

Schall- und Luftdichtheit von Fenstern in der Renovation

Barbara Wehle
Berner Fachhochschule AHB
Biel, Schweiz



Prof. Dr. Christoph Geyer
Berner Fachhochschule AHB
Biel, Schweiz



Amabel Mélian Hernandez
Berner Fachhochschule AHB
Biel, Schweiz



Schall- und Luftdichtheit von Fenstern in der Renovation

1. Einleitung

Im Rahmen des bereits abgeschlossenen Forschungsprojektes «Schallschutz und Luftdichtheit historischer Fenster - Untersuchung des Einflusses der Fugendurchlässigkeit auf den Schallschutz und die Lüftungswärmeverluste historischer Fenster» der Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau (BFH AHB) wurden die Schalldämmmaße der am häufigsten vorkommenden historischen Fensterkonstruktionen Einfachfenster, Kastenfenster, Vorfenster und Verbundfenster an sechs historisch wertvollen Gebäuden vor und nach einer Sanierung insitu gemessen.

Zudem wurde die Fugendurchlässigkeit der unsanierten und sanierten Fenster anhand von zwei verschiedenen Insitu-Messmethoden bestimmt. Durch einen Vergleich der Messergebnisse vor und nach der Sanierung wurde das Potenzial der Sanierungsmaßnahmen an historischen Fenstern in Hinblick auf die Verbesserung der Schalldämmeigenschaften sowie der Luftdichtheit ermittelt.

2. Anforderungen

Nachfolgend werden die Anforderungen an die Schalldämmung sowie Luftdichtheit eines Fensters beschrieben.

2.1. Luftschalldämmung Fassade

Gemäß Art. 74 der schweizerischen Bundesverfassung [3] ist der Bund verpflichtet, Vorschriften über den Schutz des Menschen und seiner natürlichen Umwelt gegen schädliche oder lästige Einwirkungen zu erlassen. In Bezug auf Lärmeinwirkungen wurde 1986 die Lärmschutzverordnung (LSV) eingeführt [8].

Die Beurteilung der Schallschutzanforderungen der im Forschungsprojekt untersuchten Fenster erfolgt auf Grundlage der Belastungsgrenzwerte für Straßenverkehrslärm bzw. Schienenverkehrslärm am jeweiligen Objektstandort. Andere Lärmarten, wie z.B. Fluglärm, werden nicht berücksichtigt.

Die zulässigen Belastungsgrenzwerte werden mit Hilfe der maßgebenden Beurteilungspegel L_r in dB(A) am Gebäudestandort festgelegt. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden die Beurteilungspegel der Lärmdatenbank «sonBASE» des Bundesamts für Umweltschutz (BAFU) entnommen [7]. Diese ersetzt genaue Lärmmessungen nicht, ist aber für eine erste Beurteilung der Lärmsituation an den Gebäudestandorten gut geeignet. Der Datenbank können Beurteilungspegel der Lärmbelastung durch Straßen- sowie Schienenverkehr sowohl am Tag (6:00 – 22:00 Uhr) als auch in der Nacht (22:00 – 06:00 Uhr) entnommen werden.

Die LSV definiert in Anhang 1 Anforderungen an die Schalldämmung von Fenstern. Das bewertete Bauschalldämmmaß mit am Bau gemessenem Spektrum-Anpassungswert $R'_{w+(C \text{ oder } C_{tr})}$ der Fenster einschliesslich der zugehörigen Bauteile wie z.B. Rollladenkästen muss in Abhängigkeit des maßgebenden Beurteilungspegels L_r mindestens die in Abbildung 1 dargestellten Werte einhalten. Das bewertete Bauschalldämmmaß ohne Spektrum-Anpassungswerte muss dabei mindestens 35 dB und höchstens 41 dB betragen.

| L_r in dB(A) | | $R'_{w+(C \text{ oder } C_{tr})}$ in dB |
|----------------|----------------|---|
| Tag | Nacht | |
| bis und mit 75 | bis und mit 70 | 32 |
| über 75 | über 70 | 38 |

Abbildung 1 : Anforderungen bewertetes Bauschalldämmmaß mit am Bau gemessenen Spektrum-Anpassungswerten $R'_{w+(C \text{ oder } C_{tr})}$ der Fenster einschliesslich zugehöriger Bauteile (z.B. Rollladenkästen) in Abhängigkeit des Beurteilungspegels L_r (entnommen aus LSV, Stand 01.04.2018 [8]).

Der Spektrums-Anpassungswert C_{tr} gilt bei überwiegend tieffrequentem Lärm, insbesondere von Straßen mit einer Höchstgeschwindigkeit bis 80 km/h. Der Spektrums-Anpassungswert C gilt bei überwiegend hochfrequentem Lärm, insbesondere von Straßen mit einer Höchstgeschwindigkeit über 80 km/h.

2.2. Luftdichtheit

Um die Luftdichtheit eines Fensters zu beurteilen, erfolgt in der Regel eine Einordnung in Luftdichtheitsklassen nach SN EN 12207 «Fenster und Türen – Luftdurchlässigkeit – Klassifizierung»[12]. Die Norm definiert vier verschiedene Luftdichtheitsklassen. Die Klassifizierung des jeweiligen Fensters erfolgt anhand von Messungen in akkreditierten Fensterprüfständen nach der Norm SN EN 1026 «Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit – Prüfverfahren»[11].

Für die Prüfung der Fugendurchlässigkeit wird eine Messung mit Überdruck und eine Messung mit Unterdruck durchgeführt. Die Ergebnisse beider Messungen sowie deren Mittelwerte werden mit Referenzdurchlässigkeiten der vier Luftdichtheitsklassen verglichen. Die Norm SN EN 12207 definiert für jede Luftdichtheitsklasse als oberen Grenzwert eine Referenzdurchlässigkeit bei 100 Pa.

Fenster der Klasse 1 weisen dabei die niedrigste und Fenster der Klasse 4 die höchste Luftdichtheit auf. Um ein Fenster auf dem Schweizer Markt einführen zu dürfen, muss dieses mindestens die Luftdichtheitsklasse 1 einhalten. Mit den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Messverfahren ist es möglich, die Luftdichtheitsklasse von eingebauten Fenstern insitu am Gebäude zu bestimmen.

3. Messverfahren

An sechs verschiedenen Gebäuden an den Standorten Coseaux (GE), Luzern (LU), Basel (BS), Neuchâtel (NE), Bern (BE) und Ebnat-Kappel (SG) werden Messungen der Luftschalldämmung sowie Luftdichtheit mit einer Ausnahme an jeweils zwei Fenstern vor und nach der Sanierung durchgeführt. In Ebnat-Kappel konnte nur ein unsaniertes sowie ein saniertes Fenster untersucht werden.

3.1. Luftschalldämmung nach EN ISO 16283-3

Die Luftschalldämmung der Fenster wird vor Ort mit dem sogenannten Bauteil-Lautsprecher-Verfahren nach EN ISO 16283-3 [5] bestimmt. Bei diesem Messverfahren wird das zu untersuchende Bauteil mit einem Lautsprecher beschallt. Dieser wird so vor dem zu messenden Fenster aufgestellt, dass die von ihm erzeugte Schallwelle unter einem Winkel ϑ von $(45 \pm 5)^\circ$ gegenüber der Flächennormalen des Fensters einfällt.

Das Bauschalldämmmaß für Außenbauteile, $R'_{w,\vartheta}$ in dB, wird in Anlehnung an EN ISO 16283-3 wie folgt ermittelt:

$$R'_{w,\vartheta} = L_{1,s} - L_2 + 10 \cdot \log\left(\frac{S \cdot \cos \vartheta}{A}\right) \text{ dB}$$

Dabei steht

- $L_{1,s}$ für den mittleren Schalldruckpegel direkt auf der Außenfläche des zu prüfenden Bauteils in dB
- L_2 für den mittleren Schalldruckpegel im Empfangsraum in dB
- S für die Fläche des Trennbauteils zwischen Außenraum und Empfangsraum in m^2
- ϑ für den räumlichen Einfallswinkel der Schallwelle auf dem Fenster
- A für die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum in m^2

Der Sendepiegel des Lautsprechers (mittlerer Schalldruckpegel $L_{1,s}$) wird aussen direkt auf dem zu prüfenden Fenster im Abstand von 3 mm vor der Verglasung an 8 bis 10 Positionen gemessen.

Im Raum hinter dem Fenster wird der mittlere Schalldruckpegel im Empfangsraum L_2 an mindestens 5 Positionen mit Hilfe eines weiteren Mikrophons erfasst.



Abbildung 2: Links und Mitte: Messprinzip Bauteil-Lautsprecher-Verfahren nach EN ISO 16283-3 [5]; der Lautsprecher (2) wird außen so aufgestellt, dass die Schallwelle unter einem Winkel von $(45 \pm 5)^\circ$ auf das Fenster (1) einfällt. Rechts: Positionierung des Mikrophons im Abstand von 3 mm außen vor der Verglasung mit Hilfe eines Abstandhalters.

3.2. Insitu-Messverfahren Luftdichtheit

Für die Messung der Luftdurchlässigkeit von Fenstern im eingebauten Zustand stehen zwei Messverfahren zur Verfügung: Das «a-Wert Messsystem»[1] und das «MLM-Messsystem»[2] zur Bestimmung der Fugendurchlässigkeit von Fenstern und Bauteilen, die beide von der BlowerDoor GmbH vertrieben werden.

3.2.1. Messung mittels a-Wert MessSystem

Das a-Wert MessSystem besteht aus einem Druckmessgerät (DG-700), einem Ventilator mit Drehzahlregler, einem Aluminiumrahmen mit einer roten Plane, einem Schlauchset, einem Lochblendenset, einer Plastikfolie und Klebeband. Die Folie wird mit Klebeband luftdicht auf dem Blendrahmen des Fensters befestigt.

In die Folie wird eine Lochblende mit definierter Öffnung eingeklebt. Zur Aufnahme des Druckes im Hohlraum zwischen Folie und Bauteil wird ein Kapillarröhrchen in den Zwischenraum durch die Folie gesteckt und mit Klebeband abgedichtet.

In eine Türöffnung des Raumes hinter dem zu untersuchenden Fenster wird mit Hilfe des Aluminiumrahmens und der Plane ein Ventilator eingebaut. Dieser wird genutzt, um gegenüber dem atmosphärischen Druck außen einen Unterdruck im Raum und somit auch im Hohlraum zwischen Fenster und Folie zu erzeugen. Bei der Messung werden mindestens 8 verschiedene Druckstufen angefahren.

Die Luft, die über die Funktionsfugen des Fensters eindringt, strömt durch die Lochblende mit definierter Öffnung. Anhand der Größe der Lochblendenöffnung und der Druckdifferenz vor und hinter der Lochblende (Δp_{Blende}) wird der Volumenstrom durch die Blende gemäß folgender Formel ermittelt [14]. Um die Luftdichtigkeitsklasse zu erhalten, wird dieser auf die Fugenlänge und die Bauteilfläche bezogen.

$$V_{\text{Blende}} = 3600 \cdot \frac{s}{h} \cdot c_d \cdot A_{\text{LB}} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot (\Delta p_{\text{Blende}})^{0.5} \text{ in } \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Hierbei bezeichnet

- $c_d = 0.61$ den Widerstandbeiwert der Blende
- A_{LB} die lichte Öffnungsfläche der Blende in m^2
- Δp_{Blende} die Druckdifferenz, die an der Blendenöffnung anliegt in Pa
- ρ die Dichte der Luft an der Blende in kg/m^3

Um die Messergebnisse miteinander vergleichen zu können, werden alle Volumenströme für Normalbedingungen (Temperatur $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, Luftdruck $p_0 = 101'325 \text{ Pa}$) berechnet. Zur Bestimmung der am Fenster anliegenden Druckdifferenz, wird zusätzlich die dazugehörige Druckdifferenz am Bauteil ($\Delta p_{\text{Bauteil}}$) gemessen. Die Drücke werden jeweils über Schläuche an den einzelnen Messstellen abgegriffen und von der DG-700 erfasst.

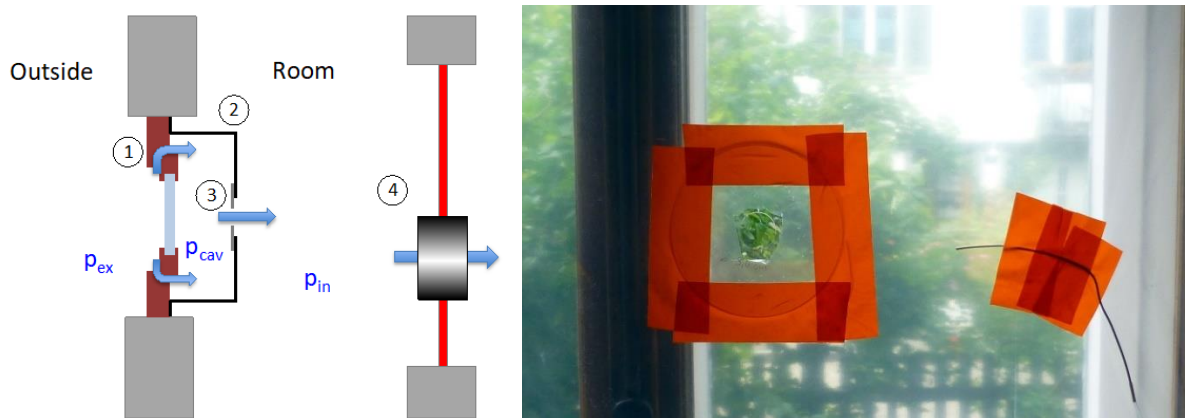


Abbildung 3: Links: Prinzipskizze der Vor-Ort-Messung zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit mittels a-Wert MessSystem mit Testfenster (1), der Folie (2), der Messblende (3) und dem BlowerDoor - Ventilator (4) zur Erzeugung eines Unterdruckes im Raum. « p_{in} » steht für Innendruck, « p_{cav} » für Druck im Hohlraum und « p_{ex} » für Außendruck. Rechts: Ansicht Lochblende mit definierter Öffnung und Kapillare.

3.2.2. Messung mittels MLM MessSystem

Das MLM-Messsystem besteht ebenfalls aus einem Ventilator mit Drehzahlregler, dem Messgerät DG-700, einem Schlauchset, einer Plastikfolie und Klebeband. Weiter besteht es aus dem Volumenstrommessgerät MLM mit vier dazugehörigen Messblenden zwei Verbindungsschläuchen und zwei Anschlußplatten.

Die Bauteilanschlußplatte wird, analog zur Lochblende beim a-Wert MessSystem, in der Folie am Fenster festgeklebt. Ein Verbindungsschlauch verbindet diese Anschlußplatte mit dem Volumenstrommessgerät MLM. Der zweite Verbindungsschlauch verbindet dieses wiederum mit dem Ventilator. Der Ventilator muss nicht wie bei der Messung mit dem a-Wert MessSystem in einer Türöffnung befestigt werden, sondern steht frei im Raum.

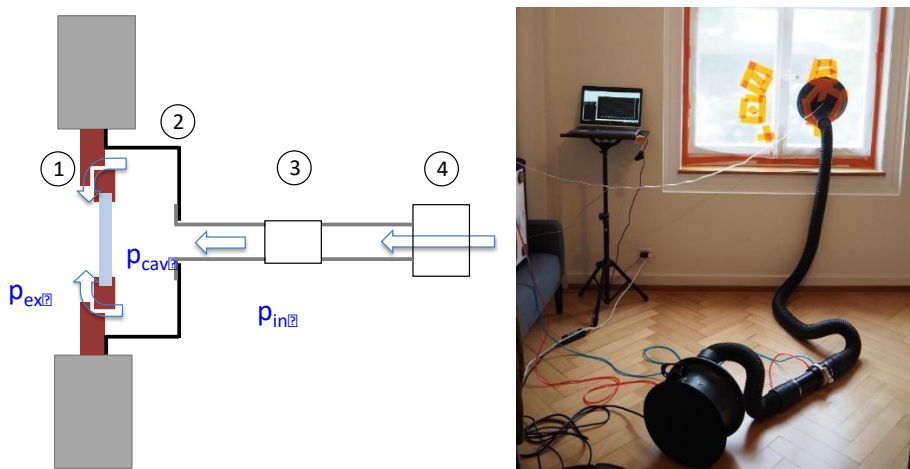


Abbildung 4: Links: Prinzipskizze der Vor-Ort-Messung zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit mittels MLM-MessSystem mit Testfenster (1), der Folie (2), der Messblende (3) und dem BlowerDoor - Ventilator (4) zur Erzeugung eines Überdruckes im Hohlraum zwischen Folie und Fenster. « p_{in} » steht für Innendruck, « p_{cav} » für Druck im Hohlraum und « p_{ex} » für Außendruck. Rechts: Ansicht MLM-Messsystem

Der Ventilator erzeugt gegenüber dem atmosphärischen Druck im Gebäude einen Überdruck im MLM Rohrsystem, und somit auch im Hohlraum zwischen Fenster und Folie. Sobald ein stabiler Überdruck zwischen Fenster und Folie hergestellt ist, kann mit der Messung begonnen werden.

Die Luft strömt durch die definierte Messblende im Volumenstrommessgerät MLM in den Hohlraum zwischen Fenster und Folie und durch Undichtigkeiten der Funktionsfugen nach außen. Anhand der Größe der Lochblendenöffnung und der Druckdifferenz vor und hinter der Blende (Δp_{MLM}) wird der Volumenstrom nach oben genannter Formel ermittelt.

Um die Referenzdrücke zu erhalten, wird zusätzlich die dazugehörige Differenz des Druckes im Hohlraum zu dem im Raum ($\Delta p_{Bauteil}$) gemessen. Damit sichergestellt ist, dass diese Druckdifferenz gleich der Druckdifferenz am Bauteil, $\Delta p_{Bauteil}$, ist, wird in diesem Raum ein Fenster geöffnet, so dass der Druck im Raum gleich dem Aussendruck ist.

4. Untersuchte Fenster

Die Messungen werden an insgesamt 11 historischen Fenstern an 6 verschiedenen Objekten durchgeführt. Bei der Sanierung werden die originalen Bauteile der Fenster, wie z.B. Beschläge und Fensterrahmen, soweit wie möglich erhalten.

Die Fensterrahmen werden im Zuge der Sanierung alle mit mindestens einer umlaufend eingefrästen Falzdichtung ausgestattet. Zudem wird in jedes Fenster eine Isolierverglasung eingebaut. Die sanierten Fensterflügel werden in der Werkstatt instandgesetzt. Die Beschläge der Fenster werden neu eingestellt.

In nachfolgender Tabelle sind Angaben zu Fenstertyp, Glasart, Glasaufbau und Anzahl Dichtungen der untersuchten Fenster vor und nach der Sanierung aufgeführt.

Tabelle 1: Fenstertyp, Glasart, Glasaufbau und Anzahl Dichtungen der untersuchten Fenster vor und nach der Sanierung.

| Objekt/ Fensteralter | Unsanierter Zustand | | | Sanierter Zustand | | |
|-------------------------------------|--|-------------------------------|------------|--|-------------------------------------|------------|
| | Fenstertyp | Glasart/Dicke [mm] | Dichtungen | Fenstertyp | Glasart/Dicke [mm] | Dichtungen |
| Corseaux (GE-1)/ ca. 1920 | Einfachfenster (2 Drehflügel) | 1-fach/ 2.5 | - | Einfachfenster (2 Drehflügel) | Isolierglas, 4/12.4/4+4 | 1 |
| Corseaux (GE-2)/ ca. 1920 | Einfachfenster (1 Kippflügel) | 1-fach/ 2.5 | - | Einfachfenster (1 Kippflügel) | Isolierglas, 4/12.4/4+4 | 1 |
| Luzern (LU-1)/ Anfang 20. Jhd. | Einfachfenster + Vorfenster (2 Drehflügel) | 1-fach + 1-fach/ 3.0 + 3.0 | - | Einfachfenster + Vorfenster (2 Drehflügel) | Isolierg.+1-fach/ 4/16/6 + 3.0 | 1+0 |
| Luzern (LU-2)/ Anfang 20. Jhd. | Einfachfenster + Vorfenster (2 Drehflügel) | 1-fach + 1-fach/ 3.0 + 3.0 | - | Einfachfenster + Vorfenster (2 Drehflügel) | Isolierg.+1-fach/ 4/16/6 + 3.0 | 1+0 |
| Basel (BS-1)/ Anfang 20. Jhd. | Einfachfenster + Vorfenster (4+2 Drehflügel) | 1-fach + 1-fach/ 2.1 + 1.8 | - | Einfachfenster + Vorfenster (4+2 Drehflügel) | Isolierg.+1-fach/ 3/10/3 + 1.8 | 2+0 |
| Basel (BS-2)/ Anfang 20. Jhd. | Einfachfenster + Vorfenster (4+2 Drehflügel) | 1-fach + 1-fach/ 2.1 + 1.8 | - | Einfachfenster (4 Drehflügel) | Isolierglas/ 3/10/3 | 2 |
| Neuchâtel (NE-1)/ Ende 19. Jhd. | Kastenfenster (2+2 Drehflügel) | 1-fach + 1-fach/ 3.0 + 3.0 | - | Kastenfenster (2+2 Drehflügel) | 1-fach+Isolierg./ 3.0 + 4/10/3+3 | 0+1 |
| Neuchâtel (NE-2)/ Ende 19. Jhd. | Kastenfenster (2+2 Drehflügel) | 1-fach + 1-fach/ 3.0 + 3.0 | - | Kastenfenster (2+2 Drehflügel) | 1-fach+Isolierg./ 3.0 + 4/10/3+3 | 0+1 |
| Bern (BE-1)/ 1930 | Verbundfenster (2 Drehflügel + 1 Lüftungsflügel) | 1-fach + 1-fach/ 2.1 + 2.1 | - | Verbundfenster (2 Drehflügel + 1 Lüftungsflügel) | Isolierg.+1-fach/ 3/10/3 + 2.1 | 2+0 |
| Bern (BE-2)/1930 | Verbundfenster (2 Drehflügel) | 1-fach + 1-fach/ 2.1 + 2.1 | - | Verbundfenster (2 Drehflügel) | Isolierg.+1-fach/ 3/10/3 + 2.1 | 2+0 |
| Ebnat-Kappel (SG-1)/Anfang 20. Jhd. | Einfachfenster + Vorfenster (3+2 Drehflügel; 3+2 Kippflügel) | 1-fach + 1-fach/ 2.1 + 2.1 | - | Einfachfenster (3 Drehflügel; 3 Kippflügel) | Isolierglas/ 4/10/4 | 1 |

5. Resultate

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Schall- sowie Luftdichtigkeitsmessungen zusammengefasst.

5.1. Schalldämmung

In Tabelle 2 ist eine Übersicht der gemessenen Bau-Schalldämmmaße $R'_{w,\vartheta}$ (C ; C_{tr}) in dB der Fenster im unsanierten sowie sanierten Zustand dargestellt. Kastenfenster, Verbundfenster und Einfachfenster mit Vorfenster werden in die Kategorie «2 Fenster» und Einfachfenster in die Kategorie «1 Fenster» eingeteilt. Die untersuchten Messobjekte befinden sich alle in Wohngebieten an Straßen mit Höchstgeschwindigkeiten unterhalb von 80 km/h, weshalb der Spektrums-Anpassungswert C_{tr} maßgebend ist.

Die gemessenen Werte für $(R'_{w,\vartheta} + C_{tr})$ werden mit den Anforderungen der LSV [8] verglichen. Ausgehend von einem maßgebenden Beurteilungspegel $L_{r,Tag} < 75$ dB und $L_{r,Nacht} < 70$ dB an den Objektstandorten gemäss «sonBASE»-Datenbank, liegt die Anforderung an die Schalldämmung der Fenster bei $(R'_{w,\vartheta} + C_{tr}) > 32$ dB.

Tabelle 2: Übersicht der gemessenen Bau-Schalldämmmaße für Außenbauteile $R'_{w,\vartheta}$ (C ; C_{tr}) in dB im unsanierten sowie sanierten Zustand der Fenster. Es erfolgt eine Einteilung in «2 Fenster» (Kastenfenster, Verbundfenster und Einfachfenster mit Vorfenster) sowie «1 Fenster» (Einfachfenster). Die gemessenen Werte für $(R'_{w,\vartheta} + C_{tr})$ werden mit den Anforderungen der LSV verglichen, ausgehend von einem maßgebenden Beurteilungspegel $L_{r,Tag} < 75$ dB und $L_{r,Nacht} < 70$ dB an den Objektstandorten gemäss «sonBASE»-Datenbank.

| Objekt | Unsanierter Zustand | | Sanierter Zustand | | Differenz | | Anforderungen LSV nach Sanierung erfüllt? | |
|--------|--|---|--|---|------------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------|
| | 2 Fenster | 1 Fenster | 2 Fenster | 1 Fenster | 1 Fen. | 2 Fen. | 2 Fenster | 1 Fenster |
| | $R'_{w,\vartheta,vor}$ (C ; C_{tr}) in dB | $R'_{w,\vartheta,nach}$ (C ; C_{tr}) in dB | $R'_{w,\vartheta,vor}$ (C ; C_{tr}) in dB | $R'_{w,\vartheta,nach}$ (C ; C_{tr}) in dB | $\Delta R'_{w,\vartheta}$ in dB | $\Delta R'_{w,\vartheta}$ in dB | $R'_w + C_{tr}$ > 32dB | $R'_w + C_{tr}$ > 32dB |
| GE-1 | | 26.7 (-2.3; -2.3) | | 34.4 (-1.8; -1.8) | | 7.7 | | ja |
| GE-2 | | 21.4 (-2.0; -1.7) | | 25.3 (-1.6; -1.2) | | 3.9 | | nein |
| LU-1 | 33.3 (-5.2; -5.2) | 25.0 (-1.3; -2.6) | 37.7 (-2.6; -7.7) | 32.3 (-1.1; -2.7) | 4.4 | 7.3 | nein | nein |
| LU-2 | 33.2 (-2.2; -5.8) | 26.7 (-1.6; -2.4) | 32.2 (-2.4; -5.9) | 29.1 (-1.5; -3.0) | -1.0 | 2.4 | nein | nein |
| BS-1 | 33.2 (-2.0; -5.6) | | 37.2 (-1.8; -4.5) | | 4.0 | | ja | |
| BS-2 | 28.9 (-2.0; -5.6) | | | 27.8 (-1.6; -1.6) | | -1.1 | | nein |
| NE-1 | 30.7 (-2.3; -0.4) | | 39.6 (-2.3; -0.4) | | 8.9 | | ja | |
| NE-2 | 40.1 (-1.6; -2.6) | | 36.2 (-1.1; -1.9) | | -3.9 | | ja | |
| BE-1 | 25.8 (-1.8; -1.3) | | 29 (-1.5; -1.4) | | 3.2 | | nein | |
| BE-2 | 22.7 (-1.0; -1.4) | | 35.7 (-1.6; -4.1) | | 13 | | ja | |
| SG-1 | 29.1 (-1.7; -3.5) | 23.5 (-1.4; -2.3) | | 22.3 (-1.3; -2.2) | -6.8 | | | nein |

In vier von elf gemessenen Fenstern wurden nach der Sanierung geringere Schalldämmmaße gemessen als zuvor. Die Verschlechterung lag im Bereich von 1 dB bis knapp 7 dB. Beim Messobjekt «NE-1» ist die Verschlechterung vermutlich mit einer offenen Bau-

anschlussfuge am unteren Blendrahmen nach der Sanierung zu begründen. Im Falle des Objektes «LU-2» scheint das Vorfenster nach der Sanierung schlechter zu sein als zuvor, da am Hauptfenster eine Verbesserung erzielt werden konnte. Bei den Testobjekten «BS-2» und «SG-1» weist das sanierte Fenster jeweils kein Hauptfenster mehr auf. Die Vorfenster tragen zum Teil erheblich zur Verbesserung des Schallschutzes sowohl der sanierten als auch der unsanierten Fenster bei. Durch die Sanierungsmaßnahmen kann das Fehlen des Vorfensters offensichtlich nicht immer kompensiert werden.

Die Verbesserungen der Schalldämmmaße der sanierten Fenster liegen im Bereich von 2 dB bis 13 dB. Die Verbesserungen sind demnach schwankend.

Bis auf die Messobjekte «GE-1» und «GE-2» sind die untersuchten Fenster an den Gebäuden jeweils mehr oder weniger baugleich. Dennoch fällt das gemessene Schalldämmmaß nach der Sanierung zum Teil stark unterschiedlich aus, wie beispielsweise an «LU-1» und «LU-2» sowie «BE-1» und «BE-2» zu sehen.

Im Falle von Luzern besteht die Vermutung, dass eine offene Fuge am Anschluss Blendrahmen zu Mauerwerk ursächlich für das 3 dB schlechtere Schalldämmmaß des Hauptfensters «LU-2» im Vergleich zum Hauptfenster «LU-1» ist.

Beim Objekt Bern konnte die Ursache für die starke Abweichung der Messresultate bei «BE-1» und «BE-2» nach der Sanierung ermittelt werden. So wurde am untern Blendrahmen des Objektes «BE-1» keine Falzdichtung eingebaut. Offene Fugen an Bauanschlüssen sowie im Fensterfalz führen gemäß den Messresultaten zu einer starken Verschlechterung des Schallschutzes. «SG-1» weist nach der Sanierung kein Vorfenster mehr auf. Zudem ist ein ungedämmter Rollladenkasten vorhanden, der die Schalldämmung des sanierten Fensters maßgeblich verringert.

5.2. Luftdichtheit

Tabelle 3 zeigt die berechneten Volumenströme bei 50 Pa Druckdifferenz inklusive des 95 %-Vertrauensintervalls aus den a-Wert sowie MLM Messungen vor und nach der Sanierung. Die Differenz der Volumenströme vor und nach der Sanierung sind ebenfalls aufgeführt. Zudem erfolgt eine Einteilung in die Luftdichtheitsklasse nach SN EN 12207 [12].

Tabelle 3: Übersicht der berechneten Volumenströme bei 50 Pa Druckdifferenz inklusive des 95 % Vertrauensintervalls aus den a-Wert sowie MLM Messungen vor und nach der Sanierung. Die Differenz der Volumenströme $\Delta V_{50,a}$ bzw. $\Delta V_{50,MLM}$ in % ist ebenfalls aufgeführt. Zusätzlich erfolgt eine Einteilung in die jeweilige Luftdichtheitsklasse nach SN EN 12207[12]. «n.g.» steht für «nicht gemessen». Die Messfehler, $dV_{50,a}$, werden als 95 %-Vertrauensintervalle angegeben.

| Ob- jekt | Unsanierter Zustand | | | | Sanierter Zustand | | | | Differenz | | Luftdichtheits- klasse | | | | | | |
|-------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|---|---|---|---|
| | $V_{50,a}$ | $dV_{50,a}$ | $V_{50,MLM}$ | $dV_{50,a}$ | $V_{50,a}$ | $dV_{50,a}$ | $V_{50,MLM}$ | $dV_{50,a}$ | $\Delta V_{50,a}$ | $\Delta V_{50,MLM}$ | $a_{vor} /$ MLM _{vor} | | $A_{nach} /$ MLM _{nach} | | | | |
| | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | m ³ /h | % | % | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| GE-1 | 28.4 | 0.60 | 31.9 | 0.47 | 4.5 | 0.16 | 5.1 | 0.07 | -84 | -84 | 1/1 | | 3/3 | | | | |
| GE-2 | 33.3 | 2.1 | 33.5 | 0.43 | 20.0 | 0.93 | 24.7 | 0.79 | -40 | -26 | x/x | | 1/1 | | | | |
| LU-1 | 46.4 | 2.8 | 50.4 | 1.2 | 11.1 | 1.2 | 16.3 | 0.28 | -75 | -68 | 1/1 | | 3/2 | | | | |
| LU-2 | 11.2 | 0.81 | 13.6 | 0.45 | 34.5 | 0.60 | 34.6 | 0.54 | +209 | +154 | 2/2 | | 2/2 | | | | |
| BS-1 | 71.0 | 1.9 | 93.3 | 2.5 | 19.8 | 1.7 | 26.4 | 0.37 | -72 | -72 | x/x | | 2/2 | | | | |
| BS-2 | 32.4 | 1.2 | 33.6 | 0.3 | 25.2 | 0.84 | 27.3 | 2.0 | -22 | -19 | 2/2 | | 2/2 | | | | |
| NE-1 | n. g. | n. g. | 69.7 | 1.0 | n. g. | n. g. | 28.4 | 0.16 | n. g. | -59 | n. g./1 | | n. g./2 | | | | |
| NE-2 | n. g. | n. g. | 63.3 | 4.7 | n. g. | n. g. | 39.8 | 0.54 | n. g. | -38 | n. g./1 | | n. g./2 | | | | |
| BE-1 | 82.3 | 0.67 | 85.1 | 1.2 | 26.6 | 1.9 | 26.5 | 0.30 | -68 | -69 | x/x | | 2/2 | | | | |
| BE-2 | 59.3 | 1.2 | 58.2 | 1.5 | 2.54 | 0.03 | 3.96 | 0.02 | -96 | -93 | 1/1 | | 4/4 | | | | |
| SG-1 | n. g. | n. g. | n. g. | n. g. | 43.5 | 3.4 | 41.6 | 1.5 | n. g. | n. g. | n.g./n.g. | | 2/2 | | | | |

Ähnlich wie die Resultate der Schallmessungen weisen auch die Messergebnisse der Luftdichtheitsmessung eine hohe Streuung auf.

So sind mehrere baugleiche Fenster schon vor der Sanierung unterschiedlich luftdurchlässig. Dies ist der Fall bei «LU-1» und «LU-2», «BS-1» und «BS-2» und «BE-1» und «BE-2». Auch ein Vergleich der untersuchten Objekte untereinander zeigt eine große Schwankungsbreite der Luftdurchlässigkeiten.

Auch nach der Sanierung weisen Fenster des gleichen Gebäudes teils große Unterschiede der Luftdichtheit auf. Einer der deutlichsten Unterschiede ist bei den Messobjekten «BE-1» und «BE-2» vorhanden. Nach der Sanierung weist «BE-2» sehr niedrige Volumenströme bei 50 Pa Druckdifferenz im Bereich von 2 – 4 m³/h auf. Das Fenster ist in Fugendurchlässigkeitsklasse 4 einzuordnen. Die Verbesserung bei «BE-1» fällt jedoch deutlich geringer aus. So weist das sanierte Fenster eine Luftdurchlässigkeit von 26 m³/h auf. Analog zu den Resultaten der Schallmessungen ist hierfür die fehlende untere Falzdichtung der Fensterflügel für die geringer ausfallende Verbesserung der Luftdichtheit verantwortlich zu machen.

Bei «LU-2» wurde im sanierten Zustand eine höhere Luftdurchlässigkeit gemessen als im unsanierten Zustand. Dieses Resultat kann ein Hinweis auf einen Schaden am Fenster sein, der vor der Sanierung nicht bestand. Eventuell bestehen Undichtigkeiten an der Verglasung oder im Fensterfalz. Dies wäre auch eine plausible Erklärung für die geringe Verbesserung des Schallschutzes des Hauptfensters bzw. Verschlechterung des Schallschutzes des Hauptfensters inklusive Vorfenster.

Auch wenn Vorfenster aufgrund ihrer Funktion nicht fest mit dem Bauwerk verbunden sind, scheinen sie dennoch die Luftdurchlässigkeit zu verringern. Dies lässt sich aus den Messergebnissen an den Objekten «BS-1» und «BS-2» schließen. Bei «BS-2» fanden die Messungen im sanierten Zustand nur am Hauptfenster statt. Bei «BS-1» hingegen wurden die Messungen des sanierten Zustands am Hauptfenster inklusive Vorfenster durchgeführt. Bei «BS-1» konnte durch die Sanierungsmaßnahmen eine Reduzierung der Luftdurchlässigkeit von ca. 70 % erzielt werden, wohingegen diese bei «BS-2» mit rund 20 % deutlich kleiner ausfällt.

Mit einer Ausnahme («LU-2») ist bei allen sanierten Fenstern eine Verbesserung der Luftdichtheit nach der Sanierung festzustellen. Das Maß der Verbesserung schwankt aber stark. So konnte die Luftdurchlässigkeit bei einem Fenster nur um 20 % gesenkt werden, wohingegen beim luftdichtesten sanierten Fenster eine Reduzierung von über 90 % stattfand. Bei den meisten Fenstern konnten jedoch deutliche Verringerungen der Luftdurchlässigkeit von über 70 % erzielt werden.

Ein Vergleich der zwei Messmethoden untereinander zeigt, dass diese, mit Ausnahme der Messungen am Messobjekt «BS-1», jeweils relativ nahe beieinanderliegende Volumenströme liefern. In den meisten Fällen weichen diese weniger als 10 % voneinander ab. Eine Regressionsanalyse liefert eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse aus a-Wert und MLM Messungen. So liegt das Bestimmtheitsmaß bei den sanierten Fenstern bei $R = 0.96$ und bei den unsanierten Fenstern bei $R = 0.93$.

6. Handlungsanweisungen Baupraxis

Aus den Messungen und Auswertungen lassen sich einige Erkenntnisse und Handlungsanweisungen für die Baupraxis ableiten.

Vorfenster tragen sowohl bei unsanierten als auch bei sanierten historischen Fenstern erheblich zum Schallschutz bei. Deutlicher fällt die Verbesserung bei unsanierten Fenstern aus. Hier konnten an drei Hauptfenstern inklusive Vorfenstern um 6 dB («LU-2» und «SG-1») und um 8 dB («LU-1») höhere Schalldämmwerte gemessen werden als ohne Vorfenster. Messungen an zwei sanierten Hauptfenstern inklusive Vorfenster ergaben 3 dB («LU-2») und 5 dB («LU-1») höhere bewertete Schalldämmmaße der Fenster. An zwei Messobjekten wiesen die sanierten Hauptfenster ohne Vorfenster um 1 dB («BS-2») bzw. um 7 dB («SG-1») niedrigere Schalldämmmaße auf.

Auch auf die Luftdichtheit haben Vorfenster einen positiven Einfluss, wie Messungen an einem Gebäude an zwei sanierten Fenstern mit bzw. ohne Vorfenster zeigen («BS-1» und «BS-2»).

Eine Weiternutzung der Vorfenster auch nach der Sanierung der Hauptfenster ist demnach anzustreben.

Offene Fugen verschlechtern den Schallschutz in hohem Maße. Aus diesem Grund müssen offene Bauanschlussfugen unbedingt sorgfältig mit elastischem Dichtmaterial verschlossen und ggf. mit Leisten abgedeckt werden. Andernfalls ist damit zu rechnen, dass die Sanierungsmaßnahmen einen geringen oder keinen positiven Effekt auf die Schalldämmung haben («LU-2»).

Schäden an Fensterrahmen können ebenfalls zu einer deutlichen Verschlechterung des Schallschutzes führen («NE-2»). Auch auf die Luftdurchlässigkeit wirken sich Schäden an Blendrahmen und Verglasungen negativ aus («LU-2»).

Auf einen sorgfältigen Einbau der Falzdichtungen ist zu achten. Fehlende Dichtungen führen zu Einbussen bezüglich der Schalldämmung von bis zu 7 dB und zu erhöhten Lüftungswärmeverlusten («BE-1»).

Weisen die zu sanierenden Fenster Rollladenkästen auf, so sollten diese im Rahmen der Schallschutzsanierung ebenfalls ertüchtigt werden. Andernfalls ist ein Erzielen von hohen Schalldämmmaßen der sanierten Fenster nicht möglich («SG-1»). Der Einbau von Dämmstoffen mit möglichst hohen Flächengewichten wirkt sich positiv auf den Schallschutz aus. Offene Fugen an den Rollladenkästen auf der Rauminnenseite sind auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Verriegelungsbeschläge der Fenster müssen so gestaltet sein, dass ein ausreichender Anpressdruck auch nach Einbau der Falzdichtungen im Rahmen der Sanierung erzielt werden kann. Andernfalls ist mit Einbussen beim Schallschutz und der Luftdichtigkeit zu rechnen.

Die Messungen der Luftdichtigkeit der Fenster zeigen eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse von a-Wert und MLM Messungen. Beide Messverfahren sind geeignet für die Messung an historischen Fenstern. In zwei Fällen kam es beim Abziehen des Klebebandes zur Fixierung der Kunststoffolie am Blendrahmen jedoch zu Schäden an der Lackierung. Die Bauherrschaft ist demnach auf mögliche Schäden an der Lackierung vor Durchführung der Messungen hinzuweisen.

Der kleinere Ventilator der MLM Messausrüstung ist handlicher als der große Ventilator für die a-Wert Messung. Zudem kann bei der MLM Messungen auf den Einbau des Prüfrahmens in einer Zimmertüre verzichtet werden.

Das Aufkleben der Folie auf dem Blendrahmen ist je nach Ausführung der Beschläge und des Blendrahmens zum Teil mit Schwierigkeiten und einem relativ hohen Zeitaufwand verbunden. Generell ist für die Messung von zwei Fenstern mit einem Messverfahren mit einem Zeitaufwand von ca. 6 Arbeitsstunden zu rechnen.

Auch für die Durchführung der Schallmessungen ist ausreichend Zeit einzuplanen. Die Verwendung von Teleskopstützen, an welchen das Mikrofon zur Erfassung der Schallpegel direkt vor der Verglasung befestigt werden kann, erleichtert die Durchführung enorm. Zudem ist die Verwendung eines Abstandhalters zum Einstellen des Abstands von 3 mm zwischen Mikrofon und Verglasung sehr hilfreich.

7. Danksagung

Wir bedanken uns bei der Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege sowie den Fensterbauunternehmungen André SA, CH-1160 Yens/Morges und Holzmanufaktur Swiss AG, CH-5502 Hunzenswil für die Finanzierung des Projektes. Unser Dank gilt auch den übrigen Partnern, die sich am Projekt beteiligt haben. Namentlich sind dies die Haupt AG, CH-6017 Ruswil, Vogel Fensterbauer AG, CH-9403 Goldach, Fachstelle Denkmalpflege Stadt Biel, Kantonale Denkmalpflege Aargau, Kantonale Denkmalpflege Zürich und Prona AG, CH-2503 Biel. Bei der BlowerDoor GmbH, D-31832 Springe-Eldagsen bedanken wir uns zudem für die zur Verfügung gestellte Messtechnik. Nicht zuletzt gilt unser Dank auch den Gebäudebesitzern, die uns Messungen an ihren Fenstern durchführen liessen.

8. Literaturangaben

- [1] BlowerDoor GmbH: *a-Wert MessSystem a-Wert MessSystem zur Bestimmung der Fugendurchlässigkeit*. Springe, 2012.
- [2] BlowerDoor GmbH: *Minneapolis Micro Leakage Meter, Dichtheitsprüfung von Lüftungskanalsystemen nach DIN EN 12599*. Springe, 2016.
- [3] Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft (SR 101) vom 18. April 1999 (Stand am 1. Januar 2018): <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19995395/201801010000/101.pdf> (zuletzt abgerufen am 31.01.2019)
- [4] EN ISO 140-5 (Ausgabe 2008): *Akustik-Messung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 5: Messung der Luftschalldämmung von Fassadenelementen und Fassaden an Gebäuden*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [5] EN ISO 16283-3 (Ausgabe 2016): *Akustik-Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil: Fassadenschalldämmung*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [6] EN ISO 717-1 (Ausgabe 2013): *Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung*. Zürich: Schweizer Ingenieur und Architekten Verein.
- [7] Lärmdatenbank «sonBASE» des Bundesamtes für Umwelt (BAFU): <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/zustand/gis-laermdatenbank-sonbase.html> (zuletzt abgerufen am 31.01.2019)
- [8] Lärmschutzverordnung (LSV; SR 814.41) vom 15. Dezember 1986 (Stand am 1. Januar 2016): <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19860372/201601010000/814.41.pdf> (zuletzt abgerufen am 31.01.2019)
- [9] Prof. Dr. Christoph Geyer, et. al.: *Evaluation of In Situ Measurement Methods for Air Permeability of Windows*. Bern: 12th Conference on Advanced Building Skins, 2017.
- [10] SIA 181. (Ausgabe 2006-09): *Schallschutz in Hochbauten*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [11] SN EN 1026:2016. (Ausgabe 2016-10): *Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit - Prüfverfahren*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [12] SN EN 12207:2016. (Ausgabe 2016-10): *Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit - Klassifizierung*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [13] SN EN 12599:2012. (2012): *Lüftung von Gebäuden - Prüf- und Messverfahren für die Übergabe raumluftechnischer Anlagen*. Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [14] Walther, W.: Messung kleiner Volumenströme mit Hilfe von Lochblenden. In: *Tagungsreader des 8. BlowerDoor Symposiums, 2013*.