

Lock-In-Thermografie mit Gebläse-Steuerung zur Ermittlung von Leckageströmen an Fassaden

Johannes Pernpeintner¹, Benedikt Kölsch², Björn Schiricke³

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Solarforschung, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland, +49 2203 601 3181, johannes.pernpeintner@dlr.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Solarforschung, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

³ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Institut für Solarforschung, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

Kurzfassung

Luftleckagen in der Gebäudehülle sind für einen großen Anteil des Heiz- und Kühlbedarfs eines Gebäudes verantwortlich. Daher ist die schnelle und zuverlässige Detektion von Leckagen entscheidend, eine Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden zu ermöglichen.

In diesem Beitrag wird ein neuer Ansatz zur Bestimmung von Luftleckagen der Gebäudehülle von außen vorgestellt, bei dem Lock-in-Thermografie und thermische Anregung durch ein Blower-Door-System kombiniert werden. Das Gebläse erzeugt dabei einen periodischen Überdruck innerhalb des Gebäudes, der periodische Temperaturänderungen der Oberflächen der Fassade in der Nähe der Leckagen hervorruft. Da die Temperaturänderungen mit bekannter Frequenz angeregt werden, ergeben sich durch Fourier-Transformation der Zeitreihen der Wärmebilder bei der Anregungsfrequenz Amplituden- und Phasenbilder, die die von Leckagen hervorheben. Die periodische Anregung und Erfassung durch eine IR-Kamera ist als Lock-in-Thermografie bekannt, welche in der zerstörungsfreien Prüfung, z.B. von Halbleiterbauelementen, eingesetzt wird.

Es werden Messungen an Fassaden mit drei Anregungszyklen von je 40 Sekunden Dauer bei einer Druckdifferenz von 75 Pa präsentiert. Die Messungen wurden bei Temperaturdifferenzen zwischen Gebäudeinneren und -äußeren von 5 bis 7 K unter stark variierenden Umgebungsbedingungen von Einstrahlung, Wind und Bewölkung durchgeführt. Die Messungen zeigen eine höhere Empfindlichkeit und einen geringeren Einfluss der sich ändernden Umgebungsbedingungen als Vergleichsmessungen mit der Differenz-Bild-Methode. Da die Lock-In-Methode im Amplitudenbild nur die Temperaturänderungen bei der Anregungsfrequenz hervorhebt, werden Temperaturänderungen, die durch Umwelteinflüsse verursacht werden, herausgefiltert. So können Fassaden schnell von außen untersucht werden. Eine weitere Reduktion von unerwünschten Artefakten im Bild wird durch eine Phasengewichtung der Amplitude durch das Skalarprodukt demonstriert.

Schlüsselwörter

Lock-In, Thermografie, Blower Door, Luftdichtheit, Lecksuche, Gebäudehülle, Gebäudeenergieeffizienz

1 Einführung

Ungewollte Luftströme durch die Gebäudehülle sind für 30-50 % des Heizenergieverbrauchs eines Gebäudes verantwortlich (Kalamees, 2007; Jokisalo et al., 2009; Jones et al., 2015). Daher ist die Bewertung der Luftdichtheit, insbesondere aber eine schnelle und zuverlässige Lokalisierung von Leckagen, von entscheidender Bedeutung für die Senkung des Heizenergiebedarfs.

Das etablierte Verfahren zur Messung der integralen Luftdurchlässigkeit von Gebäuden ist das Differenzdruckverfahren (Blower-Door-Test), das ein in einen Türrahmen abgedichtetes Gebläse mit einer integrierten Volumenstrommessung kombiniert. Das Differenzdruckverfahren ist in internationale Normen eingegangen (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018; ASTM, 2019). Zur Lokalisierung von Leckagen kann das Gebläse mit Rauchstäbchen kombiniert werden, indem sie bei aktiviertem Gebläse in die Nähe verdächtiger Stellen gehalten werden und auf Umschlag des Rauchs geachtet wird. Ein ganzes Gebäude so auf Leckagen zu untersuchen ist jedoch recht aufwändig.

Leckagen können auch mit der Infrarot-Thermografie (IRT), bzw. Gebäudethermografie gefunden werden. Die Oberflächentemperatur wird dabei aus der gemessenen Strahlungsleistung und dem Emissionsgrad der Oberfläche berechnet. Korrekturen berücksichtigen den Einfluss der Strahlungsumgebung, Absorption in der Messstecke und die Eigenstrahlung des Messsystems. Die Gebäudethermografie ermöglicht - aufgrund der Visualisierung - eine intuitive Inspektion von Gebäuden, bildet dabei aber nicht nur Lecks, sondern die Summe aller thermischen und radiometrischen Effekte ab, zeigt also gleichzeitig Wärmebrücken, Isolierungsfehler, Wasserschäden, Leckagen, aber einfach auch unterschiedliche Emissionsgrade, Temperaturen und Strahlungsumgebung der Gebäudehülle.

Eine Messmethode, die die Gebäudethermografie mit dem Differenzdruckverfahren kombiniert, wird in der Norm DIN EN 13187 beschrieben (Deutsches Institut für Normung e. V., 1999). Durch den Einsatz des Gebläses (vgl. Bild 1a) wird eine definierte Druckdifferenz zwischen Gebäude und Umgebung erzeugt, die zu Luftströmung durch die Leckagen führt. Je nach Platzierung der IR-Kamera und Anwendung von Über- oder Unterdruck kann die Gebäudehülle von innen oder von außen untersucht werden. Notwendig ist auch ein Unterschied in der Lufttemperatur zwischen innen und außen, der zu einer Temperaturänderung der Oberfläche in der Nähe der Leckagen führt, die von der IR-Kamera erfasst werden kann. Der Vergleich mit einem Referenzbild (Differenz-Bild-Methode) aufgenommen vor der Aktivierung des Ventilators ermöglicht die Unterscheidung zwischen Wärmebrücken und Luftleckagen. Normalerweise wird ein zu untersuchender Raum mit Unterdruck beaufschlagt. Umgebungsluft dringt dann durch undichte Stellen in den Raum ein, was die Temperatur der an die Leckage angrenzenden Oberflächen ändert. Ein Differenzbild, bei dem die Wärmebilder vor und nach dem Betrieb des Gebläses subtrahiert werden, hebt die Veränderungen, also die Umgebung der Leckage, hervor. Der Zeitabstand zwischen den Bildern bei der Differenz-Bild-Methode ist in der Norm nicht beschrieben. Bei Kalamees et al. (Kalamees, 2007) war der Zeitabstand 30 Minuten.

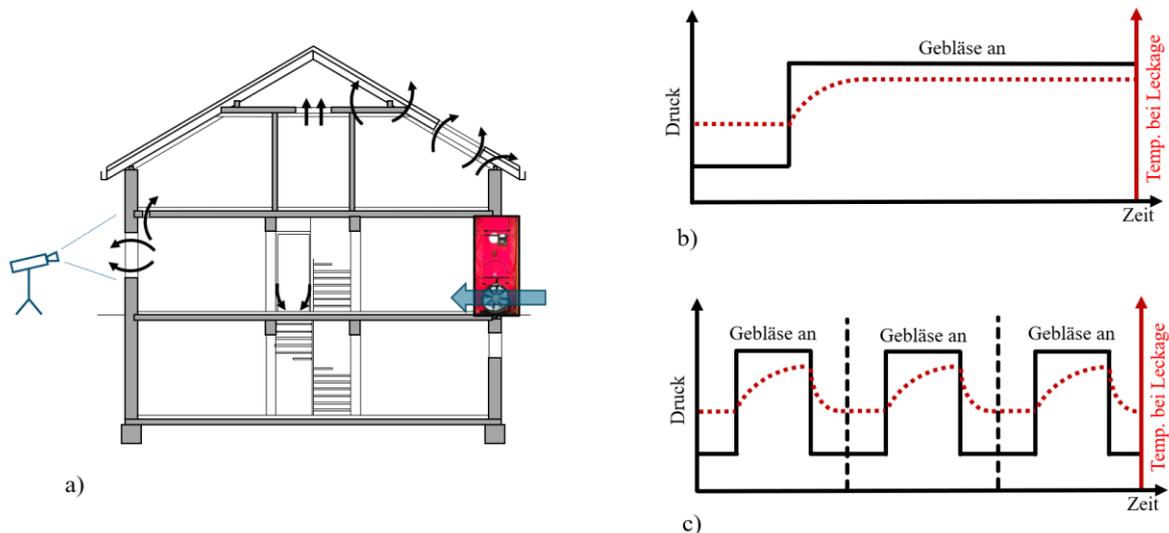


Bild 1: Messaufbau (a) mit Gebläse, IR-Kamera im Gebäudeumfeld; Druckverlauf (grau) und das erwartete Temperaturprofil der Luft bei Leckage (rot) unter Verwendung der Differenzthermografie (b) und der Lock-in-Thermografie in Kombination mit einem Gebläse (c)

Da das Infrarotbild auch von den Umgebungsbedingungen beeinflusst wird, werden auch Schwankungen dieser Einflüsse, wie Wind, Einstrahlung, Schattenwurf, Himmelsbedeckung oder sich bewegende Objekte im Hintergrund zwischen der Aufnahme des Referenz- und des Messbildes erkannt. Aus diesem Grund ist die Differenz-Bild-Methode für die Inspektionen der äußeren Gebäudehülle nur bei stabilen Wetterbedingungen geeignet. Der Temperaturunterschied zwischen innen und außen sollte mindestens 5 K, besser 10 K betragen (Wahlgren und Sikander, 2010). Fox et al. (Fox et al., 2015) stellten die Zeitraffer-Thermografie vor, die Temperaturänderungen an Gebäudeaußenwänden über einen Zeitraum von 15-63 Stunden verfolgt und die Erkennung minimaler Temperaturänderungen ermöglicht.

Die BlowerDoor GmbH bietet die Software Bautools (BlowerDoor GmbH, 2018) an, die ebenfalls Druckdifferenzmessung und Thermografie kombiniert. Dabei werden IR-Bildreihen bei Aktivierung des Gebläses analysiert. Das genaue Auswerteverfahren geht aus dem Datenblatt leider nicht hervor.

Danjoux et al. (Danjoux, 2010) haben Lock-In-Thermografie mit Anregung durch ein Gebläse eines Differenzdruck-Messsystems demonstriert, dabei klassische Auswerteverfahren verwendet und das Verfahren auf Innenräume angewendet.

In diesem Beitrag wird ebenfalls die Kombination von Gebläse mit Gebäudethermografie und Lock-in-Verstärkung untersucht, allerdings mit dem Ziel, die Auswertung robuster zu gestalten, sodass eine Anwendung für die Außenfassade möglich wird.

Lock-in-Verstärker sind Algorithmen - oder darauf basierende Geräte - für hochpräzise Messungen, die in den 1940er Jahren entwickelt wurde (Stutt, 1949), um das Messrauschen zu reduzieren (Breitenstein et al., 2018). Dies wird durch Modulation der Anregung eines Systems - hier des Gebläses - mit bekannter Frequenz erreicht; vgl. Bild 1b und Bild 1c. Durch Anwendung der Fourier-Transformation auf die Zeitreihe der Messwerte kann die lokale Reaktion des Systems auf die Anregung in Amplitude

und Phase bestimmt werden. Mit der verbesserten Verfügbarkeit von Infrarotkameras wurde das Lock-in-Konzept auch auf die Material- und Bauteilprüfung, insbesondere von elektronischen Geräten, übertragen, wo es sich zur etablierten Lock-in-Thermografie (LIT) entwickelte (Breitenstein et al., 2011). Dabei wird die Oberfläche des Objekts thermisch angeregt, um eine Temperaturänderung der Oberfläche zu bewirken, z. B. mit gepulsten Lampen, Laser, Ultraschall oder elektrischen Mitteln. In der Regel ist die Phase der primäre Informationsträger, da die Phase Information über die Eindringtiefe der Temperaturwelle enthält, was z.B. in der Materialprüfung die Erkennung von Einschlüssen oder Delamination ermöglicht.

2 Methode

2.1 Fourier-Transformation

Der Messaufbau ist in Bild 1a dargestellt. Ein Gebläse beaufschlagt ein Gebäude mit einer periodischen Anregungszeit $T_{p,e}$ entsprechend einer Winkelfrequenz von $\omega_e = 2\pi/T_{p,e}$ und einer Frequenz von $f_e = 1/T_{p,e}$. Die IR-Kamera nimmt die Fassade auf. Für jedes Pixel des Filmes wird eine Zeitreihe von Temperaturwerten T_0 auf T_N in zu den Zeiten t_0 bis t_N aufgestellt. Der Lock-in-Algorithmus wird in diesem Fall durch Berechnung der diskreten Fourier-Transformation \tilde{T}_k für jedes Pixel (vgl. Bild 2) und Frequenzindex k ermittelt über

$$\tilde{T}_k = \sum_{n=0}^{N-1} T_n \exp\left(-\frac{i 2\pi}{N} kn\right) = Re_k + i Im_k, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

berechnet, wobei das Ergebnis in einen Realteil Re_k und einen Imaginärteil Im_k aufgeteilt werden kann. Amplitude A_k und Phase φ_k können berechnet werden durch

$$A_k = \sqrt{Re_k^2 + Im_k^2} \quad (2)$$

$$\varphi_k = \tan^{-1}\left(\frac{Im_k}{Re_k}\right) \quad (3)$$

Wie aus Gleichung 1 hervor geht, ergibt die diskrete Fourier-Transformation eine Systemantwort bei den Winkelfrequenzen $\omega_k = 2\pi k / (t_{N+1} - t_0)$. Um also ein Ergebnis genau bei der Anregungsfrequenz ω_e zu erhalten, muss die Zeitspanne $t_{N+1} - t_0$ die folgende Beziehung erfüllen

$$t_{N+1} - t_0 = k T_{p,e} \quad (4)$$

wobei k für eine ganze Zahl steht, wie in Gleichung 1 eingeführt.

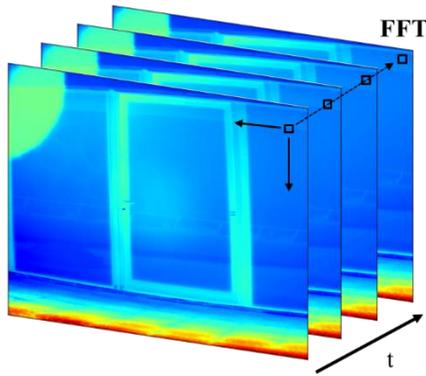


Bild 2: FFT-Berechnung für jedes Pixel

Da Amplitude A_k und Phase φ_k für jedes Pixel vorliegen, können diese als Amplituden- und Phasenbilder dargestellt werden.

Das Phasenbild ist in der Lock-in-Thermografie oft das aussagekräftigste Mittel zur Visualisierung von Prozessen ist. Hier scheint es jedoch nicht sinnvoll anwendbar zu sein, wie die später präsentierten Ergebnisse zeigen. Das Amplitudenbild hingegen macht Leckagen mit gutem Kontrast sichtbar. Allerdings zeigt das Amplitudenbild immer noch Strukturen, die aus Änderungen der Umgebung während der Messung resultieren. Da diese Strukturen im Allgemeinen eine andere Phase als die Leckagen haben, wird zusätzlich noch eine phasengewichtete Amplitude definiert, um die Möglichkeit zu untersuchen, diese unerwünschten Merkmale im Bild zu auszufiltern:

2.2 Phasengewichtete Amplitude mit Skalarprodukt

Die Fourier-Transformierte \tilde{T}_k kann als ein Vektor $\vec{\tilde{T}}_k$ in der komplexen Ebene interpretiert werden, siehe Bild 3.

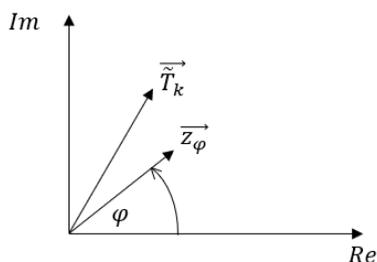


Bild 3: Darstellung der Fourier-Transformierten \tilde{T}_k und des Auswertektors \vec{z}_φ in der komplexen Ebene

Um eine Gewichtung bei einer Auswertephase φ zu ermöglichen, wird ein Auswertevektor \vec{z}_φ mit der Länge 1 eingeführt, der als komplexe Zahl $z_\varphi = \cos \varphi + i \sin \varphi$ geschrieben werden kann. Die phasengewichtete Amplitude $A_{k,\varphi}$ wird nun definiert über das Skalarprodukt der Vektoren $\vec{\tilde{T}}_k$ und \vec{z}_φ über

$$A_{k,\varphi} := \begin{cases} \vec{T}_k \cdot \vec{z}_\varphi = Re_k \cos \varphi + Im_k \sin \varphi & \text{if } \vec{T}_k \cdot \vec{z}_\varphi > 0 \\ 0 & \text{if } \vec{T}_k \cdot \vec{z}_\varphi < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Die Definition in Gleichung 5 ist so gewählt, dass die gewichtete Amplitude $A_{k,\varphi}$ für parallele Vektoren \vec{z}_φ und \vec{T}_k wieder A_k ergibt, und für größer werdende Winkelabweichungen kleiner wird. Zudem soll für negative Skalarprodukte die Gewichtung 0 ergeben.

3 Messaufbau

Ziel einer im Oktober 2021 durchgeführten Messkampagne ist es, die Lock-in-Thermografie in Kombination mit einem Blower-Door-System an einem Gebäude zu demonstrieren und mit der Differenz-Bild-Methode zu vergleichen.

Alle Messungen werden auf der Dachterrasse eines großen mehrstöckigen Bürogebäudes aus den 1970er Jahren in Sankt Augustin, durchgeführt. Bild 4a zeigt ein Foto der Fassade. Der Bildausschnitt besteht hauptsächlich aus einer Fensterfassade. Das mittlere Fenster ist eine Tür. Außerdem ist im Bild unten der Boden der Terrasse und oben ein Dachvorsprung zu sehen. Für diese Tests wurden zusätzliche Kunststoffstreifen an zwei Stellen der Türrahmendichtung eingeklemmt, wodurch künstliche, reproduzierbare Lecks in der Gebäudehülle entstehen (schwarze Kreise in Bild 4a). Bild 4b zeigt ein typisches IR-Bild. Die IR-Bilder werden mit einer InfraTec Image IR 8380 Kamera mit einem Spektralbereich zwischen 2 und 5 μm und einer Auflösung von 640x512 Pixeln aufgenommen. Auf dem IR-Bild sind zunächst keine Leckagen sichtbar. Der Kreis in der oberen linken Ecke des Bildes ist eine interne Reflexion der Kameraoptik. Im Glas sind Reflexionen der gegenüberliegenden Terrasse zu sehen. Bild 4c zeigt das Blower-Door-System, das in den Türrahmen des Raums eingeklemmt ist, der hinter der untersuchten Fassade liegt. Der Temperaturunterschied zwischen innen und außen liegt bei den Messungen zwischen 5 und 7 K. Während der Messung herrscht ein wechselhaftes Wetter mit Phasen von Windstille und böigem Wind sowie teilweiser Bewölkung, was zu wechselnden Einstrahlungsbedingungen von direktem oder diffusem Sonnenlicht auf die Fassade führt. Bei direkter Sonneneinstrahlung ergibt sich Schattenwurf im oberen Teil der abgebildeten Fassade durch den Dachvorsprung.

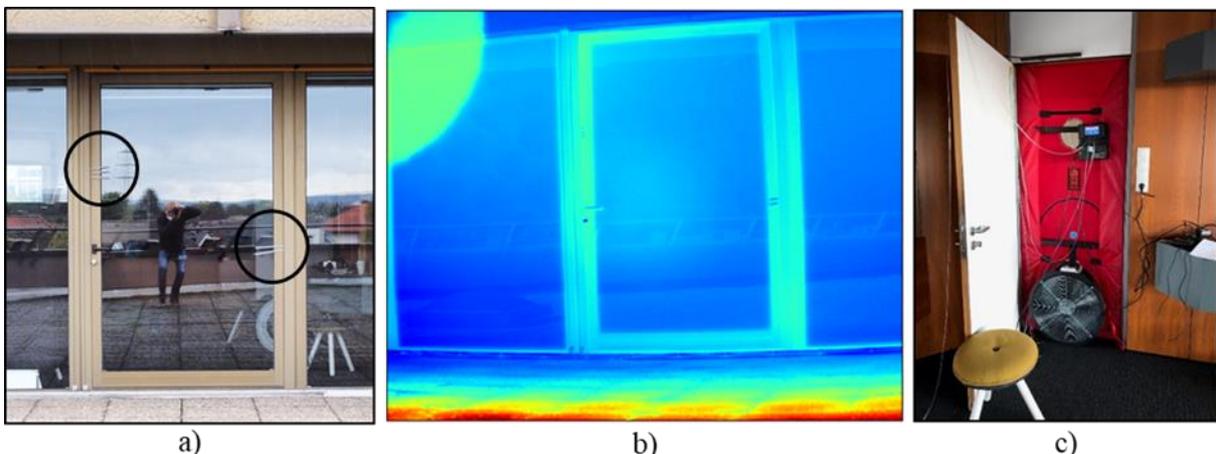


Bild 4: Das untersuchte Fenster der Gebäudefassade, schwarze Kreise zeigen die Positionen der eingeklemmten Kunststoffstreifen (a), IR-Bild (b) und Blower-Door-System im Türrahmen des angrenzenden Raumes (c)

Für die Differenz-Bild-Methode wird zu Beginn der Messperiode ein Referenz-IR-Bild aufgenommen. Dann wird das Gebläse eingeschaltet, das im Raum einen Überdruck von 75 Pa erzeugt, was zu einem Luftstrom in der Nähe der Leckagen und zu einer Änderung der lokalen Lufttemperatur führt. Ein weiteres Bild wird nach einem kurzen Zeitraum von 20 s und einem längeren Zeitraum von 30 min aufgenommen. Das Grundprinzip ist in Bild 1b dargestellt.

Für die Lock-in-Thermografie-Messungen beträgt die Messzeit 2 Minuten. Die IR-Kamera zeichnet während der gesamten Messdauer auf. Ähnlich wie in Bild 1c werden drei Perioden von $T_{p,e} = 40$ s aufgezeichnet, wobei das Gebläse periodisch für jeweils 20 s ein- und ausgeschaltet wird. Die IR-Bilder werden während des Messzeitraums von 2 Minuten mit einer Aufnahmefrequenz von 2 Hz aufgenommen, was 240 je Messung ergibt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Differenz-Bild-Methode

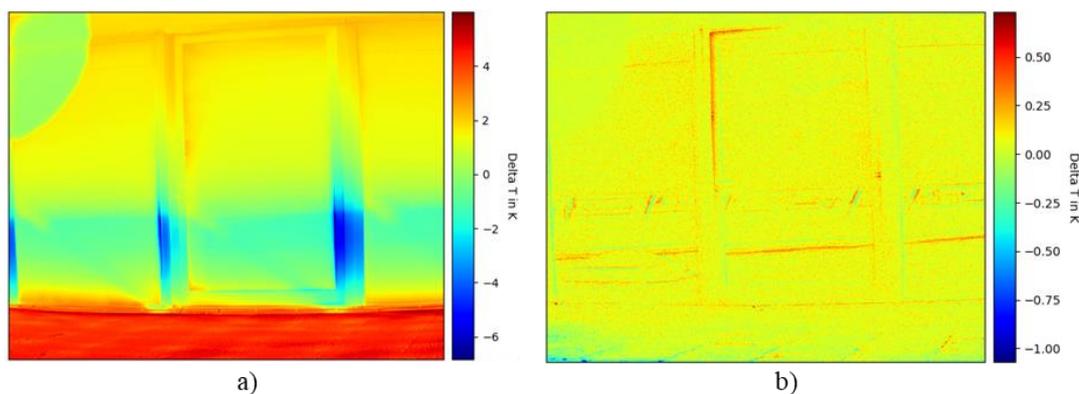


Bild 5: Differenz-Bild-Methode nach 30 Minuten (a) und 20 Sekunden (b)

Bild 5a zeigt das Differenzbild der Fassade nach 30 Minuten Betrieb des Gebläses. In diesem Zeitraum erzeugt das Blower-Door-System eine signifikante Temperaturänderung an den undichten Stellen durch den erzeugten Luftstrom. Diese Temperaturänderungen sind jedoch auf dem IR-Bild nicht sichtbar. Ein wesentliches Problem bei Differenzbildern, die außerhalb eines Gebäudes aufgenommen werden, sind die wechselnden Wetterbedingungen (z. B. Sonneneinstrahlung, Wolken). Diese von außen induzierten Temperaturänderungen an der Gebäudeoberfläche haben in diesem Fall über diesen Zeitraum einen viel größeren Einfluss als die lokalen Temperaturänderungen, die durch das Blower-Door-System erzeugt werden.

Ein weiteres Differenzbild (Bild 5b) wird mit einer Zeitdifferenz von 20 s aufgenommen. Durch die kürzere Messdauer wird der Einfluss wechselnder Wetterbedingungen auf die Messung stark reduziert. An den Positionen der Kunststoffstreifen sind

Temperaturunterschiede von $\sim 0,5$ K kaum zu erkennen. Deutlich sichtbar ist jedoch ein großes Leck in der oberen linken Ecke des Fensterrahmens, wo die eingeklemmten Kunststoffstreifen den Rahmen aufstemmen. Außerdem zeigt das Bild in den Reflexionen des Glases Artefakte der wechselnden Umgebungsbedingungen.

4.2 Lock-In-Infrarot-Thermografie

Bild 6 zeigt die Amplituden- und Phasenbilder der Lock-in-Messung. Aufgrund der Anregungsperiode von 40 s erfolgt die Auswertung bei einer Frequenz von 0,025 Hz. Das Amplitudenbild (Bild 6a) ist ähnlich aufgebaut wie das Differenzbild in Bild 5b. Es zeigt die künstlichen Lecks, in durch die Kunststoffstreifen erzeugt werden. Zudem ist wieder in der linken oberen Ecke des Fensters eine größere Leckage erkennbar. Im Allgemeinen ist das Bild klarer und weniger verrauscht, als das Bild der Differenz-Methode. Die Artefakte, die sich aus wechselnden Umgebungsbedingungen ergeben, sind im Bild immer noch sichtbar, z. B. die Reflexionen auf dem Boden im vorderen Teil des Bildes oder die Reflexionen des Geländers im Fenster.

Das Phasenbild ist in Bild 6b dargestellt. Während die Terrasse und das Gelände deutlich zu erkennen sind, scheint das Phasenbild selbst nicht geeignet zu sein, die undichten Stellen hervorzuheben. Allerdings zeigt sich keine zufällige Verteilung der Phasen, sondern, dass Strukturen im Amplitudenbild mit bestimmten Phasen korreliert sind. Daher wird im Folgenden eine Gewichtung der Amplitudenwerte mit Phasenwerten nach der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Methode vorgenommen, um so evtl. unerwünschte Artefakte im Bild ausfiltern zu können.

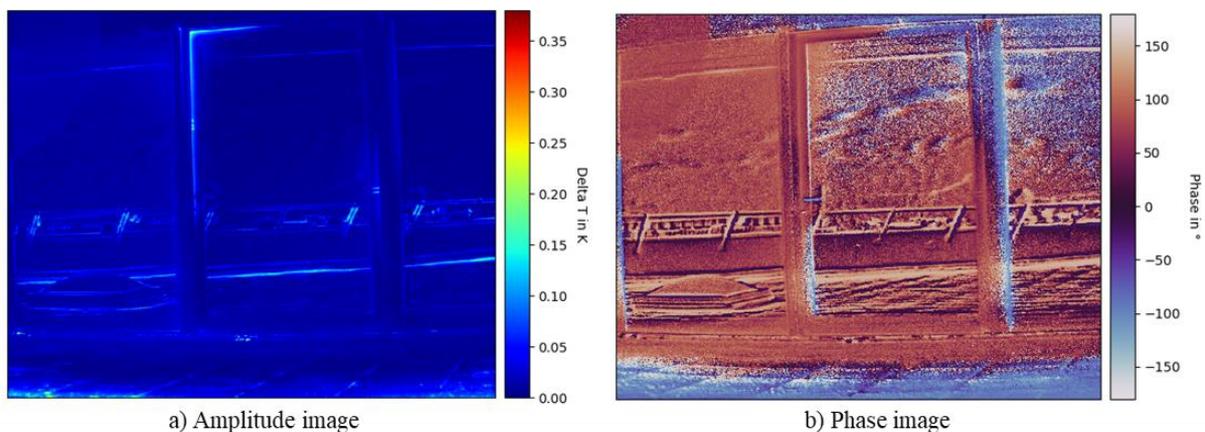


Bild 6: Amplitudenbild (a) und Phasenbild (b) der bei einer Frequenz von 0,025 Hz

Es werden mehrere Messungen mit Lock-in-Thermografie durchgeführt. Ein besonders interessanter Datensatz soll jedoch im Folgenden vorgestellt werden. Bild 7a wiederholt das Amplitudenbild (von Bild 6a), zeigt aber zusätzlich Bilder der phasengewichteten Amplitude bei den (Auswerte-)Phasen 180° , 120° und 60° . Diese Phasen werden hier exemplarisch ausgewählt, da sie zeigen, dass über die Auswertephase bestimmte Strukturen im Bild hervorgehoben werden können. In Bild 7b ist das Amplitudenbild mit einem Phasenwinkel von 180° gewichtet. Dabei werden die Reflexionen im Fenster, z. B. das Gelände, hervorgehoben. Bei einem Phasenwinkel von 120° (Bild 7c) ist vor allem der Bereich vor dem Fenster auf dem Bild sichtbar. Bei einem Phasenwinkel von 60° (Bild 7d) schließlich sind nur noch die

Stellen der Leckage im Türrahmen sichtbar, während andere Merkmale stark abgeschwächt sind. Die Auswertung der Amplitude bei einer bekannten Anregungsfrequenz und einem charakteristischen Phasenwinkel kann also dazu verwendet werden, die durch Umwelteinflüsse und die Leckagen verursachten Schwankungen zu trennen. Dies ist eine deutliche Verbesserung des reinen Amplitudenbilds aus Bild 7a. Während jedoch die Phase der Anregung durch das Gebläse bekannt ist, ist die Phase der Veränderungen in der Umgebung zufällig. Daher wird diese Trennung umso schwieriger, je geringer der Unterschied zwischen der Phase der Anregung und der der Umgebung ist.

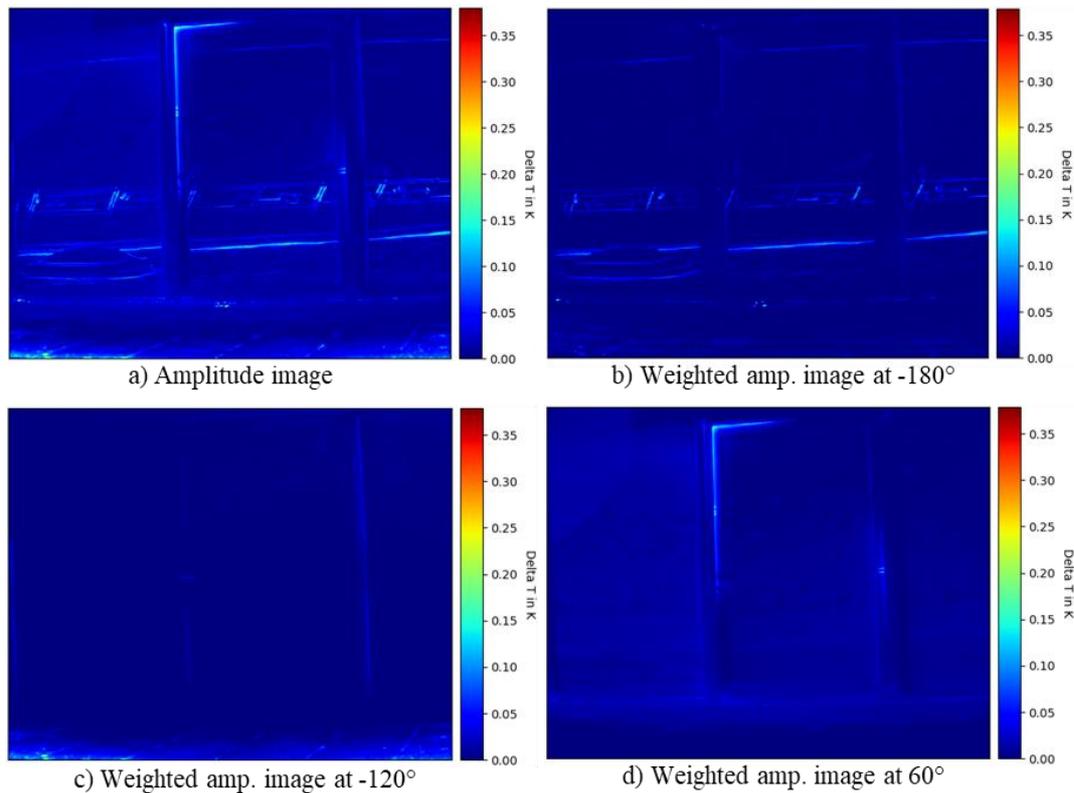


Bild 7: Amplitudenbild bei einer Frequenz von 0,025 Hz (a) und Phasen-gewichtete Amplitudenbilder bei ausgewählten Phasenwinkeln von -180° (b), -120° (b) und 60° (d)

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Methode der Lock-in-Thermografie in Kombination mit einem Blower-Door-System auf Gebäudehüllen präsentiert. Die Methode ermöglicht eine schnelle Identifizierung von Leckagen an Fassaden. Das Amplitudenbild zeigt bereits eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur Differenz-Bild-Methode. Zudem konnten in der Beispielmessung durch die Auswertung des Amplitudenbildes bei unterschiedlichen Phasenwinkeln nach Entstehungsmechanismus getrennt werden, wodurch sich die Leckage weiter von anderen Bildstrukturen trennen lässt. Die präsentierte Methode zeigt somit das Potential, unempfindlich gegenüber wechselnden Umgebungsbedingungen zu sein und somit im Außenbereich bei wechselhaften Wetterbedingungen einsetzbar zu sein. Darüber hinaus lässt sich diese Methode leicht automatisieren.

Da jedoch die Umwelteinflüsse zufällig in der Phasenlage auftreten, bleibt eine Herausforderung für künftige Entwicklungen, die Hervorhebung von Leckagen noch robuster zu gestalten.

Referenzen

ASTM (2019). E779-19 Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization. West Conshohocken, PA: ASTM International.

BlowerDoor GmbH (2018). Bau.Tools BlowerDoor. Springe-Eldagsen.

Breitenstein, O., Schmidt, C., Altmann, F. and Karg, D. (2011). Thermal Failure Analysis by IR Lock-in Thermography. In: *ASM International (ed.), Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference*, 330–339.

Breitenstein, O., Warta, W. and Schubert, M.C. (2018). Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Danjoux, R und Rinaldi, R (2010). Lock-In Blower Door Technique to Enhance the Thermographic Visualization of Extremeley Small Air Leaks. *InfraMation 2010 Proceedings*, 2010-220

Deutsches Institut für Normung e. V. (1999). DIN EN 13187:1998, Thermal Performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Deutsches Institut für Normung e. V. (2018). DIN EN ISO 9972:2018-12, Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. and Wilde, P. de (2015). Time-lapse thermography for building defect detection. *Energy and Buildings*, 92, 95–106.

Jokisalo, J., Kurnitski, J., Korpi, M., Kalamees, T. and Vinha, J. (2009). Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. *Building and Environment*, 44(2), 377–387.

Jones, B., Das, P., Chalabi, Z., Davies, M., Hamilton, I., Lowe, R., Mavrogianni, A., Robinson, D. and Taylor, J. (2015). Assessing uncertainty in housing stock infiltration rates and associated heat loss: English and UK case studies. *Building and Environment*, 92, 644–656.

Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, 42(6), 2369–2377.

Lerma, C., Barreira, E. and Almeida, R.M. (2018). A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration. *Energy and Buildings*, 168, 56–66.

Mahmoodzadeh, M., Gretka, V., Wong, S., Froese, T. and Mukhopadhyaya, P. (2020). Evaluating Patterns of Building Envelope Air Leakage with Infrared Thermography. *Energies*, 13(14).

Stutt, C.A. (1949). Low-Frequency Spectrum of Lock-In Amplifiers, Technical Report No. 105, Research Laboratory of Electrics - Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts.

Wahlgren, P. and Sikander, E. (2010). Methods and Materials for an Airtight Building, *Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI Conference*.