oberen Drittels feucht ist. Darüber ist sie nahezu trocken. Der maximale Wassergehalt liegt im Bereich des Schimmels mit einer gemessenen Extinktion von ca. 0,2.

Die Messungen zeigen, dass nur ein Teilbereich der Wand nass ist und zwar bis zu einer Höhe von ca. 30 cm. Dies liegt unterhalb des Erdreichs, was auf eine schadhafte Abdichtung der Außenwand zurückzuführen ist. Dies lässt darauf schließen, dass Wasser von außen in das Mauerwerk gelangt.

Der andere Schadensfall, der hier vorgestellt wird, betrifft eine nasse Wandfläche in einem Gebäude, wie aus Abb. 9 hervorgeht. Die betroffene Wand befindet sich im Sockelgeschoss eines Treppenhauses unterhalb des Erdreichs. Über der nassen Wand liegt ein Fenster.

In Abb. 9a sind feuchte Wandbereiche rechts unterhalb des Fensters erkennbar. Abb. 9b, welche zweieinhalb Wochen spä-



**Abb. 9:** Feuchteschaden Innenwand. (a) Aufnahme am Tag der Begutachtung der örtlichen Gegebenheiten, (b) Tag der Vermessung der Wandfläche



**Abb. 10:** Aufnahme der Wand im mittelinfraroten Wellenlängenbereich

ter aufgenommen wurde (Tag der Messung mit dem NIR-/MIR-Kameramesssystem), sind die feuchten Bereiche vollständig getrocknet. Daher lieferte die Vermessung der Wandfläche mit der NIR-Kamera keine auswertbaren Ergebnisse.

Im mittelinfraroten Wellenlängenbereich sind die ursprünglich feuchten Stellen gut erkennbar (Abb. 10).

Zusätzlich ist in Abb. 10 ein heller Streifen (rote Markierung) ausgehend von der rechten unteren Ecke des Fensters senkrecht nach unten sichtbar. Dieser ist mit bloßem Auge nicht erkennbar (vgl. Abb. 9a und b).

In Tabelle 2 sind die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Raumluft aufgeführt.

**Tabelle 2:** Temperatur- und Feuchtemessung der Raumluft

Messort	Sockelgeschoss (Treppenhaus)
Temperatur /°C	17,3 °C
Relative Feuchte /%	43,8



**Abb. 11:** Defekte Abdichtung an der Außenseite des Fensters

Aus den in Tabelle 2 aufgeführten Werten ergibt sich ein Taupunkt von 4,3 °C. Die niedrigste Temperatur der Wand beträgt 15 °C und damit kann eine Kondensation der Raumluft an der Wand ausgeschlossen werden.

Abb. 10 zeigt eine eindeutige Verbindung zwischen den ursprünglich feuchten Wandbereichen in Abb. 9 links und der unteren rechten Ecke der Fensterverkleidung (s. rote Markierung). Die Helligkeit der Bildpunkte ist proportional zur Temperatur. Die hellen Stellen sind damit wärmer als die dunklen. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich die Gipschicht aufgrund der eingedrungenen Feuchte von der Mauer abgelöst hat. Damit befindet sich eine isolierende Luftschicht dazwischen, die dazu führt, dass diese Bereiche die Temperatur der Raumluft annehmen. Folglich liegt die Vermutung nahe, dass Wasser von außen zwischen Fenster und Mauerwerk eingedrungen ist.

Gemäß Abb. 11 konnte Regenwasser über die schadhafte Abdichtung (rote Markierung) in das Mauerwerk gelangen. Eine Schlagregenbeanspruchung ist in diesem Bereich aufgrund der Windrichtung gegeben.

## 5 Schlussbetrachtung

In dem vorliegenden Beitrag wurde ein mobiles optisches Messsystem vorgestellt, mit dem eine zerstörungsfreie flächige Detektion von Wasserschäden in Mauerwerken möglich ist. Durch Einsatz einer Nah- und Mittelinfrarotkamera lässt sich sowohl die Wasser- als auch die Temperaturverteilung einer Wandfläche bestimmen. In beiden untersuchten Fällen konnten mit dem entwickelten Messverfahren auf einfache und schnelle Weise die Schadensursachen ohne Expertenwissen gefunden werden. Zu beachten ist jedoch, dass nur eine oberflächennahe Detektion von Wasser möglich ist. Beispielsweise bei einem durch einen Rohrbruch hervorgerufenen Wasserschaden, bei dem kein Wasser an die Wandaußenseite gelangt, ist eine Schadensermittlung im Nahinfraroten alleine nicht möglich. In diesem Fall kann aber anhand der Temperaturverteilung, welche die MIR-Kamera liefert, die exakte Schadensursache gefunden werden. Damit resultiert eine deutlich höhere Trefferquote hinsichtlich der Ursachenermittlung mit zwei Kameras unterschiedlicher Wellenlängenbereiche als nur mit einer Kamera eines Wellenlängenbereichs.

Die Mobilität des Systems ließe sich durch den Einsatz eines Akkus anstelle der kabelgebundenen Variante deutlich erhöhen. Hierbei ist natürlich bei der Wahl der Kapazität auf die Masse des Akkus zu achten.

Das Messsystem ist nicht nur zur Detektion von Wasserschäden in Wänden und Mauerwerken geeignet, sondern ließe sich auch zur Beobachtung des Trocknungsverlaufs von Beton-estrichböden einsetzen.

## Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- [1] DEKRA Real Estate Expertise GmbH: Zweiter DEKRA-Bericht zu Baumängeln an Wohngebäuden, Saarbrücken: 2008
- [2] Institut für Bauforschung e.V.: Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenskosten, Hannover: 2015, Forschungsbericht\_20150219
- [3] S. Wiesmaier, F. Eichinger, A. Voropaev, und A. Rocholl: Isotopenanalysen zur Klärung von Wasserschäden, Der Bausachverständige, Nr. 6, 2017, S. 27–32
- [4] K. Geith: Ungewöhnlicher Feuchteschaden in einem Neubau, Der Bausachverständige, Nr. 6, 2011, S. 23–25
- [5] M. Rädle et al.: Messvorrichtung und Verfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes eines Objektes, DE102017101000A1, 20-Juli-2017.
- [6] A. Fong und G. M. Hieftje: Near-Infrared Measurement of Relative and Absolute Humidity through Detection of Water Adsorbed on a Silica Gel Layer, Anal. Chem.
- [7] R. W. Kessler, Hrsg.: Prozessanalytik. Weinheim: 2006, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [8] D. F. Swinehart: The Beer-Lambert Law, J. Chem. Educ., Bd. 39, 1962, S. 333
- [9] E. Barreira und V. P. de Freitas: Evaluation of building materials using infrared thermography, Constr. Build. Mater., Bd. 21, 2007, Nr. 1, S. 218–224
- [10] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, und T. Jayakumar: Infrared thermography for condition monitoring – A review, Infrared Phys. Technol., Bd. 60, 2013, S. 35–55
- [11] H. D. Baehr und K. Stephan: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin Heidelberg: 2006, Springer
- [12] F. Kübel-Heising et al.: Nahinfrarot-Bildanalyse als Werkzeug zur Verfolgung verfahrenstechnischer Vorgänge, Chem. Ing. Tech., Bd. 90, Nr. 6, 2018, S. 842–851

### Die Autoren

#### Felix Kübel-Heising M. Sc.

Hochschule Mannheim  
Kompetenzzentrum CeMOS – Center for Mass Spectrometry and Optical Spectroscopy  
Paul-Wittsack-Str. 10, 68163 Mannheim  
Tel. 0621/761-508-32, Fax: -99  
f.kuebel-heising@hs-mannheim.de



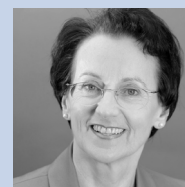
#### Isabel Medina

Kompetenzzentrum CeMOS  
Tel. 0621/761 508-62  
i.medina@hs-mannheim.de



#### Wilhelmina Katschmann

IGB Katschmann, Ingenieure für Gebäudetechnik  
Am oberen Luisenpark 7  
68165 Mannheim  
Tel. 0621/410 733-10, Fax: -11  
igb@igb.ma, www.igb.ma



#### Professor Dr. Matthias Rädle

Hochschule Mannheim CeMOS (stv. Leiter)  
Institut für Prozessmesstechnik und Innovative Energiesysteme (Leiter)  
Paul-Wittsack-Str. 10  
68163 Mannheim  
Tel. 0621/761 508-21  
m.raedle@hs-mannheim.de  
www.cemos.hs-mannheim.de

