



Luftdichtheit von Luftleitsystemen- eine Überprüfung

Valérie Leprince, PLEIAQ, France
Nolwenn Hurel, PLEIAQ, France
Maria Kapsalaki, INIVE, Greece

1 Einleitung

Verschiedene Studien haben belegt, dass Leckagen in Luftleitsystemen von raumluftechnischen Anlagen einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch von Ventilatoren ausüben [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Eine kürzlich durchgeführte Umfrage innerhalb der Arbeitsgruppe „Tightvent Airtightness Association Committee“ (TAAC) zeigte jedoch, dass in Europa nur ein geringes Bewusstsein für die Bedeutung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen vorhanden ist [10]. Darüber hinaus zeigen aktuelle Messungen [11] aus Frankreich, die im Rahmen des Gütesiegels Effinergie+ durchgeführt wurden, dass fast 50 % der Luftleitungen in den geprüften Häusern eine Luftdichtheit von 2,5*Klasse A oder schlechter aufweisen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, den Einbau der Leitungen zu verbessern. Die Luftleitungen in den meisten geprüften Gebäuden sollten für das Gütesiegel Effinergie+ mindestens Klasse A erreichen, verfehlten dieses Ziel jedoch.

Die vorliegende Arbeit soll das Ventilation Information Paper (VIP)01 „Airtightness of ventilation ducts“ (Luftdichtheit von Lüftungskanälen) [12] ergänzen. Sie bietet einen Literaturüberblick über die seit 2003 durchgeführten Arbeiten auf dem Gebiet der Luftdichtheit von Luftleitsystemen. Ziel der Arbeit ist die Bereitstellung folgender Informationen:

- die Auswirkungen der Luftdichtheit von Luftleitsystemen,
- Vorschriften und Normen,
- Messmethoden und
- die Sicherstellung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen.

2 Klassifizierung der Luftdichtheit von Leitungssystemen

Die Dichtheitsklassen von A bis D definieren die Luftdichtheit in Luftleitsystemen. Tabelle 1 gibt den maximalen Leckagevolumenstrom für die jeweilige Klasse gemäß der relevanten CEN-Normen (EN 12237 & EN 1507) an. Um sich um eine Dichtheitsklasse zu verbessern, muss ein Lüftungssystem dreimal dichter werden. Klasse C und D entsprechen einem sehr dichten Luftleitsystem, während Klasse A oder schlechter (3A, 9A, 27A) Luftleitungen mit geringer Luftdichtheit entsprechen.

Tabelle 1: Dichtheitsklassen von Luftleitsystemen gemäß
CEN-Normen

Dichtheitsklasse	Grenzwert Luftaustritt (l/s pro m ²)
A	0.027 p _{test} ^{0.65}
B	0.009 p _{test} ^{0.65}
C	0.003 p _{test} ^{0.65}
D	0.001 p _{test} ^{0.65}

3 Wie wirken sich Leckagen in Luftleitungen auf den Energieverbrauch aus?

3.1 Energieverbrauch des Ventilators und/oder Auswirkungen auf die Raumlufqualität

Wenn ein Luftleitsystem undicht ist, strömt ein Teil des vom Ventilator erzeugten Volumenstroms durch Undichtheiten. In Abluftkanälen wird Luft über Undichtheiten angesaugt, in Zu-
luftkanälen entweicht sie.

Daher muss der Ventilator mehr Luft bewegen, um den zusätzlichen Volumenstrom und die zusätzlichen Druckverluste aufgrund von Leckagen auszugleichen. Wenn die Luftströme nicht erhöht werden, um Leckagen auszugleichen, werden die erforderlichen Luftvolumenströme an den Luftauslässen nicht erreicht, was eine schlechte Raumluftqualität zur Folge haben kann. Dies wurde in einer Feldstudie [13] in einem Bunker (ohne Öffnung nach außen) gezeigt, der zur Sicherstellung einer guten Luftqualität nur eine RLT-Anlage nutzte. Eine Verbesserung der Luftdichtheit des Luftleitsystems und der RLT-Anlage (von 1,5* Klasse A auf Klasse C), bewirkte eine Absenkung der durchschnittlichen CO₂-Konzentration von 1400 ppm auf 650 ppm.

Ein Ausgleich der Leckagen durch den Ventilator (entweder durch eine höhere Ventilatorleistung oder eine längeren Betriebsdauer) führt zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs des Ventilators. In einer beispielhaften Studie wurde festgestellt, dass sich der Energieverbrauch des Ventilators verdoppelt, wenn er so eingestellt wird, dass der gewünschte Luftvolumenstrom erreicht wird [3].

Der Ventilator kann Leckagen nur teilweise ausgleichen, so dass sowohl ein Anstieg des Energieverbrauchs als auch eine Verschlechterung der Raumluftqualität in Kauf zu nehmen ist. Dies wird in Abbildung 1 zusammengefasst und in [14] näher erläutert.

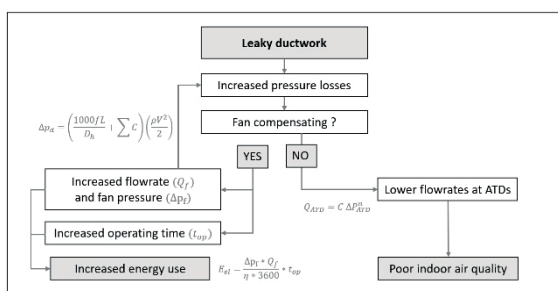


Abbildung 1: Einfluss undichter Leitungen auf den Energieverbrauch und / oder die schlechte Raumluftqualität

Leistungsaufnahme des Ventilators

Die Leistungsaufnahme des Ventilators hängt vom Luftvolumenstrom, den der Ventilator erzeugt sowie vom Druckgefälle des Ventilators ab.

$$P_{el} = \frac{\Delta p_f * Q_f}{\eta_f * 3600} \quad (1)$$

P_{el}	W	Leistungsaufnahme Ventilator
Δp_f	Pa	Druckgefälle Ventilator
Q_f	m ³ /h	Volumenstrom am Ventilator

η_f Wirkungsgrad Ventilator (abhängig von Druckdifferenz und Volumenstrom)

Je höher das Druckgefälle (der Strömungswiderstand) im Luftleitsystem, desto höher ist die Druckdifferenz, die der Ventilator erzeugen muss, um diesen Widerstand zu überwinden und den hygienischen Luftvolumenstrom zu erreichen.

Somit können Leckagen durch eine höhere Ventilatorleistung oder durch eine längere Betriebszeit kompensiert werden, um den gleichen durchschnittlichen Schadstoffgehalt in Innenräumen zu erreichen. Beides führt zu einem höheren Energieverbrauch.

Druckverluste

Druckprofile entlang eines einfachen Abluftkanals sind in Abbildung 2 für drei Fälle dargestellt:

- (1) ohne Leckagen;
- (2) bei Leckagen, die nicht durch den Ventilator kompensiert werden: der Druckabfall am Luftauslass wird reduziert, was zu einem geringeren Luftstrom führt (schlechte Raumluftqualität);
- (3) bei durch den Ventilator kompensierten Leckagen: gleicher Druckabfall wie 1) am Luftauslass, um einen hygienischen Luftvolumenstrom zu erreichen, der eine erhöhte Ventilatorleistung erfordert (erhöhter Energieverbrauch).

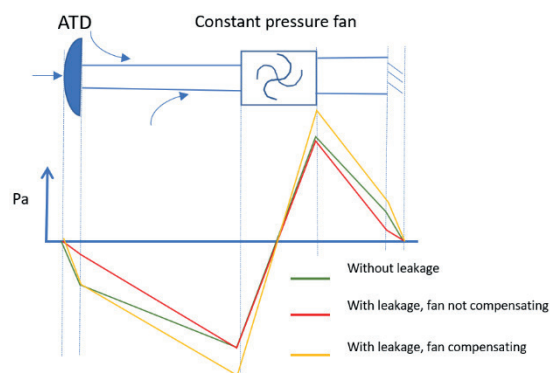


Abbildung 2: Druckprofil innerhalb des Abluftsystems mit und ohne Leckagen entsprechend dem vom Ventilator erzeugten Druck

Berechnungsmodelle

Theoretisch, da der Druckverlust in den Kanälen mit dem Volumenstrom auf der zweiten Potenz skaliert, muss die Ventilatorleistung mit dem Volumenstrom auf der dritten Potenz skaliert werden. Dennoch hängt der Wirkungsgrad des Ventilators auch vom Volumenstrom und dem Strömungswiderstand im Luftleitsystem ab. Dieses Verhältnis zwischen Wirkungsgrad und Volumenstrom bzw. Druck hängt von der Art des verwendeten

Ventilators ab (Axial- oder Radialventilator und Synchron- oder Gleichstromventilator). Modera [15] hat daraus gefolgert, dass die Ventilatorleistung mit einem Exponenten zwischen 2 und 3 [15] zunimmt, wenn dessen Volumenstromleistung gemäß einem Potenzgesetz angehoben wird.

Um die zusätzliche Energie zu berechnen, die zur Überwindung von Leckagen im Luftleitsystem aufgewendet wird, kann das von Leprince & Carrié [9] entwickelte Berechnungsmodell auf der Grundlage von EN 16798-5-1 [16] verwendet werden. Diese Studie betont, dass ein Abdichten der Rohrleitungen nicht immer zu Energieeinsparungen führt (wenn der Ventilator vor dem Abdichten keine Leckagen kompensiert hatte), sondern immer entweder den Energieverbrauch des Ventilators reduziert oder die Raumluftqualität verbessert oder beides.

Für VVS-Systeme (variabler Volumenstrom – stufenlose Luftmengenregulierung) haben Wray & Sherman [17] für Energy Plus ein Leckagemodell für Luftleitsysteme entwickelt, um die Auswirkungen von Undichtheiten in Luftleitungen auf den Energieverbrauch des Ventilators zu bewerten. Das Modell eignet sich für große Gebäude mit VVS-Systemen, da es den Anteil der Leckagen auf jeder Seite des VVS-Systems (Hoch- und Niederdruck) berücksichtigt.

Die in verschiedenen Studien durchgeführten Berechnungen und Messungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Sie zeigt, dass sich durch eine Verbesserung der Luftdichtheit des Luftleitsystems der Energieverbrauch des Ventilators um 30 bis 75 % reduzieren lässt.

3.2 Verluste vorklimatisierter Luft

In den USA dient Luft oft als Wärmeträger für die Wärmeverteilung. Eine Studie aus dem Jahr 2005 zeigte, dass in einer durchschnittlichen zentralen Klimaanlage 10 bis 30 % der klimatisierten Luft aus den Luftleitungen entweicht [18]. In den USA lag das Augenmerk bezüglich Leckagen im Luftleitsystem daher beim Verlust vorklimatisierter Luft.

Tatsächlich führen Leckagen auch zu einem Anstieg der Heiz- und Kühllasten, z. B.:

- wenn in einem klimatisierten Raum Leckagen auftreten, kann dies zu einer Überlüftung führen;
- wenn die Luft vorklimatisiert ist und Leckagen in den Zuluftkanälen außerhalb des klimatisierten Raums auftreten, wird die vorklimatisierte Luft nicht vollständig für das

Gebäude genutzt (Verlust bereits beheizter oder gekühlter Luft);

- wenn ein Wärmetauscher vorhanden ist, verringern Leckagen im Abluftkanal in einem unklimatisierten Raum die Energierückgewinnung;
- wenn die Luft vorgekühlt ist, ist eine sekundäre Auswirkung der erhöhten Ventilatorleistung eine Erhöhung der Kühllast, bedingt durch die aufgrund der erhöhten Ventilatorleistung erzeugten Wärme [15].

Das kann auch zu Komfortproblemen führen, da undichte Warmluftkanäle verhindern können, dass Luft in die vorgesehenen Räume gelangt, was zu warme oder zu kalte Räume zur Folge haben kann.

Berechnungsmodelle

Es ist möglich, die Auswirkungen von Leckagen in Luftleitsystemen auf den Energieverbrauch des Ventilators nur anhand der Eigenschaften des Ventilators und des Luftleitsystems zu berechnen. Die Berechnung der Heiz- und Kühllasten jedoch ist komplizierter, da diese auch von den baulichen Gegebenheiten und dem Klima abhängig sind. Die Berechnung der Auswirkungen von Leckagen auf die Heiz- und Kühllast kann eine vollständige dynamische Energiebedarfsberechnung für das gesamte Gebäude oder die Durchführung von Messungen vor Ort erfordern.

Die neue EPBD-Norm EN 16798-5-1 [16] enthält jetzt Gleichungen zur Berücksichtigung der Auswirkung von Leckagen in Luftleitsystemen auf Heiz- und Kühllasten in der Berechnung der Gesamtenergieeffizienz (EP – Energy Performance) von Gebäuden. Dasselbe gilt für die französische EP-Verordnung (RT 2012).

Um die Auswirkungen von Leckagen und Wärmeleitungsverlusten in Luftleitsystemen im stationären Zustand abzuschätzen, haben Carrié & Leprince [19] ein einfaches Modell gemäß EN 15241 (jetzt EN 16798-5-1) entwickelt, das jetzt in der französischen EP-Verordnung umgesetzt ist. Beispielsweise wird bei einem ausgeglichenen Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung und einem Luftleitsystem der 3* Klasse A mit 20 m² außerhalb des klimatisierten Raums die Effizienz des Wärmetauschers um fast die Hälfte reduziert.

Die Messung der Auswirkungen von Leckagen in Luftleitsystem auf Heiz- und Kühllasten ist ebenfalls kompliziert, da sie

neben Leckagen auch Leitungsverluste berücksichtigen muss.

Da sowohl Berechnung als auch Messung eine Herausforderung darstellen, beinhalten nur wenige Studien eine Einschätzung der Auswirkungen von Leckagen in Luftleitsystemen auf die Heiz- und Kühllasten (zusammengefasst in Tabelle 2). Die Auswirkung von Leckagen auf Heizlasten werden auf 5 bis 18 % und auf Kühllasten auf 10 bis 29 % geschätzt. Am meisten wirken sie sich auf die Bemessungs-Kühlleistung aus, die bei Berücksichtigung der Leckage um 48 % erhöht werden kann.

Tabelle 2: In der Literatur vorgestellte Fallstudien über die Auswirkungen von Leckagen in Luftleitsystemen

Autor	Jahr	M/C*	Beschreibung	Leckage	Einfluss
Carrié et al. (Save-duct)	[7]	M C	Feldmessung in Frankreich und Belgien und Berechnung (42 Luftleitsysteme)	Kumulative Energieeinsparungen in Europa durch den Einbau luftdichter Luftleitsysteme in neuen und sanierten Wohnungen: etwa 10 TWh in 10 Jahren	
			Wohn- und Gewerbegebäude	Die Kühlleistung der durch die Lüftungsregister zugeführten Luft nahm aufgrund von Leckage sowie Wärmeleitungs- und Konvektionsverlusten um 10 bis 40 % ab.	
Modera	[15]	C	Berechnungen gemäß der Norm 152-2004 mit Luftleitsystemen im Bereich des Deckenplenums (leichte gewerbliche Gebäude). Für 3 Klimazonen in den USA und 3 Arten der Isolierung.	Von 35 % auf 6 % des ausgeglichenen Luftvolumenstroms	+5 bis zu +18 % bei Heizlasten, +10 bis zu +29 % bei Kühllasten, bis zu +48 % bei Bemessungs-Kühlleistung
Wray et al.	[17]	C	Simulationen	Von 2,5 % auf 10 %	+30 % der Zuluftventilatorleistung (Leckagen vor dem VVS haben eine größere Auswirkung)
Guyot et al. (ASIE-PI)	[20]	C	Berechnungen mit dem französischen EP-Berechnungstool	Der Gesamt-Wirkungsgrad eines Wärmerückgewinnungssystems sank aufgrund von Leckagen von 85 % (Nennwert) auf weniger als 60 % (entspricht ca. 5 kWh/m ² /Jahr Raumbeheizung)	
Dyer	[4]	C	Simulation auf einem großen pharmazeutischen Werk	5-mal SMACCNA Standard	+1.000.000 US-Dollar über die Lebensdauer des Systems (Heiz- und Kühllasten)
Soenens & Pattijn	[1]	C	Drei Simulationsfälle: ein Krankenhausflügel, ein Pflegeheim und ein Bürogebäude	Der Gesamtenergieverbrauch für die Lüftung kann durch ein luftdichtes Lüftungssystem um mehr als 30 % reduziert werden.	
Bailly et al.	[5]	C	Berechnung an 3 Testhäusern	Klasse 2,5A; Leckagen innerhalb eines klimatisierten Raums, die eine Überlüftung verursachen	+13 % Heizenergiebedarf
Berthault et al.	[3]	M	Labor-Nachbildung von Luftleitsystemen in Wohngebäuden	Von 1,5 Klasse A bis Klasse C	Fast -50 % Energieverbrauch des Ventilators
Leprince & Carrié	[9]	C			

Autor	Jahr	M/C*	Beschreibung	Leckage	Einfluss
Krishnamoorthy & Modera	[8]	C	Heizung und Kühlung der Außenluft in gewerblichen Gebäuden mit VVS-Systemen	Von 19 % auf 2 %	1,72 bis 2,8 US-Dollar pro m ² pro Jahr (einschließlich Ventilatorleistung, Ableitung der Ventilatorabwärme und Konditionierung der überschüssigen Außenluft)
Zhivov & Lohse	[21]	C	In den USA wurden 2005 durch Leckagen in RLT-Systemen, die als Hauptursache für Energieineffizienz in gewerblichen Gebäuden gelten, schätzungsweise 2,9 Milliarden US-Dollar verschwendet.		
Richieri et al.	[13]	M	Sanierung der Lüftungsanlage eines Bunkers	Von 30 % auf 5 %	ca. -75 % Ventilatorleistung

*M Messung/en

C Kalkulationen

 Energieverbrauch des Ventilators

 Heiz- und/oder Kühllasten

 Kumulierte Verluste

3.3 Fallstudien

Fallstudien zur Veranschaulichung der Auswirkungen von Leckagen in Luftleitsystemen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die meisten von ihnen konzentrieren sich auf die Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Ventilators oder auf die Heiz-/Kühllast, die in den vorherigen Abschnitten beschrieben wurden. Manche Studien beinhalten eine Schätzung des kumulativen Energieverlusts und/oder der entsprechenden Energiekosten und ermöglichen einen Vergleich dieser Kosten mit den Investitionskosten für die Umsetzung eines luftdichten Luftleitsystems. Laut Soenens & Pattijn [1] sind die zusätzlichen Investitionen zur Erreichung einer guten Dichtheit der Lüftungsanlage im Neubau im Vergleich zur daraus resultierenden Energiekosteneinsparung gering.

Es wird auch über andere Auswirkungen von Leckagen in Luftleitsystemen berichtet, wie z. B. dem Geräuschpegel, der mit zunehmendem Volumenstrom in den Luftleitungen tendenziell zunimmt. In [13] wurde bei verbesserter Luftdichtheit des Luftleitsystems und des Lüftungsgeräts eine reduzierte Geräuschentwicklung im Bunker wahrgenommen.

Bezüglich der Lärmentwicklung können Leckagen 3 Auswirkungen haben, die einer weiteren Untersuchung bedürfen:

1. Eine Erhöhung des erforderlichen Ventilator-Luftvolumenstroms und -drucks erhöht auch die Geräuschentwicklung des Ventilators
2. Leckagen können die Übertragung des Ventilator-Schalldrucks erhöhen

3. Leckagen können ein „Pfeifgeräusch“ erzeugen

Leckageluft durch Undichtheiten nach den Filtern aber vor dem Ventilator kann den Filter umgehen, was eine Beeinträchtigung der Raumluftqualität zur Folge hat. Es wird auch vermutet, dass Leckagen die Staubansammlung in Filtern [4], Wärmetauschern und Luftleitungen, bedingt durch den höheren Luftvolumenstrom, erhöhen können.

Darüber hinaus führen Leckagen im Luftleitsystem zu unkontrollierten Luftströmen, die einen Druckabfall verursachen können, der wiederum bei einer Verbrennungsanlage zu einem Flammendurchschlag führen kann oder eine Druckbeaufschlagung bewirkt, welche Feuchteschäden in den Wänden verursacht [15]. Dieses Ungleichgewicht kann auch den Schutz vor Verunreinigungen sensibler Bereiche (Operationssäle, Reinräume usw.) beeinträchtigen.

4 Die aktuelle Situation

Laut einer Umfrage der TAAC-Arbeitsgruppe [22] ist das Bewusstsein für die Bedeutung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen in Europa nur bedingt gestiegen. Es gibt jedoch ein breiteres Bewusstsein hinsichtlich der Effizienz von Lüftungsanlagen, was zu einer Verbesserung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen führen könnte. In diesem Abschnitt werden die in der Literatur veröffentlichten Informationen über nationale Bestimmungen und die Luftdichtheitsgrade von Luftleitsystemen nach Land zusammengefasst.

4.1 Vorschriften und Bestimmungen

Tabelle 3 zeigt nationale Vorschriften und Bestimmungen sowie die Luftdichtheitsgrade von Luftleitsystemen in Portugal, im Vereinigten Königreich, in Frankreich, Schweden, Norwegen und in Finnland.

4.2 Auswirkungen auf die Berechnung der Gesamtenergieeffizienz

Ein Fragebogen zur Luftdichtheit von Luftleitsystemen in Bestimmungen wurde an TAAC-Mitglieder versandt [10]. Mitglieder aus nur vier Ländern (Belgien, Frankreich, Lettland und Deutschland) füllten den Fragebogen aus, während die Befragten in Tschechien und Polen antworteten, dass die Luftdichtheit von Luftleitsystemen in ihrem Land nicht wirklich berücksichtigt wird.

Unter den ausgewählten Ländern wird die Luftdichtheit von Luftleitsystemen in der Berechnung der Gesamtenergieeffizienz in EP-Bestimmungen nur in Frankreich (RT2012) und Belgien (EPB) berücksichtigt, jedoch gibt es keine Mindestanforderungen.

In Frankreich ist die Dichtheitsklasse von Luftleitsystemen eine Eingangsgröße für die Energiebedarfsberechnung, ebenso wie der Anteil an Leckagen innerhalb des klimatisierten Raums.

Diese Daten werden für die folgenden Zwecke verwendet:

- Berechnung der Wärmeverluste der Luft in den Abluft-

und Zuluftkanälen

- Berechnung der Überlüftung aufgrund von Leckagen innerhalb des klimatisierten Raums

Die Ventilatorleistung ist jedoch eine Eingangsgröße der Berechnung der Gesamtenergieeffizienz und wird nicht entsprechend den Leckagen in der Effizienzberechnung korrigiert. Der Standardwert in Frankreich ist 2,5 Klasse A.

In Belgien ist der Leckagevolumenstrom in Luftleitsystemen (gemäß EN 14134) nur für Wohnbauten eine Eingangsgröße für die Berechnung der Gesamtenergieeffizienz. Die Grundannahme (ohne Messung) ist, dass die Leckage 18 % des erforderlichen Volumenstroms ausmacht. Leckagen führen zu einer Überlüftung des klimatisierten Raums und damit zu Wärmeverlusten im Winter. Wie auch in Frankreich werden die Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Ventilators nicht direkt in der Berechnung der Gesamtenergieeffizienz berechnet, sondern sollten bei der Inbetriebnahme gemessen und entsprechend berücksichtigt werden.

Tabelle 3: Bestimmungen über die Luftdichtheit von Luftleitsystemen in 6 Ländern

Land	Bestimmungen	Anwendung
Portugal	Seit 2006 umfassen die Bestimmungen obligatorische Prüfungen für neue RLT-Systeme in Gebäuden mit einer Fläche von mehr als 1000 m ² . Die Leckage aus Luftleitsystemen darf bei unter 400 Pa max. 1,5 l/s pro m ² betragen. ¹	Wird selten angewandt. Eine Umfrage unter den 15 größten Systemlieferanten (11 Antworten) auf dem Markt ergab, dass 64 % von ihnen nur 1 bis 10 Prüfungen pro Jahr durchführen (nur 4 besitzen die notwendigen Prüfmittel). ²
UK	Obligatorische Prüfungen für Luftleitungen für Hochdruck (Lüftung in nicht häuslicher Umgebung) gemäß BESA DW/1433; Klasse C ist zu erreichen.	Der Anlagenplaner wählt den zu prüfenden Abschnitt aus und kann zusätzliche Prüfungen verlangen. Die Prüfung wird im Normalfall vom Systemlieferanten durchgeführt.
Frankreich	Für die Verwendung eines besseren Werts als der Standardwert in der Berechnung der Gesamtenergieeffizienz (Prüfung durch zertifizierten Prüfer oder mittels zertifiziertem Qualitätskonzept) ist eine Begründung erforderlich. Die französischen Programme Effnergie+ und BEPOS-Effnergie erfordern bezüglich der Luftdichtheit von Luftleitsystemen eine begründete Einstufung in Klasse A ¹	Mehr als 100 zertifizierte Prüfer im Jahr 2020 (Qualibat 8721) Spezifischer Leitfadens für Prüfungen: FD E 51-767, 2014 Das Bewusstsein für die Bedeutung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen ist zwischen 2002 und 2005 gestiegen. ¹
Schweden	Anforderungen an Luftleitsysteme wurden mit der AMA 1966 eingeführt und wurden seitdem verschärft. ⁴ In der Version von 2007 müssen Luftleitsysteme prinzipiell Klasse C entsprechen. 10 % aller Luftleitungen mit rundem und 20 % der Luftleitungen mit rechteckigem Querschnitt müssen überprüft werden.	Für Systemlieferanten kann sich die Installation minderwertiger Luftleitsysteme als teuer erweisen, da sie sowohl für Nachbesserungsarbeiten als auch für zusätzliche Prüfungen aufkommen müssen. Dies motiviert die Systemlieferanten zur Sicherstellung einer fachgerechten Ausführung der Arbeit. ⁵

Land	Bestimmungen	Anwendung
Norwegen	In den Bauvorschriften heißt es lediglich, dass „Luftleitungen und Lüftungsgeräte ausreichend luftdicht sein“ müssen (keine quantitativen Anforderungen). ³	Gebäudeeigentümer verlangen in der Regel Klasse B, und mehr als 90 % der installierten Leitungen haben einen runden Querschnitt und Flachdichtungen. ³
Finnland	Die Bauvorschriften verlangen für das gesamte System mindestens die Klasse B und empfehlen Luftleitungen und Komponenten der Klasse C oder besser. ⁵	Lüftet die Anlage mehr als einen Raum, werden Messungen durchgeführt, um die Erfüllung der Bestimmungen zu überprüfen. Stichprobenprüfungen sind bei Luftleitungen der Klasse C oder D zulässig.

¹ Leprince et al [10]

⁴ Andersson [25]

² Lisboa [23]

⁵ Schild & Railio [26]

³ BESA [24]

Tabelle 4: Nutzungsgrade für kontrollierte Lüftungen (Tabelle 4h aus SAP 2012)

Art der kontrollierten Lüftungen	Genehmigtes Installations-system	Nutzungsgrad für spezifische Ventilatorleistung			Nutzungsgrad für Wirkungsgrad	
		Flexibler Kanal	Starrer Kanal	Kein Kanal	Unisolierte Kanäle	Isolierte Kanäle ^{d)}
Wohnraumlüftung, zentral ^{a)}	Nein	1.70	1.40	-	-	-
	Ja	1.60	1.30	-	-	-
Wohnraumlüftung oder Zwangsbelüftung von außen, dezentral ^{a)}	Nein	1.45	1.30	1.15	-	-
	Ja	1.45	1.30	1.15	-	-
Ausgeglichene kontrollierte Gebäudelüftung ohne Wärmerückgewinnung ^{a)}	Nein	1.70	1.40 ^{c)}	-	-	-
	Ja	1.60	1.25 ^{c)}	-	-	-
Ausgeglichene kontrollierte Gebäudelüftung mit Wärmerückgewinnung ^{a)}	Nein	1.70	1.40 ^{c)}	-	0.70	0.85
	Ja	1.60	1.25 ^{c)}	-	0.70	0.85
Standardwerte aus Tabelle 4g (alle Typen)		2.5			0.70	

^{a)} Verwenden Sie diese Werte für Daten aus der Datenbank oder aus Datenblättern, die Sie von www.ncm-pcdb.org.uk/sap bezogen haben.

^{b)} Verwenden Sie diese Werte für Daten aus Tabelle 4g.

^{c)} Die Werte für starre Kanäle gelten auch für halbstarre Kanäle, sofern die halbstarren Kanäle in der Datenbank aufgeführt sind.

^{d)} Diese Spalte trifft zu, wenn sich alle Luftkanäle innerhalb der isolierten Gebäudehülle befinden, auch wenn die Kanäle selbst nicht isoliert sind.

In den britischen „Building Regulations“ (Bauvorschriften), „Approved Documents“ (genehmigten Dokumente) und zugehörigen Compliance-Richtlinien wird kaum auf die Luftdichtheit von Luftleitsystemen in kontrollierten Wohnraumlüftungen Bezug genommen. SAP 2012 (die Software zur Berechnung der Gesamtenergieeffizienz neuer Wohnbauten) enthält jedoch eine Reihe von „Nutzungsgraden“, um die installierte Leistung von kontrollierten Lüftungen genauer beziffern zu können (siehe Tabelle 4). Sie wurden entwickelt, um die Auswirkungen typischer Installations- und Betriebspraktiken bei flexiblen, halbstarren und starren Luftleitsystemen wiederzugeben. Ist die Anlage von einem „genehmigten Installationssystem“ abgedeckt, so ist der Nutzungsgrad geringer. Die Ventilatorleistung ist proportional zum Nutzungsgrad.

4.3 Luftdichtheitsgrad von Luftleitsystemen

Es gibt zwei Datenbanken zur Luftdichtheit von Luftleitsystemen, die in der Literatur häufig erwähnt werden: die französische Datenbank von CEREMA und die Datenbank ResDEB des Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) in den USA. Die im Rahmen des Projekts SAVE-DUCT gesammelten Daten werden weiterhin als Referenz verwendet.

Zusätzlich zu einem Leistungsvergleich zwischen verschiedenen Ländern, wie er etwa im Rahmen des Projekts SAVE-DUCT für Frankreich, Belgien und Schweden durchgeführt und in VIP 01 [12] vorgestellt wurde, bieten diese Datenbanken die folgenden Möglichkeiten:

- die Beobachtung der Entwicklung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen;
- eine Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen der Luftdichtheit von Luftleitsystemen und den baulichen Gegebenheiten;
- eine Abschätzung des Anteils des leckagebedingten Luftvolumenstroms.

4.3.1 Entwicklung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen

Die Ergebnisse des Projekts SAVE-DUCT zeigten, dass 1998 83 % der geprüften Rohrleitungen 3. Klasse A oder schlechter entsprachen. Sie können mit der neuen, 2016 eingerichteten französischen Datenbank verglichen werden, welche etwa 1300 von zertifizierten Prüfern durchgeführte Messungen enthält [11]. Da die Hälfte der Messungen in Gebäuden im Rahmen einer Beantragung des Gütesiegels Effinergie+ durch-

geführt wurde (das Klasse A erfordert), können diese Messungen nicht als allgemein, auf alle Neubauten in Frankreich zutreffend, betrachtet werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die geprüften Wohnbauten in Frankreich nun überwiegend der Klasse A oder besser entsprechen, während Nichtwohngebäude der Klasse B oder besser entsprechen (siehe Abbildungen 3 und 4). In 20 Jahren scheinen sich die Leckagen in Luftleitsystemen somit um den Faktor 3 bis 9 reduziert zu haben.

In den USA werden die Messungen in der ResDB-Datenbank des LBNL gesammelt. Beiträge werden auf freiwilliger Basis von Energieprüfern, Bauunternehmern, Managern von Energieeffizienzprogrammen und Forschern geleistet. Anhand einer Analyse der Daten wurde geschätzt, dass zwischen 2000 und 2010 die Luftdichtheit von Luftleitsystemen in Wohnbauten um 50 % verbessert wurde und 3,7 cfm25 (0,19 l/s pro m² bei 25 Pa) pro 100 ft² [9,3 m²] konditionierter Grundfläche erreicht hat [27].



Abbildung 3: Verteilung der durch Messungen ermittelten Dichtheitsklassen von Luftleitsystemen in Wohnbauten [11]

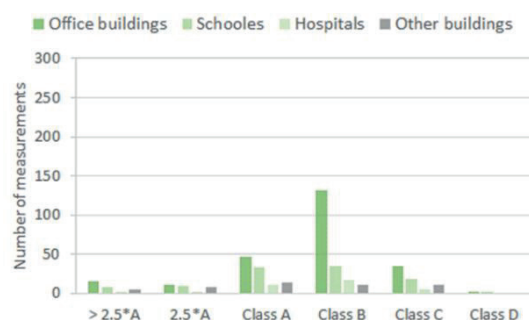


Abbildung 4: Verteilung der durch Messungen ermittelten Luftdichtheitsklassen von Luftleitsystemen in Nichtwohnbauten [11]

4.3.2 Zusammenhang zwischen der Luftdichtheit von Luftleitsystemen und den baulichen Gegebenheiten

Die Analyse der französischen Datenbank durch Moujalled, Leprince & Mélois [11] deutet darauf hin, dass die Luftdichtheit von Luftleitsystemen von den folgenden Faktoren abhängig ist:

- der Nutzung des Gebäudes (siehe Abbildung 3 und 4);
- der Lüftungsanlage;
- dem Leitungstyp (flexibel/starr).

Bei Wohngebäuden, die hauptsächlich mit Luftleitsystemen mit einem Auslass ausgestattet sind, ist Klasse A das häufigste Ergebnis. In Einfamilienhäusern, in denen meist flexible Leitungen verwendet werden, ergaben 55 % der Messungen die Klasse A oder besser. Bei Mehrfamilienhäusern mit einem großen Anteil starrer metallischer Leitungen erreichten 77 % Klasse A. Nichtwohngebäude, die hauptsächlich mit einem ausgeglichenen Lüftungssystem und starren metallischen Leitungen ausgestattet sind, erreichen am häufigsten Klasse B, und 90 % der Messungen ergaben Klasse A oder besser.

4.3.3 Anteil des leakagebedingten Luftvolumenstroms

Bei Messungen in 9 Mehrfamilienhäusern in Frankreich und Belgien stellten Carrié, Andersson & Wouters [28] fest, dass das Verhältnis zwischen dem Leakagevolumenstrom im Luftleitsystem und dem Mindestvolumenstrom durchschnittlich 13 % bei 50 Pa betrug. Bei gewerblichen und öffentlichen Gebäuden betrug das Verhältnis zwischen Leakagevolumenstrom und Auslegungsvolumenstrom 21 % bei 100 Pa.

Diese Ergebnisse stimmen mit Messungen in den USA überein. Dort war die Leckage aus Luftleitsystemen in 10 großen Gebäuden mit durchschnittlich 28 % des Volumenstroms signifikant [29].

5 Welche Messungen gibt es?

5.1 Prüfmethoden

5.1.1 Herkömmliche Methoden

Die herkömmliche Methode zur Messung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen wird in verschiedenen Publikationen beschrieben, wie z. B. in § 6.2 des Projekts SAVE-DUCT (Kapitel 6).

Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird der zu prüfende Leitungsabschnitt vom Rest des Luftleitsystems „isoliert“ und die

Enden des zu prüfenden Teilsystems sowie die Luftauslässe luftdicht verschlossen.

Die Messeinrichtung besteht aus:

- einem Ventilator, der das zu prüfende Luftleitsystem mit einem konstanten Druck beaufschlagt;
- einem Volumenstrommesser für die Ermittlung des zur Aufrechterhaltung des beaufschlagten Drucks erforderlichen Volumenstroms;
- einem Manometer zur Sicherstellung des konstanten Drucks.

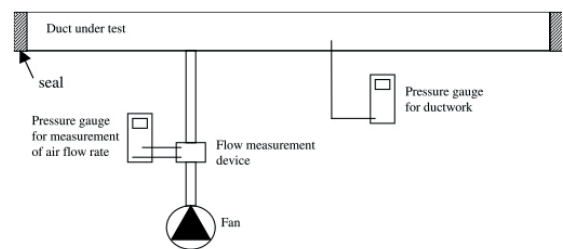


Abbildung 5: Messprinzip und Ausrüstung zur Messung der Druckbeaufschlagung durch den Ventilator [28]

In Europa besteht die Prüfung in der Regel aus einer Messung des Leakagevolumenstroms an einer Stelle. Als Prüfdruck kann entweder der Betriebsdruck des Luftleitsystems oder der in der einschlägigen Bestimmung oder Norm definierte Wert herangezogen werden. Zum Beispiel:

- In den USA wird die Luftdichtheit von Luftleitsystemen in Wohngebäuden üblicherweise bei 25 Pa geprüft [30]. Dieser Referenzdruck wird auch in den Standard-Prüfverfahren ASTM E1554 [31], RESNET 380 [32] sowie in der ASHRAE-Norm 152 [33] verwendet. Anlagen in gewerblichen Gebäuden werden bei den deutlich höheren, in den SMACNA-Prüfverfahren [34] definierten Druckwerten geprüft (125 bis 2500 Pa).
- In Frankreich sind die Prüfwerte in FD 51-767 definiert:
 - 80 Pa für Einfamilienhäuser
 - 160 Pa für Mehrfamilienhäuser
 - 250 Pa für Nichtwohngebäude
- Wenn jedoch der Standarddruck stark vom Ist-Arbeitsdruck abweicht, ist die Prüfung bei Betriebsdruck durchzuführen.

Der gemessene Luftvolumenstrom, der Druck und die Leitungsfläche ergeben einen Leckagekoeffizienten pro Quadratmeter Leitungsfläche. Dieser Leckagekoeffizient wird mit den Kapitel 2 vorgestellten Dichtheitsklassen verglichen.

$$\frac{Q}{A} = f_{ref} = K \Delta p_{ref}^{0,65}$$

Q	m ³ /s	Gemessener Luftvolumenstrom
A	m ²	Geprüfte Leitungsfläche
f _{ref}	m ³ /s.m ²	Leckagefaktor
ΔP _{ref}	Pa	Prüfdruck
K	m ³ /s.m ² .Pa ^{0,65}	Verlustkoeffizient (dynamische Verluste)

Der Ausgabewert kann die äquivalente Leckagefläche [35] sein, die für ein gegebenes „n“ (normalerweise 0,65) berechnet wurde.

$$ELA = Q \sqrt{\frac{P}{2}} \left[\frac{\Delta P_{ref}^{(n-0,5)}}{\Delta P^n} \right]$$

5.1.2 Druckleckage nach außen

In einer weiteren Methode wird nur die Leckage aus dem Luftleitsystem in den Außenbereich ermittelt. Bei diesem Differenzdruck-Messverfahren werden das Luftleitsystem und das Gebäude gleichzeitig mittels Blower-Door-Gerät mit dem selben Druck beaufschlagt [36], [31], [32].

5.1.3 Das Differenzdruck-Messverfahren

Bei der herkömmlichen Methode wird das gesamte Luftleitsystem mit demselben Druck (Prüfdruck) beaufschlagt. Im Betrieb hat jedoch nicht jede Leckage die gleichen Auswirkungen auf den Energieverbrauch der Ventilatoren und auf die Heiz- und Kühlverluste, da diese nicht unter einem homogenen Druck stehen. Daher sind Undichtheiten in der Nähe des Ventilators kritischer als in der Nähe von Luftauslässen.

Eine weitere Prüfmethode, das Differenzdruck-Messverfahren [auch Blower-Door- oder DeltaQ-Methode], wurde in den USA entwickelt, um den tatsächlichen Leckagevolumenstrom unter Betriebsbedingungen zu ermitteln. Für dieses Messverfahren wird anstelle einer Außentür, also zwischen dem Innen- und Außenbereich des Gebäudes, ein Blower-Door-Gerät installiert.

Es werden vier Prüfungen durchgeführt, bei denen das Gebäude mit Überdruck bzw. mit Unterdruck beaufschlagt wird, und bei laufendem sowie ausgeschaltetem Gebläse der RLT-Anlage. Die Daten werden mittels Computer analysiert und die Leckage aus den Luftleitungen nach außen unter Betriebsbedingungen berechnet. Die Vorgehensweise bei diesem Prüfverfahren ist in der Norm ASTM E1554 beschrieben [30]. Theoretisch ist diese Methode empfindlicher gegenüber Windverhältnissen, da sie Prüfungen der Luftdichtheit des Gebäudes beinhaltet. Von Walker et al. [37] durchgeführte Wiederholbarkeitsprüfungen haben allerdings keinen großen Unterschied zu anderen Methoden gezeigt.

5.2 Unsicherheit der Dichtheitsprüfungen für Luftleitsysteme

Laut Walker et al. [37] haben Feldstudien gezeigt, dass das Differenzdruck-Messverfahren mit einer Standardabweichung von nur 1 % des unteren Volumenstroms am besten wiederholbar ist; die beiden anderen Methoden weisen eine Standardabweichung von etwa 6 % auf. Je dichter das Luftleitsystem, desto besser die Wiederholbarkeit (Standardabweichung von 0,3 % bis 3 %).

Berthault, Boithias & Leprince [3] haben den Einfluss des Druckabfalls, der Verteilung der Leckagen und des Standorts des Messgeräts auf das Ergebnis einer herkömmlichen Prüfung getestet. Ihre Studie hat folgendes ergeben:

- Die Position des Messgeräts scheint bei unterschiedlichen Verteilungen der Leckage keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfung zu haben.
- Nur sehr hohe dynamische Verluste (fast vollständig geschlossener Dämpfer) hatten bei einem undichten Luftleitsystemen einen Einfluss auf das Ergebnis.

5.3 Bestehende Normen und Richtlinien

5.3.1 Europäische und amerikanische Normen

In den USA wird die Methodik zur Durchführung von Dichtheitsprüfungen von Luftleitsystemen in den Normen ASTM E1554 [31], RESNET 380 [32] und ASHRAE Standard 152 [33] beschrieben.

In Europa gibt es nicht eine einheitliche Norm für Dichtheitsprüfungen von Luftleitsystemen, sondern ebenso viele Normen wie Leitungstypen.

Bestehende Normen zur Dichtheitsprüfung von Luftleitsystemen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Aufgrund der Vielfalt der Normen kann Verwirrung zwischen der Prüfung der Luftdichtheit des Produkts an sich (im Labor, im nicht-installierten Zustand) und der Prüfung fertig installierter Luftleitsysteme entstehen. Auch wenn luftdichte Produkte für die Einrichtung eines luftdichten Luftleitsystems erforderlich sind, sind sie allein noch kein Garant für die Luftdichtheit des installierten Luftleitsystems. Auch eine schlechte Umsetzung kann Undichtheiten zur Folge haben.

5.3.2 Nationale Initiativen

Da die europäischen Normen jeweils nur einen Leitungstyp abdecken, wurden in Ländern, in denen Dichtheitsprüfungen von Leitungssystemen durchgeführt werden, nationale Protokolle entwickelt. Einige dieser Protokolle werden in Tabelle 6 aufgeführt.

5.4 Prüferqualifizierung

In Frankreich existiert ein Qualifikationsrahmen für die Dichtheit von Luftleitungen, wie in [38] beschrieben. Effinergie hat 2012 im Rahmen der Schaffung des Gütesiegels Effinergie+ ein Schulungsprogramm für Prüfpersonal eingeführt. Später schuf die Regierung eine Qualifikation für Luftleitungs-Dichteprüfer, einschließlich Schulung, Vor-Ort-Prüfung und Prüfung der Fachkenntnisse.

Eine Zertifizierung von Lüftungsmonteuren, inklusive Prüfung, gibt es auch in Schweden.

6 Wie errichtet man luftdichte Luftleitsysteme?

6.1 Implementierung dichter Luftleitungen

Das erste VIP zum Thema Luftdichtheit von Luftleitsystemen (1) informierte bereits über die Sicherstellung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen. Außerdem sei auf das „Source book for efficient air duct systems in Europe“ [39] und auf Kapitel 4 des Projekts SAVE-DUCT [28] verwiesen.

Ein wichtiger Punkt zur Verbesserung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen ist die Verwendung von Leitungen mit werks-

seitig montierten luftdichten Verbindungen mit Flachdichtung. Der Marktanteil dieser Produkte nimmt in Ländern, in denen die Luftdichtheit von Luftleitsystemen vorangetrieben wird, zu. Laut Schild & Railio [40] bestehen in Skandinavien heute ca. 90–95 % der Luftleitsysteme aus runden Stahlleitungen mit werksseitig eingebauten luftdichten Verbindungen mit Flachdichtung (zertifiziert Luftdichtheitsklasse C oder besser).

Beispiele für Zweilippendichtungen für Wickelfalzrohre sind in [21] angegeben und in Abbildung 6 dargestellt.

Zur Verbesserung der Dichtheit bestehender Luftleitungen wurde in den USA Anfang der 2000er Jahre eine Methode zur Abdichtung der Leitungen durch die Einbringung eines Dichtstoffs mittels Sprühzerstäuber entwickelt, die nun (seit 2015) in Europa eingesetzt wird. Mit dieser Methode kann die Leckage in einem installierten Luftleitsystem um 66–86 % reduziert werden [43].

Tabelle 5: Europäische Normen zur Dichtheitsprüfung von Luftleitsystemen (Messung und Prüfung)

Norm	Leitungstyp	Zweck	Inhalt
EN 12237 [41]	Rund, metallisch	Prüfprotokoll	Enthält Definitionen, Regeln zu Stichprobenprüfungen, Prüfdruck, Gleichungen zur Korrektur des Luftvolumenstroms sowie den grundlegenden Inhalt des Prüfberichts.
EN 1507 [42]	Rechteckig, metallisch		Ähnlich EN 12237. Beinhaltet die Messung der Durchbiegung.
EN 13403 (2003)	Nichtmetallisch		Beschreibt ein Prüfverfahren, das entweder vor Ort oder im Labor angewendet werden kann.
EN 15727 (2010)	Komponenten		Klassifiziert Komponenten und beschreibt ein Prüfverfahren, das entweder vor Ort oder im Labor angewendet werden kann.
EN 14239 (2004)	Beliebige	Messung der Oberfläche	Bezüglich der Messung der Oberfläche von Luftleitsystemen beziehen sich alle Prüfprotokolle für die Luftdichtheit von Luftleitsystemen auf diese Norm.
EN 12599 (2012)		Nichtwohngebäude	Enthält Verweise auf die oben genannten Messnormen (EN 1507 und EN 12237). In Überarbeitung (2019). Der nächste Stand soll umfangreichere Informationen über Dichtheitsprüfungen von Luftleitsystemen enthalten. Gibt einen Standard-Prüfdruck von 200, 400, 1000 Pa für Zu- und Abluftleitungen und 200, 400, 750 Pa für Abluftkanäle an. Der nächstliegende Betriebsdruck sollte jeweils gewählt werden.

Tabelle 6: Nationale Initiativen für Dichtheitsprüfungen von Luftleitsystemen

Land	Nationale Richtlinie	Inhalt
Frankreich	FD 51-767	Vervollständigt die bestehende Norm mit Informationen bezüglich: <ul style="list-style-type: none"> • des Umgangs mit verschiedenen Arten von Rohrleitungen in einem System • der Stichprobenprüfung entsprechend des geprüften Gebäudetyps: der geprüfte Abschnitt muss eine repräsentative Auswahl aller Formen, Größen und Werkstoffe der in der gesamten Anlage verwendeten Luftleitungen enthalten (Anforderungen je nach Länge der Abzweigung und Fläche der Leitungen) • der Berücksichtigung spezifischer Geräte: Plenum, Klimaschrank und flexible Rohrhülse sind in den gemessenen Abschnitt einzubeziehen; andernfalls kann der Volumenstrom bis zu 50 % abweichen • der Wahl des Prüfdrucks • der Anwendung von Korrekturen je nach Druck und Temperatur • der Definition der mindestens zu prüfenden Anzahl von Lüftungsgeräten <p>Verlangt alle 2 Jahre eine Kalibrierung des Messgeräts mit Anforderungen an die Genauigkeit.</p>
	label Effnergie +	Enthält technische Regeln, die es ermöglichen, die Leitungsfläche mit einer Pauschale entsprechend dem maximalen Volumenstrom zu berechnen (nur wenn das Luftleitsystem vollständig geprüft ist; keine Stichprobenprüfungen).
Schweden	AMA VVS&KYL 19 (HVAC and Plumbing)	Enthält Anforderungen zur Durchführung von Dichtheitsprüfungen von Luftleitsystemen bezüglich: <ul style="list-style-type: none"> • des Prüfdrucks: Betriebsdruck (>200 Pa), ansonsten beträgt der Standardwert 400 Pa • der Stichprobenprüfung (nur wenn ein von Dritten zertifizierter Prüfer die Prüfung durchführt): mindestens 10 % der runden Luftleitungen, 20 % der rechteckigen Luftleitungen; Standardfläche: 25 m² (mindestens 10 m² erforderlich)

Land	Nationale Richtlinie	Inhalt
Belgien	« Cahier des charges type 105 » by « Régie des Bâtiments », 2017 (Article E5 part 5)	Enthält Anforderungen zur Durchführung von Dichtheitsprüfungen von Luftleitsystemen bezüglich: <ul style="list-style-type: none"> • der zu prüfenden Fläche: mindestens 10 m² und 30 % der Leitungsfläche • der Druckprüfung für Insufflation: 400 Pa, 1000 Pa und 2000 Pa bei Luftleitungen für Nieder-, Mittel- bzw. Hochdruck • der Druckprüfung für Entlüftung: 500 Pa für Klasse B, 750 Pa für Klasse C und D • der maximalen Messunsicherheit • dem Prüfprotokoll sowie der Dauer und Häufigkeit der Messung • der Anwendung von Korrekturen je nach Druck und Temperatur.
UK	DW143	Enthält praktische Empfehlungen für die Durchführung von Dichtheitsprüfungen von Luftleitsystemen sowie für die Konstruktion luftdichter Luftleitsysteme (im Vereinigten Königreich werden die Prüfungen meist von Monteuren durchgeführt).
		<ul style="list-style-type: none"> • Der zu prüfende Teil des Luftleitsystems und der Prüfdruck sind mit dem Kunden oder dem Anlagenkonstrukteur zu vereinbaren. • Die Prüfung ist vor der Isolierung und Installation von Luftauslässen durchzuführen. • Die Prüfung wird immer bei Überdruck durchgeführt, auch bei Abluftkanälen, um die Route der Leckage nachvollziehen zu können (gilt nur für das Vereinigte Königreich). • Eine Prüfung ist nur für Luftleitungen für Hochdruck (über 1000 Pa) vorgeschrieben; keine Stichprobenprüfung (Vollprüfung der Luftleitungen). • Es wird empfohlen, mindestens 10 % der Leitungen für mittleren Druck zu prüfen.

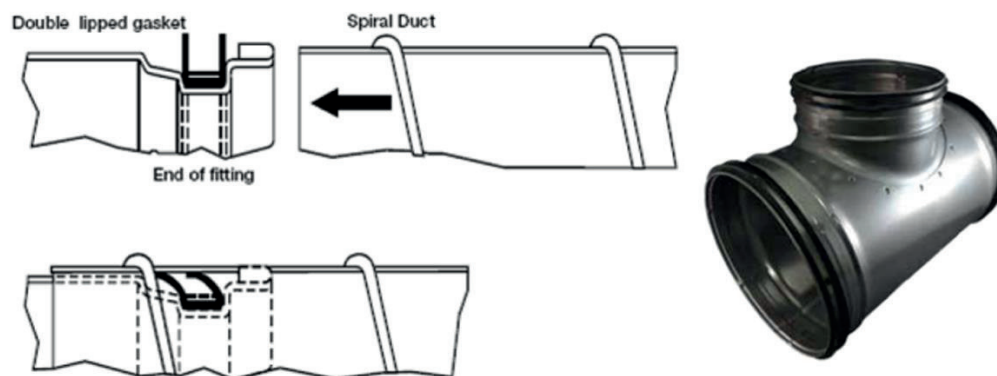


Abbildung 6: Beispiel für Zweilippendichtungen (Linx Industries)

6.2 Bestehende Zertifizierungen

Eurovent Certita Certification hat ein neues Zertifizierungsprogramm für Lüftungskanalsysteme festgelegt. Es wurde in [44] vorgestellt. Ziel war es, sicherzustellen, dass die vom Hersteller angegebene Luftdichtheitsklasse bei ordnungsgemäßer Installation des Systems vor Ort erreicht werden kann. Im Gegensatz zu den in Tabelle 6 vorgestellten Initiativen handelt es sich hierbei um eine Produktzertifizierung und nicht um eine Gebäudezertifizierung. Die Anforderungen für das DUCT-Programm beruhen auf:

- dem Prüfen des typischen Aufbaus des Luftleitsystems und
- einer Prüfung der Produktionsstätten.

Der Anwendungsbereich des Programms umfasst starre und halbstarre Luftleitsysteme.

6.3 Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit von Leitungssystemen

Sherman & Walker [45] haben ein Protokoll zur Berechnung der Haltbarkeit von Dichtungswerkstoffen für Luftleitungen erstellt. Die Prüfungen beinhalteten die Alterung üblicher Kern-Kragen-Verbindungen zwischen flexiblen Leitungen und Blechbündeln sowie Bund-Plenum-Verbindungen an Blechleitungen. Regelmäßige Leckageprüfungen und Sichtprüfungen wurden durchgeführt, um Änderungen in der Leistung des Dichtmittels zu dokumentieren. Im Anschluss an diese Studie wurde ein

ASTM-Standard (E2342-03) entwickelt, um die Prüfverfahren zu standardisieren und die Zuverlässigkeit der Prüfungen zur Bewertung von Dichtungsmaterialien zu erhöhen.

7 Schlussfolgerung: Was brauchen wir?

In den USA wird aufgrund der Baugewohnheiten bereits seit mehr als 20 Jahren an diesem Thema gearbeitet, da die Luftdichtheit von Luftleitsystemen einen großen Einfluss auf die Heiz- und Kühllasten hat. In den europäischen Ländern wurde eine Verbesserung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen in den letzten zehn Jahren stark vorangetrieben, und das Bewusstsein für dieses Thema wächst allmählich.

Es mangelt jedoch nach wie vor an Wissen über die Auswirkungen der Luftdichtheit von Luftleitsystemen auf den Energieverbrauch von Gebäuden. Zwar gibt es Gleichungen zur Berechnung der Heiz- und Kühllasten sowie des Energieverbrauchs der Ventilatoren, es besteht jedoch Bedarf:

- für Feldmessungen in verschiedenen Gebäuden mit unterschiedlichen Klimabedingungen, Luftleitsystemen usw., um die Interessengruppen von der Bedeutung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen zu überzeugen.
- für eine verbesserte Berechnung der Gesamtenergieeffizienz, um sicherzustellen, dass die Auswirkungen von Leckagen in Luftleitsystemen entsprechend berücksichtigt werden. In Abwesenheit einer korrekt kalkulierbaren Gesamtenergieeffizienz besteht für Konstrukteure kaum Motivation, eine Verbesserung der Luftdichtheit ihrer Luftleitsysteme anzustreben.

Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf zur Quantifizierung der Auswirkungen von Luftleitungsleckagen auf andere Aspekte wie etwa Geräuschentwicklung, Staubansammlung und Raumluftqualität.

Die Verbesserung der Luftdichtheit von Luftleitsystemen unterstreicht auch die Notwendigkeit einer Verbesserung des Messprotokolls. Bezüglich der Luftdichtheit von Gebäuden ist außerdem Folgendes anzustreben:

- eine Erweiterung des Wissens über die Unsicherheit der Prüfung und eine Reduktion der Unsicherheit;
- ein einheitliches internationales Protokoll (keine Aufteilung auf verschiedene Normen).

8 Danksagung

Das AIVC und die Autoren bedanken sich bei der Plattform TightVent Europe für ihre Tätigkeiten bezüglich der Luftdichtheit von Luftleitsystemen und insbesondere bei dem TAAC (TightVent Airtightness Associations Committee).



Des Weiteren gilt ein Dank der MEZ-TECHNIK GmbH für ihre Unterstützung bei der Übersetzung ins Deutsche.



9 Literaturhinweise

- [1] Feasibility study of ventilation system airtightness. Soenens, Jeroens and Pattijn, Pedro. Brussels, Belgium: AIVC, 2011. Proceedings of the 32nd AIVC & 1st TightVent Conference, 12-13 October. pp. 51-54.
- [2] Class C air-tightness: proven ROI in black and white. Stroom, Peter. Brussels, Belgium: AIVC, 2011. Proceedings of the 32nd AIVC & 1st TightVent Conference, 12-13 October. pp 96-97.
- [3] Ductwork airtightness: reliability of measurements and impact on ventilation flowrate and fan energy consumption. Bertaault, Sylvain, Boithias, Florent and Leprince, Valérie. Poznan: AIVC, 2014. Proceedings of the 35th AIVC-4th TightVent-2nd venticool Conference, 24-25 September. pp. 478-487.
- [4] Case study: Effect of excessive duct leakage in a large pharmaceutical plant. Dyer, David F. Brussels, Belgium: AIVC 2011. Proceedings of the 32nd AIVC & 1st TightVent Conference, 12-13 October. pp. 55-56.
- [5] Impact of a poor quality of ventilation systems on the energy efficiency for energy-efficient houses. Bailly, Adeline, Duboscq, Franck and Jobert, Romuald. Poznan, Poland: AIVC 2014. Proceedings of the 35th AIVC-4th TightVent-2nd venticool Conference, 24-25 September. pp. 108-118.

- [6] Effects of airflow infiltration on the thermal performance of internally insulated ducts. Levinson, Brennen, et al. 2000, *Energy and Buildings* 32(3), pp. 345-354.
- [7] Duct leakage in European buildings: status and perspectives. Carrié, François Rémi, et al. 2000, *Energy and Buildings*, Vol. 32, pp. 235-243.
- [8] Impacts of duct leakage and central outdoor-air conditioning for commercial-building VAV systems. Krishnamoorthy, Sreenidhi and Modera, Mark. 2016, *Energy and Buildings*, Vol. 119, pp. 340-351.
- [9] Impact of ductwork airtightness on fan energy use: Calculation model and test case. Leprince, Valérie and Carrié, François Rémi. 2018, *Energy & Buildings*, Vol. 176, pp. 287-295.
- [10] Building and ductwork airtightness requirements in Europe – Comparison of 10 European countries. Leprince, Valérie, Carrié, François Rémi and Kapsalaki, Maria. Nottingham : AIVC, 2017. Proceedings of the 38th AIVC Conference „Ventilating healthy low-energy buildings“, Nottingham, UK, 13-14 September 2017. pp. 192-201.
- [11] Statistical analysis of about 1,300 ductwork airtightness measurements in new French buildings: impacts of the type of ducts and ventilation systems. Moujalled, Bassam, Leprince, Valérie and Mélois, Adeline. Juan-Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th TightVent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 222-229.
- [12] Airtightness of ventilation ducts. Delmotte, Christophe. 2003, *Ventilation Information Paper n°1 - AIVC*.
- [13] Ductwork design flaws and poor airtightness: a case study about a ventilation system reconditioning in a sealed building. Richieri, Fabrice, et al. Juan-Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th TightVent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 442-451.
- [14] Impact of ductwork leakage on the fan energy use and sound production of central mechanical ventilation units in houses. Leprince, Valérie, Lightfoot, Marcus and de Jong, Jelmer. Ghent: 2019. 40th AIVC conference.
- [15] Fixing duct leaks in commercial buildings. Modera, Mark. 2005, *ASHRAE journal*, pp. 22-28.
- [16] Energy performance of buildings -Ventilation of buildings - Part 5-1: Calculation methods for energy requirements of ventilation and air conditioning systems. CEN. EN 16798-5-1:2016. 2016
- [17] Duct Leakage Modeling in EnergyPlus and Analysis of Energy Savings from Implementing SAV with InCITe. Wray, Craig P. and Sherman, Max H. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.
- [18] Measurement of air leakage in air-handling units and air conditioning ducts. Srinivasan, K. 2005, *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 273–277.
- [19] Impact of ductwork airtightness and conduction losses on heat recovery efficiency. Carrié, F.R. and Leprince, V. Berlin-Adlershof, Germany: euz, 2011. Proceedings of the 6th International BUILDAIR-Symposium.
- [20] Stimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD. Guyot, Gaëlle and Carrié, Rémi. ASIEPI, 2010.
- [21] A Guide to Achieving Significant Energy Use Reduction with Major Renovation Projects (IEA EBC Annex 61, Subtask A). Zhivov, Alexander and Lohse, Rüdiger. New Buildings Institute (NBI), 2017.
- [22] OVERVIEW | Right and Tight: What's New in Ductwork and Building Airtightness?. Leprince, Valérie, Kapsalaki, Maria and Carrié, François Rémi. BUILD UP. [Online] 2 October 2017. <http://www.buildup.eu/en/news/overview-right-and-tight-whats-new-ductwork-and-building-airtightness-1>.
- [23] Duct leakage testing in Portugal, a consulting engineer view and experience. Lisboa, Carlos. Juan-Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th TightVent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 216-217.
- [24] BESA. DW/143: Ductwork air leakage testing. London: Building Engineering Services Association, 2013.

- [25] Can we learn from the Swedish quality approach to ductwork airtightness and the regular inspection of ventilation systems? Andersson, Johnny. Brussels, Belgium: AIVC, 2012. Proceedings of the International workshop: Achieving relevant and durable airtightness levels: status, options and progress needed, 28-29 March 2012. pp. 95-101.
- [26] Duct system air leakage – How Scandinavia tackled the problem. Schild, P.G. and Railio, J. BUILD UP. [Online] 1 September 2009. http://www.buildup.eu/sites/default/files/content/P187_Duct_System_Air_Leakage_ASIEPI_WP5.pdf.
- [27] Building Envelope and Duct Airtightness of New US Dwellings. Chan, Wanyu R. and Sherman, Max H. ASHRAE, 2013. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference.
- [28] Improving Ductwork - A Time for Tighter Air Distribution Systems, Report. Carrié, F.R., Andersson, J. and Wouters, P., [ed.]. ISBN 1902177104. Brussels: EU Project SAVE-DUCT, 1999.
- [29] Field experience with sealing large building duct leakage with an aerosol based sealing process. Modera, Mark. Washington: AIVC, 2013. Proceedings of the Workshop on Building and Ductwork Airtightness Design, Implementation, Control and Durability: Feedback from Practice and Perspectives, 18-19 April.
- [30] Duct leakage repeatability testing. Walker, Iain and Sherman, Max. Lawrence Berkeley National Lab, 2014.
- [31] ASTM E1554. ASTM E1554 / E1554M-13, Standard Test Methods for Determining Air Leakage of Air Distribution Systems by Fan Pressurization. Washington DC: ASTM International, 2018.
- [32] RESNET 380. ANSI/RESNET/ICC 380. Standard for Testing Airtightness of Building, Dwelling Unit, and Sleeping Unit Enclosures; Airtightness of Heating and Cooling Air Distribution Systems; and Airflow of Mechanical Ventilation Systems. ICC & RESNET, 2019.
- [33] ANSI/ASHRAE Standard 152. ANSI/ASHRAE Standard 152. Method of Test for Determining the Design and Seasonal Efficiencies of Residential Thermal Distribution Systems. Atlanta, GA: ASHRAE, 2014.
- [34] SMACNA. HVAC AIR DUCT LEAKAGE TEST MANUAL. Chantilly: Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association Inc. , 1985.
- [35] Duct systems in large commercial buildings: physical characterization, air leakage, and heat conduction gains. Fisk, William J. , et al. 2000, Energy and Buildings, Vol. 32, pp. 109–119.
- [36] Improving Building Envelope and Duct Airtightness of US Dwellings - the Current State of Energy Retrofits. Chan, Wanyu R and Sherman, Max H. Washington: AIVC, 2013. Proceedings of the Workshop on Building and Ductwork Airtightness Design, Implementation, Control and Durability: Feedback from Practice and Perspectives, 18-19 April.
- [37] Duct Leakage Repeatability Testing. Walker, I. S., Sherman, M. H. and Francisco, P. F. Clearwater Beach: ASHRAE/DOE/BTECC, 2016. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII.
- [38] About 1,000 ductwork airtightness measurements performed in new French buildings: database creation and first analyses. Bailly Mélois, Adeline and Moujalled, Bassam. Nottingham, UK: AIVC, 2017. Proceedings of the 38th AIVC-6th TightVent-4th venticool Conference, 13-14 September. pp. 310-318.
- [39] Source book for efficient air duct systems in Europe. Malmstrom, T, et al. AIRWAYS project, 2002.
- [40] Airtight ductwork - The Scandinavian success story. Schild, Peter G. and Railio, Jorma. REHVA. [Online] 2011. <https://www.rehva.eu/publications-and-resources/rehva-journal/2011/022011/airtight-ductwork-the-scandinavian-success-story.html>
- [41] CEN. European Standard EN 12237:2003. Ventilation for buildings - Ductwork - Strength and leakage of circular sheet metal ducts. CEN, 2003
- [42] EN 1507:2006 Ventilation for buildings -Sheet metal air ducts with rectangular section Requirements for strength and leakage. CEN, 2006.

[43] Sealing ducts in large commercial buildings with aerosolized sealant particles. Modera, M, et al. 2002, Energy and Buildings 34, pp. 705–714.

[44] Ventilation Ductwork Systems Certification for a Better Air Tightness. Briffaud, Marie-Clémence. Juan-Les-Pins, France: AIVC, 2018. Proceedings of the 39th AIVC-7th Tight-Vent-5th venticool Conference, 18-19 September. pp. 230-236.

[45] Duct Tape Durability Testing. Sherman, M.H and Walker, I.S. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.



Das Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC) wurde von der Internationalen Energieagentur ins Leben gerufen und wird von den folgenden Ländern finanziert: Australien, Belgien, China, Dänemark, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Japan, Neuseeland, Niederlande, Norwegen, Republik Korea, Schweden, Spanien, Vereinigtes Königreich und Vereinigte Staaten von Amerika.

Das Air Infiltration and Ventilation Centre bietet technische Unterstützung bei der Erforschung und Anwendung von Luftinfiltration und Lüftung. Ziel ist es, das Verständnis für das komplexe Verhalten der Luftströmung in Gebäuden zu fördern und die effektive Anwendung der damit verbundenen Energiesparmaßnahmen bei der Planung von Neubauten und der Verbesserung des Gebäudebestands voranzutreiben.