

## Verbesserung der Dichtheit von Luftleitungen bei Lüftungsanlagen in Europa Praxiserfahrungen aus sieben Ländern

Nolwenn Hurel<sup>1</sup>\*, Valérie Leprince<sup>2</sup>, and Simon Tölke<sup>3</sup>

1 PLEIAQ • 2 Avenue de Mérande • 73000 Chambéry • France •\* Corresponding author:  
nolwenn.hurel@pleiaq.net

2 PLEIAQ • 84 c Av de la Libération • 69330 Meyzieu • France

3 MEZ-TECHNIK GmbH • Bierwiesenstraße 7 • 72770 Reutlingen • Germany

### Zusammenfassung

Seit Jahren spielen Lüftungs- und Klimaanlage eine immer wichtigere Rolle bei der Gewährleistung eines ausreichenden Luftaustauschs in Gebäuden. Mit der Zeit wurden Gebäude immer luftdichter, um Energieverluste durch unkontrollierte Luftlecks zu vermeiden. Um eine gute Raumluftqualität zu gewährleisten, werden vermehrt mechanische Lüftungssysteme installiert. Was in der Theorie ein guter Ansatz ist, scheitert in der Praxis oft an undichten Luftleitungen. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass das Bewusstsein für dieses Thema in den meisten europäischen Ländern gering ist [1], wobei undichte Luftleitungen den Energieverbrauch, die Raumluftqualität und auch die Lärmerzeugung negativ beeinträchtigen [2].

Eine Lösung der Probleme bietet das AeroSeal-Verfahren. Einsetzbar bei neuen Luftleitungssystemen, die nicht der erwarteten Luftdichtheitsklasse entsprechen, als auch bei bestehenden undichten Luftleitungssystemen basiert die Abdichtung mit dem AeroSeal-Verfahren auf der Injektion von Aerosolen. Mit dieser patentierten Technik können Luftleitungssysteme innerhalb kurzer Zeit und ohne vorherige Lecksuche von innen heraus abgedichtet werden [3]. Dabei werden Leckagen mit Spalten von bis zu 15 mm mit einem nach VDI 6022 zertifizierten Dichtstoff dauerhaft beseitigt. In der Theorie und in der Praxis, wie fast 700 erfolgreiche Abdichtungsprojekte in Europa seit 2015 belegen.

Im Folgendem werden die Ergebnisse von sieben Projekten zur Abdichtung von Luftleitungen vorgestellt. Alle Projekte wurden im Jahr 2021 an Bestandsgebäuden (hauptsächlich Nichtwohngebäuden) in

- Deutschland,
- Frankreich,
- Irland,
- der Tschechischen Republik,
- den Niederlanden,
- Polen und der
- Schweiz

durchgeführt.

Bei allen sieben Projekten wurden die Leckagen in den Luftleitungen im Schnitt um 93 %

reduziert, der Minimalwert lag bei 87 %, die maximale Verbesserung bei 98 %. Analog zur Reduzierung der Undichtheiten wurden auch die Auswirkungen der Abdichtung auf den Energieverbrauch quantifiziert. Die höchsten Einsparungen konnten für das ca. 30.000 m<sup>2</sup> große Gebäude in Irland verzeichnet werden. Obwohl nur rund 2/3 des Luftleitungssystems abgedichtet wurden, liegen die Einsparungen bei rund 36.000 € pro Jahr, was einer Amortisierung der Abdichtung von etwa zwei Jahren entspricht.

Da jedes Abdichtungsprojekt von einem anderen Dienstleistungsunternehmen durchgeführt wurde, wurden zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse Rückmeldungen von den Durchführenden eingeholt. Die Rückmeldungen betrafen u.a. folgende Punkte:

- Mängel an den Luftleitungssystemen, die vor Ort (in den verschiedenen europäischen Ländern) festgestellt wurden und zu Undichtheiten führen, wie
  - mangelhafte Verarbeitung,
  - fehlende manuelle Abdichtung,
  - fehlende Luftleitungsklammern,
  - Löcher, die durch Luftdichtheitsprüfgeräte entstanden sind oder
  - flexible Verbindungen, die sich geöffnet haben.
- Potenzielle technische Probleme die bei der Messung eines Leckageluftvolumenstroms unter 1 l/s mit dem AeroSeal-Equipment entstehen können.
- Rückmeldungen von Kunden wie
  - geringerer Energieverbrauch,
  - verbesserte Luftqualität,
  - weniger Leckagen von giftigen Gasen oder
  - keine Geruchsbelästigung mehr.
- Länderspezifische Trends in Sachen „Abdichtung von Luftleitungen“, wie in Irland strengere Kriterien für die Druckprüfung von Luftleitungssystemen, welche ggf. zu mehr Abdichtungsarbeiten führen könnten.

## Schlüsselwörter

Leckagen in Luftleitungen, Abdichtung, Aerosol, Praxiserfahrung

## 1 Einführung

Seit einigen Jahren spielen Lüftungs- und Klimaanlage eine immer wichtigere Rolle bei der Gewährleistung eines ausreichenden Luftaustauschs in Gebäuden. In den letzten Jahren wurden Gebäude immer luftdichter, um Energieverluste durch unkontrollierte Luftlecks zu vermeiden. Um dennoch eine gute Raumluftqualität zu gewährleisten, werden mechanische Lüftungsanlagen installiert. Was in der Theorie als ein guter Ansatz erscheint, führt in der Praxis oft zu Problemen durch undichte Luftleitungen.

Obwohl undichte Luftleitungen den Energieverbrauch, die Raumluftqualität und den Geräuschpegel in Innenräumen negativ beeinflussen, haben verschiedene Studien gezeigt, dass das Bewusstsein für dieses Thema in den meisten europäischen Ländern nur gering ist

[1, 2]. Zuverlässige Abhilfe schafft eine Abdichtung der Luftleitungssysteme mit dem AeroSeal-Verfahren. Einsetzbar bei neuen Luftleitungssystemen, die nicht der erwarteten Luftdichtheitsklasse entsprechen, als auch bei bestehenden undichten Luftleitungssystemen, basiert die Abdichtung mit dem AeroSeal-Verfahren auf der Injektion von Aerosolen. Diese patentierte Technik ermöglicht es, Luftleitungssysteme innerhalb kurzer Zeit und ohne vorherige Lecksuche von innen heraus abzudichten [3]. Luftleckagen mit Spalten von bis zu 15 mm werden dabei mit einem nach VDI 6022 zertifizierten Dichtstoff dauerhaft beseitigt. In Theorie und Praxis, wie fast 700 Abdichtungsprojekte bestätigen, die von europäischen AeroSeal-Partnern seit 2015 erfolgreich durchgeführt wurden.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von sieben Abdichtungsprojekten von vorgestellt, die im Jahr 2021 an bestehenden Gebäuden (hauptsächlich Nichtwohngebäuden) in

- Deutschland (D),
- Frankreich (F),
- Irland (IE),
- der Tschechischen Republik (CZ),
- den Niederlanden (NL),
- Polen (PL) und
- der Schweiz (CH)

durchgeführt wurden.

Die, die Abdichtung durchführenden Unternehmen wurden befragt zu den

- technischen Daten des Gebäudes, der Lüftungsanlage und der Luftleitungsabdichtung, welche insbesondere für die Berechnung der Luftleckagereduzierung und der Energieeinsparung bei den Ventilatorsystemen verwendet wurden.
- Erfahrungen vor Ort hinsichtlich Luftdichtheitsproblemen und Abdichtungsschwierigkeiten
- Rückmeldungen der Kunden bzgl. der Zufriedenheit nach der Abdichtung und zu Return-on-Investment-Zeiten.

## 2 Methodik

### 2.1 Das AeroSeal-Verfahren zur Abdichtung von Luftleitungen

Das aerosolbasierte Abdichtungsverfahren wurde in den 1990er Jahren an der Universität Berkeley, USA [4, 5], entwickelt und als sogenanntes AeroSeal-Verfahren patentiert (Abbildung 1). Die Innovation besteht darin, Luftleitungen von innen heraus abzudichten – innerhalb kurzer Zeit und ohne vorherige Suche der Leckagen. Chemisch gesehen, basiert das AeroSeal-Verfahren auf einer stabilen, ungiftigen und nicht brennbaren Mischung. Die Emulsion aus Wasser und Vinylacetatpolymer wird mit Hilfe von Druck und Temperatur in 4 µm bis 10 µm große Partikel zerstäubt [6].

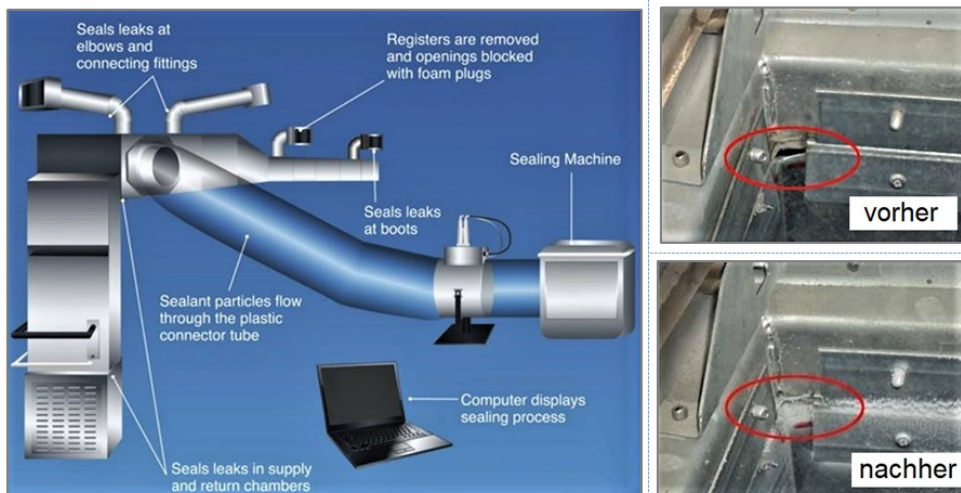


Abb. 1: Aerosol-Dichtstofftechnologie (Bild mit freundlicher Genehmigung von AeroSeal LLC)

Das entstehende Aerosol wird unter Druck im Luftleitungssystem verteilt, wie der Entwickler Modera [3] erläutert: "Durch das vorübergehende Verschließen der Luftdurchlässe eines Luftleitungssystems wird die mit Dichtmittel beladene Luft zu den undichten Stellen gedrückt. Eine leichte Turbulenz in der Strömung ist erforderlich, damit die Dichtstoffpartikel in der Schwebelage gehalten werden, bis sie die undichten Stellen erreichen. Der Druck im Luftleitungssystem führt dazu, dass die mit Dichtstoffpartikeln beladene Luft aus den Leckagen ausströmt und beschleunigt wird. Aufgrund der Massenträgheit der Dichtstoffpartikel kollidieren diese mit den Wänden der Leckagen". Dadurch dichten die Partikel Leckagen mit Spalten von bis zu 15 mm nach und nach ab. Das Ergebnis ist eine robuste Luftabdichtung, die jahrelang hält, biegsam und flexibel ist. Zudem bleibt sie über einen weiten Bereich von Betriebsdrücken, Temperaturen und Feuchtigkeitsgraden, wie sie in privaten, gewerblichen und industriellen Luftleitungssystemen vorkommen, wirksam [6]. Anders als bei Beschichtungsverfahren lagern sich beim Aerosol-Verfahren die Dichtstoffpartikel nur an den Rändern der undichten Stellen ab, und nicht an anderen Stellen des Luftleitungssystems.

Bis heute wurde das Aerosol-Verfahren in mehr als 125.000 Projekten zur Abdichtung von Luftleitungssystemen in Wohn- und Nichtwohngebäuden eingesetzt. Hauptsächlich in den USA, seit 2015 jedoch auch in Europa. Auf den europäischen Markt gebracht wurde das Aerosol-Verfahren von der deutschen MEZ-TECHNIK GmbH welche seit 2015 AeroSeal-Partnerunternehmen in 18 Ländern akquiriert und zusammen mit diesen fast 700 Abdichtungsprojekte in über 20 Ländern durchgeführt hat.

## 2.2 Fallstudie mit sieben ausgewählten Gebäuden in Europa

Um die Leistungsfähigkeit der aerosolbasierten Abdichtungstechnik zu bewerten, wurden sieben AeroSeal-Partner in Europa zu detaillierten Angaben, über die im Jahr 2021 durchgeführten Projekte zur Abdichtung von Luftleitungen befragt.

Tabelle 1 zeigt die Gebäudeeigenschaften der sieben ausgewählten Abdichtungsprojekte und nennt Gründe, warum eine Abdichtung erforderlich wurde. Bei der Auswahl der sieben Gebäude wurde darauf geachtet, dass ein möglichst breites Spektrum an Parametern abgedeckt wird. Dies bedeutet konkret, verschiedene

- Standorte (sieben Länder),
- Gebäudetypen (Wohn-, Bildungs-, Gewerbe- und Industriegebäude),
- Baujahre (von 1980 bis heute) sowie
- unterschiedliche Flächen (5.000 m<sup>2</sup> bis zu 42.000 m<sup>2</sup>).

Auch die Gründe für die Abdichtung waren von Gebäude zu Gebäude teils unterschiedlich. Nichtsdestotrotz bestand bei fast allen Gebäuden zudem die Notwendigkeit, die Luftdichtheitsklasse zu verbessern, um nationale Vorschriften oder eine vereinbarte Dichtheitsklasse zu erfüllen.

Tab. 1: Details der untersuchten Gebäude und Gründe für die erforderliche Abdichtung der vorhandenen Luftleitungen

Projekt-referenz	Standort (Land)	Gebäudetyp	Baujahr	ungefähre Fläche [m <sup>2</sup> ]	Grund für die Abdichtung
CH	Zürich (Schweiz)	Bürogebäude	Neubau	29.045	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftdichtheitsklasse nicht erreicht</li> <li>• Geruchsbelästigung</li> <li>• Optimierung der Leistung</li> </ul>
CZ	Praha (Tschechische Republik)	Mehrfamilienhaus	2016	12.714	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geruchsbelästigung</li> </ul>
DE	Leinfelden-Echterdingen (Deutschland)	Bürogebäude	Neubau	42.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftdichtheitsklasse nicht erreicht</li> <li>• Probleme mit der Luftverteilung</li> <li>• Betonschächte nicht richtig gebaut</li> </ul>
FR	Saint Denis (Frankreich)	Gymnasium	2017	15.500	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftdichtheitsklasse nicht erreicht</li> </ul>
IE	Tipperary (Irland)	Hersteller medizintechnischer Geräte – Reinraum	1980	30.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderung an die Dichtheit des Luftleitungssystem erfüllen</li> <li>• hygienische Probleme in Reinnräumen</li> </ul>
NL	(Niederlande)	Fabrik (LKW-Hersteller)	2006	30.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftdichtheitsklasse nicht erreicht</li> <li>• hygienische Probleme</li> <li>• Geruchsbelästigung</li> </ul>
PL	Krakow (Polen)	Bürogebäude	2008	5.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftdichtheitsklasse nicht erreicht</li> <li>• hygienische Probleme</li> <li>• Lärmprobleme</li> <li>• Geruchsbelästigung</li> </ul>

Die von den Befragten gemachten Angaben zu den Lüftungsanlagen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Auch hier konnte durch die Auswahl der Projekte ein breites Spektrums an Parametern abgedeckt werden:

- Zwischen dem niedrigsten Luftvolumenstrom (6.000 m<sup>3</sup>/h für das Projekt in der Tschechischen Republik) und dem höchsten (301.407 m<sup>3</sup>/h für das Projekt in Irland) besteht ein Faktor von 50.
- Die meisten der untersuchten Gebäude verfügen über zwei bis fünf Lüftungssysteme. Beim Projekt in Frankreich waren es jedoch 52.
- Sowohl Lüftungsanlagen für die Abluft (ETA) und die Zuluft (SUP), wie auch bidirektionale Lüftungsanlagen (mit Wärmerückgewinnung) sind vertreten.
- Alle Luftleitungen sind starr und meist rechteckig. Zugleich sind einige runde Abschnitte enthalten. Etwa die Hälfte der Luftleitungen ist doppelwandig, und es sind Luftleitungsabschnitte in verschiedenen Abmessungen (bis zu einer Höhe von etwa 1 m) enthalten.

Tab. 2: Details zu den Lüftungsanlagen der untersuchten Gebäude

	Projektreferenz						
	CH	CZ	DE	FR	IE	NL	PL
	Luftvolumenstrom						
Luftvol.strom ges. [m <sup>3</sup> /h]	127.000	6.000	12.370	23.251	301.407	270.000	66.750
Anzahl Lüftungsanlagen <sup>1)</sup>	5	4	8	52	5	2	2
Anteil abgedichteter Luftleitungen [%] (ca.)	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	30	66	keine Angabe	keine Angabe
	Art der Lüftungsanlage						
SUP / ETA / bidirektional <sup>2)</sup>	bidirektional / ETA	ETA	bidirektional	bidirektional	SUP	SUP	SUP / ETA
Wärmerückgewinnung	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja
	Art des Luftleitungssystems						
rund / rechteckig / beides	rechteckig	rechteckig	rechteckig	beides	beides	rechteckig	beides
flexibel / halb / starr	starr	starr	starr	starr	starr	starr	starr
doppelwandig (bspw. Wärmedämmung)	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja
durchschnittlicher Durchmesser / Höhe (min. - max.) [mm]	600 - 1.100	500 * 250	800	125 - 500	315	1.000	•
<sup>1)</sup> beinhaltet nur die Lüftungsanlagen, die von der Abdichtungsmaßnahme betroffen waren							
<sup>2)</sup> bidirektional, wenn an einer Lüftungsanlage sowohl Luftleitungen von SUP wie auch von ETA abgedichtet wurden							

In Tabelle 3 sind die Details zu den Luftleitungsabdichtungen aufgeführt. Die Tabelle zeigt die Luftdichtheitsklassen vor der Abdichtung sowie die angestrebten und durch die Abdichtung erreichte Luftdichtheitsklassen. Da die Dichtheitsklassen anhand der Luftleitungsoberfläche berechnet werden, ist auch der prozentuale Anteil der Luftleckage im Vergleich zum gesamten Luftvolumenstrom angegeben. Es zeigt sich, dass sehr undichte Luftleitungen (schlechter als 2,5 mal Klasse A und bis zu 36 % des gesamten Luftvolumenstroms als Leckage) ebenso abgedichtet wurden, wie bereits relativ dichte Luftleitungen (die Dichtheitsklasse vor der Abdichtung lag beim Projekt in den Niederlanden bereits bei Klasse B).

Tab. 3: Für die Abdichtung relevante Daten der Luftleitungen (z.B. Dichtheitsklassen vorher/nachher) in den untersuchten Gebäuden

	Projektreferenz						
	CH	CZ	DE	FR	IE	NL	PL
	Luftdichtheitsprüfung vor der Abdichtung						
Luftdichtheitsklasse <sup>1)</sup>	A	> 2,5 * A	2,5 * A	> 2,5 * A	2,5 * A	B	2,5 * A
Prüfdruck [Pa]	400	300	375	250	500	500	500
Gesamtleckagestrom [l/s]	493	421	1.814	2.547	7.743	326	4.550
Leckageanteil [%] <sup>2)</sup>	1,4	25,3	52,8	39,4	9,2	0,4	24,5
	angestrebte Luftdichtheitsklasse nach der Abdichtung						
Luftdichtheitsklasse	•	A	C bis D	C	minus 90 % der Leckage	so dicht wie möglich	B
	Luftdichtheitsprüfung nach der Abdichtung						
Luftdichtheitsklasse <sup>1)</sup>	C	B	C	C	B	< D	B
Prüfdruck [Pa]	400	200	375	250	500	500	500
Gesamtleckagestrom [l/s]	28,0	14,7	127,0	56,8	992,0	13,8	484,5
Leckageanteil [%] <sup>2)</sup>	0,08	0,88	3,69	1,04	1,18	0,02	2,61

<sup>1)</sup> als Durchschnitt für die geprüften Luftleitungen der Lüftungsanlagen  
<sup>2)</sup> bezogen auf den insgesamt geförderten Luftvolumenstrom vor der Abdichtung bzw. nach der Abdichtung

### 2.3 Berechnung der Energieeinsparungen

Die, durch die Abdichtung, erzielbaren Energieeinsparungen bei der Ventilatorleistung werden in dieser Studie unter der Annahme abgeschätzt, dass die Ventilatorsysteme, die durch die Leckagen verursachten Verluste, in den Luftleitungen vollständig kompensieren. Wäre das Ventilatorsystem nicht in der Lage die Leckagen ganz oder zumindest teilweise zu kompensieren, kann sich dies negativ auf die Luftqualität auswirken [7].

Neben der Einsparung an Ventilatorleistung kann die Abdichtung von Luftleitungen auch zu erheblichen Einsparungen beim Heizen und Kühlen führen [8, 2]. Grund ist, dass die aufbereitete Luft in nicht von der Lüftungsanlage zu versorgende Bereiche entweicht. In der vorliegenden Studie wurde diese Art der Energieeinsparung nicht berechnet, da dazu detaillierte Daten erforderlich gewesen wären, die nicht zur Verfügung standen (Fläche des Luftleitungssystems in den von der Lüftungsanlage nicht versorgten Räumen, Lage der Luftleitung im Vergleich zur Dämmschicht etc.) [7].

#### Berechnung der elektrischen Leistung der Ventilatorsysteme

Da mit Ausnahme des Projekts in Irland die elektrischen Leistungen der Ventilatorsysteme vor und nach der Abdichtung nicht bekannt sind, wurde die elektrische Leistung der Ventilatorsysteme (vor und nach der Abdichtung) wie folgt berechnet:

$$P_{AHU,i} = \frac{\Delta p_{AHU,i} * Q_{AHU,i}}{\eta_{AHU,i} * 3.600} \quad (1)$$

mit

i = vor / nach	Zustand des Luftleitungssystems vor / nach der Abdichtung,
$P_{AHU}$ [W]	elektrische Leistung des Ventilatorsystems,
$\Delta p_{AHU}$ [Pa]	Druckdifferenz des Ventilatorsystems,
$Q_{AHU}$ [m <sup>3</sup> /h]	Luftvolumenstrom des Ventilatorsystems und
$\eta_{AHU}$ [ ]	Wirkungsgrad des Ventilatorsystems.

Der Luftvolumenstrom des Lüftungssystems nach der Abdichtung wurde als Nennluftvolumenstrom betrachtet. Für diesen gilt:

$$Q_{\text{AHU, aft}} = Q_{\text{AHU, nom}} \quad (2)$$

mit

$Q_{\text{AHU, aft}}$  [m<sup>3</sup>/h] Luftvolumenstrom des Lüftungssystems nach der Abdichtung,  
 $Q_{\text{AHU, nom}}$  [m<sup>3</sup>/h] Nennluftvolumenstrom des Lüftungssystems.

Für das Projekt in Frankreich war der Luftvolumenstrom nicht für alle Lüftungssysteme bekannt. Wo nötig, wurde daher der Luftvolumenstrom anhand der Luftleitungsfläche ( $A_{\text{duct}}$ ) mit einer Formel aus der FD E 51-767 (FD: Fasciule de documentation) von RT 2012 (RT: Réglementations Thermiques) grob abgeschätzt. Der Luftvolumenstrom auf Basis der Luftleitungsfläche ergibt sich zu:

$$Q_{\text{AHU, nom}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \frac{A_{\text{duct}} \left[ \text{m}^2 \right]}{180 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3 * \text{s}^{-1}} \right]} \quad (3)$$

Der Luftvolumenstrom vor der Abdichtung wird aus dem Wert nach der Abdichtung (Nennluftvolumenstrom) und aus den, vor und nach der Abdichtung gemessenen Leckageluftvolumenströmen ( $Q_{\text{leak}}$ ) abgeleitet. Er ergibt sich zu:

$$Q_{\text{AHU, bef}} = Q_{\text{AHU, aft}} + Q_{\text{leak, bef}} - Q_{\text{leak, aft}} \quad (4)$$

mit

$Q_{\text{AHU, bef}}$  [m<sup>3</sup>/h] Luftvolumenstrom des Lüftungssystems vor der Abdichtung,  
 $Q_{\text{AHU, aft}}$  [m<sup>3</sup>/h] Luftvolumenstrom des Lüftungssystems nach der Abdichtung,  
 $Q_{\text{leak, bef}}$  [m<sup>3</sup>/h] Leckageluftvolumenstrom vor der Abdichtung und  
 $Q_{\text{leak, aft}}$  [m<sup>3</sup>/h] Leckageluftvolumenstrom nach der Abdichtung.

Der Wirkungsgrad des Ventilatorsystems hängt vom geförderten Luftvolumenstrom ab. Ausgehend von Gleichung (1) wurde der Wirkungsgrad nach der Abdichtung berechnet, sofern der Luftvolumenstrom und der Druck bekannt waren. Andernfalls wurde ein Standardwert für Ventilatorsysteme von 0,4 verwendet.

Der Wirkungsgrad des Ventilatorsystems vor der Abdichtung wurde gemäß EN 16798-5-1 abgeschätzt. Es gilt:

$$\eta_{\text{AHU, bef}} \approx \sqrt{\frac{Q_{\text{AHU, bef}}}{Q_{\text{AHU, aft}}}} * \eta_{\text{AHU, aft}} \quad (5)$$



### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Reduzierung von Luftleckagen

Die Auswertung der sieben Abdichtungsprojekte zeigt, dass in allen Fällen eine erhebliche prozentuale Verringerung der Luftleckagen erzielt wurde (Abbildung 2). Im Durchschnitt wurden die Leckageluftströme um 93,4 % reduziert. Die minimale Reduzierung der Leckagerate lag bei 87,2 % (in Irland). In Frankreich konnte die Leckagerate um 97,6 % reduziert werden.

Die Abdichtungszeiten bzw. die kumulierten Einblaszeiten des Dichtstoffs lagen zwischen etwa 1,5 Stunden (für das Projekt in der Tschechischen Republik mit der kleinsten Luftleitungsfläche) und bis zu 62 Stunden (für das Projekt in Frankreich mit einer sehr hohen Anzahl verschiedener Lüftungsanlagen). Dementsprechend ermöglicht eine Abdichtung mit dem Aroseal-Verfahren im Vergleich zu konventionellen Abdichtungsverfahren eine erhebliche Zeitersparnis.

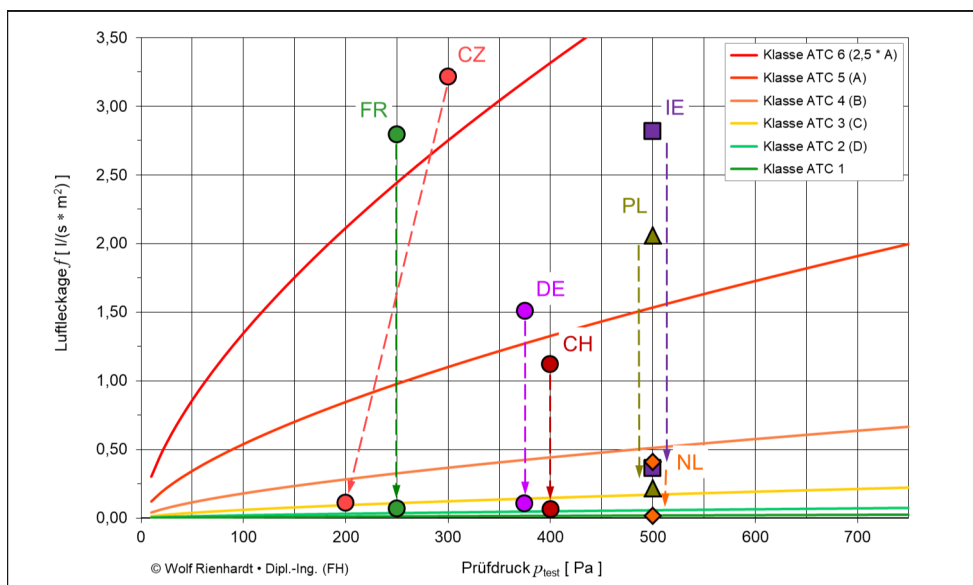


Abb. 2: Vergleich der Luftleckageraten der sieben Abdichtungsprojekte vor und nach der Abdichtung der Leckage mit dem Aroseal-Verfahren

#### 3.2 Einsparung an Ventilatorleistung

Auch die elektrische Leistungsaufnahme der Ventilatorsysteme konnte durch die Abdichtung der betrachteten Luftleitungssysteme mit dem Aroseal-Verfahren erheblich reduziert werden. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse mit Hilfe eines Farbcodes dargestellt. Anhand des Farbcodes lassen sich die von den Umfrageteilnehmern direkt eingegebenen Daten (grün), die berechneten Daten (orange) und die Standardwerte (rot) unterscheiden. Die absoluten Einsparungen bei der elektrischen Leistungsaufnahme der Ventilatorsysteme sind sehr unterschiedlich und liegen zwischen 0,6 kW und 38 kW. Die großen Unterschiede sind u. a. auf die große Bandbreite an Ventilatorleistungen sowie die anfänglich sehr unterschiedlichen Luftleckageraten zurückzuführen. In Prozent der anfänglichen

Gesamtleistung der Ventilatorsysteme liegen die, durch die Abdichtung, erzielbaren Einsparungen zwischen 1 % (für das Projekt in den Niederlanden mit dem vor der Abdichtung bereits relativ dichten Luftleitungssystem der Klasse B) und 65 % (für das Projekt in Frankreich mit der schlechtesten Luftdichtheitsklasse vor der Abdichtung).

Die, durch die Abdichtung, erzielbaren Energie- und Kosteneinsparungen werden u.a. unter Berücksichtigung der jährlichen Betriebszeiten und der nationalen Strompreise berechnet. Da die jährliche Betriebszeit den meisten Befragten nicht bekannt war, und um den Vergleich der Abdichtungswirkung zwischen den Projekten zu erleichtern, wurden die Einsparungen unter der Annahme eines ganztägig laufenden Ventilatorsystems berechnet. Dies entspricht insbesondere beim Projekt in Irland auch der Realität, und führt zu den im Vergleich höchsten Einsparungen (etwa 331.000 kWh/Jahr bzw. etwa 36.000 €/Jahr). Diese große Einsparung ist darauf zurückzuführen, dass in Irland eines der größten Luftleitungssysteme mit einer vor der Abdichtung sehr hohen Leckagerate und damit hohen Leistung der Ventilatorsysteme abgedichtet wurde.

Das Projekt in der Tschechischen Republik weist trotz der höchsten Luftleckagerate vor der Abdichtung die geringsten Einsparungen auf (ca. 5.000 kWh/Jahr bzw. ca. 900 €/Jahr). Grund dafür ist, dass die Luftleitungsfläche sehr klein, damit die Leistungsaufnahme der Ventilatorsysteme und auch deren Einsparpotenzial gering ist.

Die Amortisationszeiten (ROI: Return of Investment) hängen von verschiedenen Faktoren, wie Betriebsdauer, Luftleckagerate, Systemgröße und regionalen Energiekosten ab. Im Falle von Ventilatorsystemen im Vollzeitbetrieb (wie in der vorliegenden Studie angesetzt), liegen die ROI-Zeiten (mit Ausnahme des Projekts in den Niederlanden) zwischen ein und drei Jahren. Beim Projekt in den Niederlanden war das Luftleitungssystem bereits zu Beginn der AeroSeal-Abdichtung relativ dicht (Klasse B), was etwas längere ROI-Zeiten bedeutet.

Anzumerken bleibt, dass angesichts des derzeitigen weltweiten Anstiegs der Energiepreise zu erwarten ist, dass die Kapitalrendite (ROI) in naher Zukunft noch geringer als die durchschnittlich berechneten ein bis drei Jahre ausfallen wird. Dies bedeutet eine noch schnellere Amortisation der Kosten für ein Abdichtung mit dem AeroSeal-Verfahren.

Tab. 4: Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme der Ventilatorsysteme, der Energie- und der Kosteneinsparungen durch die Luftleitungsabdichtungen mit dem AeroSeal-Verfahren (grün: angegebene Werte; orange: berechnete Werte; rot: Standardwerte; schwarz: berechnete Ergebniswerte für alle Abdichtungsprojekte)

	Projektreferenz						
	CH	CZ	DE	FR	IE	NL	PL
relevante Luftleitungsfläche für die Abdichtungsmaßnahme [m <sup>2</sup> ]	440	131	1.202	844	2.750	800	2.210
Injektionszeit AeroSeal [h]	36,1	1,4	21,1	61,5	49,6	2,1	35,9
jährliche Betriebszeit Ventilator [h/a]	2.190 bis 8.760	8.760	2.940	2.405	8.760	4.800	2.940
Strompreis [EUR/kWh]	0,204	0,180	0,228	0,110	0,110	0,178	0,150
	Parameter der Lüftungssysteme vor der Abdichtung						
durchschnittlicher externer Druck bei den Lüftungssystemen [Pa]	464	311	912	2498	•	1.008	596
gesamter Luftvolumenstrom der Lüftungssysteme [m <sup>3</sup> /h]	128.704	7.096	18102	27953	299.876	271.761	78.960
durchschnittlicher Wirkungsgrad der Ventilatorsysteme [ ]	0,110	0,435	0,489	0,586	•	0,544	0,435
erforderliche elektr. Gesamtleistung der Ventilatorsysteme [kW]	149,1	1.405	9,159	15,72	139,3	140,0	29,99
	Parameter der Lüftungssysteme nach der Abdichtung						
durchschnittlicher externer Druck bei den Lüftungssystemen [Pa]	456	200	375	399	246	1.000	400
gesamter Luftvolumenstrom der Lüftungssysteme [m <sup>3</sup> /h]	127.000	6.000	12.370	19.666	266.012	270.000	66.750
durchschnittlicher Wirkungsgrad der Ventilatorsysteme [ ]	0,108	0,400	0,400	0,400	0,179	0,542	0,400
erforderliche elektr. Gesamtleistung der Ventilatorsysteme [kW]	145,2	0,8	3,2	5,4	101,5	138,4	18,5
	Einsparung von Leistung bei den Ventilatorsystemen						
eingesparte Leistung insgesamt [kW]	3,90	0,57	5,94	10,3	37,8	1,6	11,5
eingesparte Leistung insgesamt [%]	2,6	40,7	64,8	65,4	27,1	1,1	38,1
	Ergebnisse für die Ventilatorsysteme bei realer/geschätzter Betriebszeit						
insgesamt eingesparte Energie [kWh/a]	25.400	5.000	17.500	24.700	331.000	7.700	33.700
insgesamt eingesparte Energiekosten [EUR/a]	5.176	902	3.980	2.718	36.414	1.365	5.051
	Ergebnisse für die Ventilatorsysteme im Vollzeitbetrieb (8.760 h/a)						
insgesamt eingesparte Energie [kWh/a]	34.100	5.000	52.000	90.000	331.000	14.000	100.300
insgesamt eingesparte Energiekosten [EUR/a]	6.956	902	11.850	9.901	36.414	2.490	15.049

Wie Abbildung 3 und 4 zeigen, ist der Prozentsatz der durch die Abdichtung der Luftleitungssysteme eingesparten Ventilatorleistung nicht direkt proportional zum Leckagekoeffizienten vor der Abdichtung. Stattdessen zeigt sich eine direkte Proportionalität zum Prozentsatz der Luftleckage vor der Abdichtung im Vergleich zum gesamten Luftvolumenstrom vor der Abdichtung. Die lineare Regression zeigt eine gute Korrelation zwischen diesen beiden Parametern und weist ein Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,987 auf.

Dies bedeutet, dass der für ein bestimmtes Luftleitungssystem durch eine Abdichtung (mit dem Aeroseal-Verfahren) einzusparende Prozentsatz der Ventilatorleistung (ausgehend vom Wert vor der Abdichtung), etwa doppelt so hoch ist, wie der Prozentsatz des Leckageluftvolumenstrom im Vergleich zum gesamten Luftvolumenstrom (vor der Abdichtung). Demnach gilt:

$$\left( \frac{P_{AHU, \text{bef}} - P_{AHU, \text{aft}}}{P_{AHU, \text{bef}}} \right) \approx 2 * \frac{Q_{\text{leak, bef}}}{Q_{AHU, \text{bef}}} \quad (6)$$

Die jährlichen Kosteneinsparungen können daher grob wie folgt abgeschätzt werden:

$$\text{Einsparung [EUR]} = 2 * P_{AHU, \text{bef}} [\text{kW}] * \frac{Q_{\text{leak, bef}}}{Q_{AHU, \text{bef}}} * t_{AHU, a} [\text{h}] * \text{Preis}_{\text{elec}} \left[ \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}} \right] \quad (7)$$

mit

$t_{AHU, a}$  [h] Betriebsstunden des Lüftungssystems pro Jahr.

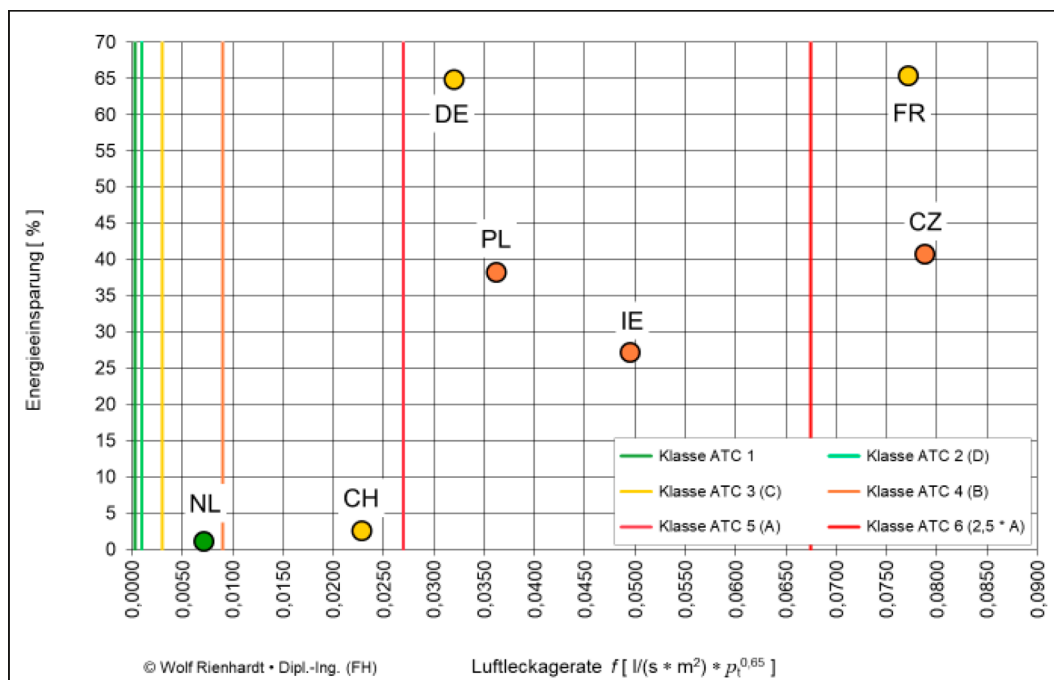


Abb. 3: Prozentsatz der durch die Abdichtung des Luftleitungssystems eingesparten Ventilatorenergie gegenüber der ursprünglich aufgenommenen Ventilatorenergie mit Bezug auf die Leckagerate vor der Abdichtung (die Farbe der Punkte entspricht der erreichten Luftdichtheitsklasse nach der Abdichtung)

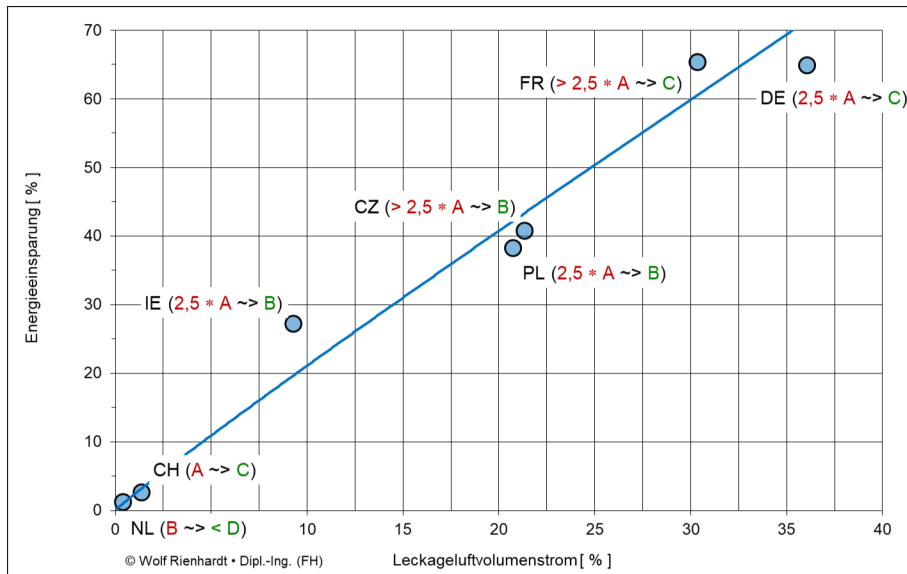


Abb. 4: Prozentuale Einsparung von Ventilatorenergie durch die Abdichtung des Luftleitungssystems mit dem Aeroseal-Verfahren basierend auf dem Prozentsatz des Leckageluftvolumenstroms (vor der Abdichtung) im Vergleich zum gesamten Luftvolumenstrom der Lüftungsanlage (Luftdichtheitsklassen vor und nach der Abdichtung sind in Klammern angegeben)

### 3.3 Vor-Ort-Erfahrungen der Abdichtungsunternehmen

Zusätzlich zu den technischen Details wurden, wie vorher erwähnt, von den ausführenden Abdichtungsunternehmen auch Rückmeldungen zu technischen Besonderheiten eingeholt. Dies betrifft insbesondere die Erfahrungen der Unternehmen vor Ort in puncto Abdichtungen der Luftleitungen.

Zusammengefasst haben die Abdichtungsunternehmen folgende Gründe für eine geringe Luftdichtheit von Luftleitungssystemen festgestellt:

- Verarbeitungsprobleme, wie
  - mangelhafte Verarbeitung,
  - fehlende manuelle Abdichtung,
  - fehlende Luftleitungsclammern,
  - schlechte Rahmenverbindung an der Decke für gedämmte Luftleitungen,
  - Löcher durch Luftdichtheitsprüfgeräte sowie
  - flexible Verbindungen, die sich geöffnet haben.
- Hinzu kommen Produktprobleme, wie
  - schlechte Produktqualität und
  - beschädigte Komponenten.

Befragt zu den Rückmeldungen von Kunden nach der Abdichtung berichteten die Abdichtungsunternehmen (unabhängig von den Ländern, in denen die Abdichtung durchgeführt wurde) folgendes:

- Geringerer Energieverbrauch,
- verbesserte Luftqualität (IAQ), insbesondere weniger Austritt giftiger Gase,
- Verschwinden von unangenehmen Gerüchen und
- geringere Drehzahl der Ventilatoren.

Die geschätzte Amortisationszeit wurde nur von zwei Betreibern angegeben. Sie liegt bei 1,5 bzw. 2 Jahren, was mit den Berechnungen in Abschnitt 3.2 übereinstimmt.

Als technische Schwierigkeiten, die während des Aero seal-Abdichtungsprozesses auftraten, wurde folgendes genannt:

- Probleme mit den installierten Rohrleitungen, wie
  - Einbau von Stahlblechen als Abschottung zum Aufbau von Injektionsabschnitten.
- Probleme mit der Ausrüstung, wie
  - Probleme bei der Messung des Leckagevolumenstroms bei unter 1 l/s,
  - Schwierigkeiten beim Transport der Abdichtungsmaschine (einschließlich Kompressor) in die oberen Stockwerke sowie
  - Überhitzung der Abdichtungsmaschine.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Vorteile einer guten Luftdichtheit von Luftleitungen offensichtlich und zahlreich sind. Nichtsdestotrotz ist das Bewusstsein für dieses Thema in Europa bisher noch gering.

Befragt nach den Trends im jeweiligen Land (und deren Auswirkungen auf den potenziellen Einsatz des Aero seal-Verfahrens) nannten einiger der Anwender Folgendes:

In Irland könnten

- strengere Kriterien für die Druckprüfung von Systemen dazu führen, dass mehr Maßnahmen ergriffen werden müssen, um Luftleitungen abzudichten.

In den Niederlanden steht eine

- verlängerte Nutzungsdauer von Luftleitungssystemen im Vordergrund, was bedeutet Sanierung statt Demontage.

In Polen zeigt sich das Phänomen,

- dass oft bloß Hauptluftleitungen in ausgewählten Abschnitten geprüft werden, was häufig nur etwa 30 % des gesamten Systems bedeutet und zu falschen Einschätzungen des Gesamtsystems führen kann.

#### 4 Fazit

Das Aero seal-Verfahren, welches bereits weltweit verbreitet ist, ermöglicht die Abdichtung von Luftleitungen von neuen und bestehenden Luftleitungssystemen von innen heraus. Am Beispiel von sieben Abdichtungsprojekten, die im Jahr 2021 in sieben europäischen Ländern an einer Vielzahl von Gebäuden und Luftleitungssystemen durchgeführt und von einer Umfrage begleitet wurden, konnte gezeigt werden, dass das Aero seal-Verfahren zahlreiche Vorteile bietet und eindeutig zur Abdichtung von kompletten Luftleitungssystemen geeignet ist. Gründe dafür sind u. a.:

- Das Aero seal-Verfahren ist effizient. Leckagen in den Luftleitungssystemen werden im Durchschnitt um 93 % reduziert (Worst Case 87 %, Best Case 98 %).

- Das Aroseal-Verfahren erlaubt eine relativ schnelle Abdichtung. Die kumulierte Einblaszeit aller sieben Abdichtungsprojekte lag (abhängig von der Größe und Komplexität des Luftleitungssystems) zwischen einer Stunde und 60 Stunden (häufig weniger als eine Stunde pro Einblasstelle).
- Das Aroseal-Verfahren trägt zur Energie- und Kosteneinsparungen bei. Die Abdichtung führte in den sieben Projekten zu Energieeinsparungen zwischen 5.000 kWh/a und 331.000 kWh/a. Dies entspricht jährliche Einsparungen von rund 900 EUR bis 36.000 EUR – abhängig vom Energieverbrauch des Ventilators vor der Abdichtung und der Dichtheit des Luftleitungssystems nach der Abdichtung.
- Das Aroseal-Verfahren erlaubt kurze Amortisationszeiten. Die geschätzten Amortisationszeiten liegen (im Schnitt für sechs Projekte) zwischen einem Jahr und drei Jahren (lediglich das Projekt in den Niederlanden stellt eine Ausnahme dar, da das Luftleitungssystem bereits vor der Abdichtung eine relativ hohe Dichtheit (Klasse B) aufwies).

Anhand der Projekte konnte eine lineare Korrelation zwischen dem, durch die Abdichtung mit dem Aroseal-Verfahren einzusparenden Prozentsatz der aufgenommenen Ventilatorleistung vor der Abdichtung, und dem Prozentsatz der Leckagerate im Vergleich zum gesamten Luftvolumenstrom identifiziert werden. Der Korrelationskoeffizient liegt etwa bei zwei. Dies besagt, dass die Einsparung an Ventilatorleistung (in Prozent) etwa zweimal dem Verhältnis von Leckagevolumenstrom zum gesamten Luftvolumenstrom (vor der Abdichtung) entspricht.

Anhand des Leckageluftvolumenstroms und des gesamten Luftvolumenstroms (vor der Abdichtung) ist bereits vor der Abdichtung eine grobe Schätzung der Einsparungen möglich. Für die Abschätzung gilt:

$$\text{Einsparung[EUR]} = 2 * P_{\text{AHU, bef}} [\text{kW}] * \frac{Q_{\text{leak, bef}}}{Q_{\text{AHU, bef}}} * t_{\text{AHU, a}} [\text{h}] * \text{Preis}_{\text{elec}} \left[ \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}} \right]$$

Um die bisherigen Ergebnisse aus sieben Abdichtungsprojekten zu untermauern und zu verifizieren, soll in einer künftigen Studie eine größere Anzahl an Projekten durchgeführt und analysiert werden.

## 5 Danksagungen

Wir möchten uns bei den AeroSeal-Dienstleistern bedanken, die uns bei dieser Studie unterstützt und die spezifischen Projektinformationen bereitgestellt haben.

Dies sind:

- Air Innovators B.V. (Niederlande),
- Energy Air Sp. Z.o.o. (Polen),
- Ventilace EU a.s. (Tschechische Republik),
- Lippuner Energie- und Metallbautechnik AG (Schweiz),
- Map Clim (Frankreich),
- Spectrum Engineering Ltd. (Irland) und
- Windmüller Technik GmbH (Deutschland).

Wolf Rienhardt (Dipl.-Ing. (FH)) danken wir für die Übersetzung und textliche Aufarbeitung der Studie.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] V. Leprince, F. R. Carrié, and M. Kapsalaki, 'Building and ductwork airtightness requirements in Europe – Comparison of 10 European countries', presented at the 38th AIVC Conference 'Ventilating healthy low-energy buildings', Nottingham, UK, Sep. 2017. Accessed: Feb. 15, 2022
- [2] V. Leprince, N. Hurel, and M. Kapsalaki, 'VIP 40: Ductwork airtightness - A review', AIVC, Apr. 2020. Accessed: May 11, 2021
- [3] M. Modera, 'Fixing Duct Leaks in Commercial Buildings', Ashrae Journal, Jun. 2005
- [4] M. Modera, D. J. Dickerhoff, O. Nilssen, H. Duquette, and J. Geyselaers, 'Residential field testing of an aerosol-based technology for sealing ductwork.', presented at the American Council for an Energy Efficient Economy (ACEEE), USA, Washington DC, 1996
- [5] F. R. Carrié and M. P. Modera, 'Particle Deposition in a Two-Dimensional Slot from a Transverse Stream', Aerosol Science and Technology, vol. 28, no. 3, pp. 235–246, Jan. 1998, doi: 10.1080/02786829808965524
- [6] Mez-AeroSeal, 'AeroSeal Duct Seal Data Sheet'. [Online]. Available: [https://www.mez-technik.de/media/wysiwyg/Download/MEZ-AEROSEAL\\_Sealant Data-Sheet\\_2022\\_EN.pdf](https://www.mez-technik.de/media/wysiwyg/Download/MEZ-AEROSEAL_Sealant Data-Sheet_2022_EN.pdf)
- [7] N. Hurel and V. Leprince, 'Ductwork leakage: practical estimation of the impact on the energy overconsumption and IAQ', presented at the 42nd AIVC-10th TightVent- 8th venticool conference, Rotterdam, The Netherlands, Oct. 2022
- [8] N. Hurel and V. Leprince, 'Impact of ventilation non conformities: calculation methodology and on-site examples', presented at the 42nd AIVC-10th TightVent- 8th venticool conference, Rotterdam, The Netherlands, Oct. 2022