

Diploma Thesis

Determination of the thermally induced air volume flow in the rear ventilation plane of flat pitched roofs

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Bestimmung des thermisch induzierten Luftvolumenstroms in der Hinterlüftungsebene von flachgeneigten Dächern

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs / Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

DI (FH) Björn Knust

Matr.Nr.: 0628028

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Thomas Bednar**

Institut für Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Bauphysik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E207-02, A-1040 Wien

Wien, im April 2019

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
Abstract	8
1 Einleitung.....	9
2 Das Flachdach.....	10
2.1 Unterteilung von Flachdächern in belüftete und nicht belüftete Konstruktionsarten.....	10
2.2 Anforderungen an das belüftete Flachdach.....	12
3 Berechnung des Massenstroms	13
3.1 Laminare und turbulente Strömungen.....	13
3.2 Berechnung des Reibungsbeiwertes	16
3.3 Berechnung der Belüftungsgeschwindigkeit nach Liersch	20
3.4 Berechnung des Volumenstroms.....	21
3.5 Berechnung des Belüftungsquerschnittes:	21
3.6 Berechnung des Massestroms	22
4 Allgemeines zum Versuchsaufbau.....	23
4.1 Definition der Varianten.....	23
4.1.1 Dachneigung.....	24
4.1.2 Höhe des Belüftungsquerschnittes	24
4.1.3 Art und Größe der Belüftungsöffnung	25
4.1.4 Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur.....	26
4.2 Variantenkenennung	26
4.3 Konstruktionszeichnungen	27
4.3.1 Versuchsaufbau Länge 10 m.....	27
4.3.2 Versuchsaufbau 5 m	27
4.3.3 Attika.....	28
5 Messungen	29
5.1 Lage der Messpunkte.....	29
5.2 Schema der Messtechnik	31
5.3 Ablauf der Messungen	32
6 Auswertung der Messergebnisse.....	33
6.1 Vorgehensweise bei der Auswertung.....	33
6.2 Mögliche Ungenauigkeiten durch die Auswertung.....	34

7	Messergebnisse	36
7.1	Lüftungsöffnung 100%	37
7.1.1	Belüftungsquerschnitthöhe von 5 cm	37
7.1.2	Belüftungsquerschnitt von 8 cm.....	38
7.1.3	Belüftungsquerschnitt 10cm	39
7.2	Lüftungsöffnung 75%	40
7.2.1	Belüftungsquerschnitt 5 cm	40
7.2.2	Belüftungsquerschnitt 8 cm	41
7.2.3	Belüftungsquerschnitt 10 cm	42
7.3	Lüftungsöffnung 50%	43
7.3.1	Belüftungsquerschnitt 5 cm	43
7.3.2	Belüftungsquerschnitt 8 cm	44
7.3.3	Belüftungsquerschnitt 10 cm	45
7.4	Lüftungsöffnung 69% mit Lüftungsgitter.....	46
7.4.1	Belüftungsquerschnitt 5 cm	46
7.4.2	Belüftungsquerschnitt 8 cm	47
7.4.3	Belüftungsquerschnitt 10 cm	48
7.5	Lüftungsöffnung 100% mit Attika	49
7.5.1	Belüftungsquerschnitt 5 cm	49
7.5.2	Belüftungsquerschnitt 8 cm	50
7.5.3	Belüftungsquerschnitt 10 cm	51
7.6	Lüftungsöffnung 50% mit Attika	51
7.6.1	Belüftungsquerschnitt 5 cm	52
7.6.2	Belüftungsquerschnitt 8 cm	52
7.6.3	Belüftungsquerschnitt 10 cm	52
8	Erkenntnisse und Ausblick	53
	Normen und Richtlinien.....	54
	Literaturverzeichnis.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Aufbau eines nicht belüfteten Flachdaches.....	11
Abb. 2.2:	Aufbau eines belüfteten Flachdaches	11
Abb. 3.1:	Zeitgemittelte Geschwindigkeitsprofile für die laminare und die turbulente Rohrströmung, normiert auf den räumlichen Mittelwert	14
Abb. 3.2:	Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung.....	14
Abb. 3.3:	schematische Darstellung der Belüftungsöffnung.....	18
Abb. 3.4:	schematische Darstellung der Entlüftungsöffnung.....	18
Abb. 3.5:	schematische Darstellung der Umlenkung	19
Abb. 4.1:	Darstellung der verschiedenen Komponenten.....	23
Abb. 4.2:	Dachneigung 3°, Länge des Versuchsaufbaus 10 m	24
Abb. 4.3:	Höhen der Belüftungsquerschnitte	24
Abb. 4.4:	Belüftungsöffnung 100, 75, 50 und 69%	25
Abb. 4.5:	Belüftungsöffnung mit Attika 100 und 50 %.....	25
Abb. 4.6:	Ermittlung der Temperaturschritte.....	26
Abb. 4.7:	Variantenkennung	26
Abb. 4.8:	Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 10 m Höhe 10 cm.....	27
Abb. 4.9:	Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 10 m Höhe 8 cm.....	27
Abb. 4.10:	Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 10 m Höhe 5 cm.....	27
Abb. 4.11:	Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 5 m Höhe 10 cm.....	27
Abb. 4.12:	Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 5 m Höhe 8 cm.....	28
Abb. 4.13:	Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 5 m Höhe 5 cm.....	28
Abb. 4.14:	Attika Höhe 10 cm	28
Abb. 4.15:	Attika Höhe 8 cm	28
Abb. 4.16:	Attika Höhe 5 cm	28
Abb. 5.1:	Lage der Sensoren im 3D Model, Versuchsaufbau 10 m.....	29
Abb. 5.2:	Lage der Messpunkte, Versuchsaufbau 10 m	30
Abb. 5.3:	Lage der Sensoren im 3D Model Versuchsaufbau 5 m.....	30
Abb. 5.4:	Lage der Messpunkte, Versuchsaufbau 5 m	30
Abb. 5.5:	schematische Darstellung der Messtechnik	31
Abb. 5.6:	Zufuhr des Ethanols mittels Sprühflasche	32
Abb. 6.1:	Darstellung der Funktion zur Ermittlung des Steigungspunktes	33
Abb. 6.2:	Darstellung des normierten Spannungsverlaufes mit Steigungspunkt.....	33
Abb. 6.3:	Optimierungsmöglichkeiten des Steigungspunktes	34
Abb. 6.4:	Optimaler Kurvenverlauf	34
Abb. 6.5:	ungenauer Verlauf.....	35
Abb. 7.1:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe 5 cm.....	37
Abb. 7.2:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm	38
Abb. 7.3:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm	39
Abb. 7.4:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm	40
Abb. 7.5:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm	41
Abb. 7.6:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm	42

Abb. 7.7:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm43
Abb. 7.8:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm44
Abb. 7.9:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm45
Abb. 7.10:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm46
Abb. 7.11:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm47
Abb. 7.12:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm48
Abb. 7.13:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 5 cm49
Abb. 7.14:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm50
Abb. 7.15:	Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm51

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Übersicht der Mindestneigungen von Flachdächern.....	10
Tab. 2.2:	Mindestbelüftungsquerschnitte von Flachdächern.....	12
Tab. 2.3:	Mindestkonstruktionshöhe der Konterlattung, ohne rechnerischen Nachweis nach ÖNORM B 7215.....	12
Tab. 3.1:	Absolute Rauigkeit der verwendeten Materialien.....	17
Tab. 3.2:	Koeffizienten zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte.....	19
Tab. 7.1:	In der Auswertung verwendete Formelzeichen.....	36
Tab. 7.2:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm	37
Tab. 7.3:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm	38
Tab. 7.4:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm.....	39
Tab. 7.5:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm:.....	40
Tab. 7.6:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm	41
Tab. 7.7:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm.....	42
Tab. 7.8:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm	43
Tab. 7.9:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm	44
Tab. 7.10:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm.....	45
Tab. 7.11:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm	46
Tab. 7.12:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm	47
Tab. 7.13:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm.....	48
Tab. 7.14:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm	49
Tab. 7.15:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm	50
Tab. 7.16:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm.....	51
Tab. 7.17:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm	52
Tab. 7.18:	Ergebnisse bei einer Höhe von 8 cm	52
Tab. 7.19:	Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm.....	52

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterthesis wurden Versuche durchgeführt, um den thermisch induzierten Luftvolumenstrom bei flachgeneigten Dächern in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern zu messen. Die gewonnenen Messergebnisse sollen dazu dienen, ein besseres Verständnis für die Belüftungsvorgänge in hinterlüfteten flachgeneigten Dächern zu entwickeln, und zur Validierung von Simulationsprogrammen beizutragen.

Der Versuchsaufbau setzte sich aus vier Grundparametern zusammen. Der erste Parameter war die Neigung des Flachdaches, sie variierte zwischen drei, fünf und sieben Grad. Der zweite war die Höhe des Belüftungsquerschnittes, diese betragen fünf, acht und zehn cm. Als dritter Parameter wurden die Art und die Größe der Lüftungsöffnung unterschiedlich ausgeführt. Die Größe der Lüftungsöffnung wechselte zwischen 100, 75, 69 und 50%. Die Art der Lüftungsöffnung wurde als rechtwinkliger Abschluss oder als Attika ausgeführt. Das Besondere bei der Attika war der abgewinkelte Verlauf der Belüftungsschicht. Der vierte Parameter war die Temperaturdifferenz zu Umgebungstemperatur. Die Temperaturdifferenz wurde mittels Heizmatten erzeugt, die Messungen erfolgten bei Temperaturdifferenzen von vier, neun, 16, 25 und 36 Grad Celsius.

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit wurden im Belüftungsquerschnitt in definierten Abständen Gassensoren angebracht. Anhand der Reaktion der Gassensoren auf eine an der Belüftungsöffnung eingestäubte Ethanolwolke konnte die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Die ermittelte Strömungsgeschwindigkeit wurde mit einem Berechnungsansatz, der von Liersch [L.3] für Steildächer entwickelt wurde, verglichen. In die Berechnung nach Liersch wurden die gleichen Parameter wie bei den Messungen eingesetzt. In den meisten Bereichen stimmen die berechneten und die gemessenen Werte überein. In einigen Bereichen jedoch beträgt die Abweichung bis zu 30%.

Abstract

In this Masterthesis experiments were carried out to measure the thermal induced air volume flow on flat roofs depending on various parameters.

The measurement results obtained will serve to develop a better understanding of the ventilation processes in rear-ventilated flat roofs and contribute to the validation of simulation programs.

The experimental setup consisted of four basic parameters. The first parameter was the inclination of the flat roof, which varied between three, five and seven degrees. The second was the height of the ventilation cross section, which was five, eight and ten cm.

The third parameter was the type and size of the ventilation opening. The size of the ventilation opening varied between 100%, 75%, 69% and 50%. The type of ventilation opening was rectangular or attic. The special feature of the parapet was the unfolded course of the ventilation layer. The fourth parameter was the temperature difference to the ambient temperature. The temperature difference was generated by means of heating mats, the measurements were made at temperature differences of 4, 9, 16, 25 and 36 degrees Celsius.

Gas sensors were installed at defined intervals in the ventilation cross-section to measure the flow velocity. The reaction of the gas sensors to an ethanol cloud dusted into the ventilation opening made it possible to determine the flow velocity.

The determined flow velocity was compared with a calculation approach developed by Liersch [L.3] for pitched roofs. The same parameters as for the measurements were used in the calculation according to Liersch. In most areas the calculated and the measured values agree. In some areas the deviation is up to 30%.

1 Einleitung

Die Anforderungen an das Dach als oberer Gebäudeabschluss haben sich im Laufe der Jahre durch die Art der Nutzung des Dachraumes geändert. Der Dachraum wurde zunächst nur als Lagerfläche genutzt. Die hieraus resultierende Anforderung war es, den Dachraum vor Regen und Schnee zu schützen. Ab der Mitte des 20. Jahrhunderts begann die Nutzung des Dachraumes als Wohnraum, wodurch sich die Anforderungen an das Dach erhöhten. Zur ursprünglichen Anforderung, den Dachraum trocken zu halten, kamen weitere Anforderungen hinzu wie z.B. der Schutz vor Wind, Kälte und Hitze. Aus diesem Grund wurde vereinfacht dargestellt unterhalb der Dachdeckung, zwischen den Sparren, eine Dämmung angebracht. Die Dicke der Dämmschicht und die Anforderungen an die Winddichtheit wurden durch verschiedenen Gesetze und Normen stetig erhöht. Anfangs wurde fachlich und umgangssprachlich zwischen einem Kaltdach- und einem Warmdachaufbau unterschieden. Der Unterschied ergab sich durch die Belüftung der Dämmung auf der Außenseite beim Kaltdach. Die aus heutiger Sicht korrekte Bezeichnung für die Begriffe Kaltdach und Warmdach lautet belüftete oder unbelüftete Dachkonstruktion.

In seinem Buch „*Bauphysik, Geschichte und Geschichten*“ [L.1] betrachtet Helmut Künzel belüftete oder hinterlüftete Konstruktionen wie flachgeneigte Dächer, Steildächer oder Fassaden als Notbehelf, welche Konstruktions-, Material-, Verarbeitungs- und Planungsfehler verschleiern und ausgleichen sollen. Eine gute Konstruktion zeichnet sich nach Künzel dadurch aus, dass sie ohne Belüftung auskommt.

In dem Buch „Dachdeckung und Dachbelüftung“ [L.2] erläutert Künzel, dass unter den heutigen Gegebenheiten die nicht belüfteten Dächer mit kleinformatigen Deckungen die richtige und zweckmäßige Ausführungsart sei. Der Einfluss der Unterlüftung der Dachdeckung (obere Belüftungsschicht) auf die Feuchteverhältnisse im Dach sei zwar klein aber aus praktischen Erwägungen zweckmäßig, um einen Stau von über Undichtheiten eingedrungener Regenfeuchte zu vermeiden.

Die vorliegende Masterthesis entstand im Rahmen eines Forschungsprojektes der Holzforschung Austria. Das Ziel des Forschungsprojektes war es, die bauphysikalischen Vorgänge in flachgeneigten Dächern, als Holzkonstruktion ausgeführt, näher zu betrachten. Die erhaltenen Daten sollten als Grundlage für die Weiterentwicklung und Validierung der eingesetzten Simulationsmodelle verwenden werden.

In dieser Masterthesis wird die obere Belüftungsschicht bei Flachdächern näher betrachtet. Es wird der Frage nachgegangen, welche Massenströme sich bei flachgeneigten Dächern unter verschiedenen Konstruktionsbedingungen und Temperaturen (Sonneneinstrahlung) einstellen. Die dabei gewonnenen Messergebnisse werden mit einem von Liersch [L.3] entwickelten Rechenmodell verglichen und sollen dazu beitragen, die Belüftungsvorgänge in flachgeneigten Dächern in der oberen Belüftungsschicht besser nachvollziehen zu können.

2 Das Flachdach

Geschichtlich gesehen wurden Flachdächer in einigen Regionen der Erde seit alters her eingesetzt, wenn es die klimatischen Randbedingungen zuließen. Zum einen war das Flachdach der obere Gebäudeabschluss, zum anderen eine Erweiterung des nutzbaren Lebensbereiches, um zum Beispiel Obst zu trocknen.

In Mittel- und Nordeuropa beginnt das Flachdach erst in der Renaissance architektonische Bedeutung zu erhalten, jedoch meist als gering geneigtes Ziegel- oder Natursteindach.

Das Flachdach mit einer Tragkonstruktion aus Holz findet meist im Wohnbau und bei kleineren Industriebauten Anwendung.

Die Zuordnung einer Dachkonstruktion als Flachdach, flach geneigtes Dach und Steildach erfolgt über die Dachneigung. Die Tab. 2.1 zeigt die Mindestneigung von Flachdächern aus Sicht von verschiedenen Normen und Richtlinien. Dachneigungen unterhalb dieser Grenzen werden meist als Sonderkonstruktionen bezeichnet und unterliegen Einzelfallprüfungen, da die Entwässerung der Dachfläche durch das Gefälle nicht als gegeben betrachtet werden kann.

Tab. 2.1: Übersicht der Mindestneigungen von Flachdächern

Normen oder Richtlinie	Deutschland	Österreich	Schweiz
ÖNORM B 2220	-	1°	-
Flachdachrichtlinien	2°	-	-
SIA 271	-	-	0,86° (1,5%)

2.1 Unterteilung von Flachdächern in belüftete und nicht belüftete Konstruktionsarten

Bei Flachdächern wird wie auch bei anderen Konstruktionen im Dach- und Fassadenbereich zwischen einer belüfteten und nicht belüfteten Konstruktionsweise unterschieden.

In der DIN 4108-3 [N.6] wird eine belüftete Luftschicht wie folgt definiert:

„Luftschicht in einer Konstruktion, die zum Zweck der konvektiven Feuchteabfuhr mit der Umgebungsluft in Verbindung steht

ANMERKUNG Die belüftete Luftschicht wird in der Praxis auch als Hinterlüftung, oder Belüftungsschicht bezeichnet.“

Die nicht belüftete Luftschicht wird dem entsprechend definiert als:

„Luftschicht in einer Konstruktion ohne oder mit einer nur dem Druckausgleich dienenden Verbindung zur Umgebungsluft“

In der Abb. 2.1 ist der Aufbau eines nicht belüfteten Flachdaches dargestellt. Bei dieser Konstruktionsweise ist besonders darauf zu achten, dass nur technisch getrocknete Hölzer verwendet werden, um möglichst wenig Feuchtigkeit in die Konstruktion einzubringen. Zusätzlich ist die Ausbildung der Luftdichtheitsebenen wichtig, da über die Dachabdichtung in der Nutzungsphase kein Feuchtetransport möglich ist.

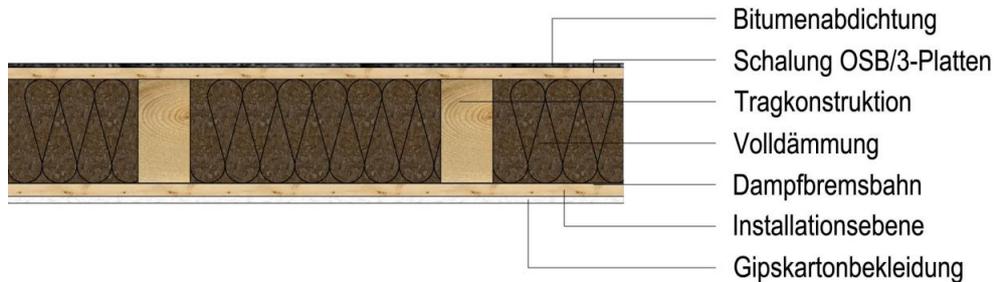


Abb. 2.1: Aufbau eines nicht belüfteten Flachdaches

Bei den belüfteten Flachdächern Abb. 2.2 besteht die Schwierigkeit darin, die Lüftungsebene so auszubilden, dass eine ausreichende Belüftung gewährleistet ist. In den verschiedenen Normen und Richtlinien sind zu diesem Problem verschiedene Aufbauhöhen und Konstruktionsmöglichkeiten dargestellt. Diese werden im nächsten Abschnitt näher betrachtet.

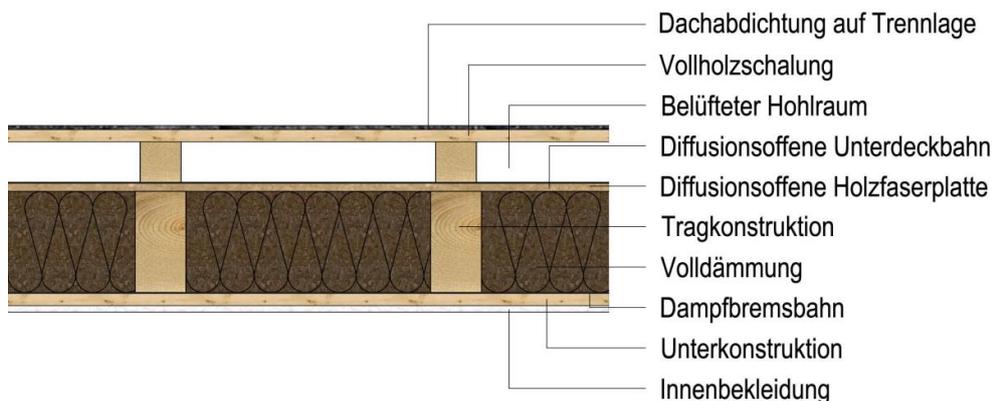


Abb. 2.2: Aufbau eines belüfteten Flachdaches

2.2 Anforderungen an das belüftete Flachdach

In der Tab. 2.2 sind die Anforderungen an den Belüftungsraum bei Flachdächern gemäß den Normen der Schweiz, Österreichs und Deutschlands zusammengetragen. Die Anforderungen an die Höhe des Belüftungsraumes sind in der SIA 271 [N.3] und in der ÖNORM B 7220 [N.4] identisch. Die übrigen Parameter, die zu berücksichtigen sind, weisen jedoch Unterschiede auf. Die ÖNORM B 7215 [N.5] stellt differenzierte Anforderung in Abhängigkeit der Dachneigung und der Sparrenlänge. Die Anforderungen an flachgeneigte Dächer sind in der Tab. 2.3 angegeben.

In der DIN 4108-3 [N.6] wird unterschieden zwischen einer Dachneigung von über und unter fünf Grad. Bei einer Dachneigung von unter fünf Grad wird eine Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke innen von ≥ 100 m unterhalb der Wärmedämmschicht gefordert, um die Konstruktion ohne rechnerischen Nachweis herstellen zu können. Jedoch wird in den Regeln für Dächer mit Abdichtungen [N.2] darauf hingewiesen, dass eine belüftete Konstruktion unter fünf Grad wegen dem möglichen Anfall von Sekundär-Tauwasser nicht zu empfehlen, sondern eine nicht belüftete Konstruktion vorzuziehen ist. Bei einer Flachdachneigung von über fünf Grad wird die benötigte Höhe des Belüftungsquerschnittes mit 20 mm angegeben.

Tab. 2.2: Mindestbelüftungsquerschnitte von Flachdächern

	Normen			
	SIA 271	ÖNORM B 7220	DIN 4108-3 Dachneigung	
			< 5°	> 5°
Querschnitt des Belüftungsraumes	1/50 der Dachfläche	1/150 der Dachgrundrissfläche	k. A.	k. A.
Höhe des Belüftungsraumes	mindestens 100 mm	mindestens 100 mm	k. A.	mindestens 20 mm
Lüftungsöffnung	mindestens 50% des Belüftungsquerschnittes	Gesamt (oben und unten mind. 600 cm ² je m	k. A.	mindestens 200 cm ² /m
Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke innen	k. A.	≥ 10 m	≥ 100 m	k. A.

Tab. 2.3: Mindestkonstruktionshöhe der Konterlattung, ohne rechnerischen Nachweis nach ÖNORM B 7215

Sparrenlänge in m	Dachneigung bis 10 Grad		
	Mindestkonstruktionshöhe	Zuluft	Abluft
bis 5	5 cm	100 cm ² je m	120 cm ²
über 5 bis 10	10 cm	200 cm ² je m	240 cm ²
über 10 bis 15	10 cm	300 cm ² je m	360 cm ²
über 15 bis 20	10 cm	400 cm ² je m	480 cm ²
über 20 bis 25	10 cm	500 cm ² je m	600 cm ²

3 Berechnung des Massenstroms

In der Buchreihe „Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen“ [L.3] behandelt Prof. Dr.-Ing. Liersch die bauphysikalischen Grundlagen dieser Bauweisen. Im Band drei „Dächer“ [L.4] zeigt er auf, wie der Belüftungsstrom im belüfteten Bereich von Dächern berechnet werden kann.

Im Nachfolgenden wird der Berechnungsansatz nach Liersch vorgestellt und die eingehenden Parameter näher betrachtet, sowie an einigen Stellen durch andere Formeln ergänzt.

Mit dem Berechnungsansatz nach Liersch kann der Volumenstrom ermittelt werden. In Kapitel 3.6. wird die Umrechnung des Volumenstroms in den Massestrom erklärt, da der Massenstrom für feuchtetechnische Betrachtungen die aktuellere Größe ist.

Die Berechnungsergebnisse nach Liersch werden bei der Auswertung der Versuchsergebnisse als Vergleichswert herangezogen, um den Ansatz von Liersch zu überprüfen und eventuelle Differenzen zwischen Theorie und Versuch erkennen und beurteilen zu können.

3.1 Laminare und turbulente Strömungen

Bei der Rohrströmung ist zwischen laminarer und turbulenter Strömung zu unterscheiden.

Laminar bedeutet, dass die Luft in Schichten (Stromfäden) strömt.

Sie lässt sich mit dem Hagen - Poiseuille - Gesetz berechnen (3.1).

$$v(y) = \frac{(p_1 - p_2)}{4\eta L} (r^2 - y^2) \quad \text{in } m^3/s \quad (3.1)$$

mit

v	Geschwindigkeit an der Stelle y in m/s
y	Wandabstand in m
r	Rohrradius in m
$p_{1,2}$	Druck am Rohranfang/ -ende in N/m ²
η	dynamische Viskosität in Ns/m ²
L	Rohrlänge in m

Das Geschwindigkeitsprofil, das sich bei Anwendung dieser Formel ergibt, ist parabolisch (3.1).

Die höchste Strömungsgeschwindigkeit stellt sich in der Rohrachse ein.

Bei turbulenten Strömungen verlaufen die Stromfäden nicht mehr nur parallel zur Rohrachse, sondern es kommt zu Verwirbelungen und Querbewegung der Stromfäden. Diese Querbewegungen führen zu einer geringeren maximalen Strömungsgeschwindigkeit und zu einem nicht mehr parabolischen Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit. In der Formel (3.2) nach Eck [L.5] wird dieser Effekt durch das 1/7 Potenzgesetz berücksichtigt.

$$v(y) = v_{max} \left(\frac{y}{r}\right)^{\frac{1}{7}} \quad \text{in } m/s \quad (3.2)$$

mit

v	Geschwindigkeit an der Stelle y in m/s
y	Wandabstand in m
v_{max}	maximale Geschwindigkeit in m/s
$\frac{1}{7}$	Potenzgesetz
r	Rohrradius in m

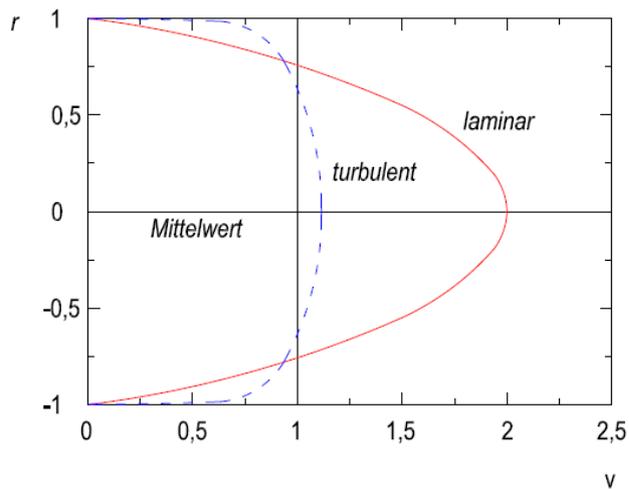


Abb. 3.1: Zeitgemittelte Geschwindigkeitsprofile für die laminare und die turbulente Rohrströmung, normiert auf den räumlichen Mittelwert

Die Abb. 3.1 zeigt für den turbulenten Strömungsverlauf ein wesentlich flacheres Profil als für den laminaren. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass der Verlauf in Wandnähe nicht die viskose Unterschicht berücksichtigt, und der Strömungsverlauf zur Rohrachse hin einen zu spitzen Verlauf aufzeigt.

Die Unterscheidung, ob eine laminare oder turbulente Strömung vorliegt, wird durch die Reynolds-Zahl (3.3) ermittelt.

$$Re_e = v_l \cdot \frac{d_g}{\nu} \quad \text{dimensionslos} \quad (3.3)$$

mit

- Re_e Reynolds-Zahl dimensionslos
- v_l Belüftungsstromgeschwindigkeit in m/s
- d_g hydraulisch gleichwertige Durchmesser in m
- ν kinematische Zähigkeit in m^2/s

Die Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften. In Versuchen wurde ermittelt, dass die kritische Reynolds Zahl bei 2300 für technische Anwendung liegt. Das bedeutet, dass wie in Abb. 3.2 veranschaulicht, ab einer Reynolds-Zahl von 2300 die laminare Strömung beginnt in eine turbulente umzuschlagen. Ab einer bestimmten Reynolds-Zahl liegt dann eine vollständig turbulente Strömung vor.

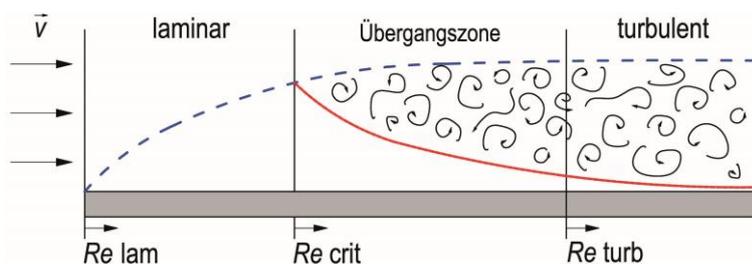


Abb. 3.2: Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung

Die Belüftungsstromgeschwindigkeit fließt als Faktor in die Gleichung von Reynolds mit ein. Die Ermittlung dieser wird im Kapitel 3.3 beschrieben.

Der hydraulisch gleichwertige Durchmesser wird wie in Formel (3.4) für Belüftungsräume mit ebenen Begrenzungsflächen berechnet.

$$d_g = \frac{2a}{\frac{a}{B} + 1} \quad \text{in m} \quad (3.4)$$

mit

d_g hydraulisch gleichwertige Durchmesser in m
 a Abstand zwischen Dachschalung und Innenschale in m
 B Abstand der seitlichen Begrenzungen in m

Die kinematische Zähigkeit (Viskosität) wird nach der Formel (3.5) unter Berücksichtigung der dynamischen Zähigkeit und der Dichte der Luft berechnet.

$$\vartheta_l = \frac{\eta_l}{\rho_l} \quad \text{in m}^2/\text{s} \quad (3.5)$$

mit

ϑ_l kinematische Zähigkeit der Luft in m²/s
 η_l dynamische Zähigkeit der Luft in kg/m s
 ρ_l Dichte der Luft in kg/m³

Die Berechnung der dynamischen Zähigkeit (3.6) ist genauso abhängig von der Temperatur, wie die Berechnung der Dichte der Luft (3.7).

$$\eta_l = \eta_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{ms}} \quad (3.6)$$

mit

η_l dynamische Zähigkeit der Luft in kg/ms
 η_0 dynamische Zähigkeit bei 0°C
 T absolute Temperatur in K
 T_0 absolute Temperatur bei 0°C in K
 n Exponent n für die Luft

Bei der Berechnung der dynamischen Zähigkeit η_0 wird mit $1,71 \cdot 10^{-5}$ kg/m s angenommen.

Die Dichte der Luft bei 0°C wird mit $\rho_0 = 1,292$ kg/m³ angenommen. Die Formel (3.7) zeigt, wie die Dichte der Luft berechnet werden kann.

$$\rho_l = \rho_0 \frac{T_0}{T} \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.7)$$

mit

ρ_l Dichte der Luft in kg/m³
 ρ_0 Dichte der Luft bei 0°C in kg/m³
 T_0 absolute Temperatur bei 0°C in K
 T absolute Temperatur in K

Die Formel (3.8) zeigt wie die Dichte der Luft bei 0°C ermittelt wird.

$$\rho_0 = \frac{p}{R_s \cdot T_0} \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.8)$$

mit

ρ_0	Dichte der Luft bei 0°C in kg/m ³
p	Luftdruck in N/m ²
R_s	spezifische Gaskonstante trockener Luft in J/kg K
T_0	absolute Temperatur bei 0°C in K

3.2 Berechnung des Reibungsbeiwertes

Im Nachfolgenden werden die verschiedenen Reibungswiderstände, die einen Einfluss auf die Belüftungsstromgeschwindigkeit haben, näher betrachtet. Die Reibungswiderstände, die in die Berechnung eingehen sind die Wandreibung und die Einzelwiderstände infolge der Querschnittsänderungen.

Der Druckverlust durch Wandreibung lässt sich allgemein mit nachfolgender Formel (3.9) berechnen:

$$\Delta_{pR} = \zeta_R \frac{\rho_l}{2} v_l^2 \frac{l}{d_g} \quad \text{in } \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (3.9)$$

mit

Δ_{pR}	Druckverlust in N/m ²
ζ_R	Wandreibungsbeiwert dimensionslos
ρ_l	Dichte der Luft in kg/m ³
v_l	Belüftungsstromgeschwindigkeit in m/s
l	Länge des Belüftungsquerschnittes in m
d_g	hydraulisch gleichwertige Durchmesser in m

Der Wandreibungsbeiwert kann nach [L.5] für laminare Strömungen $Re < 2300$ vereinfacht mit der Formel (3.10) berechnet werden.

$$\zeta_R = \chi \frac{64}{Re} \quad \text{dimensionslos} \quad (3.10)$$

mit

ζ_R	Wandreibungsbeiwert dimensionslos
χ	Formbeiwert
Re	Reynolds-Zahl dimensionsfrei

Der Formbeiwert für Parallelwände wird mit $\chi = 1,5$ angenommen.

Ist die Strömung turbulent, wird die Berechnung des Wandreibungsbeiwertes schon schwieriger, da sich der Zusammenhang zwischen der Reynolds-Zahl und dem Wandreibungsbeiwert nur Logarithmisch nachbilden lässt und die Rauigkeit der verwendeten Materialien mit einfließen.

Liersch [L.4] benutzt folgende Formel (3.11) zur genauen Berechnung des Wandreibungsbeiwertes für natürlich raue Rohre:

$$\frac{1}{\sqrt{\zeta_R}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\zeta_R}} + \frac{k_R}{3,715 d_g} \right) \quad \text{dimensionslos} \quad (3.11)$$

mit

ζ_R Wandreibungsbeiwert dimensionslos
 Re Reynolds-Zahl dimensionslos
 k_R absolute Rauigkeit in m
 d_g hydraulisch gleichwertige Durchmesser in m

In der Auswertung wird die Näherungsformel (3.12) zur Bestimmung der Wandreibung nach [L.5] zur Anwendung kommen. Diese Formel beschreibt den Wandreibungsbeiwert ausreichend genau, ist aber leichter zu handhaben. Die angegebenen Formeln zur Bestimmung des Wandreibungsbeiwertes sind iterativ zu lösen.

In der Tab. 3.1 sind die absoluten Rauigkeiten für die im späteren Versuch verwendeten Materialien angegeben.

$$\zeta_R = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{15}{Re} + \frac{k_R}{3,75 d_g} \right) \right]^2} \quad \text{dimensionslos} \quad (3.12)$$

mit

ζ_R Wandreibungsbeiwert dimensionslos
 Re Reynolds-Zahl dimensionslos
 k_R absolute Rauigkeit in m
 d_g hydraulisch gleichwertige Durchmesser in m

Tab. 3.1: Absolute Rauigkeit der verwendeten Materialien

Material	Zustand	absolute Rauigkeit k_R in mm
PE-Folie	neu	0,0015-0,01
Holz	gehobelt	0,2
OSB		0,4

Die Berücksichtigung der konstruktiven Querschnittsveränderung an den Einlass- und Auslassöffnungen erfolgt bei Liersch [L.4] angenähert an eine Parabel 2. Ordnung. Die Formel (3.13) beschreibt die Berechnung für den Reibungsbeiwert der Einlassöffnung.

$$\zeta_E = A \left(\frac{A_l}{A_E} \right)^{-2} + B \left(\frac{A_l}{A_E} \right)^{-1} + C \quad \text{dimensionslos} \quad (3.13)$$

mit

- ζ_E Reibungsbeiwert der Einlassöffnung dimensionslos
 A, B, C Koeffizienten siehe Tab. 3.2 dimensionslos
 A_l Belüftungsquerschnitt in cm^2/m
 A_E Belüftungsöffnungsquerschnitt in cm^2/m

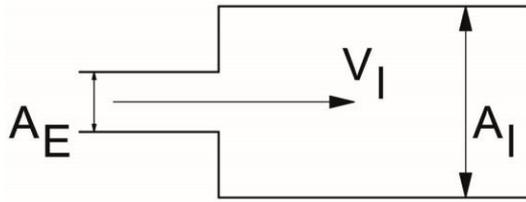


Abb. 3.3: schematische Darstellung der Belüftungsöffnung

Für den Reibungsbeiwert der Auslassöffnung wird die Formel (3.14) verwendet. Im Vergleich zur Formel (3.13) verändern sich nur die Indices.

$$\zeta_A = A \left(\frac{A_l}{A_A} \right)^{-2} + B \left(\frac{A_l}{A_A} \right)^{-1} + C \quad \text{dimensionslos} \quad (3.14)$$

mit

- ζ_A Reibungsbeiwert der Auslassöffnung dimensionslos
 A, B, C Koeffizienten siehe Tab. 3.2 dimensionslos
 A_l Belüftungsquerschnitt in cm^2/m
 A_A Entlüftungsöffnungsquerschnitt in cm^2/m

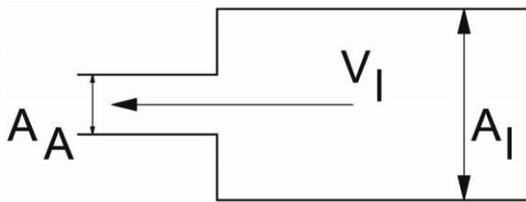


Abb. 3.4: schematische Darstellung der Entlüftungsöffnung

Der Belüftungsquerschnitt kann nach der folgenden Gleichung (3.15) berechnet werden:

$$A_l = aB \quad \text{in } \text{cm}^2/\text{m} \quad (3.15)$$

mit

- A_l Belüftungsquerschnitt in cm^2/m
 a Abstand zwischen der Dachschalung und der Innenbeplankung in cm
 B Abstand der seitlichen Begrenzungen in cm

Die Koeffizienten und die Gleichungen zur Berechnung des Reibungsbeiwertes für die Ein- und Auslassöffnung leitete Liersch mit Hilfe von Werten aus dem Eternit Handbuch [L.6] her

Tab. 3.2: Koeffizienten zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte

Widerstand	A	B	C
Lufteinlass	1,320	-3,437	2,516
Luftauslass	-1,092	-0,453	2,546

Der letzte zu betrachtende Reibungsbeiwert ist derjenige, der durch eine Umlenkung des Luftstromes entsteht. Er wird wie in der Formel (3.16) angegeben berechnet

$$\zeta_U = 1,2 \frac{\beta}{90} \quad (3.16)$$

mit

ζ_U Reibungsbeiwert der Umlenkung dimensionslos
 β Umlenkwinkel in Grad

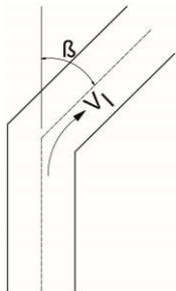


Abb. 3.5: schematische Darstellung der Umlenkung

Die Zusammenfassung erfolgt nach der Gleichung(3.17). In bestimmten Situationen können die einzelnen Widerstände auch mehrfach vorkommen. Als Beispiel sei hier ein Flachdach mit einer umlaufenden Attika erwähnt. Dort wird der Luftstrom zweimal umgelenkt, einmal im Bereich des Einlasses und einmal im Bereich des Auslasses.

$$\sum \zeta = \zeta_R \frac{l}{d_g} + \zeta_E + \zeta_A + \zeta_U \quad \text{dimensionslos} \quad (3.17)$$

mit

ζ Reibungsbeiwert dimensionslos
 ζ_R Wandreibungsbeiwert dimensionslos
 d_g hydraulisch gleichwertige Durchmesser in m
 l Länge des Belüftungquerschnittes in m
 ζ_E Reibungsbeiwert der Einlassöffnung dimensionslos
 ζ_U Reibungsbeiwert der Umlenkung dimensionslos
 ζ_A Reibungsbeiwert der Auslassöffnung dimensionslos

3.3 Berechnung der Belüftungsgeschwindigkeit nach Liersch

Zur Herleitung der Formel zur Berechnung der Belüftungsstromgeschwindigkeit fügt Liersch nun die in den vorherigen Abschnitten erläuterten Einflüsse und Zusammenhänge in die Bernoulli-Gleichung für stationäre Strömungen (3.18) ein.

$$\frac{v_l^2}{2} + \frac{p}{\rho} = C = \text{constant} \quad \text{in m/s} \quad (3.18)$$

mit

v_l	Belüftungsstromgeschwindigkeit in m/s
p	Druck in Pa
ρ	Dichte in kg/m ³
C	Bernoulli Konstante

Diese Gleichung wird nun nach p umgestellt.

$$p = \frac{\rho_l}{2} v_l^2 \quad \text{in N/m}^2 \quad (3.19)$$

Durch einfügen der Gleichung (3.20)

$$p = \Delta_{p_T} - \Delta_{p_R} \quad \text{in N/m}^2 \quad (3.20)$$

mit

p	Druck in N/m ²
Δ_{p_T}	Druckänderung infolge thermischen Auftriebs in Pa
Δ_{p_R}	Druckverlust infolge Wandreibung in Pa

ergibt sich folgende Formel (3.21)

$$\Delta_{p_T} - \Delta_{p_R} = \frac{\rho_l}{2} v_l^2 \quad \text{in N/m}^2 \quad (3.21)$$

wird die Gleichung (3.21) nach Δ_{p_T} aufgelöst und für Δ_{p_R} die Gleichung (3.17) eingesetzt, ergibt sich Formel (3.22).

$$\Delta_{p_T} = \frac{\rho_l}{2} v_l^2 (1 + \Sigma\zeta) \quad \text{in N/m}^2 \quad (3.22)$$

Durch Einsetzen von $\rho_l = \frac{T_o \rho_o}{T_l} = \frac{(273 \cdot 1,293)}{T_l} = \frac{353}{T_l}$ ergibt sich durch Umstellen folgende Formel (3.23).

$$v_l = \sqrt{\frac{\frac{2T_l}{353} \Delta_{pT}}{1 + \sum \zeta}} \quad \text{in m/s} \quad (3.23)$$

Durch Einsetzen der Formel $\Delta_{pT} = \rho g H \left(\frac{T_l - T_a}{T_a} \right)$ ergibt sich die Grundgleichung der Belüftungsstromgeschwindigkeit in Folge thermischen Auftriebs (3.24).

$$v_l = \sqrt{\frac{\frac{2gH}{T_a} (T_l - T_a)}{1 + \sum \zeta}} \quad \text{in m/s} \quad (3.24)$$

mit

v_l	Belüftungsstromgeschwindigkeit in m/s
g	Erdbeschleunigung in m/s ²
H	Höhendifferenz in m
T_a	absolute Temperatur der Außenluft in K
T_l	absolute Temperatur im Belüftungsraum in K
ζ	Reibungsbeiwert

3.4 Berechnung des Volumenstroms

Die Berechnung des Volumenstroms erfolgt nach Formel (3.25)

$$\dot{V}_l = 0,36 \cdot v_l \cdot A_l \quad \text{in m}^3/\text{h} \quad (3.25)$$

mit

\dot{V}_l	Volumenstrom in m ³ /h
0,36	Umrechnungsfaktor der Belüftungsgeschwindigkeit von m/s in m/h
v_l	Belüftungsstromgeschwindigkeit in m/s
A_l	Belüftungsquerschnitt in cm ² /m

3.5 Berechnung des Belüftungsquerschnittes:

$$A_l = a \cdot B \quad \text{in cm}^2/\text{m} \quad (3.26)$$

mit

a	Höhe der Belüftungsöffnung in cm
B	Breite der Belüftungsöffnung in cm

3.6 Berechnung des Massestroms

Die Grundformel (3.27) zur Berechnung des Massenstroms lautet:

$$\dot{m}_l = \dot{V}_l \cdot \rho_l \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (3.27)$$

mit

\dot{m}_l Massenstrom in kg/h
 \dot{V}_l Volumenstrom in m³/h
 ρ_l Dichte der Luft in kg/m³

Der Volumenstrom wurde gemessen oder berechnet, daher muss nur noch die Dichte der Luft bestimmt werden.

Zur Bestimmung der Dichte der Luft werden die Formeln (3.28) und die Formel (3.29) benötigt.

$$p_{(h)} = p_o e^{\frac{-\rho_o g h}{p_o}} \quad \text{in } \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (3.28)$$

mit

$p_{(h)}$ Druck der Luft in der Höhe h in N/m²
 p_o Druck der Luft am Erdboden in N/m²
 ρ_o Dichte der Luft bei 0°C in kg/m³
 g Erdbeschleunigung in m/s²
 h Seehöhe in m

$$\rho_o = \frac{p}{R_s T_o} \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.29)$$

mit

ρ_o Dichte der Luft bei 0°C in kg/m³
 p Luftdruck in N/m²
 R_s spezifische Gaskonstante trockener Luft in J/kg K
 T_o absolute Temperatur bei 0°C in K

Durch Einsetzen der Formel (3.28) in die Formel (3.30) ergibt sich für die Berechnung des Massenstroms folgende Gleichung:

$$\dot{m}_l = \dot{V}_l p e^{\frac{-\left(\frac{p}{R_s T_o}\right) g h}{p_o}} \quad \text{in } \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.30)$$

Bei der Berechnung werden folgende Werte angenommen:

- Dichte der Luft bei 0°C mit $\rho_o = 1,292$ in kg/m³
- Gaskonstante mit $R_s = 287,058$ in J/kg K
- Druck am Erdboden mit $p = 101325$ in N/m²
- Seehöhe mit $h = 220$ in m

4 Allgemeines zum Versuchsaufbau

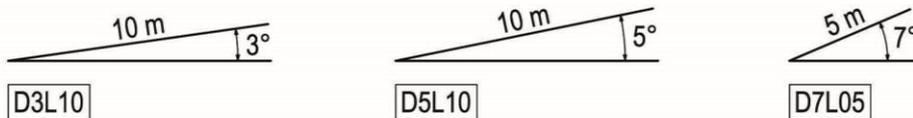
Bei der Wahl des Versuchsaufbaus und der verschiedenen Varianten wurde versucht, die gängige Praxis und die Anforderungen gemäß den Normen abzubilden, sowie die Optimierungsmöglichkeiten auszuloten.

Der Versuche zur Messung der Luftströmung bei flachgeneigten Dächern wurden in einer Prüfhalle durchgeführt. Die Prüfhalle gewährleistet einerseits eine Unabhängigkeit der Messungen in Hinblick auf äußere Witterungseinflüsse wie Wind, Regen und Sonneneinstrahlung, führt aber auch zu Einschränkungen bei der Höhe des Versuchsaufbaus.

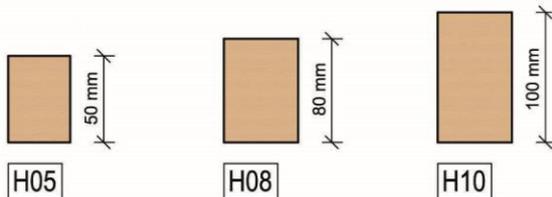
4.1 Definition der Varianten

Die Abb. 4.1 zeigt die in den Versuchen miteinander kombinierten Variationen. Es gibt vier Grundkomponenten: die Dachneigung, die Höhe des Belüftungsquerschnittes, die Art und Größe der Lüftungsöffnung und die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur.

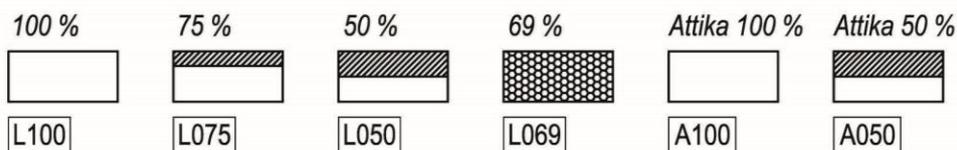
Dachneigung und Länge des Belüftungsquerschnittes, nicht maßstäblich



Höhe des Belüftungsquerschnittes, nicht maßstäblich



Art und Größe der Lüftungsöffnungen, nicht maßstäblich



Temperaturdifferenz der Heizmatten zur Umgebungstemperatur



Abb. 4.1: Darstellung der verschiedenen Komponenten

4.1.1 Dachneigung

Bei der Dachneigung wurden drei Grad als kleinste Neigung gewählt. Die normative Lage, wie in Kapitel 2 dargestellt, würde zwar eine Dachneigung bis zu einem Grad zulassen, jedoch wird für Flachdächer in Holzbauweise eine Neigung von \geq fünf Grad empfohlen [L.7].

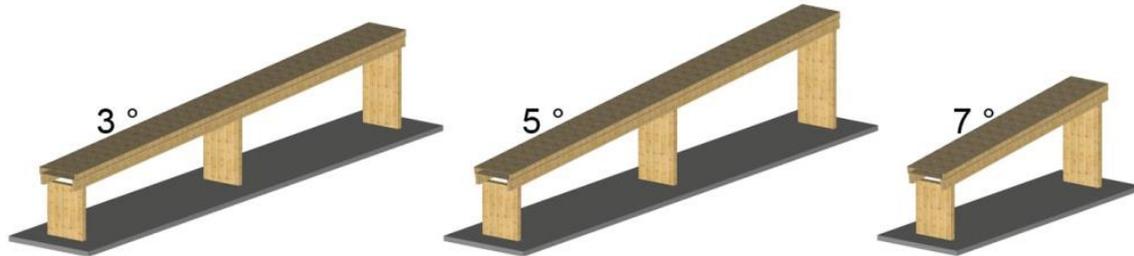


Abb. 4.2: Dachneigung 3°, Länge des Versuchsaufbaus 10 m

Des Weiteren wurden die Dachneigungen von fünf und sieben Grad gewählt. Die Dachneigung von fünf Grad beruht auf der in der DIN 4108-3 [N.6] gezogenen Grenze bezüglich der Anforderungen an die rechnerischen Nachweise.

Die Dachneigung von sieben Grad wurde gewählt, um eine dritte Messreihe zu erhalten, mit deren Hilfe die Möglichkeit besteht, weitere Dachneigungen zwischen 5 und 7 Grad zu interpolieren sowie eine höhere Basis zu erhalten um andere Dachneigungen zu extrapolieren. Aufgrund der Höhe der Prüfhalle konnte der Versuchsaufbau mit einer Dachneigung von sieben Grad nur mit einer Länge von fünf Metern ausgeführt werden.

4.1.2 Höhe des Belüftungsquerschnittes

Bei der Höhe des Belüftungsquerschnittes wurden zum einen gemäß der Angaben in der ÖNORM B 7215 [N.5] vorgegebene Querschnitte von fünf und zehn Zentimeter gewählt, zum anderen die Höhe von acht Zentimeter, um die Möglichkeit einer Optimierung zu prüfen.



Abb. 4.3: Höhen der Belüftungsquerschnitte

4.1.3 Art und Größe der Belüftungsöffnung

Die Anforderungen an die Belüftungsöffnungen (Zu- und Abluft) in den verschiedenen Normen werden in Quadratcentimeter je Meter Trauflänge angegeben. Bei den Versuchen wurde die Belüftungsöffnungsgröße in Prozent definiert, die Unterteilung erfolgte in den Schritten 100, 75 und 50%. Das Lüftungsgitter hat eine Belüftungsöffnungsgröße von 69%. Die Verschiedenen Varianten der Belüftungsöffnung sind in Abb. 4.4 dargestellt.

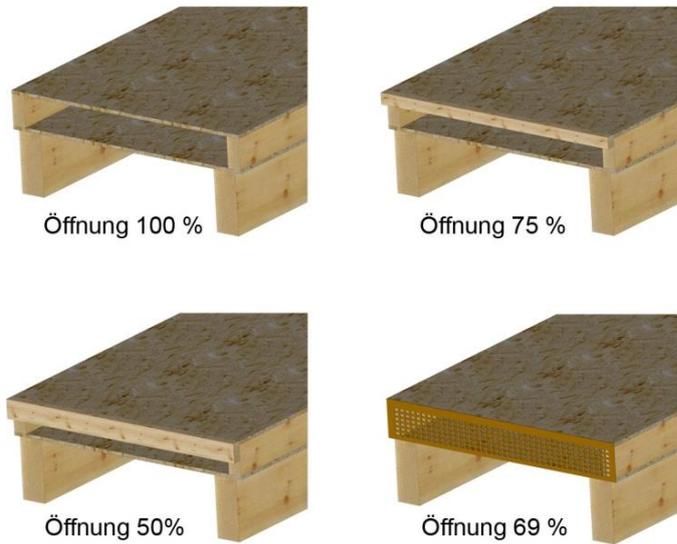


Abb. 4.4: Belüftungsöffnung 100, 75, 50 und 69%

Des Weiteren wurden Versuche mit einer Ausführung der Belüftungsöffnung als Attika ausgeführt, wie in Abb. 4.5 veranschaulicht.



Abb. 4.5: Belüftungsöffnung mit Attika 100 und 50 %

4.1.4 Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur

Bei der Temperaturdifferenz wurden die Temperaturschritte so gewählt, dass ihre logarithmische Darstellung einen lineareren Verlauf ergibt.

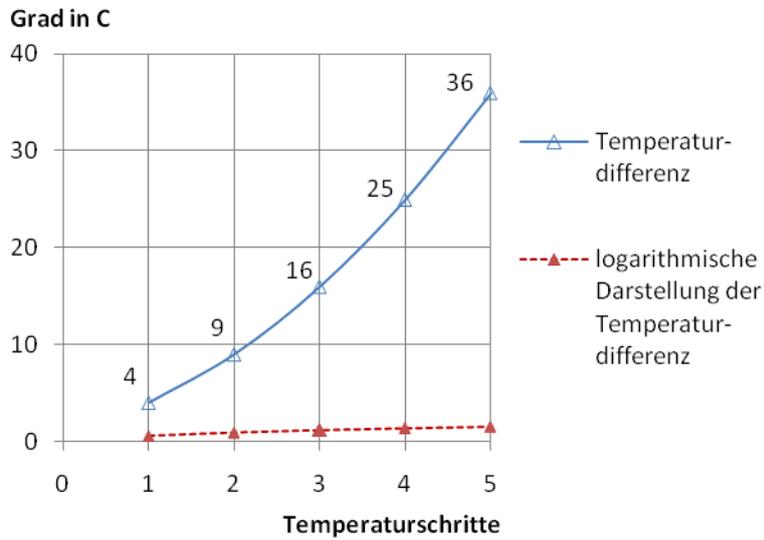


Abb. 4.6: Ermittlung der Temperaturschritte

4.2 Variantenkennung

Um die Versuchsergebnisse übersichtlich und überprüfbar zu speichern, wurde das in Abb. 4.7 dargestellte System verwendet.

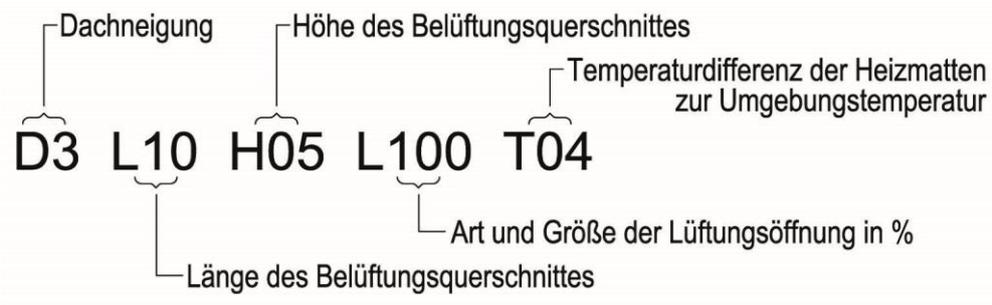


Abb. 4.7: Variantenkennung

4.3 Konstruktionszeichnungen

4.3.1 Versuchsaufbau Länge 10 m

In den Abb. 4.8, Abb. 4.9 und Abb. 4.10 ist die Konstruktion mit den verschiedenen Belüftungsquerschnitten dargestellt.

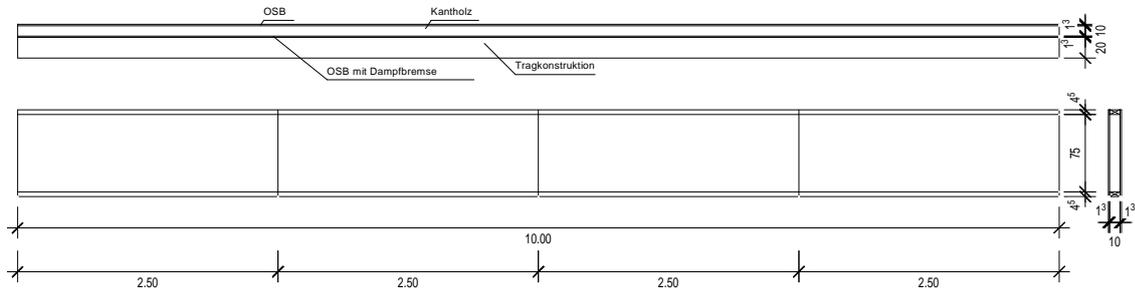


Abb. 4.8: Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 10 m Höhe 10 cm

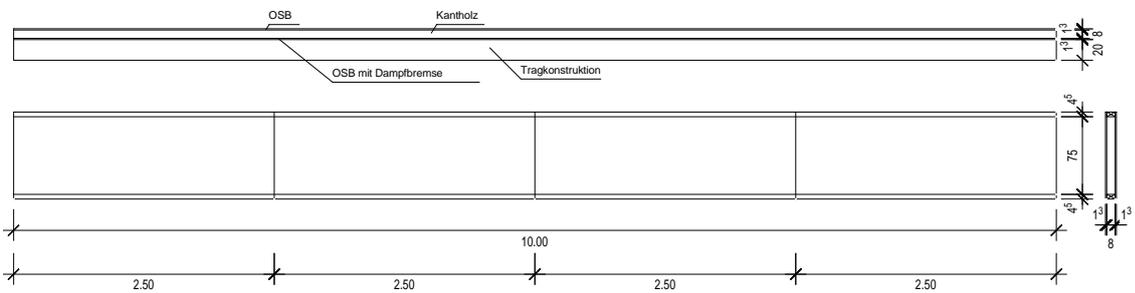


Abb. 4.9: Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 10 m Höhe 8 cm

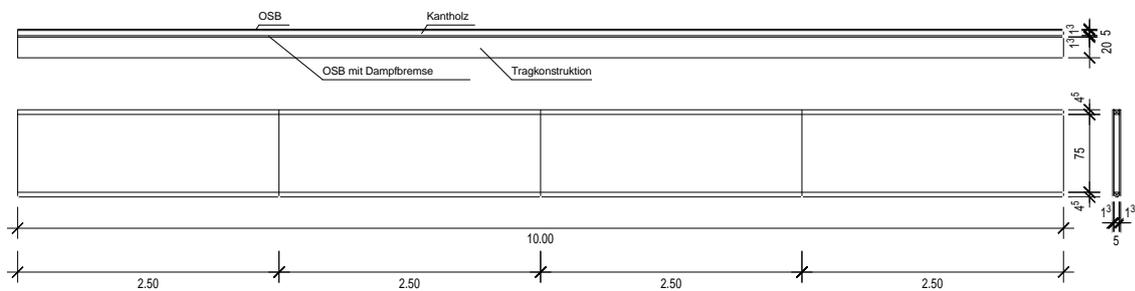


Abb. 4.10: Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 10 m Höhe 5 cm

4.3.2 Versuchsaufbau 5 m

In den Abb. 4.11, Abb. 4.12 und Abb. 4.13 ist die Konstruktion mit den verschiedenen Belüftungsquerschnitten dargestellt.

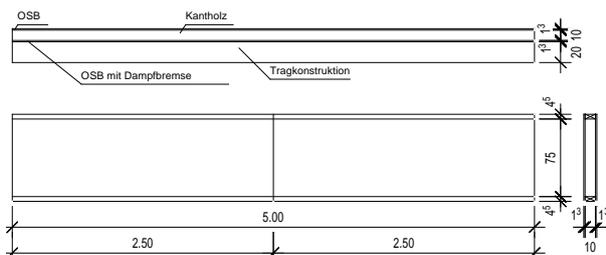


Abb. 4.11: Ansichten und Draufsicht Versuchsaufbau Länge 5 m Höhe 10 cm

5 Messungen

Die bei den Versuchen zu ermittelnde Größe war die Belüftungsstromgeschwindigkeit in m/s. Die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur wurde durch Heizmatten erzeugt, die über ein Relais gesteuert wurden, um eine möglichst konstante Temperaturdifferenz zu erzeugen.

Die Belüftungsstromgeschwindigkeit wurde mit dem folgenden Verfahren ermittelt:

der einströmenden Zuluft wurde impulsartig Ethanol zugeführt, die Ausbreitung des Gases im Belüftungsquerschnitt konnte Anhand der Luftqualitätssensoren verfolgt werden. Das Ethanol bewirkte bei den Sensoren einen Anstieg der gemessenen Spannung. Durch die in kurzen Intervallen gemessene Spannung und die bekannte Entfernung zwischen den einzelnen Sensoren konnte die Geschwindigkeit, mit der sich die Ethanolwolke durch den Belüftungsquerschnitt bewegte, gemessen werden.

Die Temperatur der Umgebung und des Belüftungsquerschnittes wurden mit Thermodrähten gemessen. Die Oberflächentemperatur und die Temperatur der Heizmatten wurden mit Temperaturfühlern (PT 100) gemessen.

5.1 Lage der Messpunkte

In den Abb. 5.1 und die Abb. 5.2 ist die Lage der verschiedenen Sensoren bei den Versuchsaufbauten mit einer Länge von 10 m dargestellt.

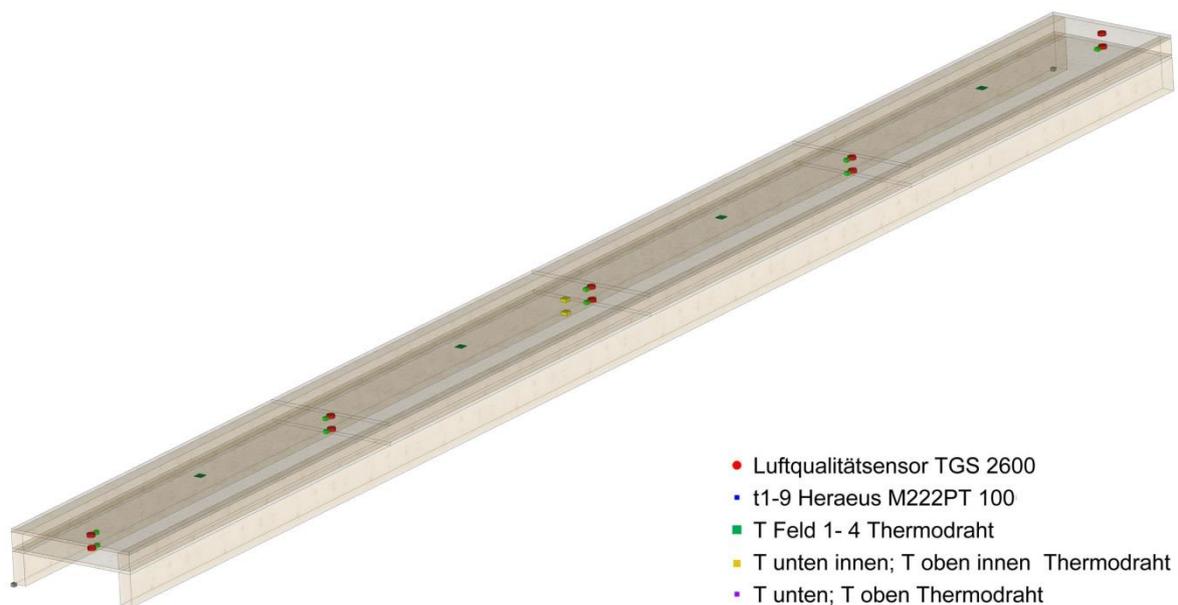


Abb. 5.1: Lage der Sensoren im 3D Model, Versuchsaufbau 10 m

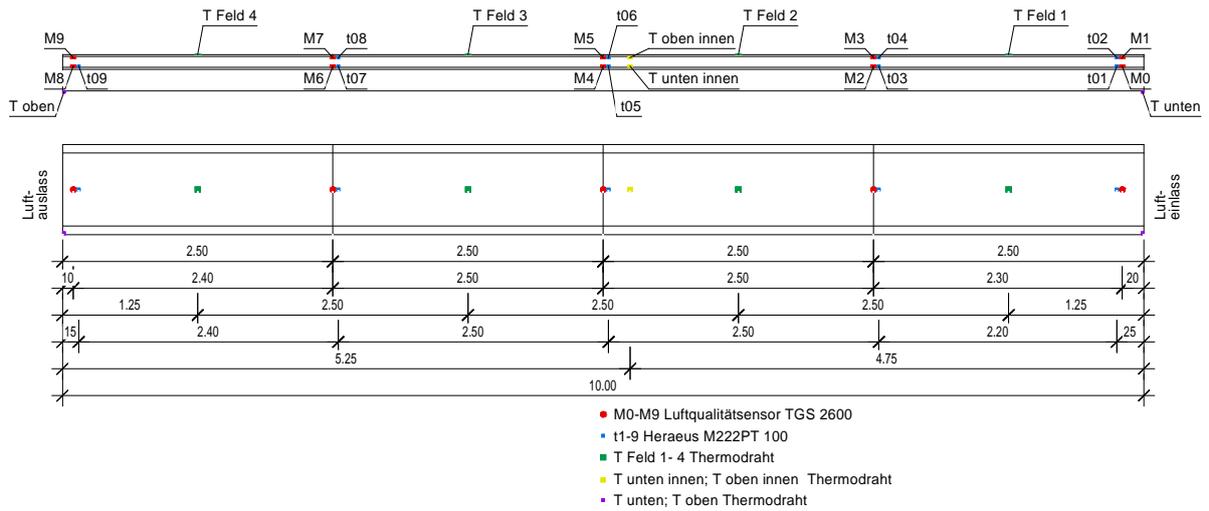


Abb. 5.2: Lage der Messpunkte, Versuchsaufbau 10 m

In den Abb. 5.3 und Abb. 5.4 sind die Sensoren und ihre Lage für die Versuche mit einer Länge von 5 m dargestellt

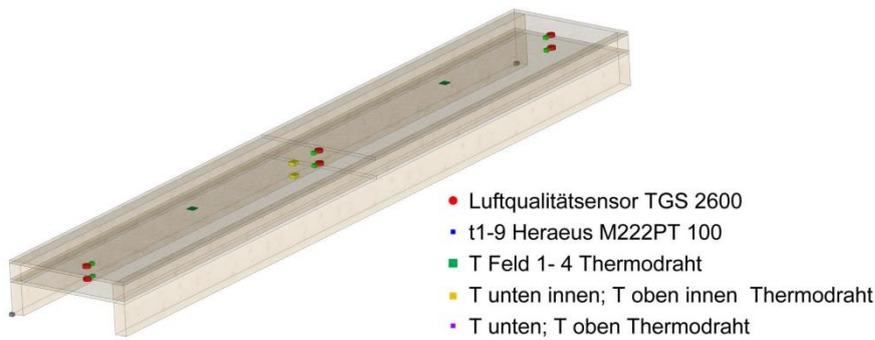


Abb. 5.3: Lage der Sensoren im 3D Model Versuchsaufbau 5 m

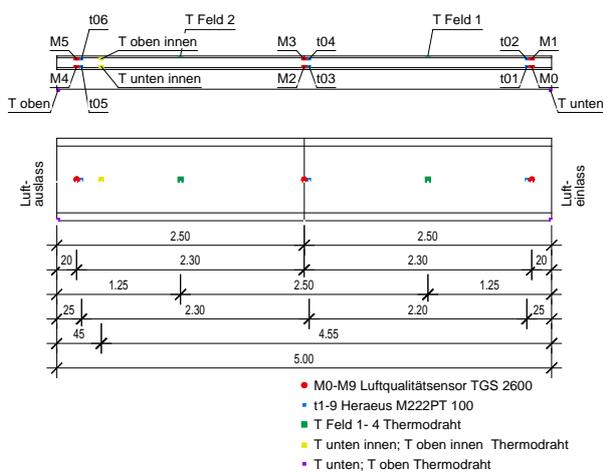


Abb. 5.4: Lage der Messpunkte, Versuchsaufbau 5 m

5.2 Schema der Messtechnik

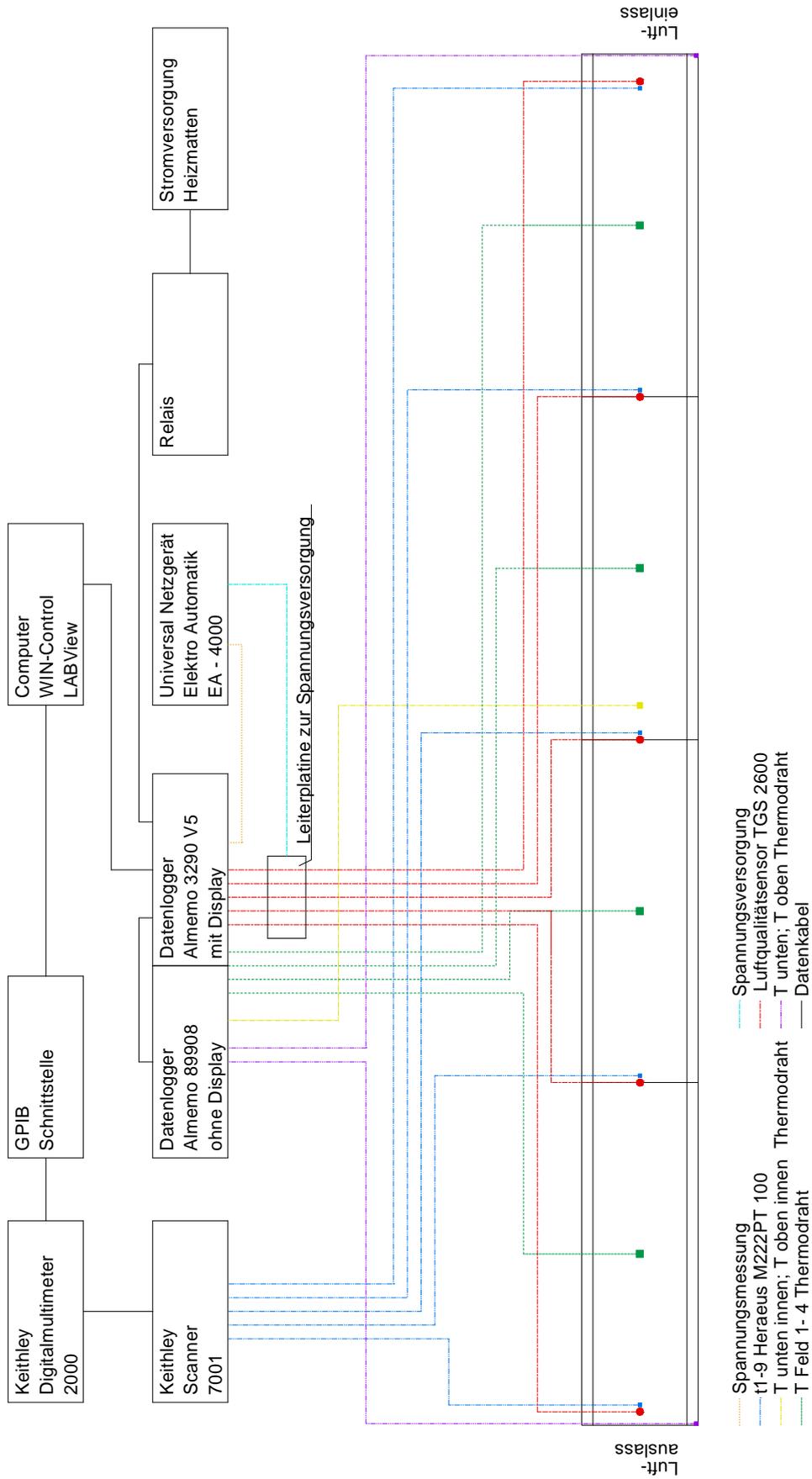


Abb. 5.5: schematische Darstellung der Messtechnik

5.3 Ablauf der Messungen

Die Messungen wurden immer in der gleichen Reihenfolge durchgeführt. Als erster Schritt wurde die Temperatur der Heizmatten eingestellt. Es wurde so lange mit dem Start der Messung gewartet, bis sich die Oberflächentemperaturen oben und unten konstant verhielten. Danach wurde die Aufzeichnung am Computer gestartet.

Die Zufuhr des Ethanol erfolgte, wie in Abb. 5.6 dargestellt, mit Hilfe einer Sprühflasche. In der Sprühflasche befand sich eine Ethanolmischung, mit dem Mischverhältnis von 2/5 Ethanol und 3/5 Wasser.



Abb. 5.6: Zufuhr des Ethanol mittels Sprühflasche

Der Verlauf der Ethanolwolke konnte anhand der Verläufe der Kurven im Messprogramm verfolgt werden. War die Wolke an allen Sensoren vorbeigezogen, wurde die Messung beendet und die Ergebnisse in eine Exceltabelle kopiert und gespeichert. Der Start der nächsten Messung erfolgte, sobald die Sensoren wieder auf ihren Startwert abgefallen waren.

Das Mischungsverhältnis von Ethanol und Wasser wurde in Testversuchen ermittelt. Es war dabei wichtig, zum einen die Ethanolkonzentration hoch genug zu wählen, um eine eindeutige Reaktion der Sensoren zu erhalten, zum anderen so niedrig wie möglich, um die Wartezeiten beim Verflüchtigen des Gemisches im Belüftungsquerschnitt zu verkürzen.

Es wurde auch versucht, die Konzentration von Ethanol im Belüftungsraum mit Hilfe von Druckluft schnell wieder zu verringern, jedoch hat die Druckluft einen starken Temperaturabfall im Belüftungsquerschnitt bewirkt, was wiederum zu Wartezeiten beim Temperaturstabilisieren führte und deshalb verworfen wurde.

6 Auswertung der Messergebnisse

6.1 Vorgehensweise bei der Auswertung

Die Auswertung der Messergebnisse wurde mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel durchgeführt. Die bei den Messungen gewonnenen Ergebnisse wurden in einzelne Tabellenblätter eingelesen. In den Tabellenblättern V1 und V2 wurden die Ergebnisse des Almemo Messsystems eingelesen, in tv1 und tv2 die des Keithleysystems. Die Auswertung erfolgte dann in mehreren Schritten in weiteren Tabellenblättern. Zuerst wurde die von den Sensoren gemessene elektrische Spannung auf Null normiert. Im Anschluss wurde mittels einer Verknüpften WENN/UND Funktion der Beginn der Steigung ermittelt (Abb. 6.1).

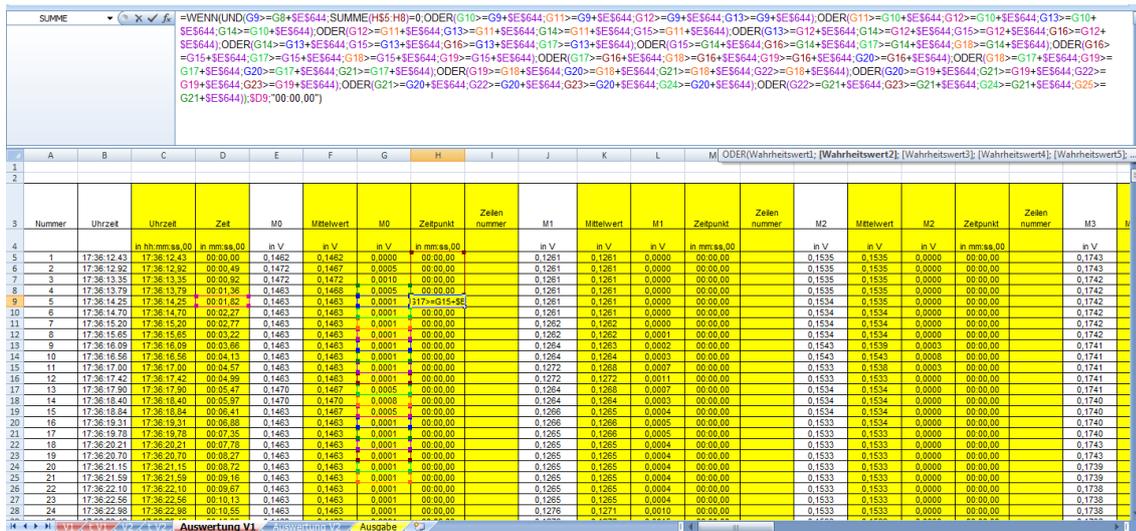


Abb. 6.1: Darstellung der Funktion zur Ermittlung des Steigungspunktes

Die Verläufe der auf Null normierten Spannung sind in Abb. 6.2 dargestellt

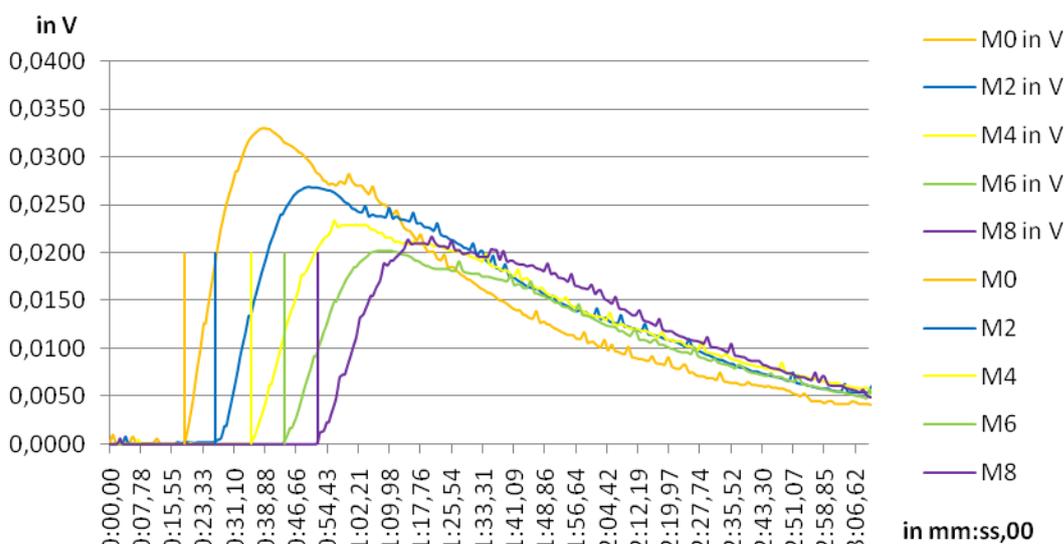


Abb. 6.2: Darstellung des normierten Spannungsverlaufes mit Steigungspunkt

Die Steigungspunkte wurden mittels der senkrechten Geraden M0- M8 kenntlich gemacht.

Es hat sich jedoch bei der Auswertung gezeigt, dass nicht immer ein, wie in Abb. 6.2 dargestellt, idealer Spannungsverlauf gemessen wurde. Daraus resultierte die Notwendigkeit, den Zeitpunkt in dem die Steigung beginnt mittels eines Steigungsfaktors manuell nach zu justieren. Zum anderen konnte der Zeitpunkt, durch die Veränderung der Zeilennummer mittels einer Variablen exakt gewählt werden.

y-Achse	Sensor	Sensor	Zeitpunkt Steigung	Steigungs-faktor	Zeitpunkt	Zeilen-nummer	Variable	neue Zeilen-nummer
0,00	M0	00:18,96	00:18,96	0,00001	00:18,96	46	0,00	46,00
0,02		00:18,96		0,00001				
	M2	00:26,55	00:26,55	0,00001	00:26,55	62	0,00	62,00
		00:26,55		0,00001				
	M4	00:35,39	00:35,39	0,00001	00:35,39	81	0,00	81,00
		00:35,39		0,00001				
	M6	00:43,88	00:43,88	0,00001	00:43,88	99	0,00	99,00
		00:43,88		0,00001				
	M8	00:52,32	00:52,32	0,00001	00:52,32	117	0,00	117,00
		00:52,32		0,00001				

Abb. 6.3: Optimierungsmöglichkeiten des Steigungspunktes

6.2 Mögliche Ungenauigkeiten durch die Auswertung

Im Nachfolgenden wird versucht, die Ungenauigkeit der Auswertung zu ermitteln. Der Spannungsverlauf in der Abb. 6.4 ist der optimale Verlauf. Durch die extreme Steigung war es ohne Probleme möglich, den Reaktionspunkt der Sensoren zu ermitteln.

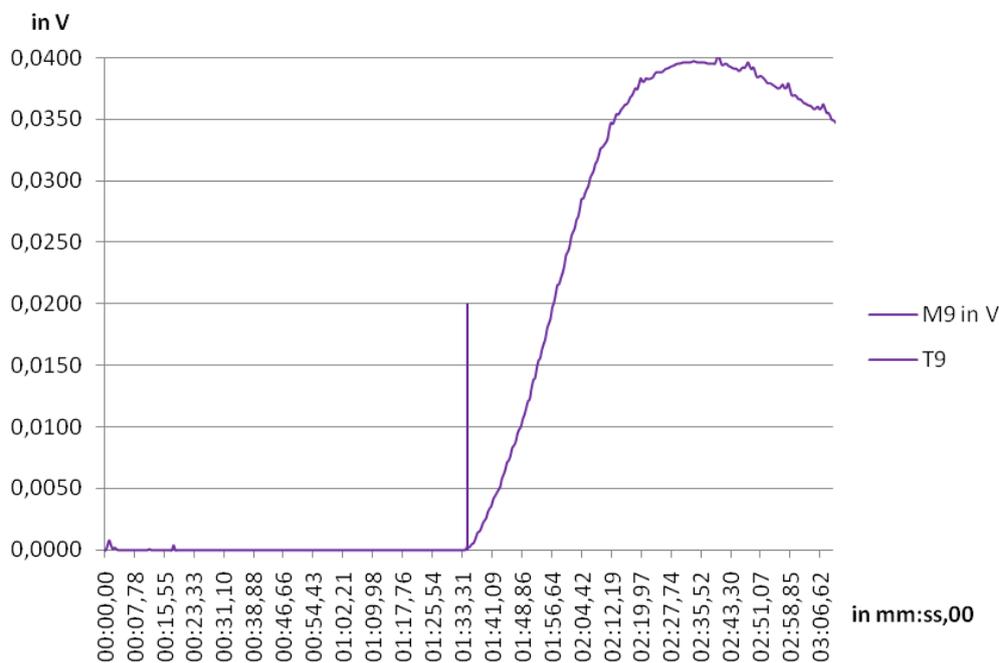


Abb. 6.4: Optimaler Kurvenverlauf

Der Verlauf der Spannungszunahme in Abb. 6.5 ist ein extremes Beispiel. Durch seine unregelmäßige Steigung ist es viel schwieriger, ihn auszuwerten. Im Punkt T1 beginnt die Steigung, jedoch fällt sie danach zweimal wieder ab, kontinuierlich steigt die Spannung erst ab Punkt T2. Der zeitliche Abstand zwischen den Punkten beträgt 6,8 Sekunden. Bezogen auf die

durchschnittliche Länge der Messstrecken bedeutet dies eine Variation der Belüftungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s

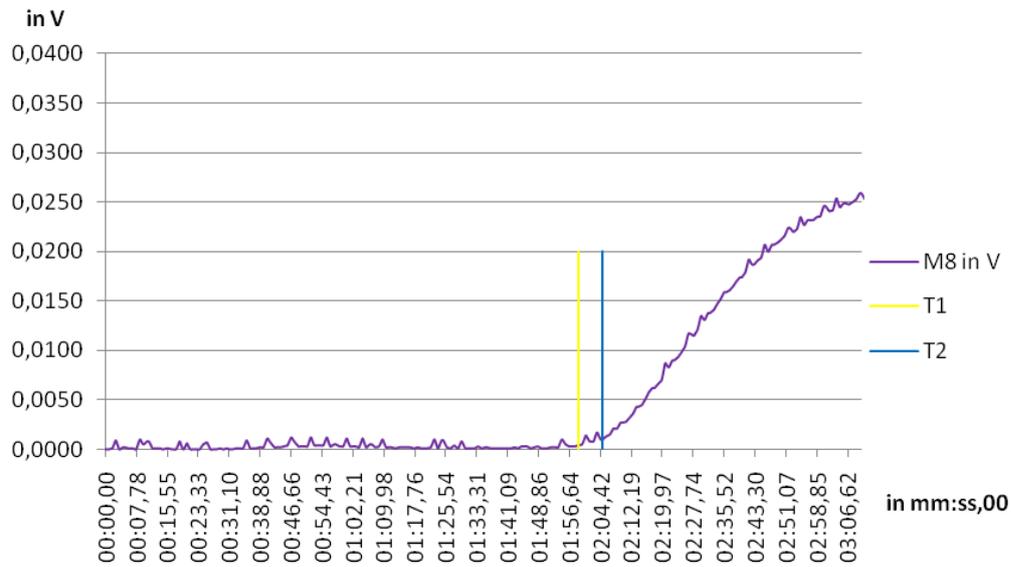


Abb. 6.5: ungenauer Verlauf

Die Abtastrate der gesamten Sensoren betrug im Durchschnitt 0,5 Sekunden. Aus diesem Grund ist es auszuschließen, dass die Abtastrate einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

7 Messergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind im Anhang aufgeführt. Im Nachfolgenden werden diese zusammengefasst dargestellt. Sie wurden zu Gruppen gegliedert, wobei die Art der Lüftungsöffnung die Hauptgruppe und die verschiedenen Höhen des Belüftungsquerschnittes die Untergruppen darstellt. Die in der Tab. 7.1 dargestellten Formelzeichen wurden in der tabellarischen Darstellung der Auswertung verwendet.

Tab. 7.1: In der Auswertung verwendete Formelzeichen

$\Delta T_{R,m}$ in K	Temperaturdifferenz
Δp in N/m^2	Druckdifferenz
v_l in m/s	Belüftungsstromgeschwindigkeit
\dot{V}_l in m^3/s	Volumenstrom
\dot{m}_l in kg/s	Massenstrom
Re in –	Reynoldszahl
$v_{l,Liersch}$ in m/s	Belüftungsstromgeschwindigkeit nach Liersch
$\dot{V}_{l,Liersch}$ in m^3/s	Volumenstrom nach Liersch
$\dot{m}_{l,Liersch}$ in kg/s	Massenstrom nach Liersch
Abweichung v_l von $v_{l,Liersch}$ in m/s	Abweichung der gemessenen Belüftungsstromgeschwindigkeit von der berechneten Belüftungsstromgeschwindigkeit nach Liersch in m/s
Abweichung v_l von $v_{l,Liersch}$ in %	Abweichung der gemessenen Belüftungsstromgeschwindigkeit von der berechneten Belüftungsstromgeschwindigkeit nach Liersch in %

In der Auswertung werden zusätzlich der Verlauf der Belüftungsstromgeschwindigkeit und des Massenstromes in Grafiken dargestellt.

7.1 Lüftungsöffnung 100%

In den Kapiteln 7.1.1, 7.1.2 und 7.1.3 zeigt sich, dass die Abweichung von Liersch im Bereich von einem Zehntel liegt. Wird jedoch die Abweichung der Messung vom Berechnungsergebnis nach Liersch in Prozent betrachtet, ergibt sich eine Abweichung von bis zu 30%. Die Abweichung wird größer, je näher die Reynoldszahl in den turbulenten Bereich kommt. Dies könnte unter anderem daran liegen, dass die Materialrauigkeit für den betrachteten Querschnitt falsch angesetzt wurde und der störende Einfluss der Sensoren in Wandnähe mit der Geschwindigkeit zunimmt.

An den Abbildungen der Belüftungsgeschwindigkeit und des Massenstromes lässt sich erkennen, dass der Verlauf von Messung und Berechnung einen nahezu identischen Verlauf haben.

7.1.1 Belüftungsquerschnittshöhe von 5 cm

Tab. 7.2: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H05L100T04	2,13	0,0017	0,05	0,0017	0,0019	293	0,04	0,0017	0,0019	-0,0010	2,17%
D3L10H05L100T09	6,38	0,0044	0,11	0,0040	0,0045	695	0,11	0,0042	0,0048	0,0053	-4,95%
D3L10H05L100T16	8,74	0,0056	0,15	0,0058	0,0064	989	0,15	0,0058	0,0064	-0,0002	0,16%
D3L10H05L100T25	10,10	0,0062	0,21	0,0077	0,0086	1321	0,18	0,0069	0,0077	-0,0207	10,07%
D3L10H05L100T36	11,74	0,0068	0,37	0,0139	0,0153	2373	0,24	0,0092	0,0101	-0,1249	33,78%
D5L10H05L100T04	1,83	0,0025	0,07	0,0025	0,0029	437	0,06	0,0024	0,0027	-0,0038	5,64%
D5L10H05L100T09	5,48	0,0065	0,15	0,0057	0,0064	974	0,16	0,0058	0,0066	0,0049	-3,27%
D5L10H05L100T16	6,75	0,0076	0,19	0,0072	0,0080	1232	0,19	0,0071	0,0080	-0,0014	0,73%
D5L10H05L100T25	8,91	0,0094	0,30	0,0112	0,0125	1927	0,26	0,0096	0,0107	-0,0427	14,25%
D5L10H05L100T36	13,12	0,0122	0,37	0,0139	0,0153	2382	0,33	0,0125	0,0138	-0,0374	10,06%
D7L05H05L100T04	2,23	0,0021	0,06	0,0021	0,0024	363	0,07	0,0028	0,0032	0,0175	-31,20%
D7L05H05L100T09	4,94	0,0042	0,14	0,0054	0,0061	926	0,16	0,0059	0,0067	0,0145	-10,10%
D7L05H05L100T16	6,97	0,0055	0,17	0,0065	0,0073	1123	0,20	0,0075	0,0084	0,0260	-14,94%
D7L05H05L100T25	9,09	0,0067	0,30	0,0111	0,0124	1911	0,27	0,0100	0,0112	-0,0295	9,94%
D7L05H05L100T36	11,23	0,0078	0,34	0,0126	0,0140	2168	0,31	0,0115	0,0127	-0,0304	9,02%

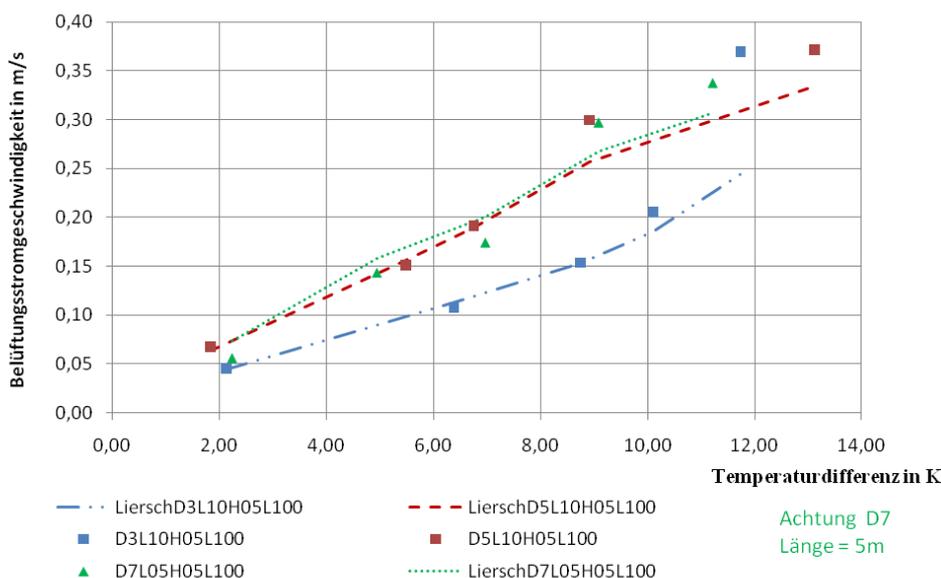


Abb. 7.1: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe 5 cm

7.1.2 Belüftungsquerschnitt von 8 cm

Tab. 7.3: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{Liersch}$ in kg/s		
D3L10H08L100T04	1,57	0,0013	0,07	0,0041	0,0047	682	0,07	0,0040	0,0046	-0,0012	1,81%
D3L10H08L100T09	4,05	0,0031	0,13	0,0080	0,0091	1330	0,14	0,0082	0,0094	0,0041	-3,10%
D3L10H08L100T16	6,15	0,0044	0,18	0,0108	0,0122	1792	0,19	0,0112	0,0126	0,0064	-3,55%
D3L10H08L100T25	9,76	0,0061	0,22	0,0130	0,0144	2147	0,25	0,0148	0,0165	0,0310	-14,35%
D3L10H08L100T36	13,56	0,0076	0,24	0,0145	0,0159	2395	0,30	0,0180	0,0198	0,0582	-24,07%
D5L10H08L100T04	2,39	0,0035	0,12	0,0071	0,0082	1192	0,13	0,0079	0,0091	0,0128	-10,82%
D5L10H08L100T09	4,65	0,0061	0,19	0,0113	0,0128	1881	0,21	0,0127	0,0145	0,0248	-13,24%
D5L10H08L100T16	7,87	0,0089	0,23	0,0137	0,0154	2278	0,29	0,0175	0,0196	0,0630	-27,57%
D5L10H08L100T25	11,18	0,0113	0,32	0,0193	0,0214	3190	0,32	0,0190	0,0210	-0,0051	1,59%
D5L10H08L100T36	14,49	0,0134	0,37	0,0224	0,0246	3701	0,44	0,0267	0,0293	0,0711	-19,04%
D7L05H08L100T04	2,37	0,0023	0,13	0,0079	0,0090	1319	0,14	0,0083	0,0095	0,0072	-5,47%
D7L05H08L100T09	3,81	0,0034	0,16	0,0093	0,0106	1554	0,18	0,0110	0,0125	0,0281	-18,06%
D7L05H08L100T16	5,60	0,0047	0,21	0,0129	0,0146	2142	0,24	0,0143	0,0162	0,0237	-11,04%
D3L10H10L100T25	7,85	0,0053	0,26	0,0193	0,0217	3129	0,22	0,0165	0,0185	-0,0375	14,58%
D7L05H08L100T36	9,79	0,0073	0,29	0,0173	0,0193	2865	0,33	0,0199	0,0222	0,0441	-15,31%

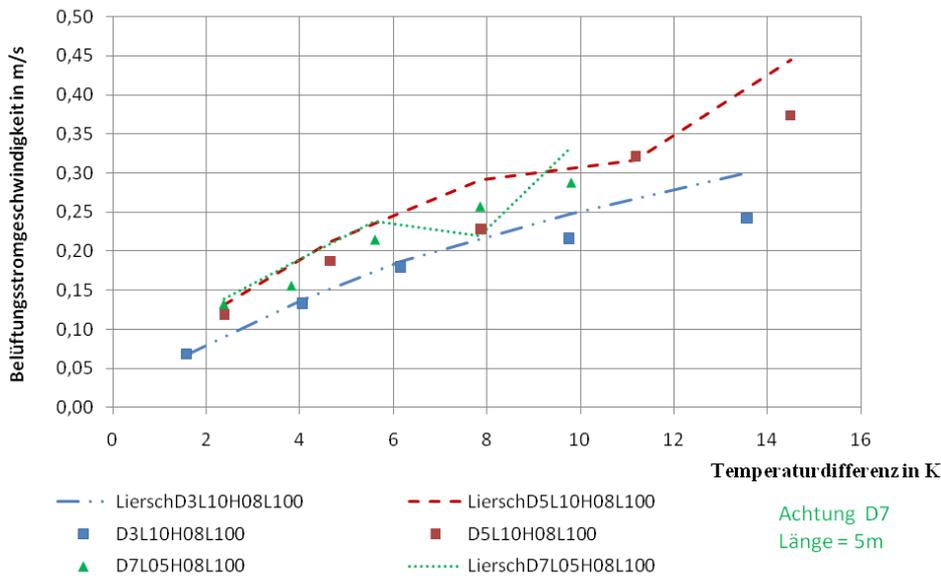


Abb. 7.2: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

7.1.3 Belüftungsquerschnitt 10cm

Tab. 7.4: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H10L100T04	2,82	0,0023	0,13	0,0101	0,0115	1642	0,13	0,0098	0,0112	-0,0040	3,01%
D3L10H10L100T09	3,88	0,0030	0,15	0,0110	0,0125	1790	0,16	0,0118	0,0134	0,0099	-6,76%
D3L10H10L100T16	5,91	0,0043	0,20	0,0148	0,0167	2398	0,19	0,0140	0,0158	-0,0101	5,14%
D3L10H10L100T25	7,85	0,0053	0,23	0,0171	0,0192	2778	0,22	0,0163	0,0183	-0,0106	4,65%
D3L10H10L100T36	12,59	0,0074	0,26	0,0196	0,0217	3168	0,32	0,0243	0,0269	0,0628	-24,02%
D5L10H10L100T04	2,26	0,0031	0,11	0,0084	0,0097	1374	0,14	0,0107	0,0123	0,0303	-26,94%
D5L10H10L100T09	5,49	0,0067	0,18	0,0135	0,0152	2187	0,25	0,0190	0,0215	0,0743	-41,34%
D5L10H10L100T16	8,56	0,0093	0,22	0,0167	0,0187	2702	0,29	0,0220	0,0246	0,0704	-31,62%
D5L10H10L100T25	10,20	0,0105	0,30	0,0224	0,0248	3612	0,33	0,0245	0,0272	0,0281	-9,42%
D5L10H10L100T36	14,95	0,0134	0,42	0,0316	0,0345	5077	0,50	0,0372	0,0406	0,0750	-17,81%
D7L05H10L100T04	2,39	0,0022	0,06	0,0045	0,0052	738	0,13	0,0094	0,0107	0,0650	-107,23%
D7L05H10L100T09	4,00	0,0035	0,12	0,0092	0,0104	1488	0,19	0,0146	0,0166	0,0723	-59,11%
D7L05H10L100T16	5,37	0,0045	0,18	0,0133	0,0151	2162	0,24	0,0182	0,0205	0,0645	-36,25%
D7L05H10L100T25	7,10	0,0056	0,20	0,0151	0,0169	2437	0,26	0,0197	0,0222	0,0624	-31,11%
D7L05H10L100T36	11,18	0,0078	0,27	0,0203	0,0225	3276	0,37	0,0279	0,0309	0,1016	-37,56%

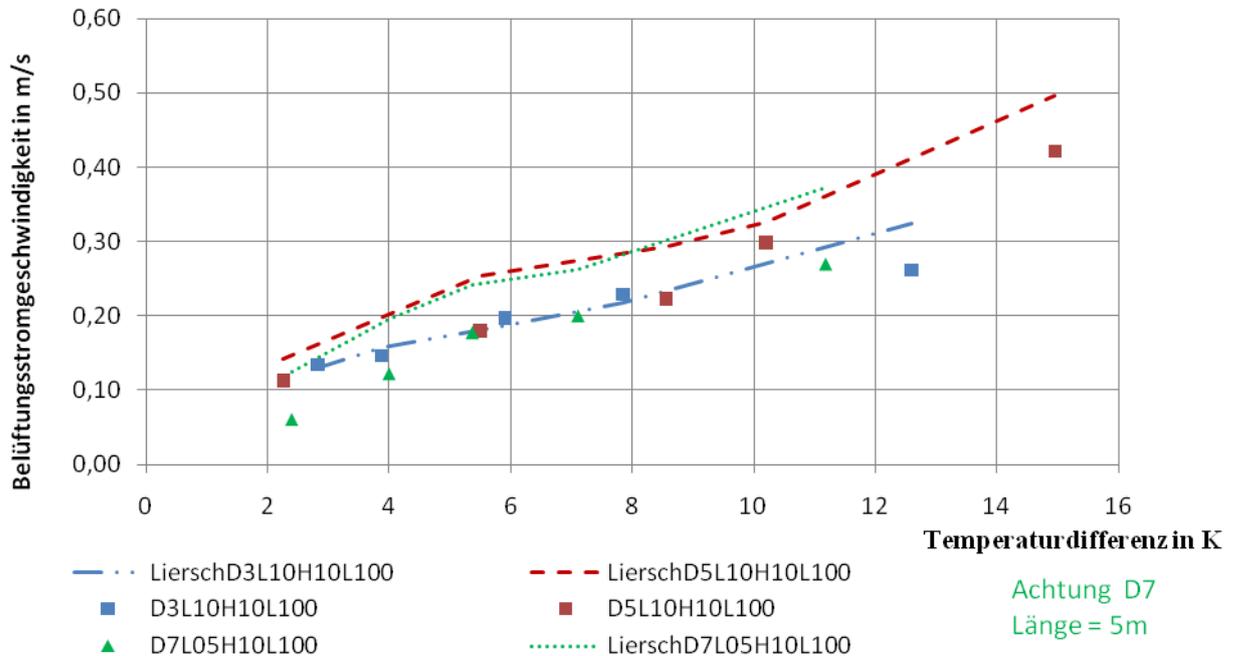


Abb. 7.3: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.2 Lüftungsöffnung 75%

Die in den Kapiteln 7.2.1, 7.2.2 und 7.2.3 dargestellten Ergebnisse liefern vereinfacht gesagt die gleichen Erkenntnisse wie die in Kapitel 7.1 aufgezeigten.

7.2.1 Belüftungsquerschnitt 5 cm

Tab. 7.5: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm:

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H05L075T04	2,13	0,0017	0,05	0,0017	0,0019	293	0,04	0,0016	0,0019	-0,0015	3,40%
D3L10H05L075T09	5,00	0,0036	0,10	0,0037	0,0041	631	0,09	0,0035	0,0040	-0,0041	4,19%
D3L10H05L075T16	7,37	0,0049	0,15	0,0055	0,0061	941	0,13	0,0050	0,0056	-0,0128	8,76%
D3L10H05L075T25	10,27	0,0062	0,20	0,0075	0,0083	1289	0,18	0,0066	0,0073	-0,0239	11,94%
D3L10H05L075T36	12,49	0,0071	0,28	0,0105	0,0116	1802	0,22	0,0082	0,0090	-0,0632	22,52%
D5L10H05L075T04	1,96	0,0027	0,07	0,0026	0,0029	445	0,07	0,0024	0,0028	-0,0034	4,98%
D5L10H05L075T09	4,16	0,0052	0,15	0,0054	0,0062	938	0,13	0,0048	0,0055	-0,0161	11,05%
D5L10H05L075T16	5,93	0,0069	0,21	0,0079	0,0089	1360	0,18	0,0066	0,0075	-0,0345	16,35%
D5L10H05L075T25	8,60	0,0091	0,25	0,0095	0,0106	1637	0,23	0,0085	0,0095	-0,0284	11,16%
D5L10H05L075T36	8,60	0,0091	0,25	0,0095	0,0106	1637	0,23	0,0085	0,0095	-0,0284	11,16%
D7L05H05L075T04	2,36	0,0022	0,07	0,0026	0,0030	451	0,08	0,0030	0,0034	0,0105	-15,06%
D7L05H05L075T09	4,61	0,0039	0,13	0,0049	0,0056	852	0,14	0,0053	0,0060	0,0085	-6,45%
D7L05H05L075T16	6,51	0,0052	0,20	0,0076	0,0086	1314	0,19	0,0071	0,0080	-0,0144	7,04%
D7L05H05L075T25	9,41	0,0068	0,23	0,0086	0,0096	1482	0,23	0,0088	0,0098	0,0045	-1,95%
D7L05H05L075T36	11,77	0,0080	0,33	0,0125	0,0138	2142	0,29	0,0107	0,0118	-0,0475	14,25%

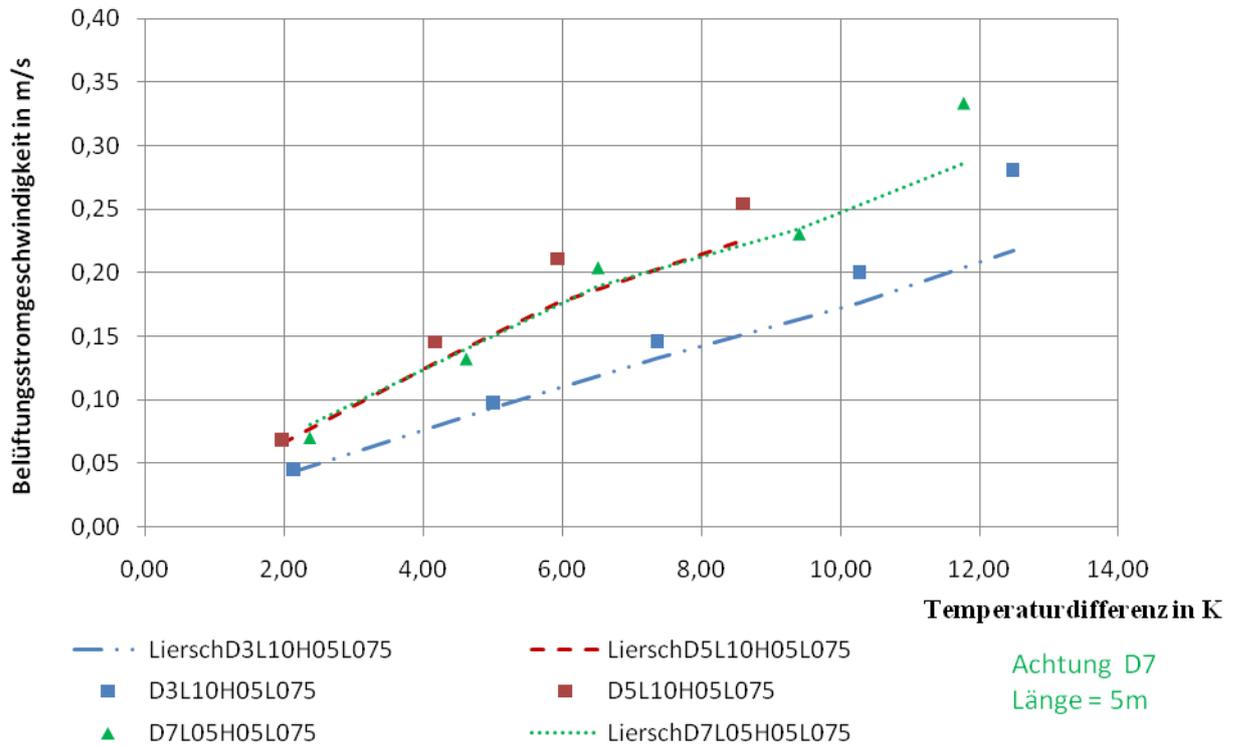


Abb. 7.4: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.2.2 Belüftungsquerschnitt 8 cm

Tab. 7.6: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{m}_1 von $\dot{m}_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H08L075T04	1,46	0,0013	0,08	0,0046	0,0052	760	0,06	0,0039	0,0044	-0,0114	15,07%
D3L10H08L075T09	4,02	0,0031	0,11	0,0067	0,0076	1112	0,12	0,0073	0,0083	0,0106	-9,47%
D3L10H08L075T16	5,96	0,0043	0,17	0,0103	0,0117	1717	0,17	0,0101	0,0114	-0,0038	2,18%
D3L10H08L075T25	7,71	0,0052	0,21	0,0125	0,0140	2076	0,20	0,0121	0,0135	-0,0074	3,54%
D3L10H08L075T36	10,00	0,0063	0,25	0,0149	0,0166	2468	0,24	0,0143	0,0159	-0,0099	3,98%
D5L10H08L075T04	2,58	0,0037	0,11	0,0066	0,0075	1096	0,13	0,0075	0,0087	0,0165	-15,11%
D5L10H08L075T09	3,69	0,0050	0,13	0,0081	0,0092	1353	0,16	0,0096	0,0110	0,0255	-18,90%
D5L10H08L075T16	3,69	0,0050	0,13	0,0081	0,0092	1353	0,16	0,0096	0,0110	0,0255	-18,90%
D5L10H08L075T25	11,15	0,0113	0,29	0,0172	0,0191	2854	0,29	0,0175	0,0194	0,0048	-1,68%
D5L10H08L075T36	14,61	0,0134	0,37	0,0222	0,0243	3656	0,40	0,0241	0,0264	0,0329	-8,90%
D7L05H08L075T04	2,81	0,0026	0,09	0,0055	0,0062	912	0,13	0,0076	0,0087	0,0357	-39,15%
D7L05H08L075T09	4,53	0,0040	0,15	0,0091	0,0103	1513	0,18	0,0109	0,0123	0,0294	-19,38%
D7L05H08L075T16	6,21	0,0051	0,20	0,0118	0,0133	1956	0,22	0,0133	0,0150	0,0258	-13,15%
D7L05H08L075T25	8,43	0,0065	0,21	0,0129	0,0144	2136	0,26	0,0157	0,0176	0,0476	-22,20%
D7L05H08L075T36	10,25	0,0075	0,28	0,0171	0,0190	2831	0,30	0,0181	0,0201	0,0164	-5,77%

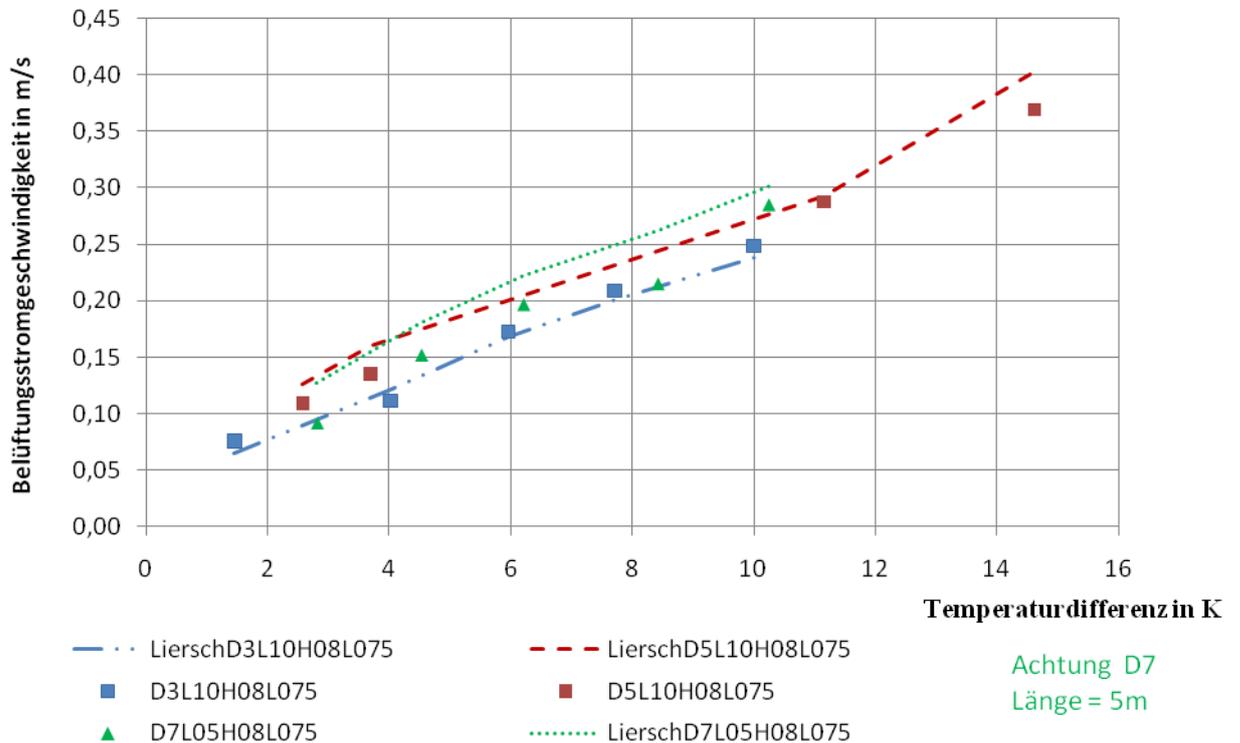


Abb. 7.5: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

7.2.3 Belüftungsquerschnitt 10 cm

Tab. 7.7: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H10L075T04	2,20	0,0018	0,10	0,0077	0,0088	1256	0,10	0,0074	0,0085	-0,0036	3,54%
D3L10H10L075T09	3,72	0,0029	0,14	0,0104	0,0118	1686	0,14	0,0105	0,0119	0,0013	-0,91%
D3L10H10L075T16	5,82	0,0042	0,17	0,0129	0,0145	2088	0,18	0,0138	0,0155	0,0119	-6,93%
D3L10H10L075T25	7,61	0,0052	0,23	0,0170	0,0191	2753	0,20	0,0149	0,0167	-0,0281	12,42%
D3L10H10L075T36	9,73	0,0062	0,24	0,0183	0,0204	2955	0,25	0,0190	0,0212	0,0105	-4,30%
D5L10H10L075T04	2,75	0,0037	0,14	0,0103	0,0118	1675	0,15	0,0116	0,0132	0,0172	-12,51%
D5L10H10L075T09	5,05	0,0062	0,17	0,0127	0,0143	2056	0,22	0,0165	0,0187	0,0508	-30,09%
D5L10H10L075T16	7,47	0,0084	0,21	0,0159	0,0178	2571	0,25	0,0189	0,0213	0,0408	-19,30%
D5L10H10L075T25	8,81	0,0095	0,27	0,0204	0,0228	3301	0,28	0,0209	0,0233	0,0063	-2,30%
D5L10H10L075T36	11,62	0,0115	0,35	0,0264	0,0292	4268	0,38	0,0284	0,0314	0,0262	-7,42%
D7L05H10L075T04	3,39	0,0031	0,10	0,0075	0,0085	1220	0,16	0,0117	0,0133	0,0559	-55,84%
D7L05H10L075T09	4,07	0,0036	0,10	0,0078	0,0089	1272	0,17	0,0129	0,0147	0,0676	-64,65%
D7L05H10L075T16	6,17	0,0050	0,14	0,0108	0,0122	1756	0,22	0,0168	0,0190	0,0799	-55,28%
D7L05H10L075T25	8,26	0,0063	0,18	0,0137	0,0154	2221	0,27	0,0201	0,0225	0,0855	-46,71%
D7L05H10L075T36	9,54	0,0070	0,23	0,0172	0,0191	2778	0,30	0,0223	0,0248	0,0675	-29,47%

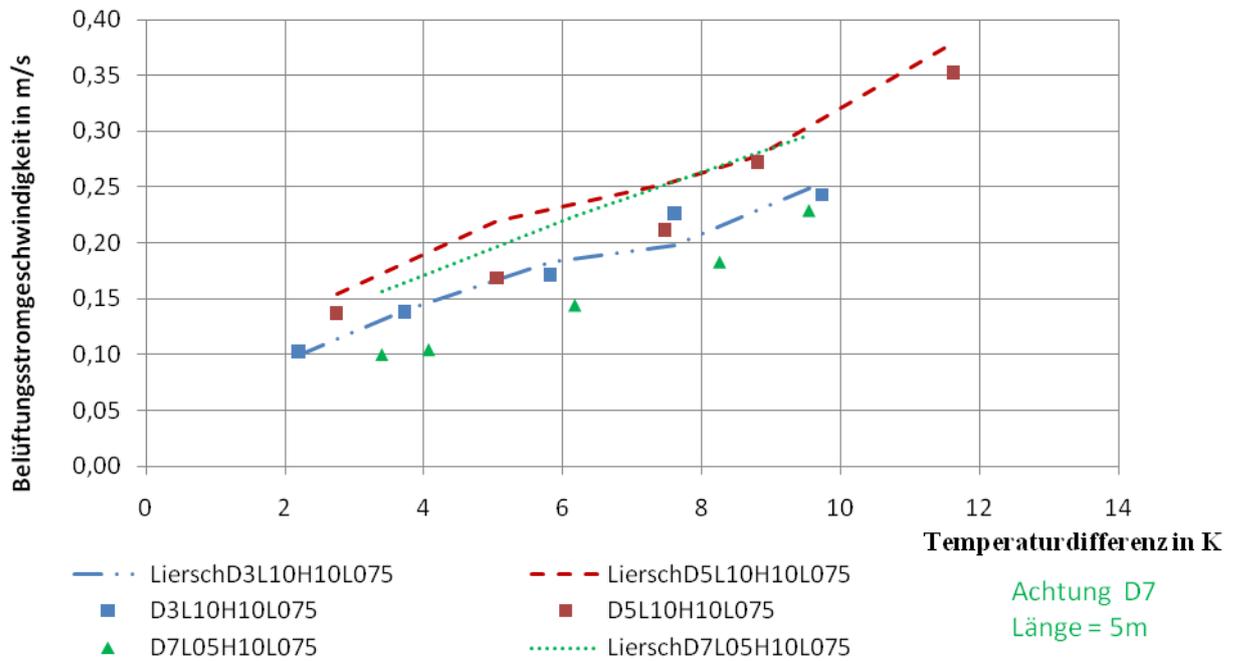


Abb. 7.6: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.3 Lüftungsöffnung 50%

Die in den Kapiteln 7.3.1, 7.3.2 und 7.3.3 dargestellten Ergebnisse zeigen wieder eine Abweichung von maximal 30 %. Die Abweichungen sind ähnlich wie in den vorherigen Kapiteln.

7.3.1 Belüftungsquerschnitt 5 cm

Tab. 7.8: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H05L050T04	2,17	0,0017	0,04	0,0016	0,0018	276	0,04	0,0016	0,0018	-0,0002	0,45%
D3L10H05L050T09	4,64	0,0034	0,13	0,0051	0,0057	870	0,10	0,0037	0,0042	-0,0352	26,10%
D3L10H05L050T16	7,66	0,0050	0,13	0,0050	0,0056	855	0,13	0,0048	0,0053	-0,0056	4,23%
D3L10H05L050T25	10,15	0,0062	0,18	0,0067	0,0075	1154	0,16	0,0061	0,0068	-0,0169	9,42%
D3L10H05L050T36	14,10	0,0077	0,23	0,0085	0,0094	1461	0,21	0,0078	0,0085	-0,0211	9,26%
D5L10H05L050T04	1,96	0,0026	0,06	0,0023	0,0026	400	0,06	0,0023	0,0026	-0,0006	0,89%
D5L10H05L050T09	3,71	0,0047	0,13	0,0049	0,0056	850	0,11	0,0043	0,0049	-0,0175	13,32%
D5L10H05L050T16	6,42	0,0073	0,18	0,0067	0,0076	1157	0,17	0,0063	0,0070	-0,0123	6,87%
D5L10H05L050T25	8,89	0,0093	0,29	0,0107	0,0119	1838	0,23	0,0085	0,0095	-0,0589	20,60%
D5L10H05L050T36	11,63	0,0113	0,30	0,0114	0,0125	1945	0,26	0,0099	0,0109	-0,0395	13,04%
D7L05H05L050T04	2,41	0,0022	0,06	0,0023	0,0026	389	0,07	0,0028	0,0032	0,0142	-23,65%
D7L05H05L050T09	4,34	0,0037	0,12	0,0046	0,0052	789	0,13	0,0048	0,0054	0,0049	-3,99%
D7L05H05L050T16	6,64	0,0053	0,17	0,0065	0,0073	1124	0,17	0,0065	0,0073	-0,0011	0,60%
D7L05H05L050T25	9,56	0,0069	0,22	0,0081	0,0090	1384	0,22	0,0082	0,0091	0,0035	-1,62%
D7L05H05L050T36	11,87	0,0080	0,29	0,0110	0,0121	1878	0,26	0,0097	0,0108	-0,0326	11,14%

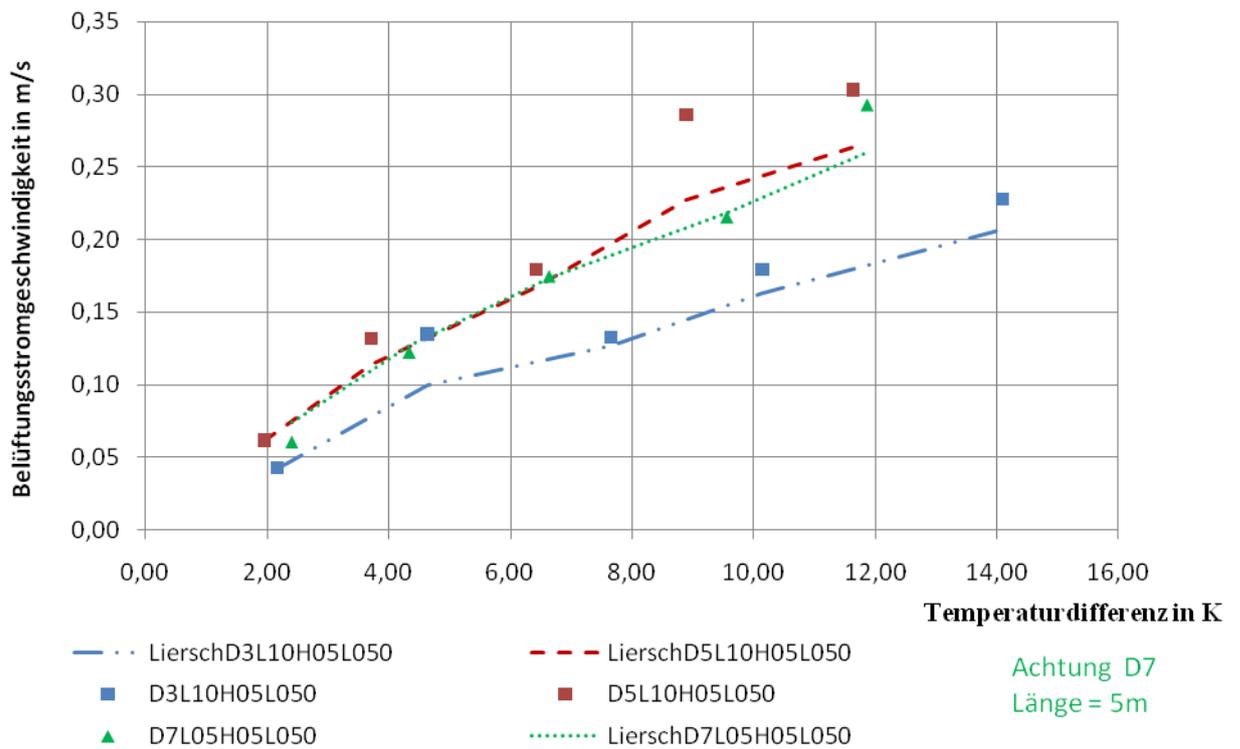


Abb. 7.7: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.3.2 Belüftungsquerschnitt 8 cm

Tab. 7.9: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_l von $v_{l,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{m}_l von $\dot{m}_{l,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_l in m/s	\dot{V}_l in m ³ /s	\dot{m}_l in kg/s	Re in -	$v_{l,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{l,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{l,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H08L050T04	1,60	0,0014	0,06	0,0034	0,0039	574	0,06	0,0035	0,0041	0,0017	-3,01%
D3L10H08L050T09	3,36	0,0027	0,10	0,0058	0,0066	970	0,10	0,0061	0,0070	0,0050	-5,11%
D3L10H08L050T16	4,82	0,0036	0,15	0,0093	0,0105	1541	0,14	0,0083	0,0095	-0,0153	9,91%
D3L10H08L050T25	6,38	0,0045	0,19	0,0111	0,0126	1852	0,17	0,0100	0,0113	-0,0188	10,12%
D3L10H08L050T36	8,23	0,0055	0,24	0,0145	0,0162	2406	0,20	0,0120	0,0135	-0,0412	17,03%
D5L10H08L050T04	2,69	0,0038	0,11	0,0063	0,0072	1057	0,12	0,0073	0,0083	0,0158	-15,06%
D5L10H08L050T09	3,64	0,0049	0,13	0,0076	0,0087	1266	0,15	0,0089	0,0102	0,0221	-17,50%
D5L10H08L050T16	7,66	0,0088	0,22	0,0133	0,0150	2213	0,25	0,0147	0,0166	0,0236	-10,63%
D5L10H08L050T25	10,86	0,0111	0,27	0,0161	0,0178	2658	0,27	0,0162	0,0180	0,0031	-1,16%
D5L10H08L050T36	13,04	0,0125	0,31	0,0185	0,0204	3058	0,34	0,0204	0,0225	0,0317	-10,28%
D7L05H08L050T04	2,99	0,0028	0,08	0,0045	0,0052	752	0,12	0,0070	0,0080	0,0422	-56,01%
D7L05H08L050T09	4,73	0,0041	0,12	0,0074	0,0084	1231	0,16	0,0099	0,0112	0,0413	-33,45%
D7L05H08L050T16	6,69	0,0054	0,16	0,0097	0,0109	1615	0,21	0,0123	0,0139	0,0435	-26,84%
D7L05H08L050T25	8,87	0,0067	0,20	0,0123	0,0137	2036	0,24	0,0147	0,0164	0,0403	-19,69%
D7L05H08L050T36	10,68	0,0077	0,25	0,0152	0,0169	2516	0,28	0,0166	0,0184	0,0230	-9,07%

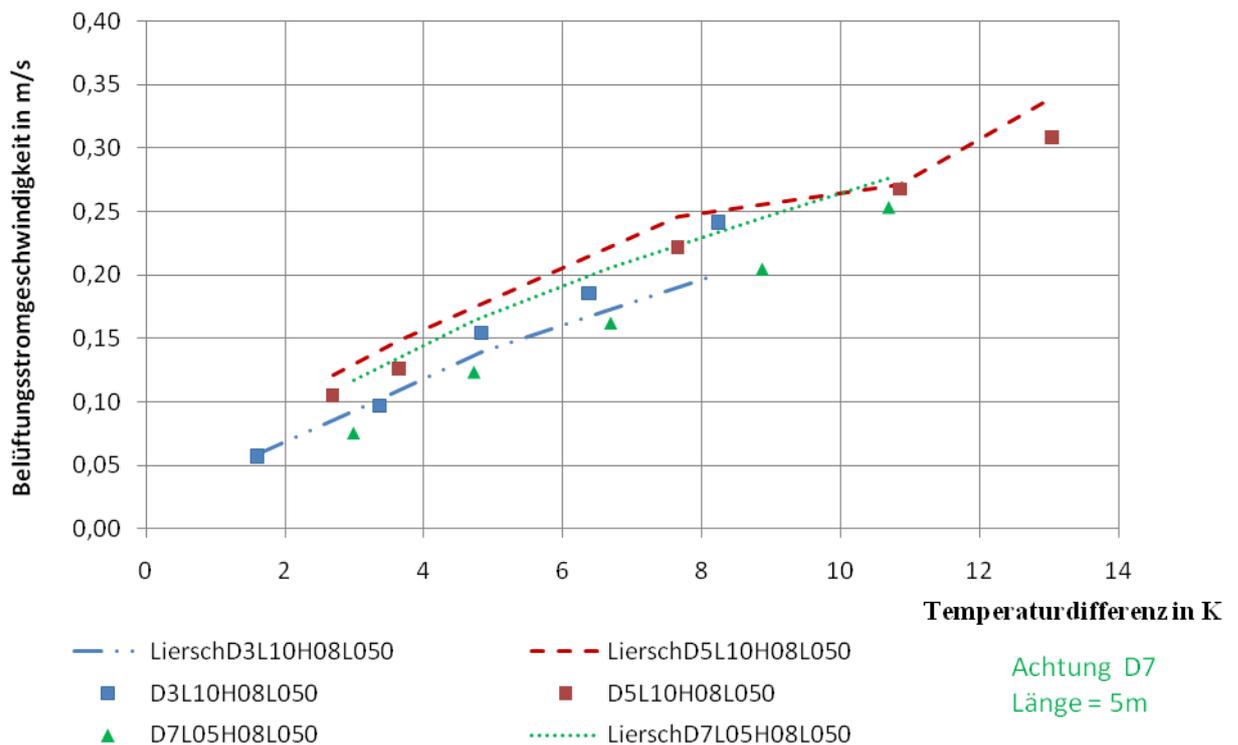


Abb. 7.8: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

7.3.3 Belüftungsquerschnitt 10 cm

Tab. 7.10: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_l von $v_{l,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_l von $v_{l,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_l in m/s	\dot{V}_l in m ³ /s	\dot{m}_l in kg/s	Re in -	$v_{l,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{l,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{l,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H10L050T04	2,05	0,0017	0,08	0,0058	0,0066	945	0,08	0,0063	0,0072	0,0065	-8,36%
D3L10H10L050T09	3,63	0,0028	0,13	0,0096	0,0109	1558	0,13	0,0095	0,0108	-0,0010	0,77%
D3L10H10L050T16	5,18	0,0038	0,17	0,0124	0,0140	2011	0,16	0,0120	0,0136	-0,0053	3,19%
D3L10H10L050T25	7,00	0,0049	0,20	0,0149	0,0168	2422	0,18	0,0133	0,0149	-0,0222	11,14%
D3L10H10L050T36	9,08	0,0059	0,23	0,0173	0,0193	2799	0,22	0,0168	0,0188	-0,0064	2,79%
D5L10H10L050T04	2,78	0,0037	0,11	0,0082	0,0094	1333	0,14	0,0104	0,0118	0,0288	-26,38%
D5L10H10L050T09	4,98	0,0061	0,15	0,0115	0,0130	1860	0,20	0,0149	0,0169	0,0463	-30,33%
D5L10H10L050T16	7,52	0,0085	0,18	0,0136	0,0153	2206	0,25	0,0189	0,0213	0,0710	-39,08%
D5L10H10L050T25	9,31	0,0098	0,25	0,0188	0,0209	3031	0,27	0,0200	0,0223	0,0164	-6,57%
D5L10H10L050T36	11,71	0,0115	0,31	0,0236	0,0261	3809	0,34	0,0257	0,0284	0,0275	-8,72%
D7L05H10L050T04	2,43	0,0023	0,06	0,0043	0,0049	694	0,11	0,0082	0,0093	0,0518	-91,01%
D7L05H10L050T09	3,90	0,0034	0,09	0,0065	0,0074	1057	0,15	0,0113	0,0128	0,0640	-73,63%
D7L05H10L050T16	5,58	0,0046	0,11	0,0085	0,0096	1378	0,19	0,0142	0,0160	0,0755	-66,59%
D7L05H10L050T25	7,60	0,0059	0,15	0,0110	0,0123	1776	0,23	0,0171	0,0192	0,0822	-56,18%
D7L05H10L050T36	9,21	0,0068	0,20	0,0148	0,0165	2396	0,26	0,0196	0,0218	0,0631	-31,95%

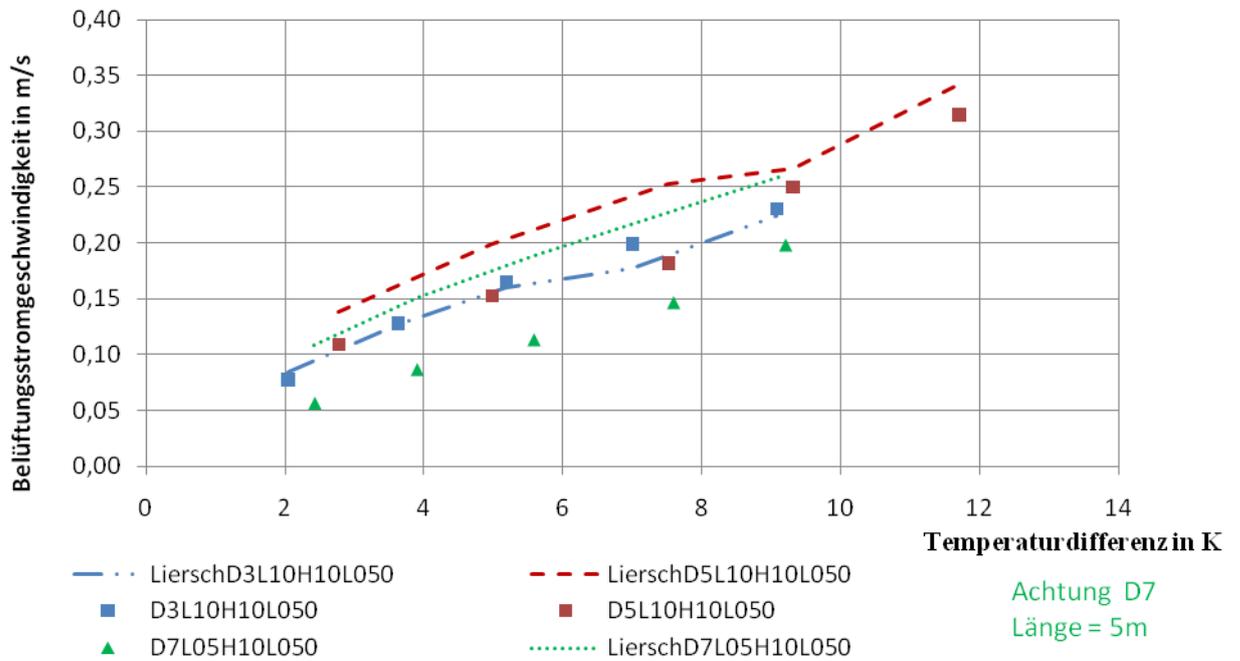


Abb. 7.9: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.4 Lüftungsöffnung 69% mit Lüftungsgitter

7.4.1 Belüftungsquerschnitt 5 cm

Der Einfluss des Lüftungsgitter scheint ebenfalls durch die Berechnungen von Liersch recht gut berechenbar zu sein. Jedoch bei einer Dachneigung von 7 Grad und einer Belüftungsöffnung von 10 cm gibt es erhebliche Differenzen.

Tab. 7.11: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{v}_1 von $\dot{v}_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{v}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H05G069T04	3,79	0,0029	0,04	0,0015	0,0017	262	0,06	0,0021	0,0024	0,0147	-36,39%
D3L10H05G069T09	6,02	0,0042	0,09	0,0033	0,0037	562	0,10	0,0036	0,0041	0,0100	-11,43%
D3L10H05G069T16	8,40	0,0054	0,13	0,0047	0,0053	807	0,13	0,0050	0,0056	0,0075	-5,96%
D3L10H05G069T25	8,84	0,0056	0,18	0,0069	0,0077	1180	0,16	0,0059	0,0066	-0,0265	14,44%
D3L10H05G069T36	11,82	0,0069	0,25	0,0094	0,0104	1616	0,20	0,0076	0,0083	-0,0501	19,90%
D5L10H05G069T04	1,98	0,0027	0,06	0,0022	0,0025	383	0,06	0,0023	0,0026	0,0019	-3,28%
D5L10H05G069T09	3,68	0,0046	0,13	0,0047	0,0053	809	0,11	0,0043	0,0048	-0,0114	9,07%
D5L10H05G069T16	7,65	0,0084	0,19	0,0073	0,0081	1249	0,19	0,0072	0,0081	-0,0012	0,64%
D5L10H05G069T25	10,24	0,0103	0,25	0,0092	0,0102	1574	0,24	0,0090	0,0100	-0,0044	1,81%
D5L10H05G069T36	14,01	0,0127	0,31	0,0117	0,0128	1990	0,30	0,0113	0,0124	-0,0081	2,60%
D7L05H05G069T04	2,48	0,0023	0,06	0,0022	0,0025	371	0,08	0,0028	0,0032	0,0182	-31,73%
D7L05H05G069T09	4,33	0,0037	0,13	0,0048	0,0055	832	0,13	0,0050	0,0057	0,0046	-3,58%
D7L05H05G069T16	9,91	0,0071	0,20	0,0073	0,0081	1257	0,23	0,0085	0,0095	0,0321	-16,41%
D7L05H05G069T25	13,70	0,0088	0,23	0,0087	0,0096	1493	0,28	0,0105	0,0115	0,0463	-19,86%
D7L05H05G069T36	18,25	0,0105	0,33	0,0122	0,0132	2086	0,35	0,0130	0,0141	0,0208	-6,37%

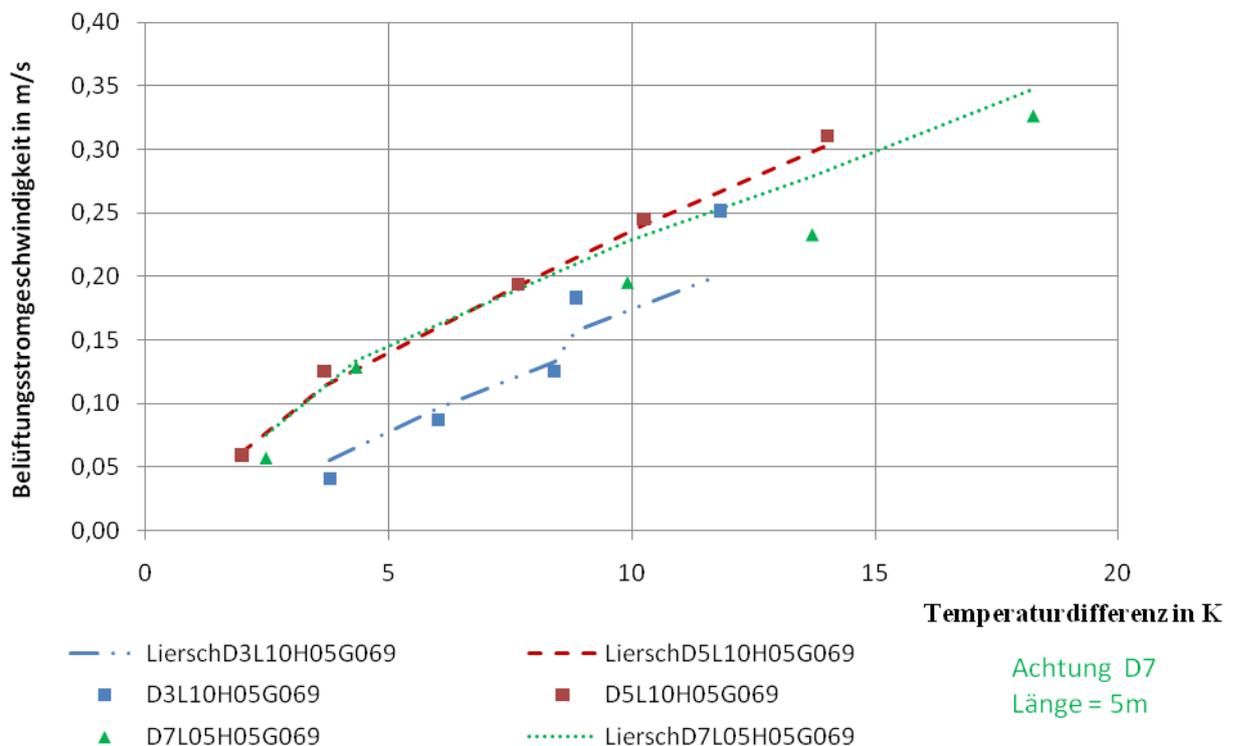


Abb. 7.10: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.4.2 Belüftungsquerschnitt 8 cm

Tab. 7.12: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{m}_1 von $\dot{m}_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H05G069T04	1,58	0,0014	0,05	0,0030	0,0034	496	0,06	0,0034	0,0039	0,0072	-14,53%
D3L10H05G069T09	3,49	0,0027	0,10	0,0063	0,0072	1047	0,11	0,0066	0,0075	0,0050	-4,73%
D3L10H05G069T16	5,30	0,0039	0,13	0,0080	0,0091	1335	0,15	0,0087	0,0099	0,0119	-8,91%
D3L10H05G069T25	6,72	0,0047	0,18	0,0107	0,0121	1783	0,18	0,0106	0,0120	-0,0015	0,86%
D3L10H05G069T36	8,92	0,0058	0,22	0,0134	0,0149	2216	0,22	0,0129	0,0144	-0,0074	3,31%
D5L10H08G069T04	2,57	0,0036	0,10	0,0063	0,0072	1053	0,12	0,0073	0,0084	0,0174	-16,62%
D5L10H08G069T09	3,78	0,0051	0,12	0,0069	0,0079	1160	0,15	0,0092	0,0105	0,0371	-32,09%
D5L10H08G069T16	8,00	0,0091	0,21	0,0128	0,0143	2121	0,26	0,0157	0,0176	0,0490	-23,05%
D5L10H08G069T25	11,35	0,0114	0,26	0,0158	0,0175	2620	0,29	0,0173	0,0192	0,0248	-9,41%
D5L10H08G069T36	15,04	0,0137	0,34	0,0206	0,0226	3403	0,39	0,0237	0,0259	0,0508	-14,77%
D7L05H08G069T04	2,61	0,0025	0,07	0,0040	0,0046	669	0,11	0,0066	0,0076	0,0438	-65,62%
D7L05H08G069T09	5,64	0,0048	0,12	0,0071	0,0080	1177	0,19	0,0113	0,0128	0,0701	-59,52%
D7L05H08G069T16	8,24	0,0065	0,17	0,0102	0,0115	1696	0,24	0,0147	0,0164	0,0741	-43,53%
D7L05H08G069T25	10,76	0,0078	0,21	0,0128	0,0142	2116	0,29	0,0174	0,0193	0,0767	-36,07%
D7L05H08G069T36	14,39	0,0094	0,29	0,0175	0,0193	2900	0,35	0,0210	0,0230	0,0571	-19,54%

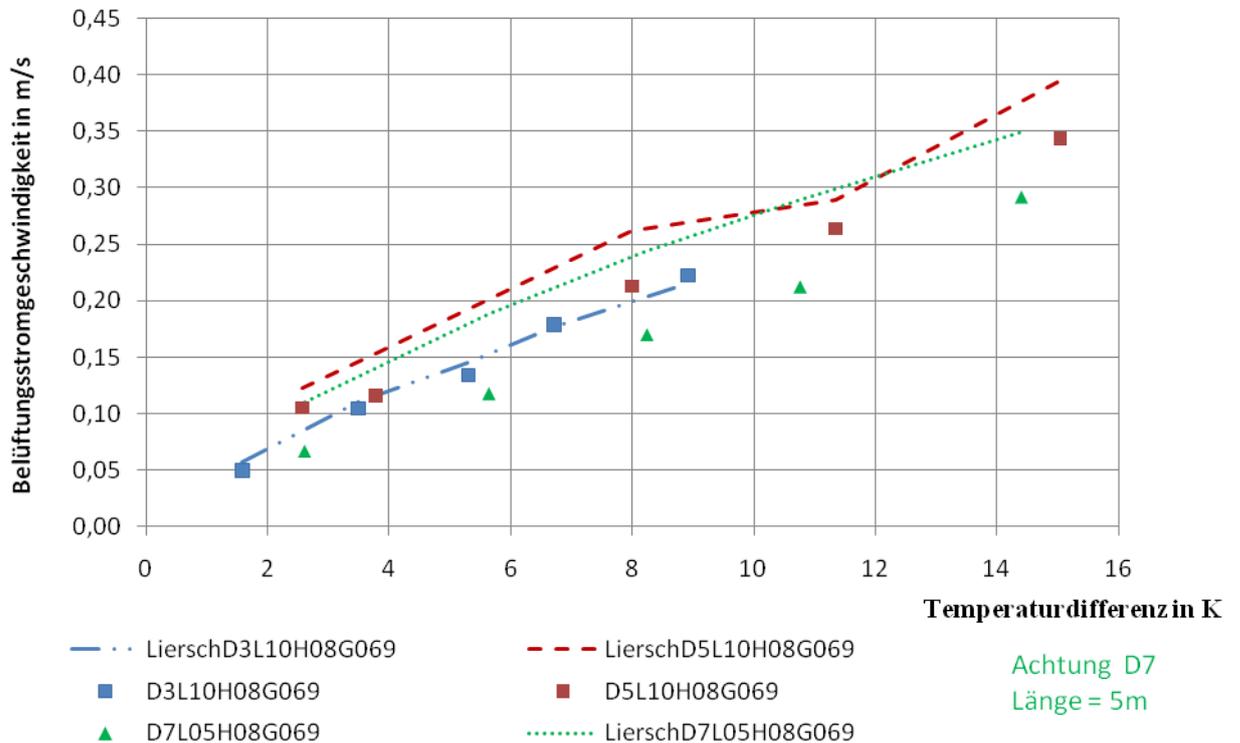


Abb. 7.11: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

7.4.3 Belüftungsquerschnitt 10 cm

Tab. 7.13: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_l von $v_{l,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_l von $v_{l,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_l in m/s	\dot{V}_l in m ³ /s	\dot{m}_l in kg/s	Re in -	$v_{l,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{l,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{l,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H10G069T04	2,00	0,0017	0,07	0,0053	0,0061	866	0,08	0,0063	0,0072	0,0126	-17,81%
D3L10H10G069T09	3,69	0,0029	0,10	0,0076	0,0087	1238	0,13	0,0094	0,0107	0,0243	-23,97%
D3L10H10G069T16	6,72	0,0047	0,16	0,0116	0,0131	1888	0,19	0,0141	0,0159	0,0335	-21,59%
D3L10H10G069T25	8,93	0,0058	0,20	0,0148	0,0166	2401	0,21	0,0157	0,0175	0,0110	-5,54%
D3L10H10G069T36	12,03	0,0071	0,22	0,0168	0,0185	2708	0,27	0,0203	0,0225	0,0478	-21,40%
D5L10H10G069T04	2,75	0,0037	0,08	0,0063	0,0072	1021	0,13	0,0100	0,0114	0,0493	-58,96%
D5L10H10G069T09	5,11	0,0063	0,12	0,0092	0,0104	1486	0,20	0,0151	0,0171	0,0791	-64,82%
D5L10H10G069T16	7,22	0,0083	0,17	0,0127	0,0142	2051	0,26	0,0193	0,0217	0,0890	-52,73%
D5L10H10G069T25	10,00	0,0103	0,29	0,0217	0,0241	3507	0,29	0,0219	0,0244	0,0029	-1,01%
D5L10H10G069T36	14,00	0,0129	0,29	0,0221	0,0243	3562	0,40	0,0297	0,0325	0,1006	-34,12%
D7L05H10G069T04	2,43	0,0023	0,06	0,0044	0,0050	709	0,11	0,0086	0,0098	0,0563	-96,67%
D7L05H10G069T09	4,39	0,0038	0,08	0,0060	0,0068	975	0,17	0,0125	0,0141	0,0859	-107,11%
D7L05H10G069T16	7,40	0,0058	0,12	0,0092	0,0104	1495	0,23	0,0176	0,0197	0,1109	-90,07%
D7L05H10G069T25	11,05	0,0078	0,17	0,0126	0,0140	2039	0,30	0,0225	0,0249	0,1314	-78,06%
D7L05H10G069T36	13,90	0,0090	0,20	0,0152	0,0167	2453	0,34	0,0258	0,0283	0,1412	-69,58%

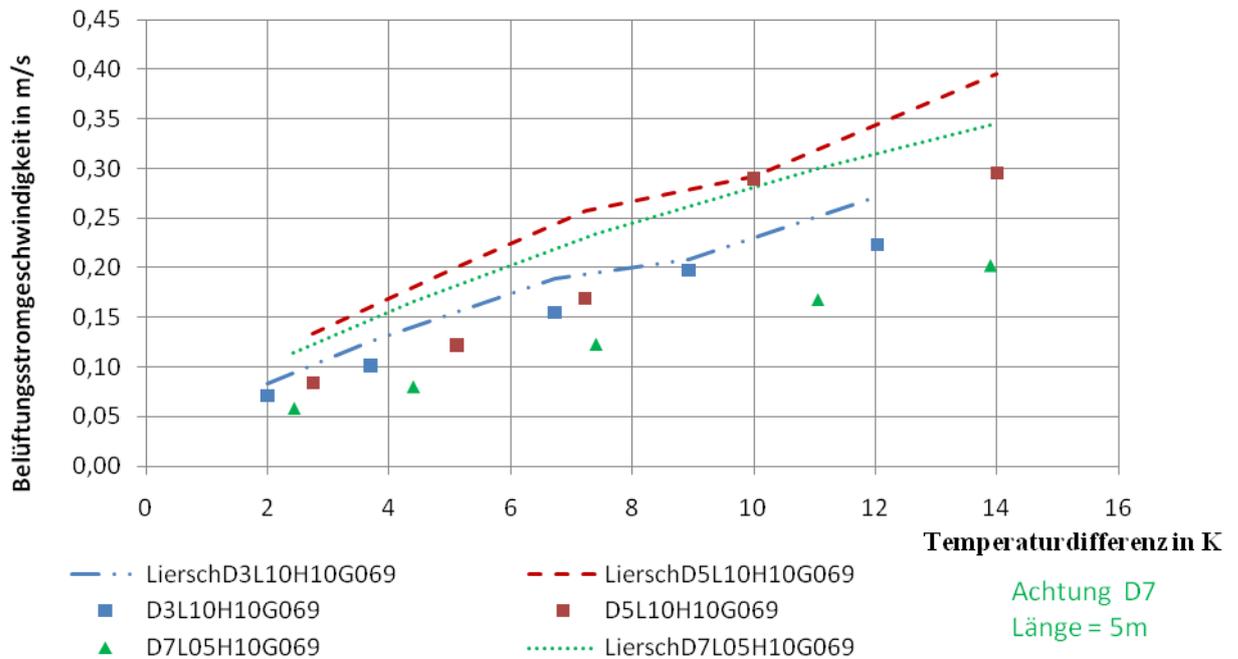


Abb. 7.12: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.5 Lüftungsöffnung 100% mit Attika

Die Ergebnisse sind wieder identisch zu den in den vorherigen Kapiteln. Jedoch zeigen die Abb. 7.13 und Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. einen sprunghaften Verlauf bei einer Dachneigung von drei Grad und einer Belüftungsquerschnittshöhe von 5 cm. Dies liegt an einem Abfall der Temperatur, bei der eine Temperaturdifferenz von 16 Grad entsteht. Im Rahmen der Versuchsreihe war es nicht mehr möglich zu klären, wie dieser Temperaturabfall zustande kam.

7.5.1 Belüftungsquerschnitt 5 cm

Tab. 7.14: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H05A100T04	6,07	0,0043	0,04	0,0016	0,0018	276	0,07	0,0025	0,0028	0,0235	-54,93%
D3L10H05A100T09	8,26	0,0054	0,10	0,0038	0,0043	662	0,11	0,0041	0,0045	0,0057	-5,56%
D3L10H05A100T16	6,57	0,0045	0,13	0,0049	0,0055	846	0,10	0,0039	0,0044	-0,0263	20,02%
D3L10H05A100T25	8,83	0,0056	0,19	0,0073	0,0081	1252	0,14	0,0051	0,0057	-0,0577	29,66%
D3L10H05A100T36	11,67	0,0068	0,24	0,0090	0,0100	1549	0,17	0,0062	0,0069	-0,0748	31,04%
D5L10H05A100T04	1,98	0,0027	0,06	0,0023	0,0026	396	0,06	0,0021	0,0024	-0,0046	7,48%
D5L10H05A100T09	4,26	0,0053	0,16	0,0061	0,0069	1046	0,12	0,0044	0,0050	-0,0449	27,77%
D5L10H05A100T16	6,00	0,0069	0,22	0,0084	0,0094	1439	0,15	0,0057	0,0064	-0,0717	32,12%
D5L10H05A100T25	8,35	0,0090	0,28	0,0106	0,0118	1819	0,19	0,0071	0,0079	-0,0933	33,01%
D5L10H05A100T36	10,21	0,0103	0,29	0,0110	0,0122	1889	0,21	0,0079	0,0088	-0,0829	28,20%
D7L05H05A100T04	2,38	0,0022	0,06	0,0024	0,0028	416	0,07	0,0025	0,0028	0,0020	-3,09%
D7L05H05A100T09	5,18	0,0043	0,17	0,0062	0,0070	1066	0,13	0,0048	0,0054	-0,0381	23,08%
D7L05H05A100T16	7,62	0,0059	0,19	0,0070	0,0079	1207	0,16	0,0059	0,0066	-0,0293	15,61%
D7L05H05A100T25	10,09	0,0072	0,26	0,0098	0,0109	1684	0,19	0,0073	0,0081	-0,0685	26,14%
D7L05H05A100T36	12,38	0,0083	0,28	0,0104	0,0115	1782	0,22	0,0081	0,0089	-0,0614	22,13%

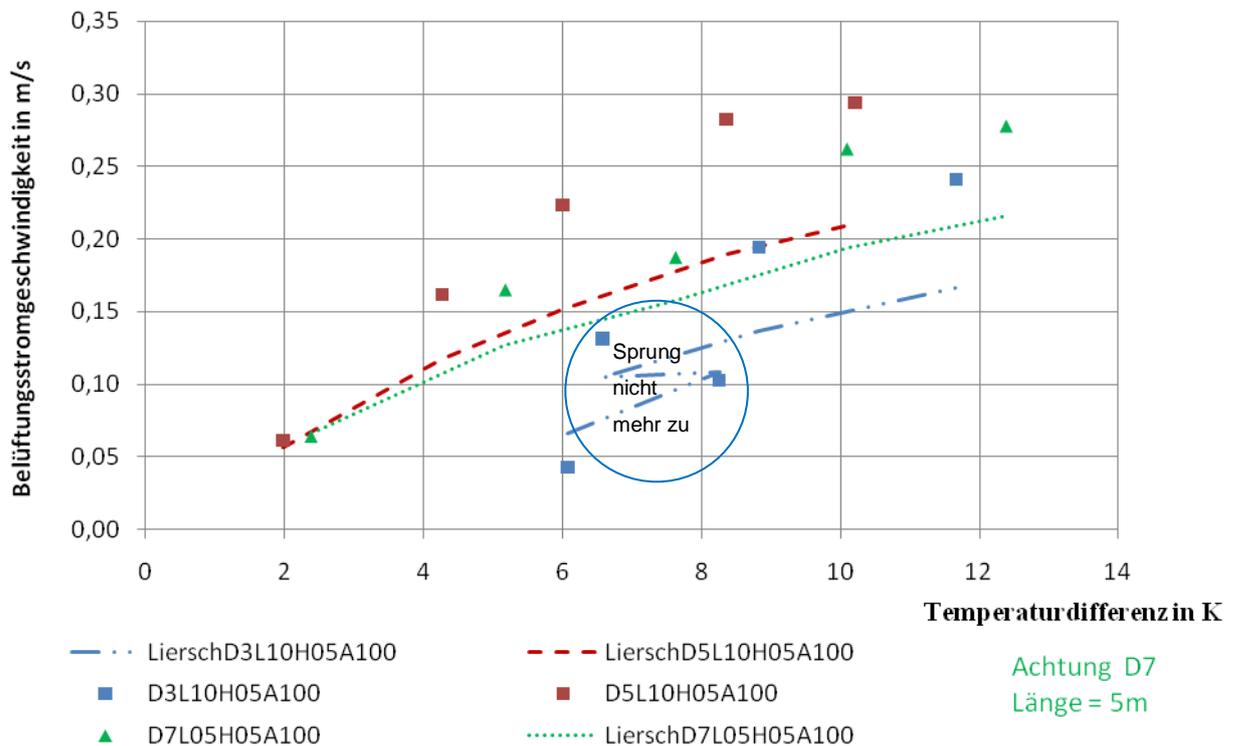


Abb. 7.13: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 5 cm

7.5.2 Belüftungsquerschnitt 8 cm

Tab. 7.15: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,m}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H08A100T04	1,52	0,0013	0,06	0,0038	0,0044	634	0,05	0,0032	0,0037	-0,0103	16,29%
D3L10H08A100T09	3,13	0,0025	0,15	0,0087	0,0099	1450	0,09	0,0056	0,0064	-0,0513	35,39%
D3L10H08A100T16	4,46	0,0033	0,16	0,0098	0,0111	1625	0,11	0,0069	0,0078	-0,0484	29,74%
D3L10H08A100T25	6,26	0,0044	0,24	0,0144	0,0162	2387	0,13	0,0080	0,0091	-0,1054	44,02%
D3L10H08A100T36	8,35	0,0055	0,27	0,0161	0,0180	2662	0,17	0,0102	0,0114	-0,0981	36,65%
D5L10H08A100T04	2,42	0,0034	0,10	0,0058	0,0067	971	0,10	0,0059	0,0067	0,0008	-0,78%
D5L10H08A100T09	5,09	0,0066	0,15	0,0087	0,0099	1461	0,16	0,0093	0,0106	-0,0096	-6,59%
D5L10H08A100T16	7,59	0,0087	0,24	0,0142	0,0159	2355	0,19	0,0115	0,0129	-0,0450	19,08%
D5L10H08A100T25	11,04	0,0113	0,31	0,0187	0,0207	3094	0,23	0,0140	0,0156	-0,0778	24,99%
D5L10H08A100T36	12,82	0,0124	0,39	0,0237	0,0261	3911	0,28	0,0171	0,0188	-0,1095	27,77%
D7L05H08A100T04	3,96	0,0035	0,09	0,0054	0,0061	897	0,12	0,0070	0,0080	0,0271	-30,20%
D7L05H08A100T09	5,89	0,0049	0,16	0,0096	0,0109	1602	0,16	0,0094	0,0106	-0,0044	2,76%
D7L05H08A100T16	7,38	0,0058	0,18	0,0107	0,0120	1776	0,18	0,0106	0,0119	-0,0013	0,72%
D7L05H08A100T25	9,07	0,0068	0,23	0,0140	0,0156	2314	0,19	0,0116	0,0129	-0,0400	17,18%
D7L05H08A100T36	11,49	0,0080	0,29	0,0172	0,0191	2848	0,23	0,0139	0,0154	-0,0554	19,33%

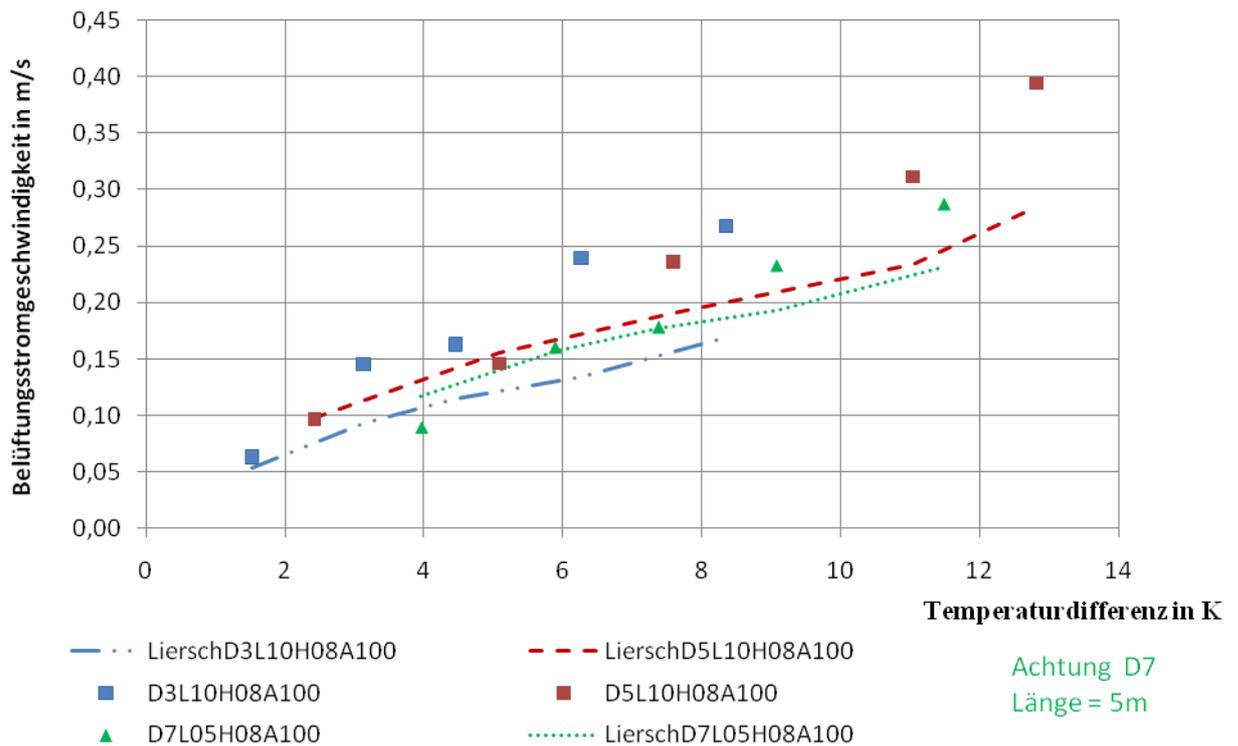


Abb. 7.14: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 8 cm

7.5.3 Belüftungsquerschnitt 10 cm

Tab. 7.16: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{m}_1 von $\dot{m}_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,sm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H10A100T04	2,40	0,0020	0,09	0,0069	0,0079	1123	0,08	0,0061	0,0070	-0,0107	11,60%
D3L10H10A100T09	4,10	0,0031	0,16	0,0117	0,0133	1898	0,12	0,0087	0,0099	-0,0393	25,21%
D3L10H10A100T16	5,53	0,0040	0,16	0,0121	0,0136	1959	0,14	0,0102	0,0115	-0,0251	15,58%
D3L10H10A100T25	7,70	0,0052	0,23	0,0171	0,0192	2778	0,16	0,0117	0,0131	-0,0724	31,70%
D3L10H10A100T36	10,82	0,0066	0,25	0,0187	0,0207	3020	0,20	0,0151	0,0167	-0,0484	19,44%
D5L10H10A100T04	2,78	0,0037	0,11	0,0086	0,0098	1396	0,12	0,0088	0,0101	0,0035	-3,07%
D5L10H10A100T09	5,14	0,0063	0,14	0,0106	0,0120	1724	0,17	0,0125	0,0141	0,0247	-17,48%
D5L10H10A100T16	8,53	0,0093	0,22	0,0162	0,0181	2625	0,21	0,0159	0,0178	-0,0043	1,99%
D5L10H10A100T25	9,32	0,0099	0,26	0,0193	0,0215	3114	0,22	0,0167	0,0187	-0,0336	13,10%
D5L10H10A100T36	13,72	0,0127	0,33	0,0249	0,0273	4001	0,30	0,0225	0,0247	-0,0311	9,39%
D7L05H10A100T04	3,15	0,0028	0,06	0,0048	0,0055	778	0,11	0,0079	0,0090	0,0413	-64,69%
D7L05H10A100T09	4,74	0,0040	0,11	0,0083	0,0094	1344	0,14	0,0105	0,0119	0,0299	-27,06%
D7L05H10A100T16	6,82	0,0054	0,14	0,0109	0,0122	1757	0,17	0,0130	0,0146	0,0289	-19,98%
D7L05H10A100T25	8,90	0,0066	0,19	0,0144	0,0161	2331	0,20	0,0147	0,0164	0,0037	-1,94%
D7L05H10A100T36	11,30	0,0079	0,21	0,0157	0,0173	2529	0,23	0,0173	0,0192	0,0218	-10,45%

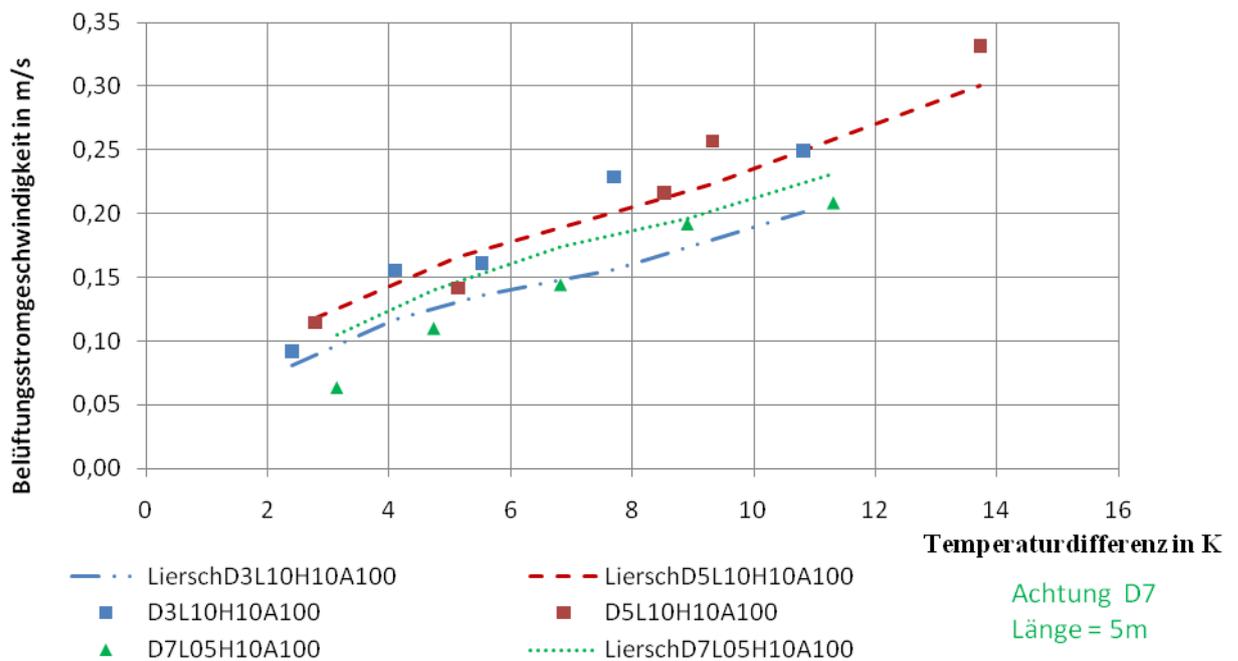


Abb. 7.15: Belüftungsstromgeschwindigkeit bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

7.6 Lüftungsöffnung 50% mit Attika

Bei der Ausbildung der Lüftungsöffnung mit einer Attika und einer Verkleinerung der Öffnung um 50% wurden nur Messungen bei einer Temperaturdifferenz von 25 Grad durchgeführt. Im Nachfolgenden werden diese Ergebnisse den bei einer Attika mit 100% Öffnung gegenübergestellt.

7.6.1 Belüftungsquerschnitt 5 cm

Tab. 7.17: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 5 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{m}_1 von $\dot{m}_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H05A100T25	8,83	0,0056	0,19	0,0073	0,0081	1252	0,14	0,0051	0,0057	-0,0572	29,43%
D3L10H05A050T25	8,98	0,0057	0,20	0,0074	0,0083	1275	0,13	0,0049	0,0055	-0,0665	33,59%
D5L10H05A100T25	8,35	0,0090	0,28	0,0106	0,0118	1819	0,19	0,0071	0,0079	-0,0933	33,01%
D5L10H05A050T25	8,40	0,0090	0,22	0,0081	0,0090	1388	0,17	0,0063	0,0070	-0,0481	22,32%
D7L05H05A100T25	10,09	0,0072	0,26	0,0098	0,0109	1684	0,19	0,0073	0,0081	-0,0685	26,14%
D7L05H05A050T25	10,23	0,0073	0,21	0,0077	0,0086	1322	0,17	0,0065	0,0072	-0,0325	15,82%

7.6.2 Belüftungsquerschnitt 8 cm

Tab. 7.18: Ergebnisse bei einer Höhe von 8 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{m}_1 von $\dot{m}_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H08A100T25	6,26	0,0044	0,24	0,0144	0,0162	2387	0,13	0,0081	0,0091	-0,1050	43,84%
D3L10H08A050T25	7,20	0,0049	0,20	0,0117	0,0132	1948	0,14	0,0083	0,0094	-0,0568	29,00%
D5L10H08A100T25	11,04	0,0113	0,31	0,0187	0,0207	3094	0,23	0,0140	0,0156	-0,0778	24,99%
D5L10H08A050T25	9,45	0,0101	0,26	0,0154	0,0172	2555	0,21	0,0128	0,0143	-0,0439	17,10%
D7L05H08A100T25	9,07	0,0068	0,23	0,0140	0,0156	2314	0,19	0,0116	0,0129	-0,0400	17,18%
D7L05H08A050T25	10,52	0,0075	0,20	0,0122	0,0136	2026	0,20	0,0117	0,0130	-0,0087	4,28%

7.6.3 Belüftungsquerschnitt 10 cm

Tab. 7.19: Ergebnisse bei einer Querschnittshöhe von 10 cm

Variantenkennung	Messergebnisse					Berechnungen nach Liersch				Abweichung v_1 von $v_{1,Liersch}$ in m/s	Abweichung \dot{m}_1 von $\dot{m}_{1,Liersch}$ in %
	$\Delta T_{R,tm}$ in K	Δp in N/m ²	v_1 in m/s	\dot{V}_1 in m ³ /s	\dot{m}_1 in kg/s	Re in -	$v_{1,Liersch}$ in m/s	$\dot{V}_{1,Liersch}$ in m ³ /s	$\dot{m}_{1,Liersch}$ in kg/s		
D3L10H10A100T25	7,70	0,0052	0,23	0,0171	0,0192	2778	0,16	0,0117	0,0132	-0,0719	31,48%
D3L10H10A050T25	8,22	0,0054	0,19	0,0139	0,0156	2256	0,16	0,0116	0,0130	-0,0307	16,50%
D5L10H10A100T25	9,32	0,0099	0,26	0,0193	0,0215	3114	0,22	0,0167	0,0187	-0,0336	13,10%
D5L10H10A050T25	9,27	0,0098	0,23	0,0175	0,0195	2827	0,22	0,0163	0,0182	-0,0156	6,67%
D7L05H10A100T25	8,90	0,0066	0,19	0,0144	0,0161	2331	0,20	0,0147	0,0164	0,0037	-1,94%
D7L05H10A050T25	10,23	0,0073	0,17	0,0128	0,0142	2070	0,20	0,0147	0,0163	0,0250	-14,60%

8 Erkenntnisse und Ausblick

Die Auswertung der Masterthesis hat gezeigt, dass die Belüftungsstromgeschwindigkeit nach der Berechnungsart von Liersch recht genau berechnet werden kann. In bestimmten Temperaturbereichen kam es zu Abweichungen von bis zu 30%, daher wäre es zu empfehlen, einen Sicherheitsfaktor einzuführen. Dies wäre vor allem bei der Berechnung der Masse an sekundärem Tauwasser, welche durch den Luftvolumenstrom in diese Konstruktion eingetragen wird, zu empfehlen. Die Messergebnisse haben gezeigt, dass ein Sicherheitsfaktor von 1,4 ausreichend ist. Für eine genauere Bestimmung des Sicherheitsfaktors sind jedoch weitere Untersuchungen und Simulationen notwendig.

Nachfolgende Untersuchungen sollten sich differenzierter mit den äußeren Einflüssen auf den Luftvolumenstrom, die aus zeitlichen Gründen im Rahmen dieser Masterthesis nicht näher untersucht wurden, beschäftigen. Zu den äußeren Einflüssen gehören z.B. Einwirkungen wie Wind, Schatten und negative Temperaturen.

Normen und Richtlinien

- [N.1] STANDARD, ÖNORM B 2220, 1996-06-01: Schwarzdeckerarbeiten - Dachdeckungs- und Dachabdichtungsarbeiten mit Bitumen- und Kunststoffdachbahnen - Werkvertragsnorm.
- [N.2] Deutsches Dachdeckerhandwerk: Regeln für Abdichtungen ; mit Flachdachrichtlinie. 4., überarbeitete Auflage, Stand: Oktober 2008. (2008). Köln: Müller.
- [N.3] SIA 271, 2007-06: Abdichtungen für Hochbauten.
- [N.4] ÖNORM B 7220, 2002-07-01: Dächer mit Abdichtung - Verfahrensnorm.
- [N.5] ÖNORM B 7215, 2000-11-01: Zimmererarbeiten und Holzbauarbeiten - Verfahrensnorm. [Ersatz durch folgende Normen ÖNORM B 2215 (2009 07 15)]
- [N.6] DIN 4108-3, 2001-7: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

Literaturverzeichnis

- [L.1] Künzel, Helmut (2002): Bauphysik. Geschichte und Geschichten ; Teil I: Baustoffe, Baukonstruktionen und Bauforschung im 20. Jahrhundert ; Teil II: Bauphysik-Geschichten. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- [L.2] Künzel, Helmut (1996): Dachdeckung und Dachbelüftung Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- [L.3] Liersch, Klaus w. (1986): Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen. Wiesbaden Berlin: Bauverlag.
- [L.4] Liersch, Klaus w. (1986): Dächer. Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. 4 Bände. Wiesbaden Berlin: Bauverlag, 1986 (Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen, 3).
- [L.5] Bruno, Eck (1987): Grundlagen. 2 Bände. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag (Technische Strömungslehre, 1)
- [L.6] Brandi, O. H. (1963): Eternit Handbuch. Kanäle für Lüftung, Klima, Abgas: Bauverlag GmbH; Wiesbaden.
- [L.7] Informationsdienst Holz. (2008): Spezial, Flachdächer in Holzbauweise HOLZABSATZFONDS; Bonn.