

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Räumliche Erfassung der Verdünnung von Brandrauch, Gasen und Dämpfen bei Brandsimulationen in unterschiedlichen Modellmaßstäben

von B.Eng. Mary Weigand
und Dipl.-Ing. Dieter Brein

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

170

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 170

Räumliche Erfassung der Verdünnung von Brandrauch, Gasen und Dämpfen bei Brandsimulationen in unterschiedlichen Modellmaßstäben

von

B.Eng. Mary Weigand und Dipl.-Ing. Dieter Brein

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Dezember 2012

BERICHTSKENNBLATT

Nummer des Berichtes: 170	Titel des Berichtes: Räumliche Erfassung der Verdünnung von Brandrauch, Gasen und Dämpfen bei Brandsimulationen in unterschiedlichen Modellmaßstäben		ISSN: 0170-0060
Autoren: B.Eng. Mary Weigand und Dipl.-Ing. Dieter Brein		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 219 (4/2011)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: Dezember 2012			
Seitenzahl: 70	Bilder: 46	Tabellen: 3	Literaturverweise: 15
Kurzfassung: <p>Es wurde ein neues optisches Messsystem auf der Basis von Laserlicht entwickelt. Das Messsystem bietet unter anderem die Möglichkeit, unter der Verwendung von Ersatzgasen einschließlich Nebelpartikeln bei Strömungssimulationen in unterschiedlichen geometrischen Maßstäben eine Bewertung der Bewegung und Verdünnung zum Beispiel brennbarer Gase durchzuführen.</p> <p>Die in diesem Bericht beschriebene Methode zur Auswertung der Ergebnisse beruht auf dem Prinzip der Transmissionsmessung. Dazu wurde in einen Ersatzstoff ein sogenannter Tracer eingebracht. Durch diesen kann der Strömungsverlauf sichtbar gemacht werden und letztlich eine optische Dichtemessung über den Transmissionsverlauf hergeleitet werden. Die Bestimmung der Gaskonzentration ergibt sich durch Umrechnung aus der optischen Dichte. Der verwendete Ersatzstoff ist dann – unabhängig vom angewendeten Messverfahren hinsichtlich seiner Eigenschaften entsprechend den Gesetzen der physikalischen Ähnlichkeit auszuwählen.</p> <p>Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Lasermessstrecke mit einer Photodiode in Sperrrichtung kann innerhalb der Fehlergrenzen zum Messen verwendet werden. Um die Abweichungen zum Maurer Messgerät zu kompensieren, wurden eine lineare und eine kubische Korrekturgleichung berechnet. • Die Lasermessstrecke mit einer Photodiode in Durchlassrichtung hat sich in dieser Arbeit als nicht geeignet herausgestellt. Der Grund sind herstellungsbedingte Schwankungen der Photodiode und damit ein nicht linearer Verlauf in Durchlassbetrieb. • Über Folienmessungen wurde festgestellt, dass der gemessene Transmissionswert bei der Lasermethode von der Position der optischen Trübung in der Messstrecke abhängt. Die größte Messgenauigkeit liegt in der Mitte der Messstrecke. • Im theoretischen Abschnitt wird die Abhängigkeit der Konzentration von einer Intensitätsmessung beschrieben. Dafür wurde der Extinktionskoeffizient für Wassertröpfchen berechnet. 			
Schlagwörter: Brandrauch, Modelluntersuchungen, Messverfahren, Verdünnung.			

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS I

TABELLENVERZEICHNIS III

1.	VORWORT	1
2.	MESSMETHODEN ZUR BESTIMMUNG DER GASKONZENTRATION	3
2.1.	Gassensoren	3
2.2.	Ersatzmessungen	3
2.3.	Disconebel als Tracer	4
2.3.1.	Eigenschaften von Nebelfluid	5
2.3.2.	Nebel als Tracer für leichte Gase	5
2.3.3.	Nebel als Tracer für schwere Gase	7
2.3.4.	Standzeit von Disconebel	8
2.4.	Grundlagen der optischen Dichtemessung	10
2.4.1.	Rauchdichtemessgerät Maurer ME 82	11
2.4.2.	Eigenschaften von Rauch	11
2.4.3.	Lambert-Béer Gesetz	12
2.4.4.	Streuung von Licht	13
2.4.5.	Komplexer Brechungsindex	13
2.4.6.	Berechnung des spezifischen Extinktionskoeffizienten von Nebel	15
2.4.7.	Berechnung der Nebelkonzentration	17
2.5.	Laserdiode	18
2.5.1.	Physikalische Grundlagen der Laserdiode	18
2.5.2.	Die Laserdiode innerhalb des Messsystems	19
2.6.	Photodiode	20
2.6.1.	Physikalische Grundlagen der Photodiode	20
2.6.2.	Die Photodiode innerhalb des Messsystems	21
2.6.3.	Ersatzschaltbild der Photodiode	22
2.6.4.	Kennlinie der Photodiode	23
2.6.5.	Schaltung der Photodiode	24
2.7.	PC – Messsystem	26
2.7.1.	DAQ – Modul	26
2.7.2.	Steuersoftware des Messsystems	27

3.	VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG	29
3.1.	Lasermessstrecke	29
3.1.1.	Zulässige Modifikationen der mechanischen Fixierung von Sender und Empfänger	30
3.2.	Maurer Rauchdichtemessgerät	31
3.3.	Abhängigkeit der Laserintensität von der Betriebsspannung	33
3.4.	Vergleichsmessungen mit Folie	34
3.5.	Vergleichsmessungen mit Nebel	35
3.6.	Messung der Nebelstandzeit	37
3.7.	Messung der Nebelablagerung	39
4.	MESSUNGEN UND AUSWERTUNG	40
4.1.	Abhängigkeit der Laserintensität von der Spannung	40
4.2.	Vergleichsmessungen mit Folie	42
4.3.	Vergleichsmessungen mit Nebel	49
4.4.	Messung der Nebelstandzeit	56
4.5.	Messung der Nebelablagerung	58
5.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	60
6.	LITERATURVERZEICHNIS	61

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Sedimentationsgeschwindigkeit der Inhaltsstoffe von handelsüblichem Disconeel als Funktion der Partikelgröße	9
Abbildung 2: komplexer Brechungsindex von Wasser für die Wellenlänge von 10nm bis 10m (Segelstein (1981))	15
Abbildung 3: Extinktionsquerschnitt für Wassertröpfchen als Funktion der Wellenlänge bei zunehmenden Partikeldurchmessern (Quelle: Michel (2007), mit Beschriftungen nachbearbeitet)	17
Abbildung 4: Konzentration von Wassertröpfchen als Funktion der Transmission bei verschiedenen Partikeldurchmessern	17
Abbildung 5: Verwendete Laserdiode SL8-650-05-D im Messsystem (Quelle:Profi Laser Pointer Shop (2008))	20
Abbildung 6: Verwendete Photodiode OSD 15-5T im Messsystem	21
Abbildung 7: Spektrale Empfindlichkeit der Photodiode (Quelle: Centronic (2008a), mit deutscher Achsenbeschriftung nachbearbeitet)	22
Abbildung 8: Ersatzschaltbild der Photodiode (Quelle: Centronic (2008b))	23
Abbildung 9: Kennlinie der Photodiode (Quelle: Centronic (2008b), mit deutscher Achsenbeschriftung nachbearbeitet)	24
Abbildung 10: Schaltbild der Photodiode in Durchlassrichtung (Quelle: Centronic (2008b))	25
Abbildung 11. Schaltbild 1 der Photodiode in Sperrrichtung (Quelle: Centronic (2008b))	26
Abbildung 12: Schaltbild 2 der Photodiode in Sperrrichtung (Quelle: Centronic (2008b))	26
Abbildung 13: DASyLab Arbeitsoberfläche als Screenshot	27
Abbildung 14: Grundaufbau der Lasermesstrecke in Frontansicht	30
Abbildung 15: Grundaufbau der Lasermesstrecke in Frontansicht	30
Abbildung 16: Grundaufbau des Maurer ME 82 Rauchdichtemessgeräts	32
Abbildung 17: Foto zum Grundaufbau des Maurer ME 82 Rauchdichtemessgeräts und zweier Lasermesstrecken	32
Abbildung 18: Versuchsaufbau zur Messung der Laserintensität mit Conrad Luxmeter	33
Abbildung 19: Versuchsaufbau zur Messung der Laserintensität mit Photodiode	33
Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Messung mit Folien	34

Abbildung 21: Foto zum Versuchsaufbau zur Messung mit Folien	35
Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Messung mit Nebel	36
Abbildung 23: Foto zum Versuchsaufbau zur Messung mit Nebel	37
Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Messung der Nebelstandzeit	38
Abbildung 25: Foto zum Versuchsaufbau zur Messung der Nebelstandzeit	38
Abbildung 26: Versuchsaufbau zur Messung der Nebelablagerung an Plexiglas	39
Abbildung 27: Messung der Laserintensität mit Conrad Luxmeter	40
Abbildung 28: Messung der Laserintensität mit Photodiode in Sperrrichtung	41
Abbildung 29: Messung der Laserintensität mit Photodiode in Durchlassrichtung	41
Abbildung 30: Transmission in Abhängigkeit von der Position für 1 Folie	43
Abbildung 31: Transmission in Abhängigkeit von der Position für 2 Folien	43
Abbildung 32: Transmission in Anhängigkeit von der Position für 3 Folien	44
Abbildung 33: Transmission in Abhängigkeit von der Position für 4 Folien	44
Abbildung 34: Absorption von Folien bei 7 cm	45
Abbildung 35: Absorption von Folien als Mittelwert	47
Abbildung 36: Absorption von Folien mit berechneter Lambert-Béer Funktion	48
Abbildung 37: Messung der Nebeldichte Vergleich 1	50
Abbildung 38: Messung der Nebeldichte Vergleich 2	50
Abbildung 39: Messung der Nebeldichte Vergleich 3	51
Abbildung 40: Messung der Nebeldichte Vergleich 4	52
Abbildung 41: Messung der Nebeldichte Vergleich 5	52
Abbildung 42: Abweichung von Maurer ME 82 und Diode in Sperrrichtung bei Nebeldichte Vergleich 1	54
Abbildung 43: Vergleich der linearen Korrekturfunktionen für die Nebelmessungen 1 bis 5	55
Abbildung 44: Vergleich der kubischen Korrekturfunktionen für die Nebelmessungen 1 bis 5	56
Abbildung 45: Messung der Nebelstandzeit	57
Abbildung 46: Messung der Nebelablagerung an Plexiglas	58

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der Inhaltsstoffe von Nebelfluid bei 20°C (Weast(1989), Pea Soup (2010))	5
Tabelle 2: Beschreibung und verwendete Daten für MieCalc	16
Tabelle 3: Messwerte zur Nebelablagerung an Plexiglas	58

1. Vorwort

Die Erfassung von Strömungen und Verdünnungen von Schadstoffen in Räumen im Real- und Modellmaßstab ist eine ständige Messaufgabe und wird an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik (FFB) durchgeführt.

Rauchdichtemessungen mit professionellen Rauchdichtemessgeräten gehören zum langjährigen Standard bei der Bewertung von Brandabläufen in Forschung und Materialprüfung. Diese Geräte sind in geringer Stückzahl auch an der FFB vorhanden, jedoch im rauen Versuchsbetrieb eingesetzt und sowohl wegen ihrer Abmessungen als auch der durch das Messsystem erzeugten Abwärme und der hierdurch hervorgerufenen Veränderungen im Strömungsfeld für die Durchführung von Modelluntersuchungen nicht geeignet. Aus Kostengründen ist darüber hinaus eine Verwendung einer hinreichenden Zahl derartiger Geräte zur Erfassung realer Rauchdichteverteilungen bei Realmaßstabsversuchen nicht möglich.

Die Bewertung des Strömungsverhaltens nach Freisetzungen von Brandrauch, Gasen und von Dämpfen in Räumen kann allgemein sowohl durch Brandsimulationsrechnungen als auch durch Untersuchungen in verschiedenen Modellmaßstäben vertieft werden.

Klassische Beispiele sind Untersuchungen der Auswirkung von Brandentwicklungen in geometrisch nicht einfachen Raumgeometrien auf die Strömung und Verdünnung im Raum. Eine andere Anwendung ist zum Beispiel der Einsatz von Strömungssimulationen in verkleinertem Maßstab (Modelluntersuchungen) zur Auswirkung der Leckage von brennbaren Gasen bei Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben auf die zeitliche und örtliche Verteilung explosionsfähiger Atmosphären in geschlossenen Tiefgaragen. Die letztgenannte Anwendung wird in einem weiteren Forschungsprojekt der Forschungsstelle für Brandschutztechnik näher untersucht. Diese Gase sind entweder deutlich leichter als Luft (Wasserstoff, Erdgas) oder deutlich schwerer als Luft (Autogas, d.h. ein Gemisch aus im Wesentlichen Propan und Butan), woraus sich unterschiedliche strömungstechnische Voraussetzungen für eine Verdünnung/ Abführung dieser Gase im Gemisch mit Luft ergeben.

Bei derartigen Strömungsuntersuchungen kann die Bewertung der qualitativ beobachtbaren Strömungsvorgänge durch räumliche messtechnische Erfassung mit hoher Messfühlerdichte verbessert werden.

Die Auswirkung der Parametervariation von Lüftung, Leckage und mit Modellgas auf die Ausbreitungsvorgänge der mit Partikeln visualisierten Strömung kann mittels eines Systems von Rauchdichtemessstrecken messtechnisch erfasst werden, wenn an einer Stelle des

Raumes ein Konzentrations-Vergleichswert vorliegt. Hierzu wurde ein mit Lasern als Lichtquelle arbeitendes, kostengünstiges Messsystem aufgebaut, erprobt und in dem aus dem oben genannten Forschungsprojekt Risikoermittlung bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen in Garagen – Konsequenz für Lüftungsanlagen (Brein et al. in Vorbereitung) vorhandenen Modell (1:18) einer Tiefgarage daraufhin untersucht, inwieweit eine Verbesserung der Aussagen über Strömungspfade und Verdünnung möglich ist.

Das Ergebnis des Projekts ist ein Messsystem (Orth), das einen hohen Detaillierungsgrad bei der messtechnischen Erfassung von sichtbar gemachten Strömungen in Gebäuden erlaubt. Mit den so erfassten Messwerten ist es möglich, bei Modelluntersuchungen von Strömungen in Räumen nicht nur die Bewertung von Gefährdungspotentialen zu verbessern, sondern auch Daten für die Validierung von Rechenverfahren (z.B. von Feldmodellen) zu liefern.

2. Messmethoden zur Bestimmung der Gaskonzentration

Nachstehend werden Methoden zur Bestimmung der Gaskonzentration beschrieben, wobei diese unter anderem auch auf ihre Eignung hin beleuchtet werden, die im Forschungsprojekt Risikoermittlung bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen in Garagen – Konsequenz für Lüftungsanlagen (Brein et al. in Vorbereitung) genannte Fragestellung zu bearbeiten. In diesem Fall muss das Strömungsfeld von Gasen, die im Havariefall in der Tiefgarage austreten, gemessen werden können. Dafür gibt es mehrere Methoden. Folgende (2.1 und 2.2) werden hier genannt wobei nur auf die Ersatzgasmessung detaillierter eingegangen wird.

2.1. Gassensoren

Zum einen kann mittels Gaswarngeräten die absolute Gaskonzentration an einer bestimmten Stelle gemessen werden. Abhängig von der Gasart und der Konzentration, gibt es verschiedene Möglichkeiten das Gas zu detektieren. Hierbei kommen vor allem elektronische, optische oder thermische Methoden zum Einsatz. Anschließend wird das Messergebnis in ein verwertbares elektronisches Signal umgewandelt. Die Verwendung solcher Sensoren scheitert allerdings am Aufwand und an den Kosten der zu beschaffenden Messgeräte. Für die Anwendung bei Modelluntersuchungen wäre darüber hinaus zu klären, inwieweit diese Sensoren in hinreichend miniaturisierter Form zur Verfügung stehen um eine Beeinflussung des Strömungsfeldes zu vermeiden.

2.2. Ersatzmessungen

Die Ersatzmessung stellt in diesem Fall eine weitaus effektivere und günstigere Variante dar, bei der das Gas durch einen Ersatzstoff simuliert wird. Dies hat den Vorteil, dass speziell auf brennbare Gase verzichtet werden kann und damit die Gefährdung beim Versuch minimiert wird.

Zusätzlich lassen sich sogenannte Tracer in den Ersatzstoff einbringen, wodurch der Strömungsverlauf optisch sichtbar gemacht werden kann. Mit dieser Voraussetzung lassen sich weitere Messgrößen, wie beispielsweise eine optische Dichte über den Transmissionsverlauf herleiten.

Dabei steht die optische Dichte für eine Ersatzgröße, von der letztlich auf die Gaskonzentration geschlossen werden kann.

Im nächsten Schritt kann daraus auf das Gefahrenpotential des Gases geschlossen werden. Bei dieser Messvariante ist es allerdings wichtig, die physikalischen Eigenschaften des Ersatzstoffes möglichst dicht an die des eigentlichen Gases heranzubringen. In den durchgeführten Versuchen am Tiefgaragenmodell hat man sich für eine optische Transmissionsmes-

sung entschieden. Die frei werdenden Gase werden dabei durch Luft ersetzt, welche mit handelsüblichem Disconebl getracert sind.

Die unterschiedlichen Dichteverhältnisse zwischen Umgebungsluft und Ersatzgas werden dabei über die Temperatur erzeugt.

Bei Temperaturen $>$ Umgebungstemperatur (Standardbedingungen $T=20^{\circ}\text{C}$) strömt die Luft samt Nebel nach oben und sammelt sich im Bereich der Garagendecke. Im Gegensatz dazu setzt sich bei Raumtemperatur schweres Gas mit dem vorher eingemischten Nebel ab und verteilt sich zunächst am Garagenboden, bevor durch externe Querströmungen und Diffusionsvorgänge die Vermischung mit Umgebungsluft erfolgt. Inwiefern sich von der relativen Dichte des Gases (z.B. Methan) auf die notwendige Temperatur der Luft schließen lässt, ist zum Beispiel in Steinert (1999) oder Seeger (1970) im Hinblick auf die Anwendung physikalischer Ähnlichkeitsgesetze bei Modelluntersuchungen beschrieben.

Den Übergang von einer Transmissionsmessung zu einem Gefahrenpotential durch Gas erreicht man durch eine relative Messung. Angenommen an der Austrittsstelle wird die Nebelkonzentration c_0 gemessen und im Abstand x die Nebelkonzentration $c(x)$. Dann ergibt sich die entsprechende Abnahme der Gaskonzentration aus dem Verhältniswert $\frac{c(x)}{c_0}$. Aufgrund der vorherrschenden physikalischen Ähnlichkeiten wird erwartet, dass sich die mit Nebel (sehr kleine Tropfen) getracerte Luft genauso ausbreitet wie das Gas. Entsprechend lassen sich deshalb Rückschlüsse auf die vorliegende Gaskonzentration ziehen.

Die Aufgabe ist es eine optische Messmethode zu entwickeln, bei der die Transmissionswerte erfasst werden, um daraus die Nebelkonzentration zu berechnen. Demnach besteht der Aufbau aus einem Lichtgeber und einem Empfänger, dazwischen wird die Lichtintensität am Empfänger gemessen. Für den Empfänger wird eine normale Photodiode eingesetzt und als Lichtgeber dient Laserlicht.

2.3. Disconebl als Tracer

Wie oben bereits erwähnt, werden bei den Modellversuchen, um auf brennbares Gas zu verzichten, die verschiedenen Gase durch Ersatzgase nachgestellt. Für Erdgas ist das Ersatzgas erwärmte Luft; für Autogas wird als Ersatzgas CO_2 verwendet. Der Strömungsweg wird dabei durch die Zugabe von Disconebl als Tracermaterial sichtbar gemacht. Dies ermöglicht eine Dichtemessung nach dem Extinktionsprinzip.

2.3.1. Eigenschaften von Nebelfluid

Bei Nebelfluid handelt es sich um eine Mischung von Glykolen und Wasser. Abhängig von der Konzentration der Glykole, kann so die Nebeldichte verändert werden. Dazu kommen meist weitere Stoffe, welche die Standzeit des Nebels verlängern. Auch wenn die genaue Zusammensetzung von Produkt zu Produkt variiert, so beschränken sich die wesentlichen Inhaltsstoffe nach Meier (2010) auf 1,2-Propylenglykol, Triethylenglykol und destilliertes Wasser. Im Zusammenhang mit der Dichtemessung soll daher nur von diesen drei Inhaltsstoffen ausgegangen werden. Zur Aufbereitung des Nebelfluids wird in den durchgeführten Versuchen eine handelsübliche Nebelmaschine verwendet. Darin wird das Nebelfluid mittels Pumpe in ein ca. 300°C heißes Heizelement gepumpt. Dort verdampft Nebelfluid und wird über den entstehenden Druck in kleinsten Tröpfchen ausgestoßen. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht zu den Inhaltsstoffen von Nebelfluid.

Stoff	1,2-Propylenglykol	Triethylenglykol	Wasser
Chemische Formel	C ₃ H ₈ O ₂	C ₆ H ₁₄ O ₄	H ₂ O
Brechungsindex	1,4324	1,4531	1,333
Dichte in g/cm ³	1,0361	1,1274	1,003
Tröpfchendurchmesser	1 bis 10 µm		

Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften der Inhaltsstoffe von Nebelfluid bei 20°C (Weast(1989), Pea Soup (2010))

2.3.2. Nebel als Tracer für leichte Gase

Die Verwendung von erwärmter Luft mit Nebel als Tracermaterial wird als Näherung für ein leichtes Brenngas angesehen. Dabei wird in Kauf genommen, dass die verwendeten Gase nicht streng dem Idealen Gasgesetz folgen und sich hieraus geringe Fehler in der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Gase einstellen können. Außerdem entsteht durch die Vermischung der warmen Luft mit kalter Umgebungsluft sowie Abgabe von Wärme dieser Strömung an die Decke des Raums und die Wände ein geringer Wärmeverlust. Dieser Verlust tritt mit Ausnahme möglicher Ablagerungen von Gasmolekülen an Oberflächenrauigkeiten realer Wände/ Decken bei der Vermischung der Brenngase mit Umgebungsluft nicht auf.

Innerhalb entsprechender Fehlergrenzen ist es trotzdem möglich, das Strömungsverhalten von warmer Luft in einem Bereich anzunähern. Entscheidend für den Auftrieb ist das Dichteverhältnis der eingesetzten Gase.

Als Ansatz wählt man den Quotienten aus der Dichte des Ersatzgases ρ_E und der Dichte der Umgebungsluft ρ_L . Die Dichte des Ersatzgases ist dabei die warme Luft, welche mit Nebel versetzt wird. Außerdem wird beim Austreten aus der Quelle Umgebungsluft mitgerissen.

Bewegt sich dieser Quotient im Grenzbereich der relativen Dichte des zu ersetzenden Gases, so werden die Strömungsprofile ähnlich verlaufen.

$$\frac{\rho_E}{\rho_L} \approx k_{\text{grenz}} \quad (2.1)$$

Das Verhältnis ändert sich jedoch im realen Versuch, da sich die warme Luft abkühlt, was bedeutet, dass die Dichte der einströmenden Luft von der Temperatur abhängig ist. Des Weiteren ist die Temperatur abhängig vom Abstand zur Quelle und vom zeitlichen Verlauf. Es muss also gelten

$$\rho_E = \rho_E(T) = \rho_E(T(\vec{x}, t))$$

Als ersten Schritt lässt sich die Temperaturabhängigkeit näherungsweise mit dem idealen Gasgesetz beschreiben

$$pV = N k_B T$$

Darin ist p der Druck, V das Volumen, N die Teilchenzahl, k_B die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur.

Für einen konstanten Druck ($p=\text{const}$) und eine konstante Teilchenzahl ($N=\text{const}$), gilt als direkte Folgerung aus dem Idealen Gasgesetz die vereinfachte Form wie folgt (entspricht dem Gesetz von Gay-Lussac):

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Die Volumina $V_{1,2}$ können anhand der Gleichung $V_{1,2} = \frac{m}{\rho_{1,2}}$ durch die Dichte ersetzt werden.

Dabei bleibt die Masse konstant und nur das Volumen ändert sich. Stellt man entsprechend um, so folgt die Dichte zu

$$\rho_2 = \rho_1 \times \frac{T_1}{T_2}$$

Nimmt man als Referenz aus Stöcker (2005) die Dichte für trockene Luft zu $\rho_1=1,2928 \text{ kg/m}^3$ unter Normalbedingung bei $T_1=273,15 \text{ K}$ und $p=101325 \text{ Pa}$, dann lässt sich ρ_E direkt in Abhängigkeit von der Temperatur angeben

$$\rho_{E(T)} = \frac{353,128 \text{ K kgm}^{-3}}{T}$$

Eingesetzt in Formel (2.1) lässt sich also k_{grenz} zu

$$\frac{353,128 \text{ K kgm}^{-3}}{T \times \rho_L} \approx k_{\text{grenz}} \quad (2.2)$$

abschätzen. Entscheidend ist dabei die Frage, inwiefern eine Variation der Temperatur ΔT auf eine entsprechende Veränderung der relativen Dichte Δk_{grenz} des Gases schließen lässt. Die Änderungen können mit Methoden der Fehlerrechnung abgeschätzt werden. Nach Mesche (2006) gilt allgemein das Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_k) = \sum_{i=1}^k \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i$$

Vereinfachend geht man davon aus, dass die Fehler von $353,128 \text{ K kgm}^{-3}$ und ρ_L keine signifikanten Auswirkungen haben. Deshalb vereinfacht sich die Summe für k_{grenz} in Abhängigkeit von T zu

$$\Delta k_{\text{grenz}} = \frac{353,128 \text{ K kgm}^{-3}}{T^2 \times \rho_L} \times \Delta T = k_{\text{grenz}} \times \frac{\rho T}{T} \quad (2.3)$$

Die indirekte Abhängigkeit der Dichte von Ort und zeitlichem Verlauf ist sehr kompliziert, weil nicht bekannt ist, wie die Temperatur an die Umgebung abgegeben wird. Ein weiterer Einfluss wäre die Durchmischung mit Umgebungsluft, was mit der Freistrahtheorie beschrieben werden kann.

2.3.3. Nebel als Tracer für schwere Gase

Wie bereits oben erläutert, ist Autogas schwerer als Umgebungsluft. Für die Anwendung im Tiefgaragenmodell soll Autogas durch ein CO_2 – Luft Gemisch simuliert werden. Es gilt der gleiche Ansatz wie oben, jedoch mit dem Unterschied, dass der Dichtequotient größer als 1 wird.

$$\frac{\rho_E}{\rho_L} \approx k_{\text{grenz}} > 1$$

CO_2 sammelt sich aufgrund des Dichteunterschieds nach dem Austritt am Boden. Dieser

Effekt wird in Grenzen durch die Sedimentation des Nebels beeinflusst.

2.3.4. Standzeit von Disconebel

Die Standzeit von Disconebel hängt von mehreren Faktoren ab, welche nun im Einzelnen genannt und untersucht werden sollen.

Sedimentation

Der Begriff Sedimentation beschreibt das zeitliche Absinken von Nebelpartikeln. Die in der Luft befindlichen Partikel werden durch die Schwerkraft beschleunigt. Es stellt sich nun ein Kräftegleichgewicht ein und die Nebelpartikel gehen mit stationärer Sinkgeschwindigkeit in eine gleichförmige Bewegung über. Man kann die Geschwindigkeit nach Demtroder (2006) herleiten. Für eine konstante Sinkgeschwindigkeit gilt die Kräftebilanz

$$F_{\text{Gewicht}} = F_{\text{Auftrieb}} + F_{\text{Reibung}}$$

Die Reibungskraft wird durch die Stokes'sche Reibung beschrieben. Setzt man zudem für die Gewichtskraft und die Auftriebskraft entsprechende Terme ein, so lässt sich die Gleichung schreiben als

$$\Delta_N V_N g = \Delta_L V_N g + 6\pi R_N \eta_L v_N$$

Für das Volumen der kugelförmigen Nebelpartikel gilt $V_N = \frac{4}{3}\pi R_N^3$. Umgestellt nach v_N folgt die Sedimentationsgeschwindigkeit damit zu

$$v_N = \frac{2}{9} \times \frac{R_N^2 g (\Delta_N - \Delta_L)}{\eta_L} \quad (2.4)$$

oder, um vereinfacht mit dem Tröpfchendurchmesser zu rechnen

$$v_N = \frac{d_N^2 g (\Delta_N - \Delta_L)}{18\eta_L} \quad (2.5)$$

Dabei ist v_N die Sedimentationsgeschwindigkeit, V_N das Volumen der Nebelpartikel, g die Erdbeschleunigung, d_N der Durchmesser der Nebelpartikel, R_N der Radius der Nebelpartikel, Δ_N die Dichte der Nebelpartikel, Δ_L die Dichte von Luft und η_L die Viskosität von Luft.

Bei der Stokes'schen Reibung ist zu beachten, dass diese nur für langsame Sedimentati-

ongeschwindigkeiten mit Reynolds-Zahlen $Re < 1$ und kleine Kugelradien eine gute Näherung liefert. In diesem Fall sind die Bedingungen gegeben, sodass die Stokes'sche Reibung angewendet werden kann.

In Abbildung 1 sind die Sedimentationsgeschwindigkeiten v_N der Inhaltsstoffe von handelsüblichem Nebelfluid gegen den Partikeldurchmesser d_N aufgetragen. Dabei wurden die Werte aus Tabelle 2 und $g=9,81 \text{ m/s}^2$, $\Delta_L=1,2046 \text{ kg/m}^3$, $\eta_L=18,1 \text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ aus Stöcker (2005) verwendet.

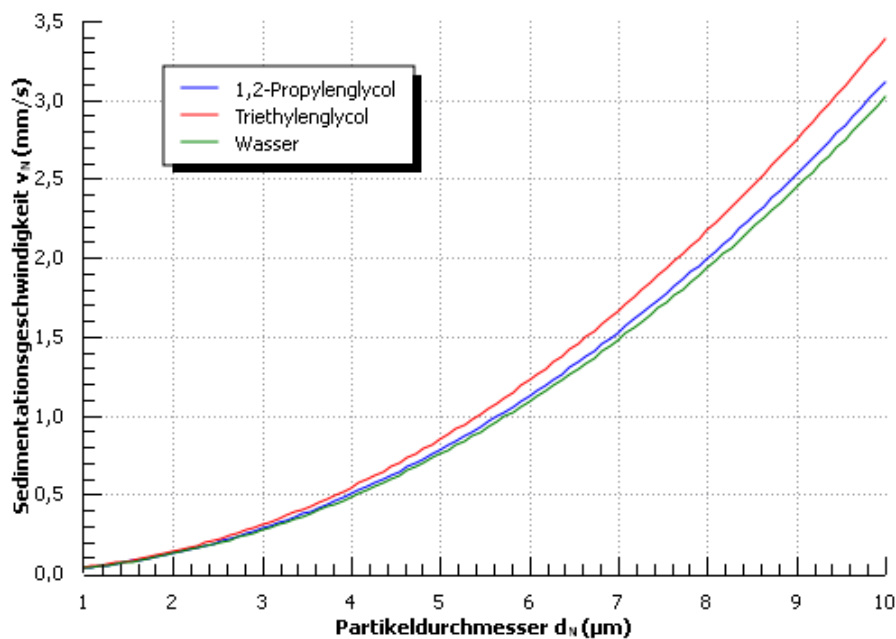


Abbildung 1 Sedimentationsgeschwindigkeit der Inhaltsstoffe von handelsüblichem Disconebel als Funktion der Partikelgröße

Neben der Sedimentation wird die Nebelstandzeit durch weitere Effekte beeinflusst. Folgende Punkte sind an dieser Stelle zu nennen;

Kondensation, Koagulation und Absetzung an den Wänden. Im nächsten Schritt folgt eine kurze Begriffsdefinition

- Kondensation: Durch Abkühlung der Nebeltröpfchen wird weitere Feuchtigkeit gebunden.
- Koagulation: Es entsteht eine Zusammenballung von Nebeltröpfchen zu größeren Tropfen. Durch die größeren Partikeldurchmesser wird die Sedimentation beschleunigt.

- Absetzung an Wänden: Durch den Kontakt von Nebelpartikeln mit der Wand kommt es zur Ablagerung.

Alle vorgenannten Effekte sind Zeit-, Temperatur- und Konzentrations-abhängig. Eine theoretische Beschreibung wäre jedoch sehr kompliziert und würde an dieser Stelle zu weit führen. Daher wurde sowohl die Standzeit als auch die Ablagerung experimentell in einer Messung erfasst.

2.4. Grundlagen der optischen Dichtemessung

Nach Abschnitt 2.2 wird zur Messung der Nebelkonzentration eine optische Lasermessstrecke entwickelt. Die Messung selbst geschieht nach dem Extinktionsprinzip. Demzufolge kommt es bei steigender Nebeldichte in der Messstrecke zu einer Abnahme der Intensität am Empfänger. Das Ziel bei der Messung ist es, die Intensitätsschwächung möglichst empfindlich nachzuweisen. Der Begriff Extinktion bedeutet hierbei allgemein eine Abschwächung des Lichts. Die resultierende Extinktion vereinigt Einflüsse aus Absorption, Streuung, Beugung und Reflexion. Zudem ist die Extinktion wellenlängenabhängig.

Kommerziell sind mehrere Messgeräte verfügbar, die nach diesem Prinzip funktionieren. An der Forschungsstelle für Brandschutztechnik sind langjährig einige Geräte Fabrikat Maurer ME 82 in Gebrauch, die jedoch entsprechend den oben gemachten Angaben für Versuche im Modellmaßstab aufgrund der Beeinflussung der Strömungsfelder in den Modellräumen infolge ihrer geometrischer Abmessung und Wärmeentwicklung nicht geeignet sind. Dieses Gerät wird jedoch als Referenz zu den Lasermessgeräten herangezogen. Das Maurer Gerät ME 82 wird daher in Abschnitt 2.4.1 kurz beschrieben.

In erster Linie wurde das Gerät Maurer ME 82 für den Einsatz mit Brandrauch entwickelt. Es wird davon ausgegangen, dass das Messgerät auch bei Nebel zuverlässige Messergebnisse liefert. Dennoch beschränken sich die Erklärungen zu Messungen nach dem Extinktionsprinzip auf Brandrauch. In Abschnitt 2.4.2 wird ein kurzer Überblick zu den Eigenschaften von Brandrauch gegeben. Diese Erkenntnisse sollten sich nunmehr auf den verwendeten Nebel übertragen lassen. Für eine Erweiterung der Theorie für Nebel werden daher zunächst einige physikalische Grundlagen erläutert. Diese Grundlagen werden dann in Abschnitt 2.4.6 angewandt und der Extinktionskoeffizient entsprechend bestimmt. Das Ziel ist es, die Nebelkonzentration über eine optische Transmission zu berechnen.

2.4.1. Rauchdichtemessgerät Maurer ME 82

Das Gerät Maurer ME 82 ist ein Lichtmesssystem für Rauchdichtemessungen nach dem Extinktionsprinzip. Die Messstrecke besteht aus einem Messlichtgeber, einem Messlichtempfänger und dem eigentlichen Messgerät (Quelle: Bedienungsanleitung Maurer).

- Im Messlichtgeber ist als Lichtquelle eine Wolfram-Glühbirne verbaut, welche eine genormte Verteilungstemperatur um $T = 2856 \text{ K}$ aufweist (vgl. DIN 5033). Das Licht ist nicht-monochromatisch und wird über Linsensysteme quasiparallel mit einem Durchmesser von 25 mm ausgesandt. Weiterhin kann abhängig von der Länge der Messstrecke die Leuchtdichte eingestellt werden.
- Als Messlichtempfänger dient ein Silizium-Photoelement mit vorgesetztem Spektralfiltersatz. Temperatureinflüsse werden über ein Thermoelement erfasst und kompensiert
- An das Messgerät werden der Lichtgeber und der Empfänger angeschlossen. Während der Messung werden die Transmissionswerte auf einem Anzeigeelement zur visuellen Kontrolle dargestellt. Dazu besitzt das Gerät einen linearen Verstärkerausgang mit einer Messgenauigkeit von 0,2 %. Das Gerät Maurer ME 82 wird seit langer Zeit aufgrund der hohen Genauigkeit als Standardmessgerät für Materialprüfungen im Zusammenhang mit Rauchbildung eingesetzt. Infolge dessen wird es auch hier als Referenz für die zu untersuchenden Lasermessgeräte verwendet.

2.4.2. Eigenschaften von Rauch

Die Dichtemessung nach dem Extinktionsprinzip ist bisher weitestgehend nur für Brandrauch untersucht. Es ist also nötig, zunächst einige Eigenschaften von Brandrauch zu erläutern, bevor die Untersuchungen auf Nebel erweitert werden können. Eine allgemein umfängliche Definition zu Brandrauch ergibt sich aus Angaben in DIN EN ISO 13943 aus der Definition sichtbarer flüchtiger Verbrennungsprodukte (alle Gase und Aerosole einschließlich flüchtiger Partikel, die bei einem Brand bzw. Feuer bei der Verbrennung oder Pyrolyse entstehen) im Gemisch mit Luft, wobei dieses durch Strömungs- oder Diffusionsvorgänge mit den Verbrennungsprodukten entsteht.

Zusammengefasst besteht Rauch aus zwei Komponenten: einem Dispersionsmittel (Luft und Verbrennungsgase) und der dispersen Phase (feste und flüssige Partikel). Das Dispersionsmittel wird messtechnisch nur in bestimmten Wellenlängenbereichen erfasst. So absorbieren die infrarotaktiven Gase wie Kohlendioxid und Wasserdampf bei $2,7 \mu\text{m}$, $4,3 \mu\text{m}$ und $6,2 \mu\text{m}$ Wellenlänge (Portscht (1972)). Diese Absorption ist für die hier durchgeführte

Untersuchung von untergeordneter Bedeutung. Die disperse Phase absorbiert über einen weitaus größeren Wellenlängenbereich und ist für die hier durchgeführten Untersuchungen von besonderer Bedeutung.

Die disperse Phase besteht im Wesentlichen aus den Rauchpartikeln und ist das Ergebnis einer unvollständigen Verbrennung. Die Rauchpartikel selbst lassen sich anhand der Größe, Form und abhängig vom Material charakterisieren. Bei einer rußenden Flamme bilden sich zunächst kugelförmige Einzelpartikel mit einem Durchmesser von ca. 10 bis 100 nm (Drysdale (1998)). Beeinflusst durch die Verweilzeit der Partikel in der Strömung und die Konzentration des Rauchs konglomerieren die Rauchpartikel und bilden Aggregate in der Größe von bis zu 6 µm. Die Rauchpartikel bestehen meist aus Kohlenstoff. Dennoch sind auch Wassertropfen oder Teerpartikel möglich. Entsprechend kann hier die Struktur und Größe variieren. In Einzelfällen kommt es in der Praxis von Bränden bei Luftmangel und/oder flammhemmend ausgerüsteten Stoffen auch zur Agglomeration auch größerer Einheiten von Partikeln im $\frac{1}{10}$ -mm Bereich.

2.4.3. Lambert-Béer Gesetz

Das Lambert-Béer Gesetz beschreibt die Schwächung der Strahlungsintensität, welche beim Durchgang durch Materie auftritt. Beim Durchgang einer Schichtdicke dx wird die Strahlungsintensität I um den Anteil dI gedämpft. Die Schwächung ist materialabhängig und wird durch den Absorptionskoeffizienten α beschrieben. Demnach lässt sich nach Meschede (2006) eine Differentialgleichung aufstellen

$$dI = -\alpha I dx$$

Zur Lösung gelangt man über den Ansatz der Variablenseparation

$$\begin{aligned}\frac{dI}{I} &= -\alpha dx \\ \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} &= \alpha \int_0^x dx \\ \ln I - \ln I_0 &= -\alpha x\end{aligned}$$

unter Anwendung der Logarithmengesetze folgt nun das Lambert-Béer Gesetz zu

$$I = I_0 \times e^{-\alpha x} \quad (2.7)$$

Hierbei ist I die Intensität des geschwächten Lichts und I_0 die Intensität der Referenz. Der Quotient $\frac{I}{I_0}$ definiert den Transmissionsgrad τ , der sozusagen die optische Durchlässigkeit eines Stoffes beschreibt.

Für Stoffe, die als Partikel in einem Dispersionsmittel gelöst sind, kann der Absorptionskoeffizient α auch als $\alpha = \epsilon c$ geschrieben werden. Hier bezeichnet ϵ die spezifische Extinktionsfläche (Fläche/ Teilchen) und c die Partikelkonzentration (Teilchen/ Volumen). Die gemessene Extinktionsfläche ist im Allgemeinen von der Wellenlänge abhängig. Um nun von einer Transmissionsmessung auf eine Konzentration zu schließen, ist für weitere Überlegungen die Lambert-Béer Gleichung in der Form

$$I(c) = I_0 \times e^{-\epsilon c x} \quad (2.8)$$

von Bedeutung. Wenn man die spezifische Extinktionsfläche ϵ ermittelt hat, so lässt sich für eine feste Messlänge x die Partikelkonzentration in Abhängigkeit von der Transmission angeben. Die Lambert-Béer Gleichung gilt in der einfachen Form zunächst nur für monochromatisches Licht. Um den allgemeinen Fall (nicht-monochromatisches Licht) zu untersuchen, muss man über den entsprechenden Bereich der Wellenlänge integrieren. Das ist möglich, weil Licht zugleich durch eine elektromagnetische Welle beschrieben wird. Aufgrund der Linearität der Maxwell'schen Gleichungen, kann das Prinzip der Superposition angewendet werden.

2.4.4. Streuung von Licht

Zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten α im Lambert-Béer Gesetz wird die Theorie der Lichtstreuung verwendet. Streuung tritt mitunter dann auf, wenn Licht auf ein Nebelpartikel trifft. Dabei hängt die Streuung maßgeblich von der Partikelgröße und von der Wellenlänge des Lichts ab. Da sich die Durchmesser der Nebelpartikel in etwa in derselben Größenordnung wie die Wellenlänge des eingesetzten Lasers bewegen, gilt die Mie-Streuung. Die Theorie zur Mie-Streuung (Mie, 1908) wird hier nicht wiedergegeben. Zur Berechnung eines Streuquerschnitts wurde das Programm MieCalc von Michel (2007) verwendet.

2.4.5. Komplexer Brechungsindex

In der geometrischen Optik gibt der Brechungsindex an, wie ein Lichtstrahl beim Übergang in ein anderes Medium gebrochen wird. Entscheidend ist hierbei die Geschwindigkeit, mit der sich das Licht im jeweiligen Medium ausbreitet. Allgemein wird der Brechungsindex n als das Verhältnis aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 zur Geschwindigkeit im Medium c_m definiert. Die Formel dazu lautet:

$$n = \frac{c_0}{c_m}$$

Folglich ist der Brechungsindex materialabhängig. Die weiteren Abhängigkeiten des Brechungsindex von der Lichtwellenlänge λ werden als Dispersion bezeichnet.

Speziell für die Mie-Streuung spielt jedoch auch die Licht-Materie-Wechselwirkung eine Rolle. Nach Meschede (2006) geht man also über zu dem komplexen Brechungsindex

$$n = n' + in''$$

Betrachtet man Licht als elektromagnetische Welle, so muss sie ausgehend von den Maxwell-Gleichungen eine Lösung der Wellengleichung sein. Um die Ausbreitung in einem Medium zu betrachten, wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit dem komplexen Brechungsindex modifiziert. Für die Wellengleichung folgt damit

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{n^2}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0$$

Eine der möglichen Lösungswege ist eine ebene Welle (vereinfachend nur in z-Richtung)

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \times e^{-i(\omega t - n k_z \times z)}$$

Benutzt man für n den komplexen Brechungsindex, dann lässt sich die Welle beschreiben als

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \times e^{-i(\omega t - n' k_z \times z)} \times e^{-n'' k_z \times z}$$

Darin beschreibt der erste Term die Schwingungseigenschaft der Welle, wohingegen der zweite Term die Dämpfung beschreibt. Da sich die Welle nunmehr in einem Medium ausbreitet, muss die Dämpfung dem Lambert-Béer Gesetz folgen. Mit der Annahme $I \propto |E|^2$ folgt damit

$$I(z) = I_0 \times e^{-2n'' k_z \times z} = I_0 \times e^{-\alpha z}$$

Der Faktor α ist wiederum der Absorptionskoeffizient. Der komplexe Brechungsindex ist also maßgeblich an der Absorption der Welle beteiligt. Erklären lässt sich das dadurch, dass die elektromagnetische Welle die atomaren Oszillatoren im Medium zu Schwingungen anregt. Es wird also Energie in Joulesche Wärme umgesetzt.

Als Beispiel zeigt Abbildung 2 den komplexen Brechungsindex von Wasser in Abhängigkeit von der Wellenlänge in doppelt logarithmischen Maßstab.

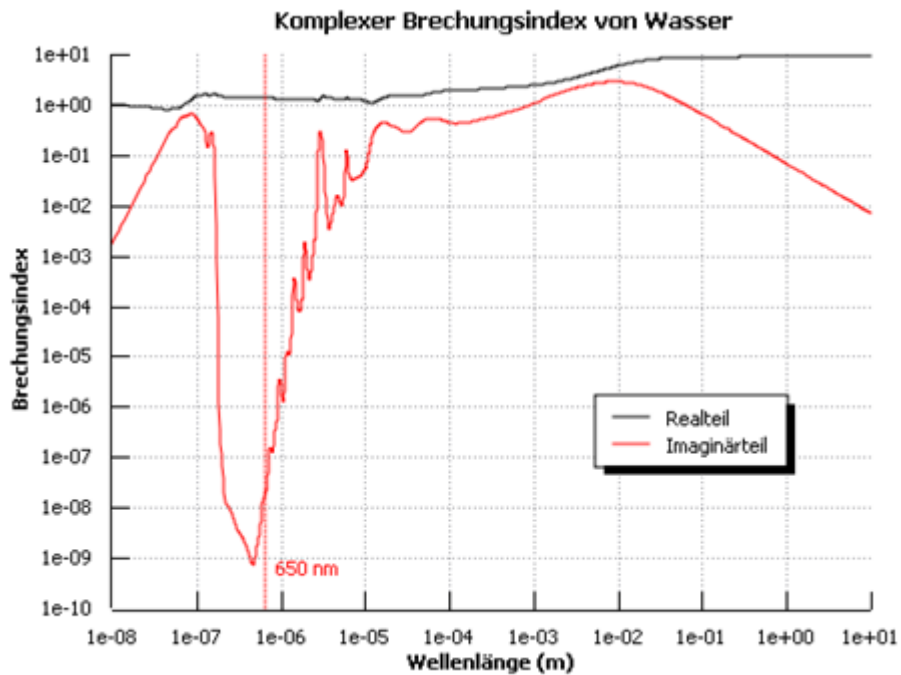


Abbildung 2: komplexer Brechungsindex von Wasser für die Wellenlänge von 10nm bis 10m (Segelstein (1981))

Allgemein ist es sehr schwer den komplexen Brechungsindex für seltene Stoffe zu finden. So auch für 1,2-Propylenglycol und Triethylenglycol. Für das weitere Vorgehen soll daher ersatzweise nur Wasser als Inhaltsstoff von Nebelfluid untersucht werden. In Abbildung 2 ist weiterhin die Laserwellenlänge von $\lambda = 650 \text{ nm}$ eingezeichnet. Für diese Wellenlänge ergibt sich der komplexe Brechungsindex nach Segelstein (1981) zu $n' = 1,331$ und $n'' = 16,74 \cdot 10^{-9}$. Die Werte sind für die weitere Berechnung des spezifischen Extinktionskoeffizienten von Interesse.

2.4.6. Berechnung des spezifischen Extinktionskoeffizienten von Nebel

Nach den physikalischen Betrachtungen kann nun der spezifische Extinktionskoeffizient im Lambert-Béer Gesetz für Wassertröpfchen berechnet werden. Hinsichtlich der Größe, der Form und der physikalischen Eigenschaften gibt es jedoch sehr viele Einflüsse. Eine einfache Berechnung ist daher nicht ohne weiteres möglich. Für das weitere Vorgehen sind daher nach Portscht (1972) einige Idealisierungen notwendig, die nachfolgend im Einzelnen beschrieben werden

1. Die Partikel werden als kugelförmig angenommen und die Abstände der Partikel sind so groß, dass Einzelstreuung gilt.
2. Es wird angenommen, dass alle Partikel den gleichen Durchmesser haben.

3. Die Nebelpartikel sind homogen und optisch richtungsunabhängig (isotrop).
4. Bei einer Konzentrationsänderung verändert sich die Verteilung der Partikelgrößen nicht.
5. Sedimentation, Koagulation, Kondensation und Ablagerung an Wänden wird vernachlässigt.
6. Die Nebelpartikel sind gleichmäßig in der Messstrecke verteilt. Es gibt keine Schwebenbildung mit örtlich höheren Konzentrationen.
7. Es tritt keine Lumineszenz auf

Als nächster Schritt kann jetzt mithilfe der Mie-Streuung der spezifische Extinktionskoeffizient berechnet werden. Demzufolge wird als Ergebnis ein Streuquerschnitt mit der Dimension einer Fläche gesucht. Der Extinktionsquerschnitt selbst ist abhängig von der Wellenlänge λ , dem Partikeldurchmesser d und dem Brechungsindex n_{ref} des umgebenden Mediums (hier Luft). Weiterhin von dem realen Brechungsindex $n'(\lambda)$ und dem imaginären Brechungsindex $n''(\lambda)$ des Partikels, welche selbst wiederum von der Wellenlänge abhängen. Der Ansatz für monodisperse Partikel lautet daher

$$\varepsilon = \varepsilon(\lambda, d, n_{ref}, n'(\lambda), n''(\lambda)) \quad (2.9)$$

Abbildung 3 zeigt den spezifischen Extinktionskoeffizient (Fläche/ Teilchen) für Wassertröpfchen als Funktion der Wellenlänge von 100 nm bis 10 μm in doppelt logarithmischen Maßstab. Dabei wird der Verlauf für verschiedene Partikeldurchmesser deutlich. Der Plot wurde mit dem Programm MieCalc von Michel (2007) angefertigt und optisch aufbereitet. Für die Berechnungen benötigt das Programm verschiedene Parameter. Eine Übersicht der Parameter und die dazu verwendeten Daten gibt Tabelle 2.

Symbol Name	Beschreibung	Verwendeter Wert
lambda	Wellenlänge	0,1 - 10 μm
d	Partikeldurchmesser	1 - 10 μm
refmed	Brechungsindex des umgebenden Mediums	$n = 1,00029$ für Luft aus Stocker (2005)
ref	Realer Brechungsindex des Partikels	Daten entsprechend aus Segelstein (1981)
refim	Imaginärer Brechungsindex des Partikels	Daten entsprechend aus Segelstein (1981)
Cext	Extinktionsquerschnitt als Ausgabe	-

Tabelle 2: Beschreibung und verwendete Daten für MieCalc

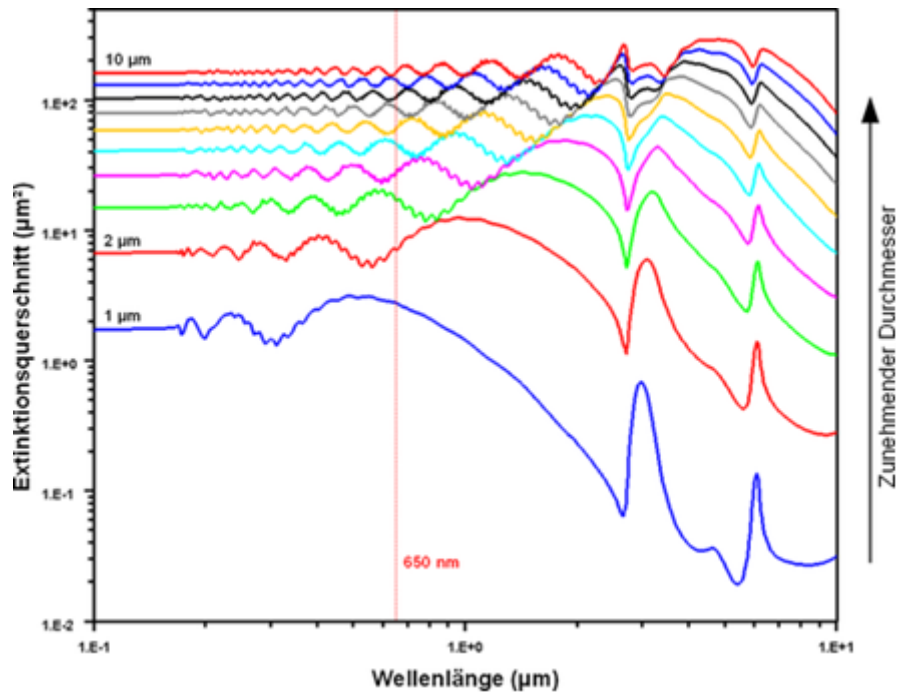


Abbildung 3: Extinktionsquerschnitt für Wassertröpfchen als Funktion der Wellenlänge bei zunehmenden Partikeldurchmessern (Quelle: Michel (2007), mit Beschriftungen nachbearbeitet)

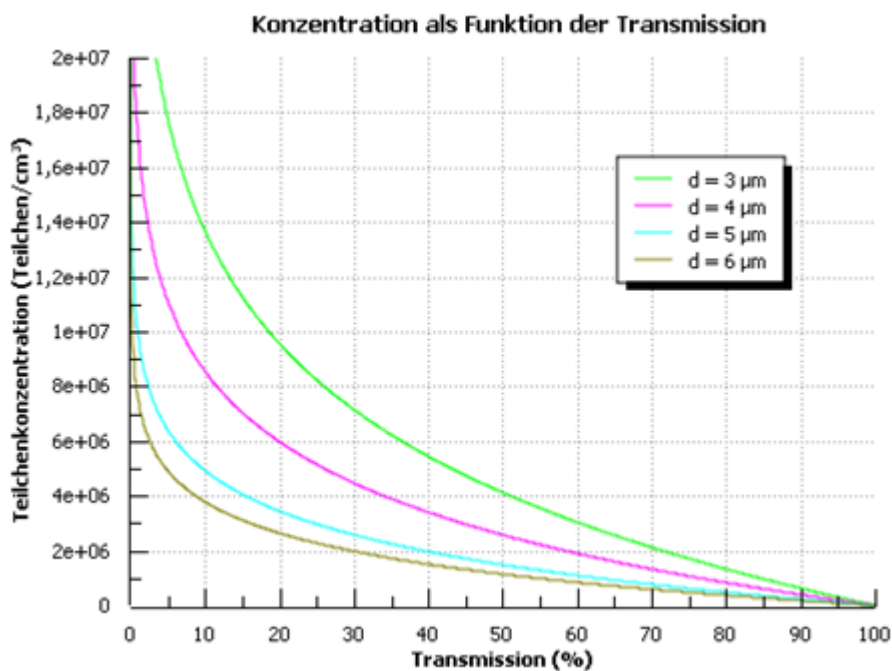


Abbildung 4: Konzentration von Wassertröpfchen als Funktion der Transmission bei verschiedenen Partikeldurchmessern

2.4.7. Berechnung der Nebelkonzentration

Ziel ist die Ermittlung der Nebelkonzentration in Abhängigkeit der festgestellten Transmission zu bestimmen. Hierzu wird Formel 2.8 nach der Konzentration c umgestellt:

$$c(I) = \frac{1}{\varepsilon x} \times \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

Für die Berechnung der Konzentration in Teilchen pro cm^3 wählt man für die Messweglänge sinnvollerweise $x = 1 \text{ cm}$. Die Werte für ε ergeben sich entsprechend dem Partikeldurchmesser d aus Abbildung 3 für die Wellenlänge 650 nm . Es folgt damit („Hauptgleichung“ für die Bestimmung der Konzentration aus den Messwerten)

$$c(I) = \frac{1}{\varepsilon \times 1\text{cm}} \times \ln\left(\frac{100\%}{I}\right)$$

In Abbildung 4 ist die Teilchenkonzentration von Wassertröpfchen als Funktion der Transmission für die Durchmesser 3 bis $6 \mu\text{m}$ dargestellt. Die Farben der Kurven für die Durchmesser wurden dabei wie oben beibehalten.

2.5. Laserdiode

In dem zu untersuchenden Messsystem wird als Strahlungsquelle eine Laserdiode eingesetzt. Im nachfolgenden Abschnitt werden zunächst die physikalischen Grundlagen einer Laserdiode erläutert. Anschließend wird dann explizit auf die Verwendung innerhalb des Messsystems eingegangen.

2.5.1. Physikalische Grundlagen der Laserdiode

Der Begriff Laser ist die Abkürzung für „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“. Übersetzt bedeutet dies die Verstärkung von Licht durch stimulierte Emission von Strahlung. Benötigt wird hierfür ein optisch aktives Medium. Durch einen Pumpprozess wird dem aktiven Medium Energie zugeführt. Dabei werden die Elektronen auf ein höheres Energieniveau angehoben. Befindet sich das Atom im angeregten Zustand, so wird durch spontane Emission eines Photons der Grundzustand wieder erreicht. Die Energie des Photons beträgt dabei genau die Differenz der Energieniveaus. Befinden sich zeitgleich weitere Elektronen in einem angeregten Zustand, so kann durch ein bereits existierendes Photon ein weiteres Photon erzeugt werden. Dieser Effekt wird als stimulierte Emission bezeichnet. Das entstandene Photon zeichnet sich dadurch aus, dass es die gleichen Eigenschaften besitzt, wie das Erzeuger-Photon. In den meisten Fällen überwiegt jedoch die spontane Emission. Für einen eigenständigen Prozess wird daher versucht, durch pumpen das höhere Energieniveau stärker zu besetzen. Befinden sich mehr Elektronen im angeregten als im Grundzustand, so spricht man von einer Besetzungsinversion.

Um die Verstärkung zu vergrößern, wird das aktive Medium in einem Resonator platziert. Der Resonator hat die Aufgabe, das Licht in eine vorgegebene Richtung zu reflektieren und dadurch das aktive Medium hin und her laufen zu lassen. Die Strahlung wird hierdurch weiter verstärkt und die Laserschwelle erreicht. Der Resonator besitzt bestimmte Resonanzbedingungen. Dadurch bildet sich eine stehende Welle aus und es werden nur ausgewählte Frequenzen verstärkt.

Im Gegensatz zum Licht einer Glühbirne zeichnet sich Laserlicht durch folgende besondere Eigenschaften aus. Zum einen ist Laserlicht stets monochromatisch. Das heißt, der Laser strahlt Licht nur in einer definierten Wellenlänge ab. Weiterhin besitzt Laserlicht eine hohe Kohärenz. Die Wellenlänge bleibt also nicht nur konstant, sondern die Welle ist über weite Strecken phasensynchron zueinander. Dies liefert die Grundlage für einen parallelen Lichtstrahl mit einer sehr gleichmäßigen Leuchtdichte.

Eine Laserdiode ist ein spezieller Lasertyp basierend auf einer Diode. Grundlegend gibt es hier einen sehr stark dotierten pn-Übergang (vgl. 2.6.1). Wenn ausreichend Strom durch diesen Übergang fließt, so kommt es zur Rekombination von Elektronen und Löchern. Durch den inversen photoelektrischen Effekt wird dabei Licht emittiert. Für die Lasereigenschaften sind die besonderen Resonatoreigenschaften des Halbleitermaterials verantwortlich. Materialien unterschiedlicher Brechzahlen bilden dabei die Außenflächen des Halbleiters. In diesem Resonator können sich nun stehende Wellen ausbilden. Das Erreichen der Besetzungsinversion führt zur stimulierten Emission und damit zu Emission von Laserlicht. Normalerweise entsteht die Besetzungsinversion bei Laserdioden durch elektrisches pumpen.

2.5.2. Die Laserdiode innerhalb des Messsystems

Bei dem hier verwendeten Lasermodul (SL8-650-05-D, Vertrieb Profi Laser Pointer Shop (2008)), handelt es sich um eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von 650 nm bei einer Ausgangsleistung von kleiner 5 mW. Dies entspricht der Laser Klasse 3R. Der Laserstrahl ist in Punktopatik ausgeführt und der Fokus einstellbar. Die Betriebsspannung für die Laserdiode liegt zwischen 3 bis 5 V Gleichspannung. Dabei fließt ein Strom von etwa 50 mA. Es ist darauf zu achten, dass die Spannungswerte nicht überschritten werden. Abbildung 5 zeigt ein Bild der verwendeten Laserdiode im Messsystem



Abbildung 5: Verwendete Laserdiode SL8-650-05-D im Messsystem (Quelle:Profi Laser Pointer Shop (2008))

Das dazu vorhandene Datenblatt macht keine Aussagen über die Stabilität der Laserintensität in Abhängigkeit von der Betriebsspannung. Für den Betrieb in einer Messstrecke ist diese Information allerdings unerlässlich. Daher wird der Verlauf der Laserintensität in Abschnitt 4.1 experimentell untersucht.

Betrachtet man mögliche Fehlerquellen der Laserdiode, so spielt die zeitliche Konstanz der Laserintensität eine Rolle. Insbesondere kann auch der Einfluss durch Alterung der Bauteile genannt werden. Der Fehler wird jedoch vernachlässigt, da es sich jeweils bei den hier in Frage stehenden Anwendungen um kurze Messzeiten handelt. Zudem wird die empfangene Lichtintensität vor jeder Messung über die Photodiode kalibriert. Möchte man dennoch diese Effekte minimieren, so ist eine Messung nach dem Zweistrahlverfahren möglich. Mittels zweier Messstrecken geschieht dabei die Messung der Nebeldichte relativ zu einer Referenzmessung.

Eine weitere Überlegung zu den Fehlerquellen ist die Betrachtung des Durchmessers, den der Laserstrahl im Verhältnis zur Nebelpartikelgröße aufweist. Auch ist die Unregelmäßigkeit der Nebeldichte (Schwadenbildung) in diesem Zusammenhang anzuführen.

2.6. Photodiode

Als Empfänger dient in der Messschaltung eine Photodiode. Zunächst wird auch hier auf die physikalischen Eigenschaften einer Photodiode eingegangen. Im darauffolgenden Schritt werden verschiedene Schaltungsvarianten der Photodiode untersucht. Die Messungen haben ergeben, dass der wesentliche Erfolg dabei von den folgenden Überlegungen abhängig ist.

2.6.1. Physikalische Grundlagen der Photodiode

Eine Photodiode ist ein elektronisches Bauteil basierend auf einer Diode. Um eine Diode zu konstruieren benötigt man grundsätzlich einen Halbleiter mit 4 Valenzelektronen. Handelsüb-

lich sind dabei die Halbleiter Silizium oder Germanium. Anschließend wird der Halbleiter mit Fremdatomen dotiert. Dabei gibt es die Möglichkeit der n-Dotierung, indem 5-wertige Atome (Donatoren) in den Halbleiter implantiert werden. Es steht damit ein frei bewegliches Elektron zur Verfügung. Im Gegensatz dazu kann der Halbleiter mit 3-wertigen Atomen (Akzeptoren) dotiert werden. Dadurch entsteht im Gitter eine Elektronenfehlstelle und wirkt so als positiver Ladungsträger. Werden ein n-dotierter und p-dotierter Halbleiter zusammengeführt, so entsteht durch Ladungsverschiebungen ein pn-Übergang. Entscheidend bei der Photodiode ist nun, dass der pn-Übergang einer externen Lichtquelle zugänglich ist. Einfallende Photonen heben durch den inneren Photoeffekt zusätzliche Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband. Dadurch kommt ein Photostrom zustande.

2.6.2. Die Photodiode innerhalb des Messsystems

Im Messsystem kommt die Photodiode OSD15-5T (Firma Centronic) zum Einsatz. Die Photodiode ist ein einzelner Photosensor in einem Gehäuse. Die aktive Sensorfläche beträgt 15 mm² und ist quadratisch. Die Diode zeichnet sich durch ein geringes Dunkelstromrauschen aus und kann mit einer externen Sperrspannung von bis zu 12 V betrieben werden.

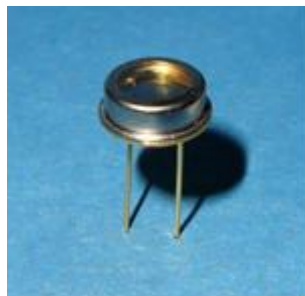


Abbildung 6: Verwendete Photodiode OSD 15-5T im Messsystem

Eine wichtige Charakteristik der Photodiode ist die spektrale Empfindlichkeit. In Abbildung 7 wird daher die Empfindlichkeit der verwendeten Photodiode aus der Centronic 5T-Serie als Funktion der Wellenlänge gezeigt. Dabei beschreibt die gestrichelte Linie den Fall, dass an der Photodiode keine Spannung angelegt ist. Die durchgängige Linie geht davon aus, dass eine Spannung von 12 V in Sperrrichtung über der Photodiode angelegt wird. Beide Kurven besitzen ihr Maximum zwischen 800 und 900 nm. Die Laserdiode der Messstrecke hat die Wellenlänge 650 nm. Die Photodiode besitzt hier eine Empfindlichkeit von 0,4 A/W. Die Diode ist daher gut für die Anwendung in der Lasermessstrecke geeignet.

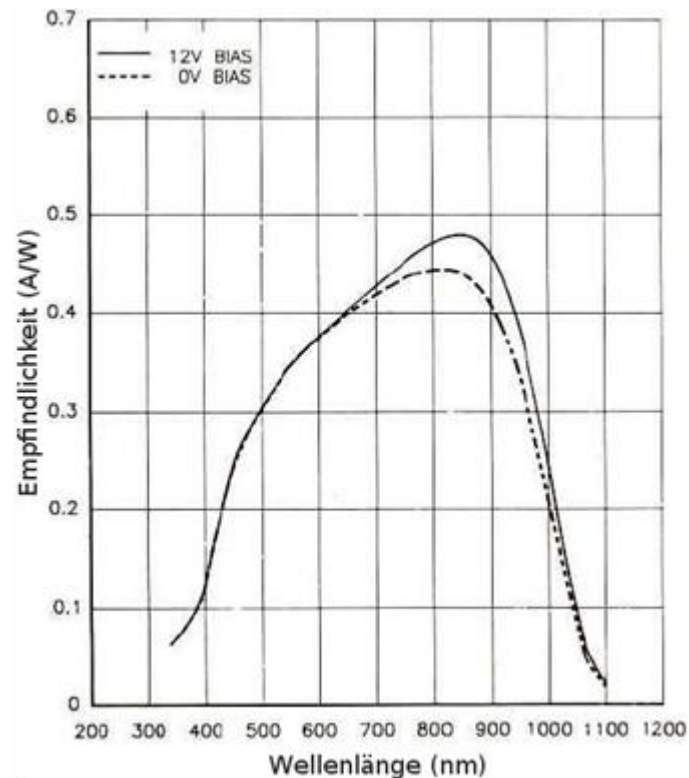


Abbildung 7: Spektrale Empfindlichkeit der Photodiode (Quelle: Centronic (2008a), mit deutscher Achsenbeschriftung nachbearbeitet)

In Abhängigkeit von der Wellenlänge bleibt auch zu überlegen, ob die Verwendung von Farbfiltern sinnvoll ist. So könnte Fremdlicht als mögliche Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Auch eine Temperaturkompensation der Empfängerschaltung wäre zu untersuchen. In der weiteren Arbeit werden diese Einflüsse nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass diese möglichen Fehler von untergeordneter Bedeutung sind (Anmerkung: der Laserstrahl ist um Größenordnungen intensiver als das mögliche Fremdlicht, weshalb zumindest dieser Effekt vernachlässigt wird. Da auch die Empfängerschaltung nicht von Temperaturänderungen innerhalb der kurzen Messdauer beeinflusst wird, kann auch dieser mögliche Fehler vernachlässigt werden).

2.6.3. Ersatzschaltbild der Photodiode

Die Funktionsweise einer realen Photodiode ist im Allgemeinen sehr kompliziert. Man geht daher über zu einem Ersatzschaltbild, welches in Abbildung 8 dargestellt ist. Zunächst wird von einer idealen Photodiode ausgegangen. Dazu kommen weitere Schaltkreise, um die elektronischen Effekte zu beschreiben.

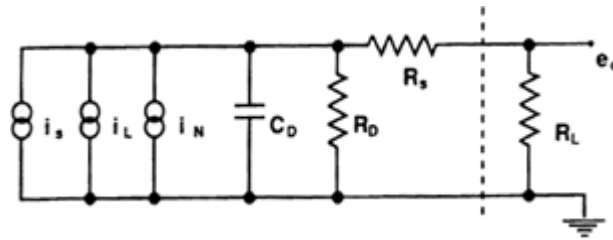


Abbildung 8: Ersatzschaltbild der Photodiode (Quelle: Centronic (2008b))

i_s	idealer Diodenstrom
i_L	Kriechstrom
i_N	Rauschstrom
C_D	Kapazität der Diode
R_D	Parallelwiderstand der Diode
R_S	Reihenwiderstand der Diode
R_L	Lastwiderstand

Hier im speziellen sind der Reihenwiderstand R_S und der Parallelwiderstand R_D wichtig. In Abhängigkeit von einem externen Lastwiderstand R_L , beeinflussen R_S und R_D den fließenden Strom und die Klemmenspannung der Photodiode. Insbesondere variiert nach Centronic (2008b) der Widerstand R_D produktionsbedingt innerhalb einer Produktlinie über einen größeren Bereich. Diese Information ist später beim Vergleich der Schaltungsvarianten der Photodiode von Bedeutung.

2.6.4. Kennlinie der Photodiode

So wie jedes elektronische Bauteil besitzt auch die Photodiode eine Kennlinie. Darin wird der Photostrom in Abhängigkeit von der Spannung dargestellt. Die weitere Abhängigkeit von der Lichtintensität ergibt eine Kurvenschar. Bei positiver Spannung hängt der Strom weitgehend linear von der einfallenden Lichtintensität ab. Bei negativer Spannung wird die Photodiode als Solarzelle betrieben. Bei großer negativer Spannung geht die Photodiode in die Sättigungsphase über, was am Einbruch der Stromstärke zu sehen ist. Zeichnet man in die Kennlinie eine Gerade ein, so entspricht die Steigung genau dem Kehrwert des Widerstands. Über einen solchen externen Widerstand R_L lässt sich der Arbeitsbereich der Photodiode bestimmen, was für die Planung einer elektronischen Schaltung wichtig ist.

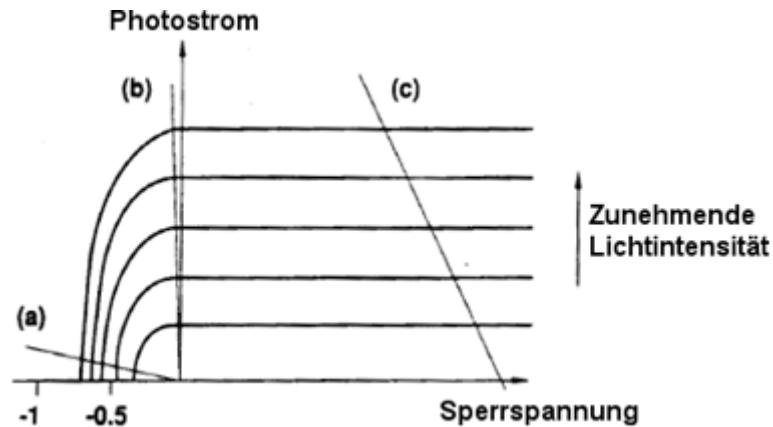


Abbildung 9: Kennlinie der Photodiode (Quelle: Centronic (2008b), mit deutscher Achsenbeschriftung nachbearbeitet)

2.6.5. Schaltung der Photodiode

Anhand der Kennlinie lassen sich verschiedene Arbeitsbereiche der Photodiode erkennen. Abhängig von der Spannung kann die Diode in Durchlassrichtung oder in Sperrrichtung betrieben werden. Mithilfe einer elektronischen Schaltung kann man die Arbeitsbereiche realisieren.

Beim Betrieb in Durchlassrichtung sind nach der Kennlinie prinzipiell zwei Betriebsmodi zu unterscheiden. Ausschlaggebend ist hierbei die externe Belastung, dargestellt durch einen Widerstand R_L . Der Widerstand R_L ist parallel zu dem internen Widerstand R_D aus dem Ersatzschaltbild. Man unterscheidet zwei Fälle:

- $R_L \gg R_D$: Nach Arbeitsgerade (a) in der Kennlinie wird die Photodiode als Solarzelle betrieben. Offensichtlich hängt der Photostrom nicht linear von der Lichtintensität ab. Für Messungen ist dieser Betrieb somit nicht geeignet.
- $R_L \ll R_D$: Die Arbeitsgerade (b) in der Kennlinie zeigt den Quasi-Kurzschlussbetrieb. Über den sehr kleinen Widerstand R_L fällt nur eine geringe Spannung ab und es fließt ein hoher Strom, der nahezu linear von der Lichtintensität abhängt. Der Strom wird lediglich durch die Photodiode begrenzt.

Zieht man in Betracht, dass der Widerstand R_D innerhalb der Produktlinie schwankt, so ist eine Aussage über eine lineare Abhängigkeit von der Lichtintensität nur schwer möglich. Diese Schwankungen sind besonders bei den Vergleichsmessungen mit Nebel in Abschnitt 4.3 zu beobachten.

Abbildung 10 zeigt eine Photodiode, die in Durchlassrichtung geschaltet ist. Die Diode und der Lastwiderstand R_L sind parallel geschaltet. Es wird dabei versucht, den Fall $R_L \ll R_D$ für den linearen Betrieb zu erfüllen. Mit der Ausführung von R_L als Potentiometer kann so der Stromfluss eingestellt werden. Die Spannung selbst hängt von der Diode ab, wobei die Messspannung vor jeder Messung mit einem 100Ω Potentiometer elektronisch auf 100 mV kalibriert wird. Diese Schaltungsvariante wird in Verwendung mit der Lasermessstrecke weiter untersucht. Im weiteren Text wird diese Schaltung daher mit „Diode in Durchlassrichtung“ bezeichnet.

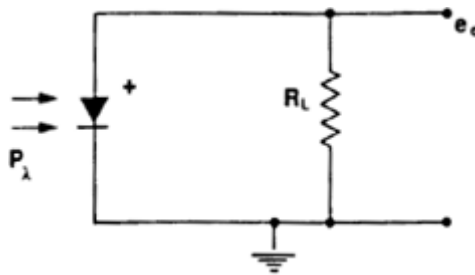


Abbildung 10: Schaltbild der Photodiode in Durchlassrichtung (Quelle: Centronic (2008b))

Der Betrieb in Sperrichtung liefert hingegen die Arbeitsgerade (c) in der Kennlinie. In diesem Betriebsmodus ist stets ein von der Beleuchtungsstärke linear abhängiger Strom garantiert. Der Widerstand R_D aus dem Ersatzschaltbild bleibt bei dieser Schaltungsvariante konstant. Einziger Nachteil ist das größere Rauschen beim Betrieb in Sperrichtung. Dieser Effekt ist aber bei der Anwendung in der Lasermessstrecke nicht von Bedeutung. Das Schaltbild dazu ist in Abbildung 11 dargestellt.

Über einen Spannungsteiler aus einem Widerstand R_L und der Photodiode in Sperrichtung wird eine externe Spannung angelegt. Über R_L kann der Arbeitsbereich eingestellt werden. Hierfür eignet sich besonders die Ausführung des Widerstands als Potentiometer. Parallel zu R_L wird nun die Messspannung abgegriffen. Weil diese Schaltungsvariante von einer externen Spannungsquelle versorgt wird, hängt die Messspannung nicht direkt von der Photodiode ab und besitzt einen größeren Spannungsbereich. Verwendet wird ein Festspannungsnetzteil mit 5 V . Mit einem $10 \text{ k}\Omega$ Potentiometer wird die Messspannung hierbei auf 5 V kalibriert. Diese Schaltungsvariante wird in Verwendung mit der Lasermessstrecke weiter untersucht. Im weiteren Text wird daher diese Schaltung mit „Diode in Sperrichtung“ bezeichnet.

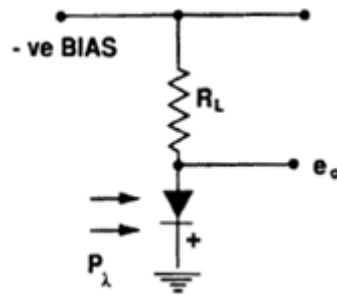


Abbildung 11. Schaltbild 1 der Photodiode in Sperrrichtung (Quelle: Centronic (2008b))

Der Einsatz eines Operationsverstärkers (OP) wie in Abbildung 12 dargestellt, ist eine erweiterte Variante, um die Photodiode in Sperrrichtung zu betreiben. Der Operationsverstärker wird hier als Invertierer verwendet. Der Spannungsteiler aus der Photodiode und dem Widerstand R_f stellt den Arbeitspunkt am invertierenden Eingang des OP dar. Über die Rückkopplung mit R_f kann dann die Verstärkung eingestellt werden. Das Messsignal wird nun am Ausgang des OP abgegriffen. Durch die Beschaltung eines Operationsverstärkers stellt der Aufbau der Schaltung 2 einen deutlichen Mehraufwand gegenüber Schaltung 1 dar. Zudem wird kein deutlich besseres Messergebnis durch den Aufwand erwartet. Schaltungsvariante 2 wird daher in der weiteren Arbeit nicht untersucht.

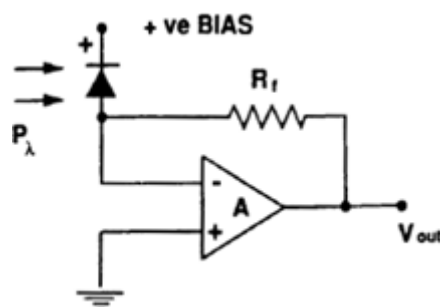


Abbildung 12: Schaltbild 2 der Photodiode in Sperrrichtung (Quelle: Centronic (2008b))

2.7. PC – Messsystem

Die Messungen erfolgen mit einem computergestützten Messsystem. Dabei werden die analogen Messsignale zunächst auf einen Eingang des DAQ-Modul (Data Acquisition Modul) aufgeschaltet und anschließend digital zum PC übertragen. Um das Modul zu programmieren und anschließend die Messdaten zu verwerten, wird das Programm DASyLab verwendet.

2.7.1. DAQ – Modul

Beim DAQ-Modul handelt es sich um ein Multifunktionsmesssystem (Fabrikat: Omega). Über mehrere Ein- und Ausgänge können Daten von Analog nach Digital und von Digital nach

Analog gewandelt werden. Weiterhin bestehen Anschlussmöglichkeiten für Thermoelemente, um beispielsweise Temperaturmessungen durchzuführen. Die erfassten Daten werden anschließend über USB an einen PC übertragen. Für alle Messungen mit der Lasermessstrecke wird ausschließlich die Variante AD-Wandler (Auflösung bis zu 22 Bit) verwendet. Anschließend können die digitalen Daten mit Auswertesoftware weiter verarbeitet werden.

2.7.2. Steuersoftware des Messsystems

Die verwendete Steuersoftware DASyLab (Firma: National Instruments) vereinigt Funktionen des Messens, Steuerns und Regelns. Die zugeordnete Hardware besteht aus einem DAQ-Modul, welches mit dem Computer verbunden wird. Je nach Bedarf können innerhalb der Software per Drag & Drop verschiedene Module in die Arbeitsoberfläche eingefügt werden. Diese Module werden alle über spezifische Eigenschaften konfiguriert, so dass keine Programmiersprache nötig ist. Anschließend werden die Ein- und Ausgänge der Module miteinander verbunden. Abbildung 13 zeigt die Arbeitsoberfläche als Screenshot.

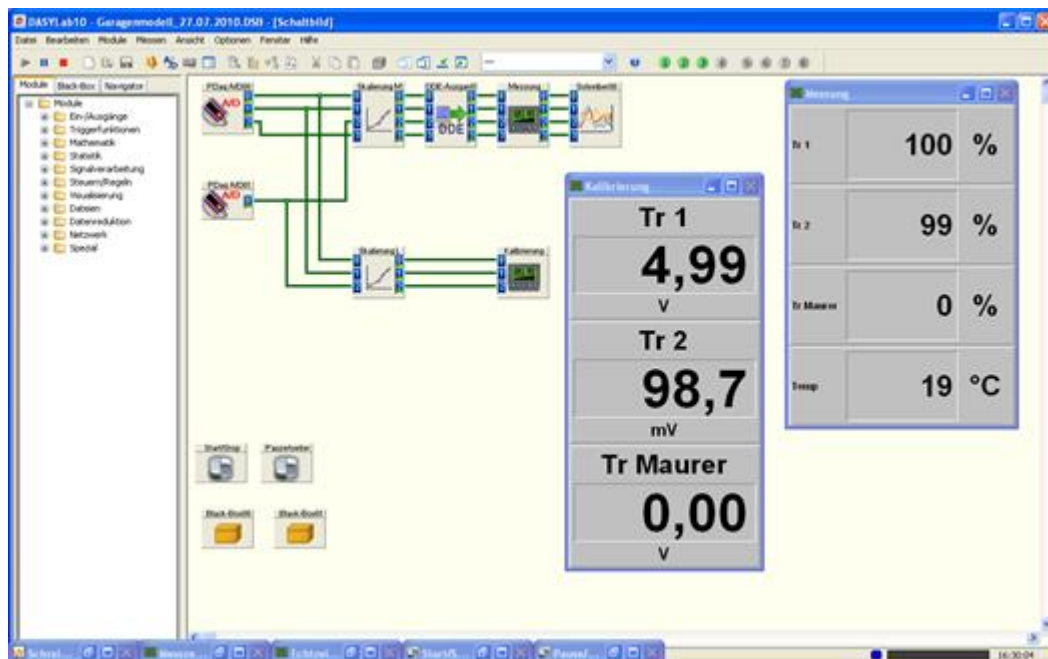


Abbildung 13: DASyLab Arbeitsoberfläche als Screenshot

Zunächst werden die Messdaten über ein Modul als Schnittstelle zur Hardware des DAQ-Moduls in einem vom Anwender der Messaufgabe angepassten Zeitintervall eingelesen. Abhängig von den eingesetzten Messgrößen liegen verschiedene Spannungswerte als Rohdaten vor. Zur besseren Vergleichbarkeit von gleichartigen Messstrecken untereinander werden die Spannungswerte daher in einem Skalierungs-Modul auf Transmissionswerte von 0 bis 100 % umgerechnet. Zur Umrechnung sind für die in dieser berücksichtigten Messstrecke

cken beziehungsweise Schaltungsvarianten der Photodiode (Sperrichtung oder Durchlassrichtung) jeweils die folgenden Geraden hinterlegt

$$T_{Durchlass} = \frac{100\%}{100 \text{ mV}} \times U_{Durchlass}$$

$$T_{Sperr} = \frac{100\%}{5 \text{ V}} \times U_{Sperr}$$

$$T_{Maurer} = \frac{100\%}{1 \text{ V}} \times U_{Maurer}$$

Ein weiteres Modul der Software wandelt die Messdaten zur späteren Auswertung in eine Excel-Datei um. Über ein Display-Modul können die Messwerte auch direkt in ihrem zeitlichen Verlauf am Bildschirm angezeigt werden.

3. Versuchsaufbau und Durchführung

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die verwendeten Lasermessstrecken und das Maurer ME 82 Messgerät.

Die hier beschriebenen Messanordnungen gelten als Grundlage für alle folgenden Messungen. Im Anschluss werden die eigentlichen Versuchsaufbauten für die Messungen beschrieben. Um den Zusammenhang zu vereinfachen, wurde bei den Skizzen zu den Messungen auf unwesentliche Details verzichtet.

3.1. Lasermessstrecke

Die verwendete Lasermessstrecke besteht aus einem Sender und einem Empfänger. Beide Komponenten sind für diese Versuche/ Kalibrierung in einem Abstand von 14 cm parallel auf einer Metallschiene montiert.

- Als Sender wird eine 5 mW Laserdiode mit Punkt-Optik (siehe 2.5.2) verwendet. Das komplette Lasermodul in Stiftform war zunächst für die Kalibrierversuche in eine äußere Fassung eingelassen und über insgesamt sechs Madenschrauben fixiert. Die Schrauben dienten der mechanischen Ausrichtung des Senders. Als Spannungsversorgung wird ein geregeltes Netzteil mit 5 V verwendet.

- Der Empfänger wird durch die Photodiode OSD15-5T (siehe 2.6.2) realisiert. Das stiftförmige Modul war zunächst für die Kalibrierung ebenfalls in eine Fassung montiert und war über sechs Madenschrauben justierbar. Entsprechend der Anwendung wird die Diode über eine elektronische Schaltung entweder in Durchlass- oder Sperrrichtung betrieben. Das Signal wird dann auf einen Eingang des DAQ-Moduls gegeben und mit dem PC ausgewertet.

Für eine reibungslose Messung müssen vor der Inbetriebnahme einer neuen Messstrecke einige Punkte beachtet werden. Zudem sollte die Messstrecke justiert werden. Dazu hat sich folgende Vorgehensweise bewährt:

1. Laserdiode mit Betriebsspannung verbinden und Photodiode an die Messschaltung anschließen. Danach ca. 10 Minuten warten. Die Zeit wird dazu benötigt, damit die Komponenten auf Betriebstemperatur arbeiten und sich das System einschwingt. Nur so ist sichergestellt, dass Abweichungen durch das Messsystem möglichst gering gehalten werden.

2. Laserdiode und Photodiode mechanisch über die Madenschrauben justieren, bis sich am Empfänger ein Intensitätsmaximum einstellt.

3. Über das Potentiometer in der Messschaltung wird das Messsystem elektronisch kalibriert. Der Messwert wird so auf einen Normwert eingestellt. Damit sind 100 % Transmission definiert. Hierdurch wird es möglich, die Signale verschiedener gleichartiger Messstrecken unmittelbar miteinander zu vergleichen.

Abbildung 14 zeigt jeweils eine Skizze von Sender und Empfänger in Frontalansicht. Zu erkennen ist der stiftförmige Einbau der Module in eine äußere Fassung. Zudem sind die vorderen Madenschrauben zu sehen. Abbildung 15 gibt skizzenhaft eine komplette Übersicht über den Aufbau der Lasermessstrecke in Seitenansicht.

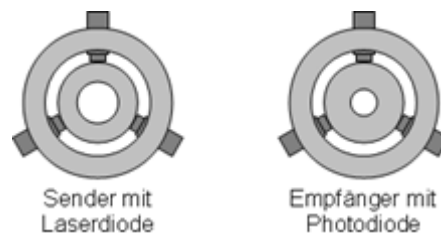


Abbildung 14: Grundaufbau der Lasermessstrecke in Frontansicht

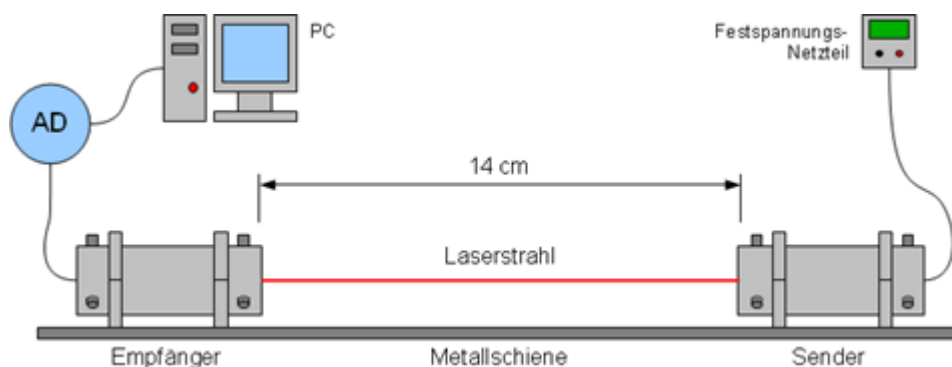


Abbildung 15: Grundaufbau der Lasermessstrecke in Frontansicht

3.1.1. Zulässige Modifikationen der mechanischen Fixierung von Sender und Empfänger

Im Vorgriff auf Erkenntnisse, die bei der Nutzung des hier grundsätzlich beschriebenen Lasermesssystems bei weiteren Projekten der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gewonnen wurden, können die Aufwendungen für Halterung und Positionierung von Sender und Empfänger ohne Funktionseinbuße weiter reduziert werden. Es ist demgemäß auch möglich, das Messsystem ohne die äußeren Hüllrohre aufzubauen, wobei die stiftförmigen Sende- und Empfängermodule mittels der stiftformangepassten Klammern auf einer Leiste derartig befestigt werden, dass der Lichtstrahl des Lasers die Aufnahmeöffnung der Laserdiode ausfüllt. Diese Anordnung hat den Vorzug, eine weitere Miniaturisierung mit der Folge

einer geringeren Beeinträchtigung des Strömungsfeldes durch die messtechnisch bedingten Einbauten zu gewährleisten. Dies war zum Beispiel bei Versuchen in der Modelltiefgarage sinnvoll, bei denen das Ausbreitungsverhalten schwerer Gase zu untersuchen war. Hierbei findet die Ausbreitung des Nebels in Bodennähe statt. Bei dem dort verwendeten Modellmaßstab von 1:18 war es unter anderem erforderlich, weil schon wenige cm Abstand von der Quelle einen signifikanten Unterschied für die Auswertung der Messergebnisse hervorrufen können, die Höhe der Lasermessstrecke zu minimieren. Deshalb wurde mit der Folge der verbesserten räumlichen Auflösung die Fassung, in die der Laser und die Diode eingebracht waren sowie die Befestigungsschiene zur Anpassung an die erforderliche geringe Höhenlage der Messstrecke über dem Boden des Versuchsraums entfernt.

Des Weiteren wurde im Verlauf solcher Versuche beobachtet, dass sich sowohl die Positionierung als auch der Abstand der Messstrecken auf die Auswertung der Messergebnisse auswirken. So ist zu beachten, dass der bei der in diesem Bericht beschriebenen Kalibrierung und ersten Erprobung der Messstrecken festgelegte Abstand zwischen Laser und Photodiode (14 cm) nicht grundsätzlich für verschiedene Modelle geeignet sein muss. Dies ist nur dann zu erwarten, wenn sich das Strömungsbild so einstellt, dass diese Messstrecke jeweils gleichmäßig durch vorbeiströmenden Rauch/ Nebel ausgefüllt ist. So wurde bei den Versuchen mit schweren Gasen im Tiefgaragenmodell festgestellt, dass die gesamte Länge der Messstrecke nur teilweise komplett ausgefüllt war. Der hierbei entstehende Auswertefehler zwischen dem Bezug der Konzentration auf 14 cm Abstand oder auf die tatsächlich durch die partikelbeladene Strömung ausgefüllte (geringere) Messlänge ist dann individuell zu korrigieren. Dies kann entweder dadurch erfolgen, dass der Abstand zwischen Laser und Photodiode vor dem Versuch verringert wird, sodass die Messstrecke immer von Strömung ausgefüllt ist, oder dass durch näherungsweisen Vergleich der anzusetzenden Messlänge mit der vorhandenen Messlänge festgestellt wird, wie groß der maßgebende Abstand ist. Dies kann zum Beispiel mittels parallel zu den Strömungsmodellversuchen angefertigten Filmaufnahmen einer senkrecht auf den Grundriss des Versuchsstands ausgerichteten Videokamera ermittelt werden. Voraussetzung hierzu ist der Aufbau des Strömungsmodells aus durchsichtigen Wand- und Deckenplatten. Allerdings stößt die Verringerung des tatsächlichen Messabstandes durch Annäherung von Sender und Empfänger an ihrer Grenzen dort, wo der Abstand so gering wird, dass hierdurch das Strömungsbild nachhaltig verändert wird.

3.2. Maurer Rauchdichtemessgerät

Das Maurer ME 82 Rauchdichtemessgerät wurde ausführlich in 2.4.1 beschrieben. Der Sender und der Empfänger werden idealerweise auf einer optischen Bank montiert. Bei der Ausrichtung der Komponenten ist darauf zu achten, dass der Lichtstrahl vollständig auf den

Empfänger trifft. Am Anzeigeeinstrument des Messgeräts ist bei dieser Justierung das Intensitätsmaximum herbeizuführen. Den Grundaufbau skizziert Abbildung 16.

Das Foto in Abbildung 17 zeigt den Grundaufbau zweier Lasermessstrecken und des Maurer Messgeräts für alle weiteren Kalibrierversuche. Zu sehen ist die Montage von Sender und Empfänger der Lasermessstrecke auf der Metallschiene. Das Maurer Messgerät befindet sich in der Mitte und ist mittels optischer Bank ausgerichtet. Alle Messstrecken wurden auf die gleiche Höhenlage der Messebene ausgerichtet. Für die Sichtbarkeit der Lichtstrahlen wurde eine kleine Menge Nebel in der Messstrecke verteilt.

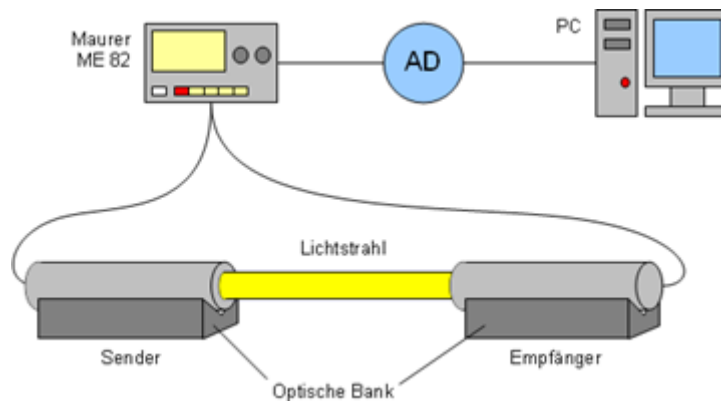


Abbildung 16: Grundaufbau des Maurer ME 82 Rauchdichtemessgeräts

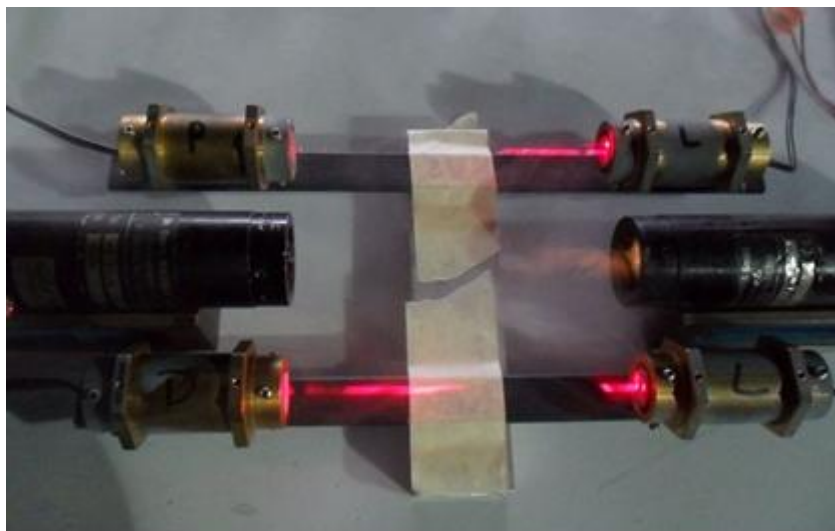


Abbildung 17: Foto zum Grundaufbau des Maurer ME 82 Rauchdichtemessgeräts und zweier Lasermessstrecken

3.3. Abhängigkeit der Laserintensität von der Betriebsspannung

Zur Bewertung der Laserintensität in Abhängigkeit der Betriebsspannung wurde ein handelsübliches Multifunktions-Umweltmessgerät mit Lichtsensor (Fabrikat: Conrad) verwendet. Als Lichtquelle wurde ein 5 mW Laser auf eine optische Bank gelegt und der Strahl direkt auf den Sensormittelpunkt gerichtet. Um Einflüsse durch Fremdlicht auszuschließen, blieb der Messaufbau abgedunkelt. Zur Messung wurde am regelbaren Netzteil die Spannung von 5 Volt bis 2 Volt in 0,1 Volt Schritten heruntergefahren und dabei die Laserspannung von einem Voltmeter und die dazugehörige Beleuchtungsstärke vom Luxmeter abgelesen. Der dazugehörige Versuchsaufbau ist in Abbildung 18 dargestellt.

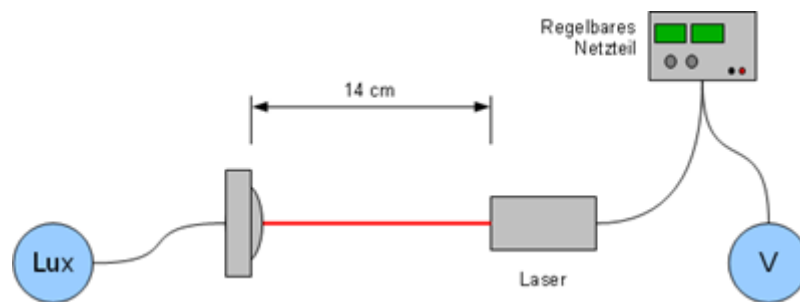


Abbildung 18: Versuchsaufbau zur Messung der Laserintensität mit Conrad Luxmeter

Für die Wiederholung der Messreihe kamen zwei vollständige Lasermessstrecken mit Photodiode zum Einsatz. Die Beschaltung der Photodiode T1 erfolgte in Sperrrichtung, die Photodiode T2 in Durchlassrichtung. Wieder wurden am regelbaren Netzteil Spannungen von 5 Volt bis 2 Volt in 0,1 Volt Schritten abnehmend eingestellt und dabei die Laserspannung von einem Voltmeter und die Diodenspannungen am PC abgelesen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 19 skizziert.

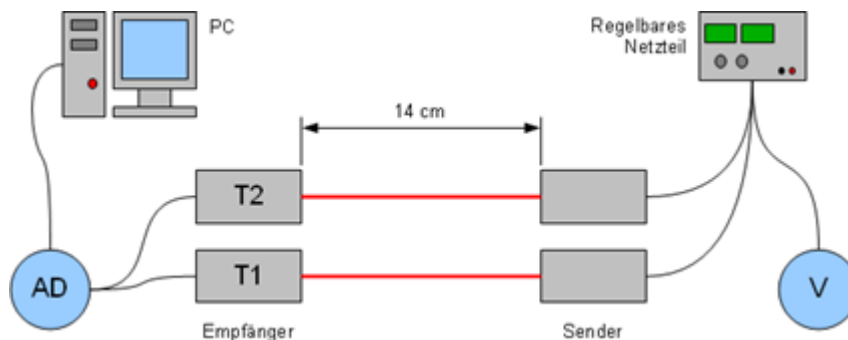


Abbildung 19: Versuchsaufbau zur Messung der Laserintensität mit Photodiode

3.4. Vergleichsmessungen mit Folie

Bei den Messungen mit Folie wurden die Messmethoden anhand der Trübung an unterschiedlichen Positionen verglichen. Zu diesem Zweck erfolgte der Betrieb der Messstrecke T1 in Sperrichtung und der Messstrecke T2 in Durchlassrichtung. Als Referenz diente das Maurer ME 82 Messgerät. Alle drei Systeme hatten den gleichen Abstand von Sender und Empfänger. Zur Lichtdämpfung wurde leicht eingetrübtes Folienmaterial aus einer handelsüblichen Sichthülle verwendet (Fabrikat: Leitz 4100, Material PVC). Die Folie wurde an einem Stativ stets senkrecht zum Lichtstrahl befestigt. Eine Versuchsskizze kann Abbildung 20 entnommen werden.

Die Platzierung der Folie begann mit einem Abstand von 1 cm zum Empfänger und wurde anschließend in 1 cm-Schritten Richtung Sender verschoben. Um eine höhere Trübung zu erreichen, wurden bis zu 4 Folien aneinander gelegt und die Messreihen jeweils wiederholt.

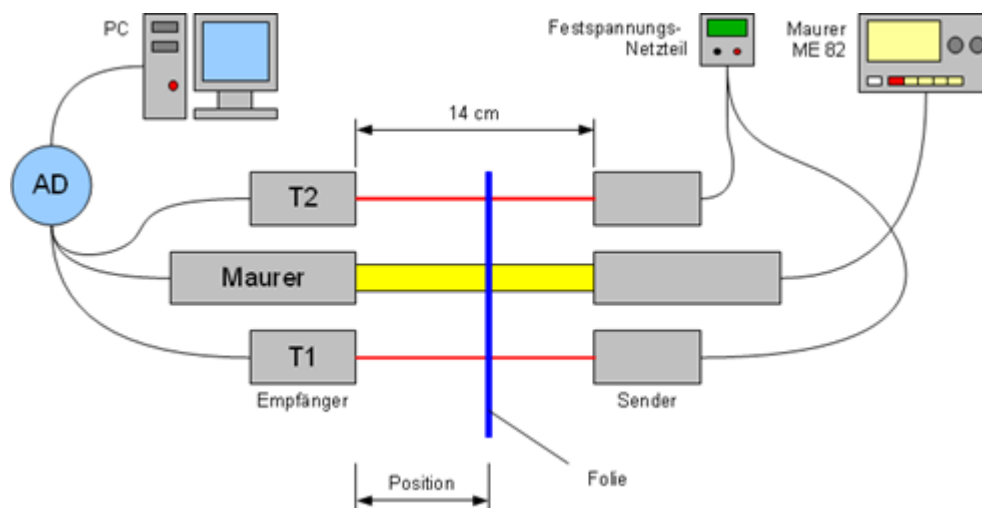


Abbildung 20: Versuchsaufbau zur Messung mit Folien

Abbildung 21 ist die Versuchsanordnung zur Folienmessung zu entnehmen. Wie oben beschrieben, besteht der Grundaufbau aus zwei Lasermessstrecken und dem Maurer Messgerät in der Mitte. Mithilfe zweier Stative wird die Folie in den Strahlengang gehalten und mit einem Meterstab exakt positioniert.

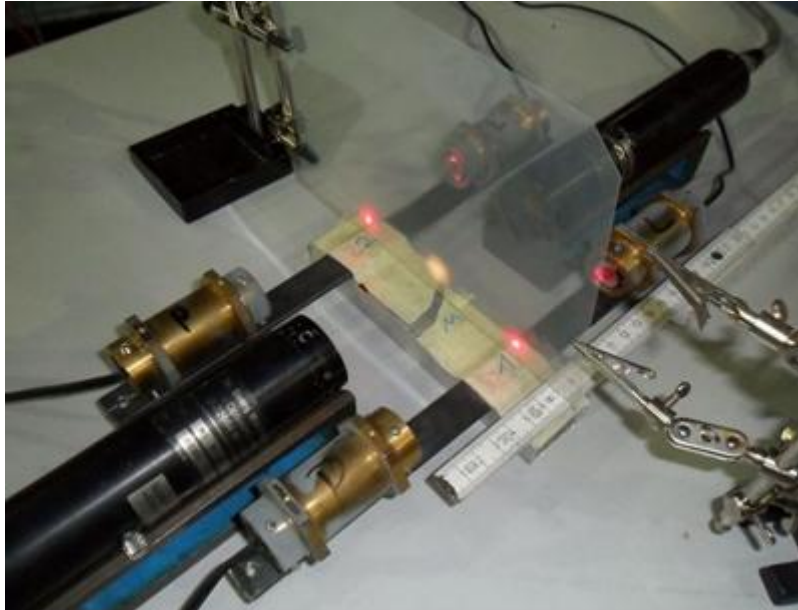


Abbildung 21: Foto zum Versuchsaufbau zur Messung mit Folien

3.5. Vergleichsmessungen mit Nebel

Im Folgenden wird eine Vergleichsmessung beschrieben, bei der in einen mit den drei vorgenannten Messstrecken bestückten Versuchsraum Nebel eingeleitet und gleichmäßig verteilt worden war. Der Raum hatte Abmessungen von ca. 100 cm x 60 cm x 30 cm (LxBxH), wobei Boden und Decke aus Holzplatten bestanden; die Wände waren aus Polyethylenfolie, vergleiche Abbildung 23. In dem Raum befindet sich also je eine Lasermessstrecke in Durchlassrichtung und eine in Sperrrichtung. Dazu kommt die Messstrecke Maurer ME 82 als Referenz. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger beträgt in allen Fällen jeweils 14 cm. Die Lasermessstrecken werden mit 5 V vom Festspannungsnetzteil versorgt. Die Empfänger sind über das DAQ-Modul mit dem PC verbunden. Vor den Messstrecken befindet sich ein PC-Lüfter, der den einströmenden Nebel verteilt und für eine homogene Nebelverteilung in der Messstrecke sorgt. Zur Produktion des Nebels wird eine handelsübliche Disconebelmaschine mit Nebelfluid verwendet, welche mit einem Schlauchsystem direkt mit dem Messaufbau verbunden ist. Der Nebelstrom selbst kann über einen Kugelhahn am Nebelreinlass reguliert werden. Direkt vor dem Nebelreinlass ist eine Wand angebracht, um den Nebelstrom als direkten Strahl in die Messapparatur zu verhindern. Den Messaufbau zeigt Abbildung 22.

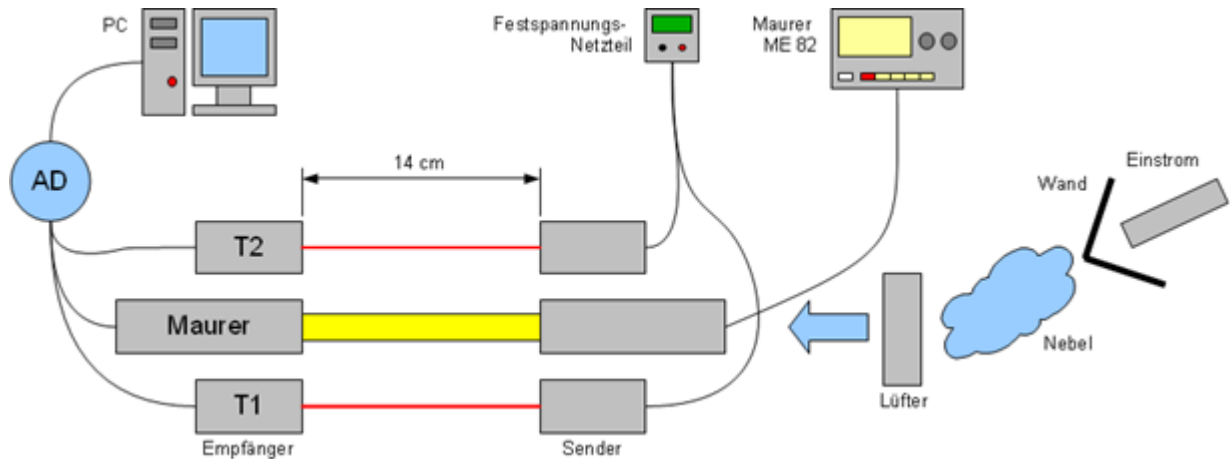


Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Messung mit Nebel

Zur Durchführung wurden zunächst die Messstrecken ausgerichtet. Vor der Messung wurde der Raum abgedichtet. Anschließend wurde über einen Zeitraum von 20 Minuten Nebel in den Raum eingelassen, und danach durch einen externen Lüfter freigespült. Der Versuch wurde insgesamt 5-mal wiederholt.

- Die Vergleichsmessungen 2 und 3 dienen zur Bestätigung der Vergleichsmessung 1 und zur Sicherung der Konsistenz. Die Versuche wurden direkt in Folge und ohne weitere Veränderungen des Aufbaus durchgeführt.
- Bei Vergleichsmessung 4 wurde die Beschaltung der beiden Lasermessstrecken ausgetauscht. Messstrecke T1 wurde deshalb in Durchlassrichtung und Messstrecke T2 in Sperrrichtung betrieben. Der Versuch sollte also ein Vergleich zwischen den beiden Lasermessstrecken und Maurer dem Messgerät herstellen.
- Bei Vergleichsmessung 5 wurden zwei aus neuen Komponenten aufgebaute Lasermessstrecken verwendet. Zudem wurde die Nebelmaschine gegen ein anderes Modell ausgetauscht sowie ein anderes Nebelfluid verwendet, um die Eignung des Messverfahrens unter völlig veränderten Randbedingungen zu erproben.

Abbildung 23 zeigt den Grundaufbau aus zwei Lasermessstrecken und dem Maurer Messgerät im Versuchsraum.



Abbildung 23: Foto zum Versuchsaufbau zur Messung mit Nebel

3.6. Messung der Nebelstandzeit

Zur Bestimmung der Nebelstandzeit wurde eine Box aus Plexiglas mit einem Volumen von ca. 100 Liter verwendet. Für die Standzeit ist es wichtig, dass die Box dicht ist und kein Nebel austreten kann. Für die Platzierung des Maurer Messgeräts befinden sich auf etwa 20 cm Höhe Bohrungen in der Box. Das Maurer Messgerät ist entsprechend über das DAQ-Modul mit dem PC verbunden. In der Box ist zur homogenen Nebelverteilung ein Lüfter platziert. Daneben steht eine Plexiglasplatte zur Messung der Nebelablagerung entsprechend Abschnitt 3.7. Für die Nebelerzeugung kommt eine handelsübliche Nebelmaschine zum Einsatz. Der Nebelzustrom kann über einen Kugelhahn direkt am Nebeleinlass gesteuert werden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 24 skizziert. Es ist anzumerken, dass sich die Plexiglasplatte vor dem Lichtstrahl und nicht im Lichtstrahl befindet.

Abbildung 25 enthält ein Foto des Versuchsaufbaus. Man erkennt die Box, sowie die Komponenten des Maurer Messgeräts. Die Box wurde mit Klebeband abgedichtet. In der Box selbst ist das Stativ mit der Plexiglasplatte zur Nebelablagerung erkennbar.

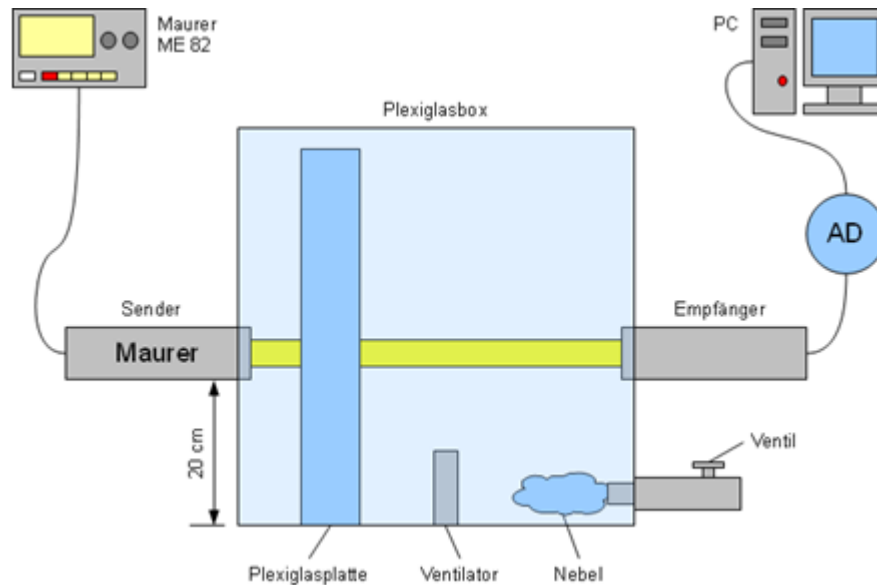


Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Messung der Nebelstandzeit

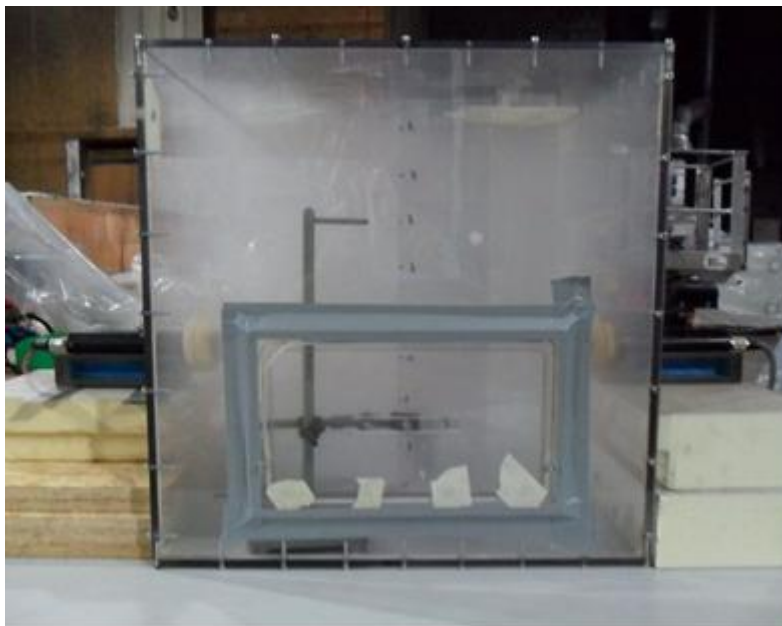


Abbildung 25: Foto zum Versuchsaufbau zur Messung der Nebelstandzeit

Zuerst werden alle nötigen Komponenten in die Box eingebaut. Anschließend wird die Box verschraubt und mögliche Undichtigkeiten werden abgedichtet. Der Nebelzustrom in die Box wird über den Kugelhahn eingeleitet. Die Nebelmenge wird dabei so festgelegt, dass Transmissionswerte gegen 10% erreicht werden. Zeitgleich mit dem Nebelzustrom bleibt der Lüfter in Betrieb, wird aber nach Erreichen homogener Nebelverteilung ausgeschaltet, um die Standzeitmessung nicht zu beeinflussen.

3.7. Messung der Nebelablagerung

Auf der Plexiglasplatte (vergleiche 3.6) sind im Bereich 5 bis 45 cm in einem Abstand von 5 cm Messpunkte markiert. Zur Messung befindet sich die Plexiglasplatte in der Box aus der Standzeitmessung in Abschnitt 3.6. In der Box wird die Platte mit einem Stativ festgehalten und sitzt direkt auf dem Boden auf, damit die Nebelablagerung in Abhängigkeit von der Höhe untersucht werden kann. Der Aufbau für die Nullmessung, sowie der Messung nach Ablagerung ist in Abbildung 26 dargestellt.

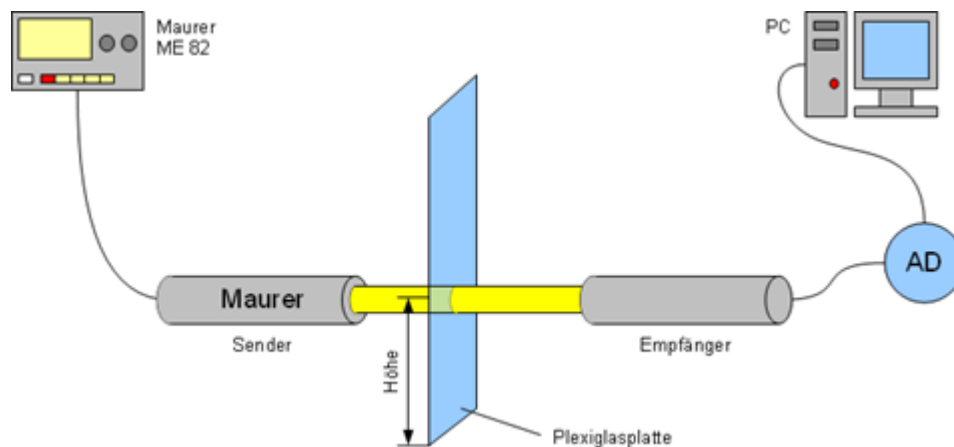


Abbildung 26: Versuchsaufbau zur Messung der Nebelablagerung an Plexiglas

Vor Messung der Nebelablagerung wurde zunächst an den markierten Punkten eine Nullmessung durchgeführt. Dazu wurde die Transmission an den markierten Stellen mit dem Maurer-Messsystem gemessen. Um daraufhin die Messung der Standzeit durchzuführen, wurde die Platte in der Box montiert. Nach Abschluss der Messung wurde die Transmission nochmals mit dem Maurer Messgerät an den markierten Stellen gemessen und die Werte mit der Nullmessung verglichen. Aus der Differenz zwischen Standzeitmessung und Nullmessung ergibt sich die optische Trübung durch Nebelablagerung.

4. Messungen und Auswertung

4.1. Abhängigkeit der Laserintensität von der Spannung

Das vorliegende Datenblatt der Laserdiode macht keine Aussage über die Schwankung der Laserintensität als Funktion der Spannung. Für spätere Messanwendungen muss jedoch die Stabilität der Intensität gewährleistet sein. Die Abhängigkeit der Laserintensität von der Spannung wurde daher im Folgenden mit verschiedenen Methoden registriert.

Abbildung 27 zeigt die Messung der Beleuchtungsstärke mit einem Conrad-Luxmeter in Abhängigkeit der Laser-Versorgungsspannung. Der Fehler des Luxmeters ist mit $\pm 5\%$ des Anzeigewertes angegeben. Für den Fehler der eingestellten Spannung wird ein Wert von $\pm 0,02\text{ V}$ angenommen. Bei sinkender Spannung bis ungefähr 3 V bleibt die Beleuchtungsstärke in dem Bereich von 5200 bis 5500 Lux weitgehend stabil. Zwischen einer Spannung von $2,4$ und 3 Volt gibt es einen leichten Einbruch der Beleuchtungsstärke. Ab $2,4\text{ V}$ kommt es zum schlagartigen Abfall der Beleuchtungsstärke, was wohl mit dem Unterschreiten der Laserschwelle erklärt werden kann.

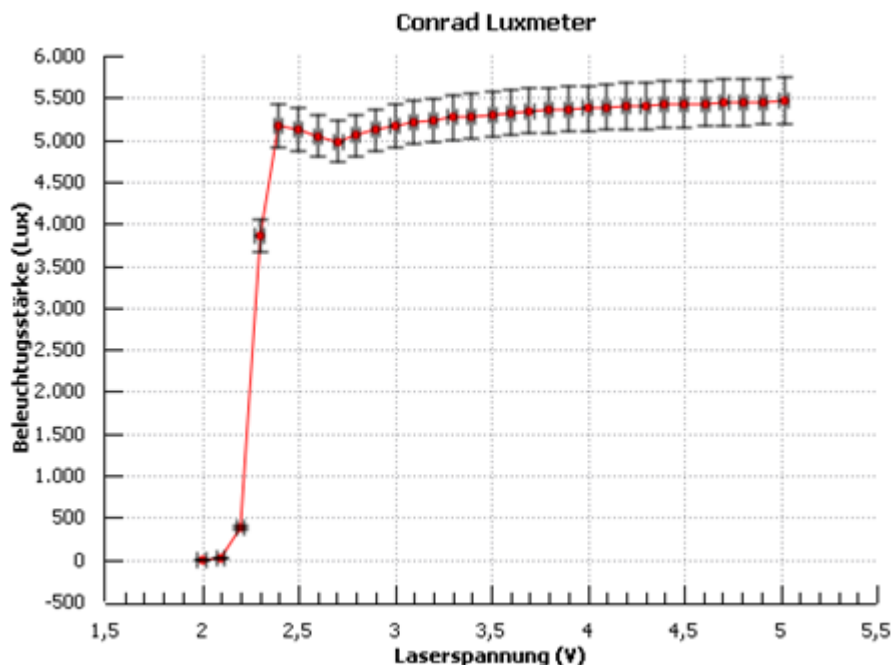


Abbildung 27: Messung der Laserintensität mit Conrad Luxmeter

Die Messung der Laserintensität mit einer Photodiode in Sperrrichtung in Abbildung 28 verläuft ähnlich wie die Messung mit dem Conrad-Luxmeter. Nur im Bereich von 3 bis 5 V fällt die Messspannung schwächer ab. Die Fehler wurden für die Messspannung zu $\pm 0,05\text{ V}$ und

für die Laserspannung zu $\pm 0,02$ V geschätzt. Prinzipiell lässt sich hier durch einen Vergleich der Werte mit dem Luxmeter eine Zuordnung der Messspannung zu einer Beleuchtungsstärke ableiten. Die Kenntnis dieser absoluten Messwerte ist aber für die Messmethode nicht weiter von Interesse.

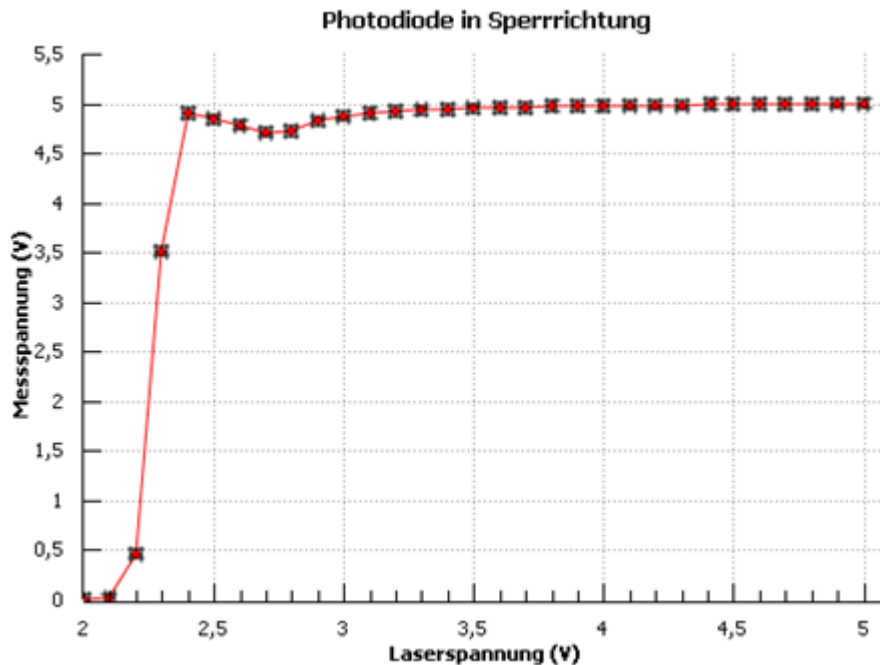


Abbildung 28: Messung der Laserintensität mit Photodiode in Sperrrichtung

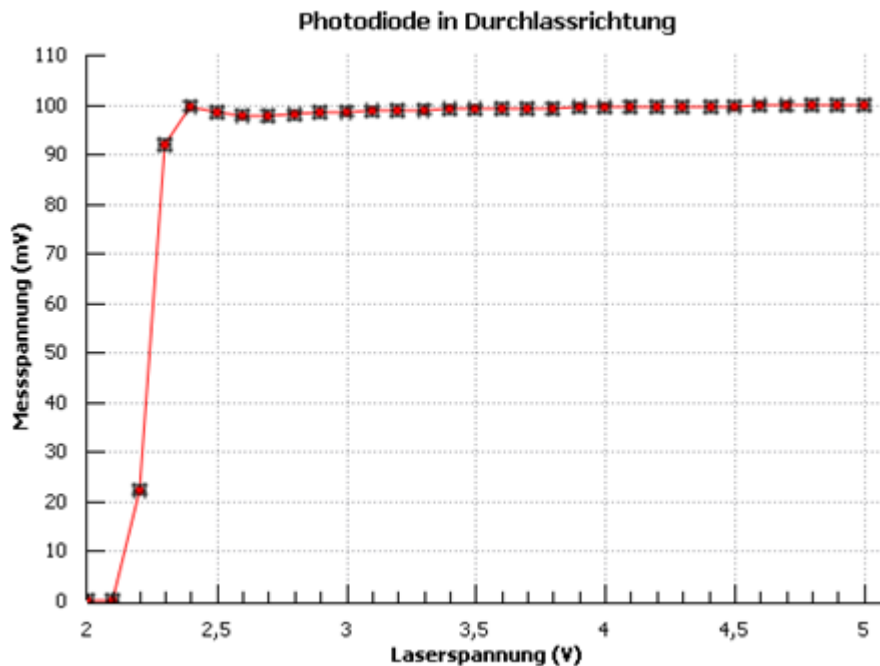


Abbildung 29: Messung der Laserintensität mit Photodiode in Durchlassrichtung

Die Messung mit einer Photodiode in Durchlassrichtung (wie Abbildung 29 zeigt) verläuft im Bereich von 3,5 bis 5 V ähnlich, wie die anderen Messmethoden. Bei Spannungen kleiner

3 V gibt es jedoch signifikante Abweichungen. Ein Einbruch der Intensität ist für den Bereich zwischen 2,5 und 3 V kaum festzustellen. Spätere Messungen ergaben allerdings, dass diese Schaltungsvariante ungeeignet ist. Als Fehler wurden für die Messspannung ± 1 mV und für die Laserspannung $\pm 0,02$ V geschätzt.

Als Ergebnis dieser Messreihe folgt, dass die Laserintensität oberhalb einer Spannung von 4 V weitgehend stabil bleibt. Messfehler durch kleinere Schwankungen der Laser-Versorgungsspannung können somit für weitere Betrachtungen vernachlässigt werden.

4.2. Vergleichsmessungen mit Folie

Um einen ersten Eindruck über das Verhalten der Messstrecke zu gewinnen, wurden Vergleichsmessungen mit Folien durchgeführt. Je nach Anzahl der in der Messstrecke befindlichen Folien wird eine optische Trübung erzeugt. Darüber hinaus können die Folien frei innerhalb der Messstrecke positioniert werden. Es lässt sich also quantitativ ein Unterschied feststellen, ob sich die optische Trübung näher am Sender oder am Empfänger befindet.

Gemessen wurde jeweils die Abhängigkeit der Transmission von der Position der Folie. Der Messvorgang wurde insgesamt für 1 bis 4 Folien wiederholt. Zur Messung der Transmission kamen die Lasermesssysteme in Sperr- und Durchlassbetrieb der Diode zum Einsatz. Als Referenz diente das Maurer Messgerät. Für alle folgenden Messungen wurde als Fehler der Position $\pm 0,4$ cm geschätzt. Für die Diode in Durchlassrichtung und in Sperrrichtung wurde je ein Fehler von ± 2 % angenommen. Der Fehler des Maurer-Messgeräts wird mit $\pm 0,2$ % des gemessenen Werts angegeben.

Die erste Messung der Transmission, als Funktion der Position einer Folie ist in Abbildung 30 dargestellt. Die Messung mit dem Maurer Messgerät zeigt bei einem Abstand von 1 cm zum Empfänger einen Messwert von 69 %. Für alle weiteren Positionen bleibt der gemessene Wert konstant bei 70 %. Die Diode in Sperrrichtung kommt der Referenzmessung vom Maurer Messgerät am nächsten. Angefangen mit einem Wert von 78 % bei der Position 1 cm, fällt der Wert mit zunehmendem Abstand auf 63 %. Es gibt dabei einen Schnittpunkt mit der Maurer Messkurve bei etwa 11 cm. Die Diode in Durchlassbetrieb fällt von einem Anfangswert von 88 % mit zunehmendem Abstand monoton auf 77 %. Die Messwerte der Diode in Durchlassrichtung sind dabei am weitesten von der Referenz entfernt.

In Abbildung 31 ist die Messreihe für zwei Folien dargestellt. Hier bleibt wiederum das Maurer Messgerät mit einem Wert von 49 % weitgehend unabhängig von der Position. Die Werte der Diode in Sperrbetrieb fallen von 60 % auf 47 %. Die Werte der Diode in Durchlassbetrieb liegen zwischen 75 % und 67 % deutlich über der Referenz.

Abbildung 32 zeigt selbige Messung für drei Folien. Die Messwerte des Maurer-Messgeräts liegen nahezu konstant bei 31 %. Die Werte der Diode in Sperrrichtung fallen von 41 % auf 29 % ab. Die Werte der Diode in Durchlassrichtung fallen von 41 % auf 29 % ab.

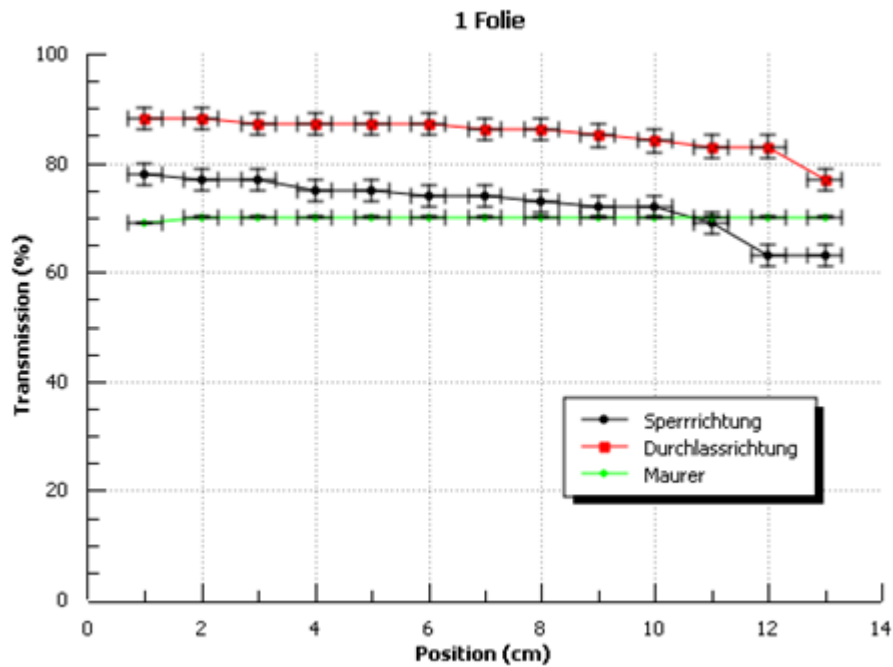


Abbildung 30: Transmission in Abhängigkeit von der Position für 1 Folie

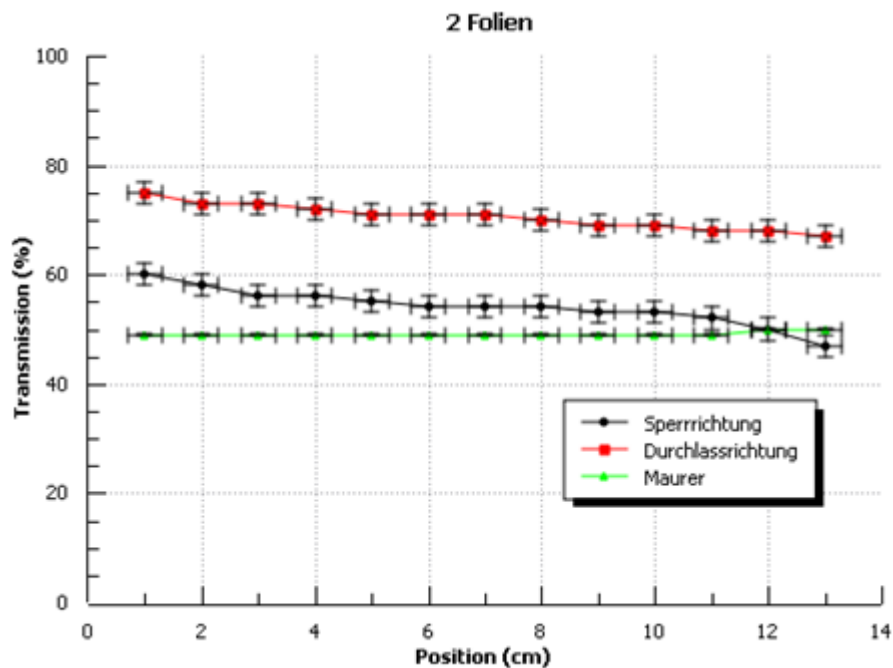


Abbildung 31: Transmission in Abhängigkeit von der Position für 2 Folien

Die Messreihe für 4 Folien ist Abbildung 33 zu entnehmen. Die Messwerte des Maurer-Messgeräts liegen fast unverändert auf 20 %. Die Werte der Diode in Sperrrichtung fallen von 27 % auf 18 % ab. Die Werte der Diode in Durchlassrichtung fallen von 38 % auf 28 % ab.

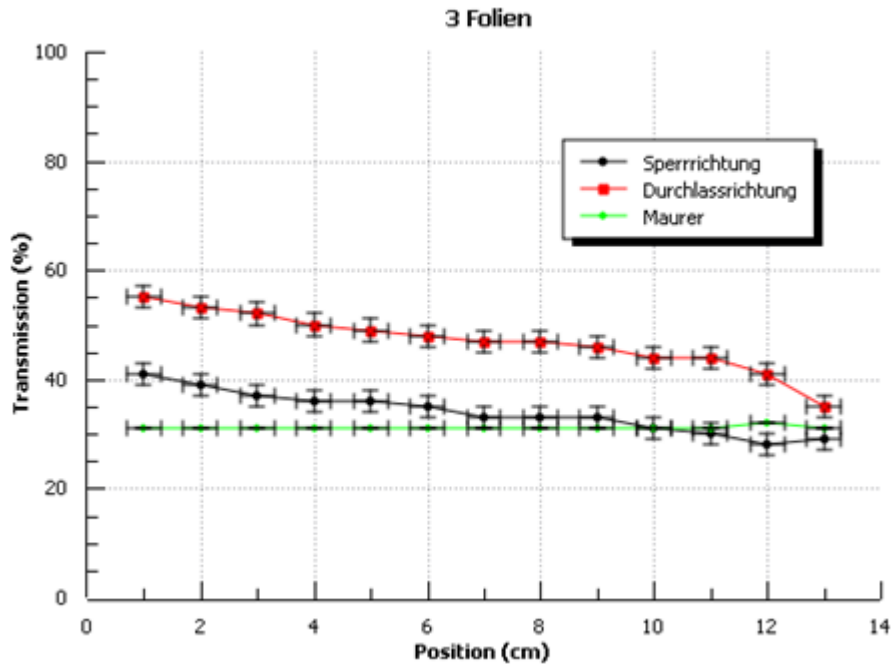


Abbildung 32: Transmission in Anhängigkeit von der Position für 3 Folien

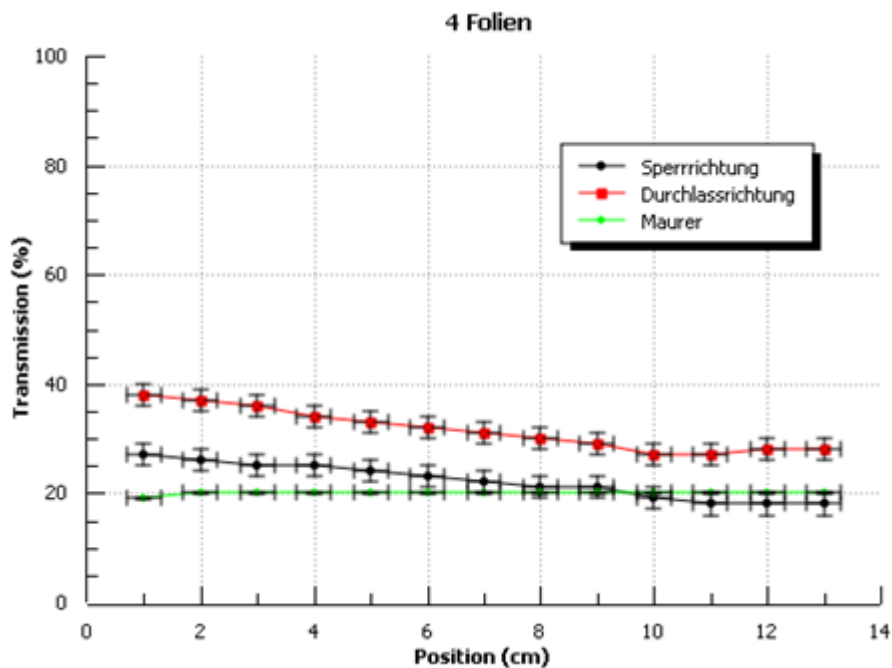


Abbildung 33: Transmission in Abhängigkeit von der Position für 4 Folien

Insgesamt kommen bei allen Messungen die Transmissionswerte der Diode in Sperrrichtungsbetrieb der Referenz am nächsten. Die Werte der Diode in Durchlassrichtung hingegen

liegen deutlich zu hoch. Weiterhin lässt sich bei allen Messungen mit der Diode in Durchlass- oder Sperrrichtung ein stetiger Abfall der Messwerte beobachten. Die gemessene Transmission hängt also von der Position der Trübung innerhalb der Messstrecke ab. Dies kann damit begründet werden, dass der Laserstrahl im Abstand zwischen Sender und Empfänger unterschiedlich gestreut und reflektiert wird. Eine weitere Annahme ist der unterschiedliche Durchmesser der Lichtstrahlen von Lasermessgerät und Maurer Messgerät. Durch den breiteren Lichtstrahl des Maurer-Messgeräts werden Unregelmäßigkeiten eher kompensiert. Als Ergebnis kann angenommen werden, dass eine optische Trübung möglichst in der Mitte der Messstrecke gemessen werden sollte.

Als weiteres kann ausgehend von vorhergehenden Messungen die Transmission als Funktion der steigenden Folienanzahl dargestellt werden. Da sich die Folie möglichst in der Mitte der Messstrecke befinden sollte, wird in Abbildung 34 die Absorption der Folien bei einer Position von 7 cm gezeigt. Dabei wurden jeweils für die verschiedenen Messsysteme die Transmissionswerte bei der Position 7 cm verwendet und gegen die Anzahl der Folien aufgetragen. Es lässt sich erkennen, dass die Werte von Maurer Messgerät und Diode in Sperrrichtung ähnlich verlaufen und es keine große Abweichung gibt. Die Transmissionswerte sollten dem Lambert-Beer Gesetz zufolge als exponentielle Funktion abfallen. Für die Werte von Maurer Messgerät und Diode in Sperrrichtung lässt sich ein solcher Verlauf nachvollziehen. Für die Diode in Durchlassrichtung ist keine solche Gesetzmäßigkeit zu erkennen. Eine Interpolation durch eine Lambert-Béer Funktion wird weiter unten berechnet.

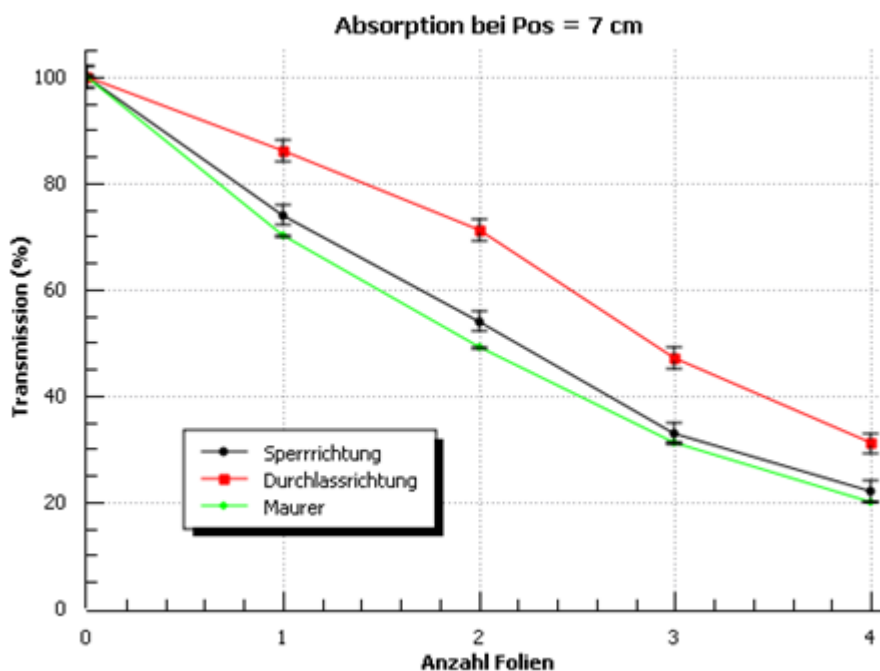


Abbildung 34: Absorption von Folien bei 7 cm

Die Absorption bei 7 cm gibt lediglich eine punktuelle Aussage. Möchte man einen Verlauf über alle Positionen, so ist die Berechnung mit dem arithmetischen Mittelwert der Einzelmessung möglich. Eine bessere Methode ist es jedoch, den Mittelwert mit einem Integral über die Funktion zu berechnen. Das garantiert eine kontinuierliche (sozusagen homogene) Verteilung der Folien innerhalb der Messstrecke. Der Mittelwert einer Funktion im Intervall $[a, b]$ berechnet sich allgemein nach Bronstein u. a. (2005) zu

$$MW = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx$$

Für das Intervall gilt nach obigen Messungen der Bereich 1 bis 13 cm. Die Funktion $f(x)$ wird durch jeden Verlauf der obigen Messungen für 1 bis 4 Folien definiert. Das Integral kann durch Anwendung der Trapezformel gelöst werden. Durch diese Methode wird die zu integrierende Funktion $f(x)$ durch ein Polynom 1. Grades interpoliert. Es folgt nach Bronstein u. a. (2005) die Trapezsumme

$$\int_a^b f(x) dx \approx \Delta x \times \left(\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + \frac{y_n}{2} \right)$$

Die Approximation kann mit einem Fehler abgeschätzt werden, was an dieser Stelle allerdings vernachlässigt wird.

Als Δx dient jeweils der Abstand zweier Messwerte auf der Abszisse. Die y -Werte werden durch die Messwerte selbst gegeben. Mit den Vorbetrachtungen ergibt sich der Mittelwert zu

$$MW = \frac{1}{13 \text{ cm} - 1 \text{ cm}} \int_a^b f(x) dx = \frac{1 \text{ cm}}{13 \text{ cm} - 1 \text{ cm}} \times \left(\frac{y_1}{2} + y_2 + \dots + y_{12} + \frac{y_{13}}{2} \right)$$

Abbildung 35 stellt den Verlauf der berechneten Mittelwerte dar. Ein Vergleich mit dem Verlauf bei 7 cm zeigt keine signifikante Abweichung. Dies unterstützt die Behauptung, dass die Messgenauigkeit für eine optische Trübung stets in der Mitte der Messstrecke gegeben ist.

Als nächstes können die Absorptionswerte der Folien durch die Lambert-Béer Funktion interpoliert werden. Hierfür ist zunächst die Berechnung des Absorptionskoeffizienten nötig. Das Lambert-Béer Gesetz ist nach Abschnitt 2.4.3 gegeben zu

$$I = 100\% \times e^{-\alpha x k}$$

Hier bezeichnet der Faktor k die Anzahl der Folien. Die Gleichung wird zunächst nach αx umgestellt.

$$\alpha x = \ln\left(\frac{100\%}{I}\right) \frac{1}{k}$$

Betrachtet man nun den Verlauf der Messwerte des Maurer Messgeräts in Abbildung 35, so kann man für k die Anzahl der Folien und entsprechend für I die Transmissionswerte einsetzen.

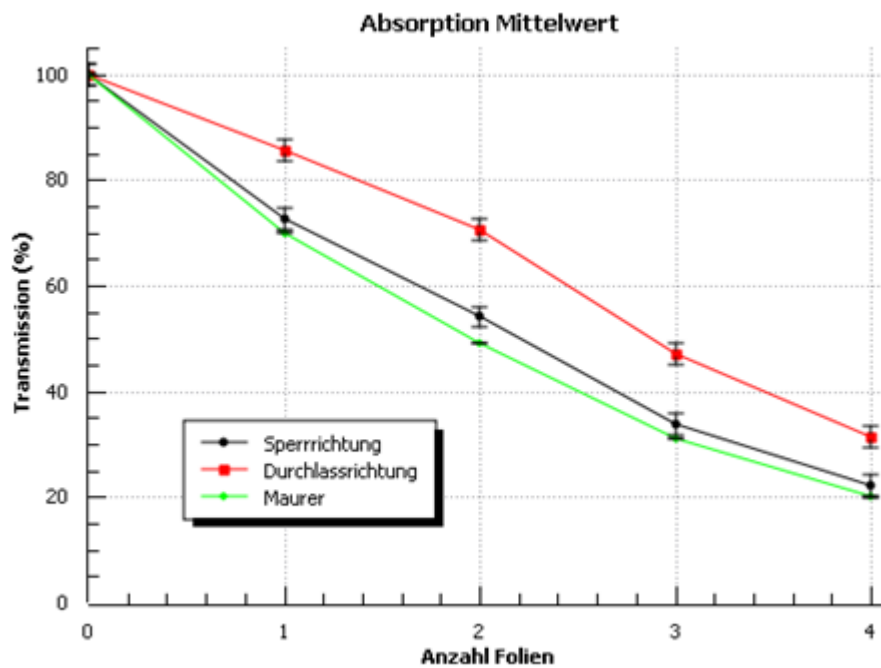


Abbildung 35: Absorption von Folien als Mittelwert

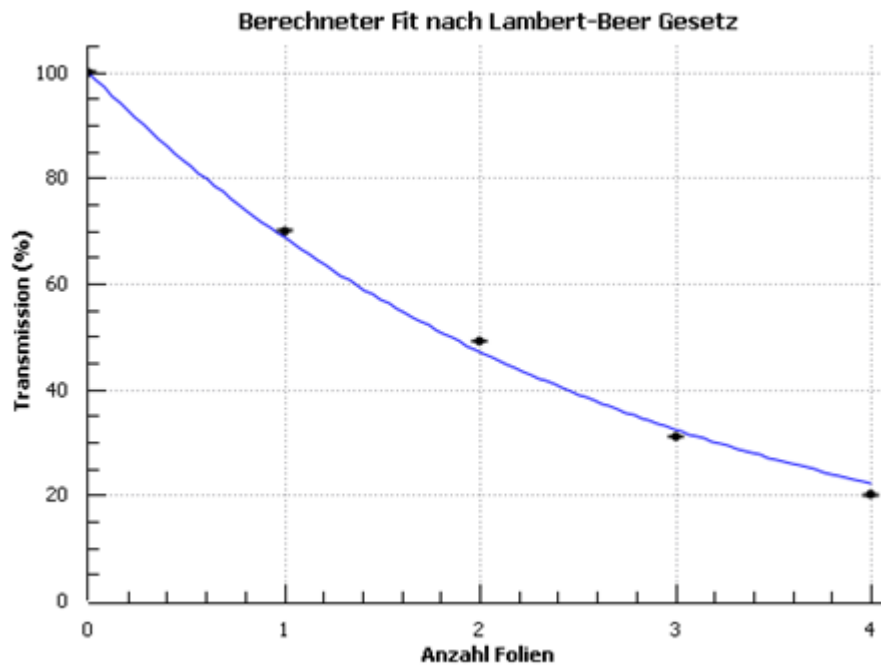


Abbildung 36: Absorption von Folien mit berechneter Lambert-Béer Funktion
Es ergeben sich folgende Werte:

1. Folien: $\alpha x = 0,357$
2. Folien: $\alpha x = 0,355$
3. Folien: $\alpha x = 0,390$
4. Folien: $\alpha x = 0,403$

Für eine bessere Genauigkeit wird daraus der arithmetische Mittelwert mit nachfolgender Formel berechnet.

$$\overline{\alpha x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,376$$

Setzt man diesen Faktor in obige Gleichung ein, dann folgt das Lambert-Béer Gesetz zu

$$I(k) = 100\% \times e^{-0,376 \times k}$$

In Abbildung 36 sind nun die Absorptionswerte für das Maurer Messgerät zusammen mit dem berechneten Lambert-Béer Gesetz eingezeichnet. Man kann erkennen, dass die gemessenen Werte gut durch das verwendete Gesetz von Lambert-Béer beschrieben werden.

4.3. Vergleichsmessungen mit Nebel

Bei den Messungen mit Nebel geht es darum, direkte Vergleiche unter den verschiedenen Messsystemen zu ziehen. Dafür wird jeweils eine Lasermessstrecke mit der Photodiode in Sperrrichtung und eine in Durchlassrichtung betrieben. Als Referenz zu allen Messungen dient das Maurer Rauchdichtemessgerät. Über einen zeitlichen Verlauf wird die Nebeldichte innerhalb des Versuchsaufbaus als Transmissionswert angegeben. Untersucht wird jedoch weniger die zeitliche Abhängigkeit, vielmehr der Vergleich der Messsysteme bei unterschiedlicher Nebeldichte. Im Gegensatz zur Messung mit Folien ist es hier von Vorteil, eine kontinuierliche Veränderung der Nebeldichte zu erhalten. Abbildung 37 zeigt den ersten Vergleich der Nebeldichte. Zu erkennen ist der Nebeleinlass bei etwa 1 Minute nach Versuchsbeginn und der darauf folgende Transmissionsabfall. Bei etwa 20 min wurde der Versuchsaufbau wieder belüftet. Der Rückgang auf 100 % Transmission zeigt den Abgleich mit den Anfangswerten. Hier würden sich mögliche Nebelrückstände an der Oberfläche der Messgeräte erkennen lassen. Positiv ist der ähnliche Verlauf des Messsystems in Sperrrichtung zum Maurer Messgerät. Es kommt hier nur zu geringen Abweichungen bei den Transmissionswerten. Auffallend ist der Schnittpunkt beider Verläufe bei etwa 75 % Transmission. Allerdings weist der Vergleich zwischen Maurer Messwerten und dem Messsystem in Durchlassrichtung eine auffallende Abweichung voneinander auf. Nicht nur die Werte weichen voneinander ab, sondern auch der Verlauf an sich ist anders. Die Begründung liegt wahrscheinlich darin, dass der Lastwiderstand R_D zu groß gewählt ist und damit die Diode in Durchlassrichtung nicht linear mit der Lichtintensität misst (vgl. Abschnitt 2.6.5).

In Abbildung 38 wurde zum Vergleich selbige Messung direkt im Anschluss an Vergleich 1 wiederholt. Es wurden dabei keine Veränderungen am Aufbau vorgenommen. Der Verlauf der Messwerte gestaltet sich weitgehend gleich, wie in Messung 1.

Die Messung in Abbildung 39 wurde ebenfalls ohne messtechnische Veränderungen direkt im Anschluss an Vergleich 2 durchgeführt. Die drei Wiederholungen der Messungen dienen zur Sicherung der Konsistenz der Ergebnisse. Bei diesem Vergleich fällt die geringere Nebeldichte auf. Es wurde nach dem Nebeleinströmen eine Transmission von nur 35 % erreicht. Dennoch zeigt auch diese Messung einen ähnlichen Verlauf wie bereits in Vergleich 1 oder 2.

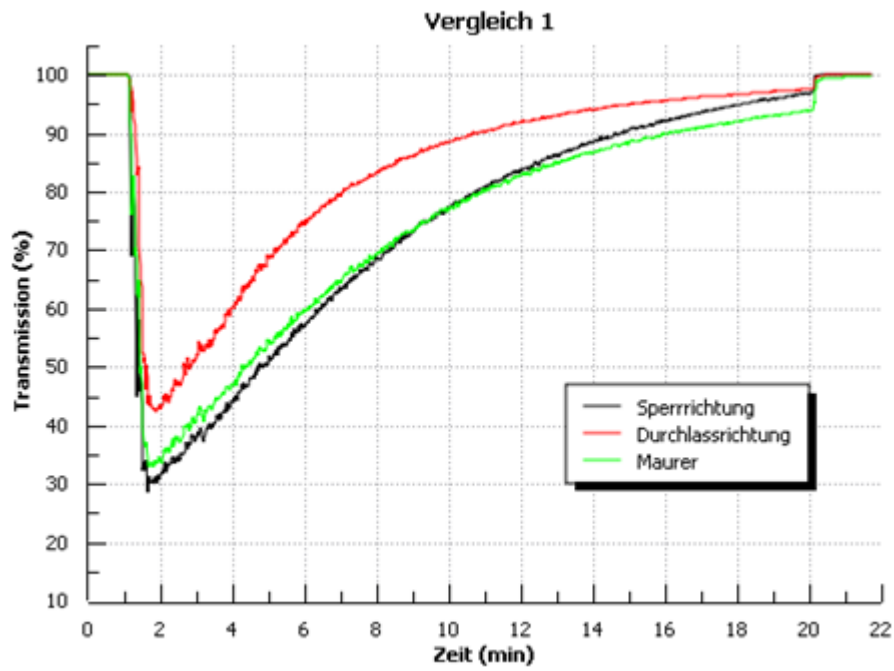


Abbildung 37: Messung der Nebeldichte Vergleich 1

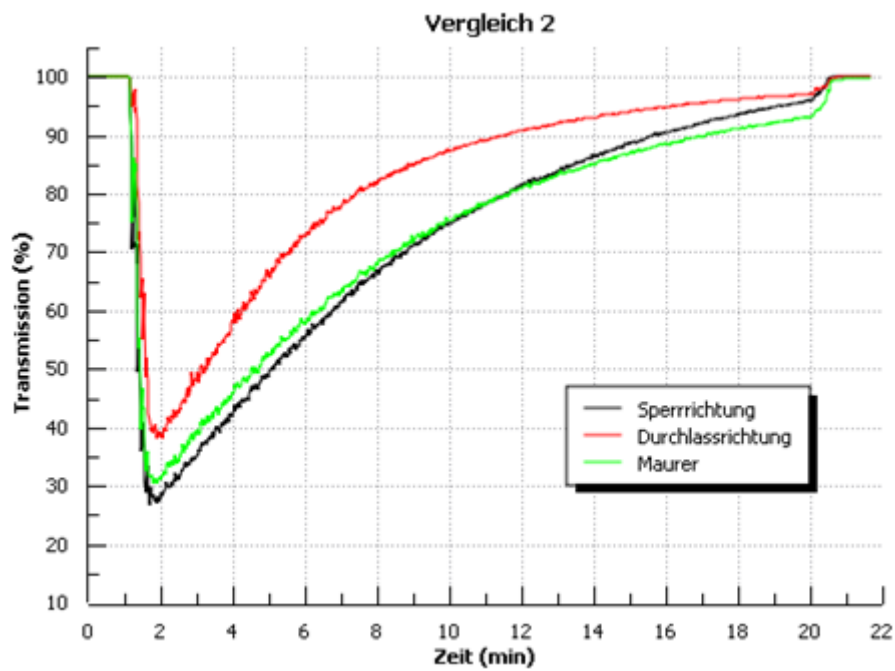


Abbildung 38: Messung der Nebeldichte Vergleich 2

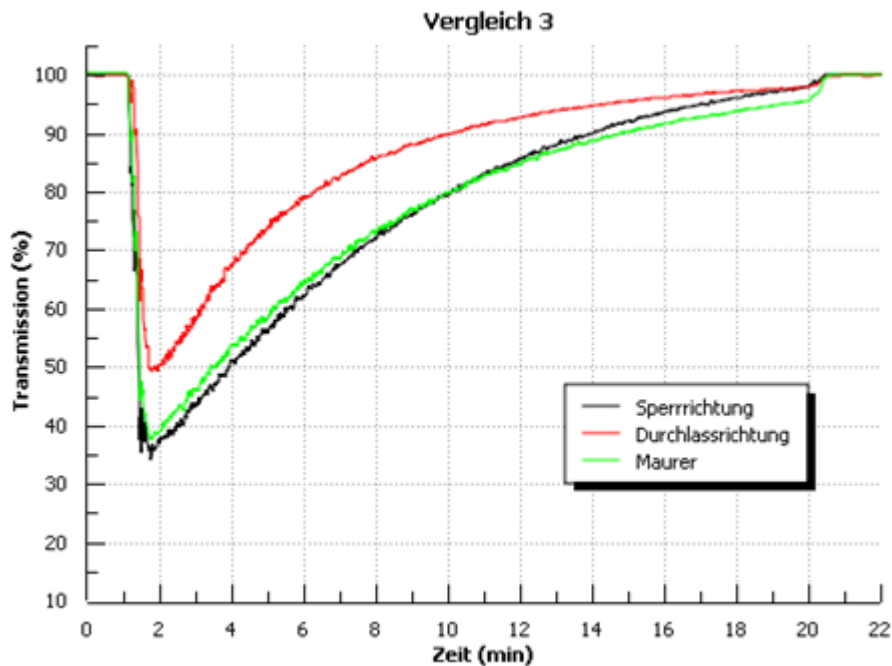


Abbildung 39: Messung der Nebeldichte Vergleich 3

Bei Vergleich 4 (wie Abbildung 40 zeigt) wurde die Schaltungsart der beiden Lasermesssysteme vertauscht. Messstrecke 1 wird nun in Durchlassrichtung und Messstrecke 2 in Sperrrichtung betrieben. Ziel ist es, einen Überblick über die unterschiedlichen Schaltungsmöglichkeiten der Messsysteme zu erhalten. Die Messwerte der in Sperrrichtung betriebenen Diode und dem Maurer Messgerät verlaufen weitestgehend deckungsgleich, wie auch schon in den vorangegangenen Messungen. Auffallend ist jedoch der Verlauf der Messwerte des Messsystems in Durchlassrichtung, welches hier deutlich weniger von der Referenz abweicht.

Für den Vergleich 5, der in Abbildung 41 dargestellt ist, wurden zwei neue Lasermesssysteme angeschlossen und der Versuch neu aufgebaut. Bedingt durch den Ausfall der Nebelmaschine wurde eine neue Nebelmaschine mit einem anderen Nebelfluid eingesetzt. Auch hier ist bei Betrieb in Sperrrichtung nur eine kleine Abweichung der Transmissionswerte von dem Maurer Messgerät zu beobachten. Dahingegen liefert der Betrieb in Durchlassrichtung einen abweichenden Kurvenverlauf.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die Versuche, welche in Durchlassrichtung betrieben wurden stets unterschiedliche Ergebnisse erzielt wurden. Bei Variation des Messsystems sind die Abweichungen zum Maurer Messgerät nicht reproduzierbar. Dieser Effekt lässt sich durch den Innenwiderstand R_D der Photodiode erklären, welcher herstellungsbedingt innerhalb einer Produktlinie schwankt. Je nach Verhältnis von Lastwiderstand R_L zum Innenwiderstand R_D , misst die Diode nicht linear in Abhängigkeit von der Lichtintensität. Die-

ser Einfluss ist so erheblich, dass der Betrieb in Durchlassrichtung nicht geeignet ist und daher nicht weiter untersucht wird.

Hingegen lässt sich beim Betrieb der Photodiode in Sperrrichtung immer ein ähnlicher Verlauf zu dem des Maurer Messgeräts erkennen. Zudem ist dieser Verlauf reproduzierbar.

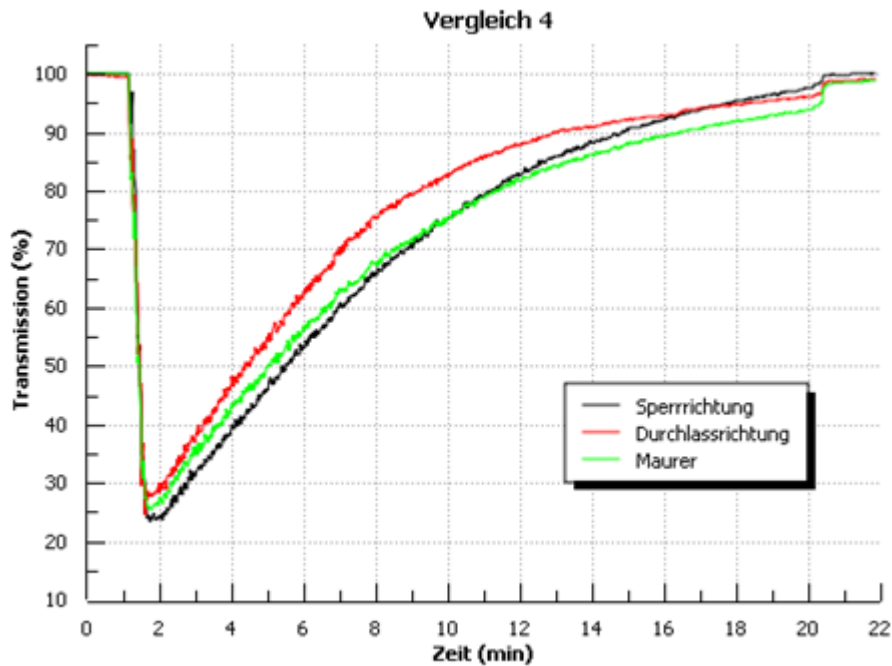


Abbildung 40: Messung der Nebeldichte Vergleich 4

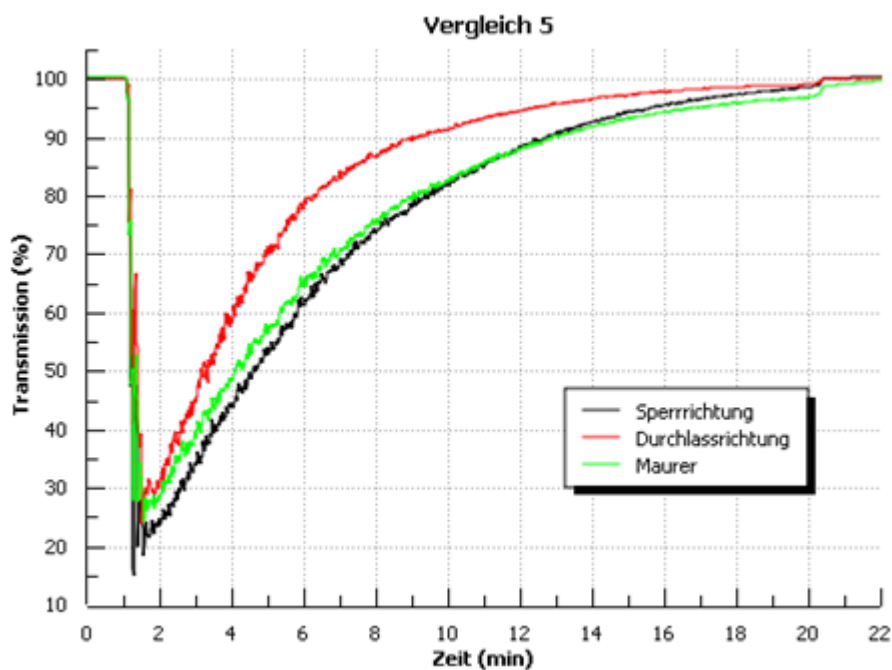


Abbildung 41: Messung der Nebeldichte Vergleich 5

Im nächsten Schritt soll nun die Abweichung quantifiziert und korrigiert werden. Als weiteres wird im folgenden Verlauf mit der Bezeichnung „Lasermessstrecke“ ausschließlich der Betrieb in Sperrrichtung gemeint.

Voraussetzung für weitere Überlegungen ist, dass das Maurer Messgerät die Werte mit absoluter Genauigkeit misst und daher als Referenz verwendet werden kann. Die Fragestellung lautet nun, um welchen Wert der gemessene Transmissionswert der Lasermessung korrigiert werden muss. Es soll also eine Funktion gefunden werden, die bei entsprechenden Transmissionswerten der Lasermessstrecke einen Korrekturwert zur Referenzmessung ausgibt.

Für die Berechnung der Abweichungen wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Zunächst wird aus den obigen Messungen die Differenz der Transmissionswerte von Maurer und Lasermessstrecke ($T_{\text{Maurer}} - T_{\text{Laser}}$) berechnet. Dabei stellt die Differenz zugleich die Abweichung beider Messverfahren dar.
- Anschließend werden alle Werte unterhalb von 2 Minuten aus der Messreihe nicht beachtet, weil das System nach dem Nebeleinströmen eine Einschwingphase aufweist.
- Als weiteres werden die verbleibenden Werte aufsteigend mit den Transmissionswerten der Lasermessung sortiert. Dies ist notwendig, um die Abweichungen des Messverfahrens als Funktion der Transmissionswerte der Lasermessung darzustellen.
- Schlussendlich ergibt sich ein Verlauf der Abweichungen als Funktion der Transmissionswerte der Lasermessstrecke. Zeigt also die Lasermessung einen Transmissionswert an, so ist der entsprechende Funktionswert zu addieren.

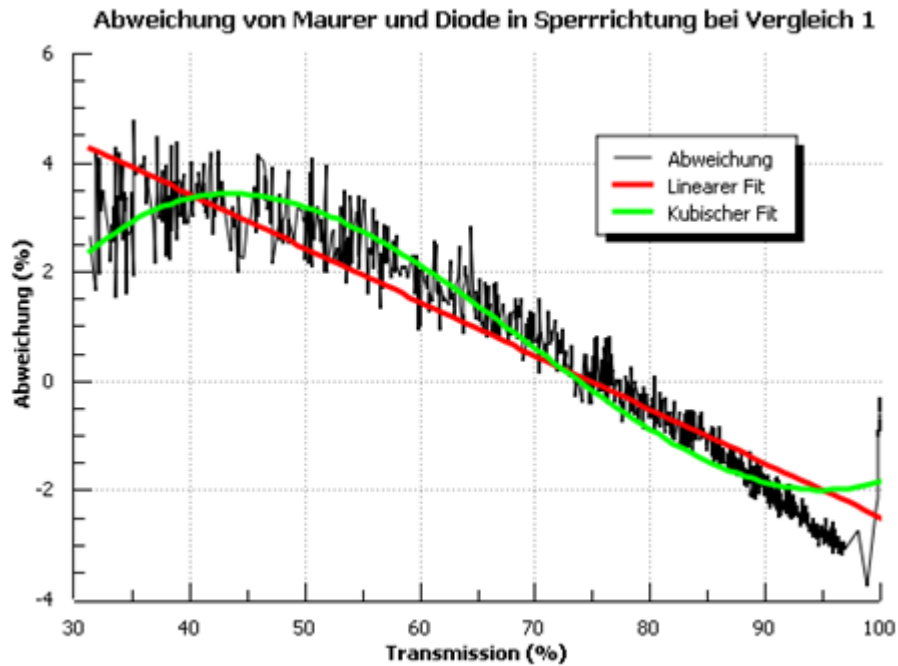


Abbildung 42: Abweichung von Maurer ME 82 und Diode in Sperrrichtung bei Nebeldichte Vergleich 1

Die Anwendung des oben beschriebenen Auswerteverfahrens wird am Beispiel der Messwerte aus Versuch 1 in Abbildung 42 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte der Lasermessung zunächst kleiner als die Referenzwerte sind und daher einer positiven Korrektur bedürfen. Bei etwa 75 % stimmen beide Werte überein. Danach sind die Werte der Lasermessung größer als die Werte der Referenz und bedürfen einer negativen Korrektur. Einzig bei 100% besteht ein Problem, da hier beide Werte übereinstimmen. Zur Ableitung einer Korrekturformel wird in den Verlauf der Abweichung ein Kurvenfit gelegt. Als einfachste Lösung bietet sich hier ein linearer Fit an.

Obiges Verfahren wurde für alle Vergleiche der Nebeldichte durchgeführt. Es ergeben sich demnach fünf verschiedene Geraden, welche in Abbildung 43 skizziert sind. Es ist ersichtlich, dass die Geraden insgesamt wenig voneinander abweichen.

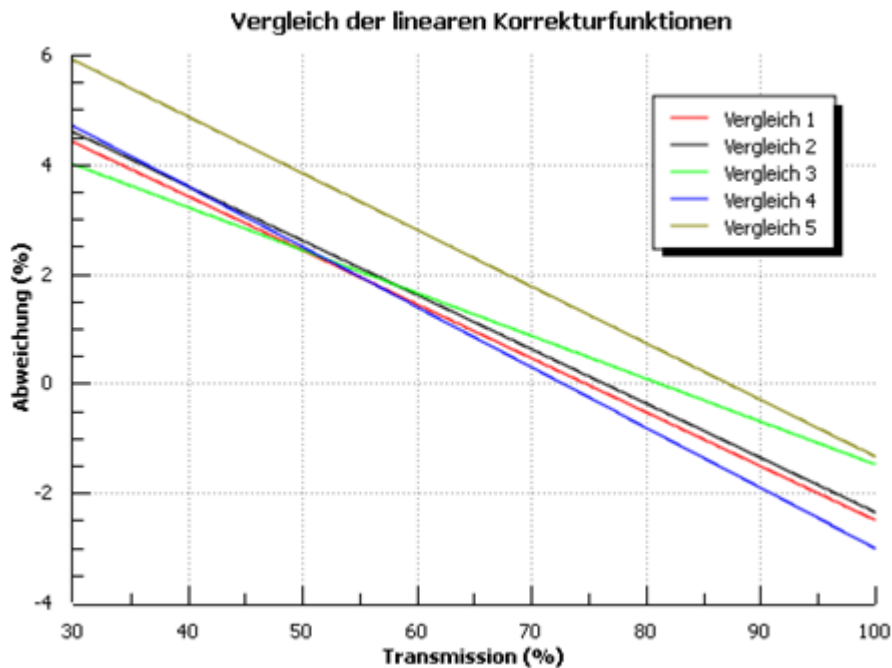


Abbildung 43: Vergleich der linearen Korrekturfunktionen für die Nebelmessungen 1 bis 5

Die Geraden aus der Abbildung sind nachfolgend als Gleichung aufgeführt

$$g_1(T) = -0,0986 \cdot T + 7,36 \%$$

$$g_2(T) = -0,0992 \cdot T + 7,57 \%$$

$$g_3(T) = -0,0783 \cdot T + 6,35 \%$$

$$g_4(T) = -0,1101 \cdot T + 8,00 \%$$

$$g_5(T) = -0,1035 \cdot T + 9,01 \%$$

Über die einzelnen Polynomterme lässt sich nun der Mittelwert bestimmen und die lineare Korrekturfunktion ableiten.

$$g(T) = -0,0979 \times T + 7,66\%$$

Wird mit der Lasermessstrecke gemessen, so ist zum Messwert der entsprechende Korrekturwert der Funktion zu addieren.

Ähnlich wie für die lineare Korrektur wurde auch die kubische Funktion berechnet. In Abbildung 44 sind die kubischen Funktionen für die fünf Vergleichsmessungen der Nebeldichte dargestellt. Auch hier ist zu sehen, dass alle Funktionen sehr ähnlich verlaufen.

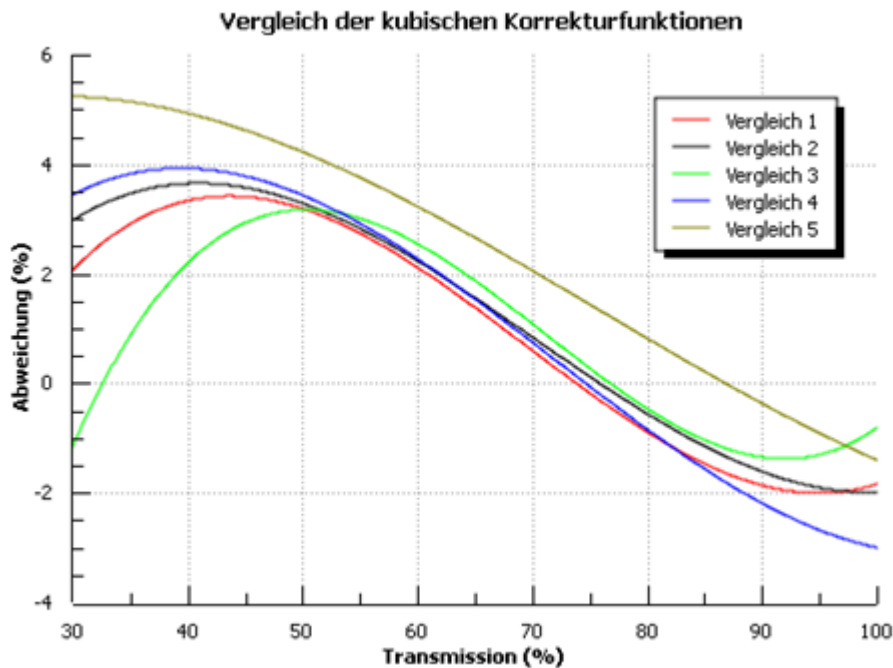


Abbildung 44: Vergleich der kubischen Korrekturfunktionen für die Nebelmessungen 1 bis 5

Die kubischen Funktionen aus der Abbildung sind anschließend als Gleichung aufgeführt

$$f_1(T) = 8,002 \cdot 10^{-5} \%^{-2} \cdot T^3 - 0,0166 \%^{-1} \cdot T^2 + 0,9952 \cdot T - 14,9660 \%$$

$$f_2(T) = 5,708 \cdot 10^{-5} \%^{-2} \cdot T^3 - 0,0120 \%^{-1} \cdot T^2 + 0,6955 \cdot T - 8,62914 \%$$

$$f_3(T) = 12,558 \cdot 10^{-5} \%^{-2} \cdot T^3 - 0,0268 \%^{-1} \cdot T^2 + 1,7445 \cdot T - 32,7258 \%$$

$$f_4(T) = 5,048 \cdot 10^{-5} \%^{-2} \cdot T^3 - 0,0109 \%^{-1} \cdot T^2 + 0,6257 \cdot T - 6,8663 \%$$

$$f_5(T) = 1,860 \cdot 10^{-5} \%^{-2} \cdot T^3 - 0,0042 \%^{-1} \cdot T^2 + 0,1965 \cdot T + 2,6465 \%$$

Wieder lassen sich über die einzelnen Polynomterme die Mittelwerte bestimmen. Als Ergebnis folgt die kubische Korrekturfunktion

$$f(T) = 6,635 \times 10^{-5} \%^{-2} \times T^3 - 0,0141 \%^{-1} \times T^2 + 0,8515 \times T - 12,1081 \%$$

Auf eine Fehleranalyse zum Korrekturwert wird an dieser Stelle verzichtet, da alleine durch die Messmethode der geschätzte Messfehler der Transmission bei $\pm 2 \%$ liegt und damit erheblich geringer ausfällt als die zu erwartende Schwankungsbreite bei der Wiederholung von Modellversuchen, bei denen die hier beschriebenen Messstrecken eingesetzt werden.

4.4. Messung der Nebelstandzeit

Nach Abschnitt 2.3.4 tragen mehrere Einflüsse zur Standzeit von Nebel bei. Da die einzelnen Effekte sehr kompliziert zu beschreiben sind, wurde ein Versuch unternommen, um die Nebelstandzeit zu messen. Die Auswertung erfolgt dennoch mehr qualitativ.

Der Messverlauf der Transmission in Abhängigkeit der Zeit ist Abbildung 45 zu entnehmen. Klar zu erkennen ist die Nebel einströmung bei 1 Minute. Dies schlägt sich in der Grafik so nieder, dass die Transmission auf einen Wert von etwa 5 % herabsinkt. Sobald der Nebelzuströmung gestoppt wird, beginnt der Transmissionswert wieder zu steigen. Auffallend ist, dass bei ca. 20 Minuten ein Wendepunkt auftritt, da ein exponentieller Verlauf erwartet worden war. Außerdem ist zu bemerken, dass bei 68 Minuten ein Ausreißer in der Grafik auftritt; dieser ist allerdings damit zu begründen, dass in das Messsystem von außen eingegriffen wurde

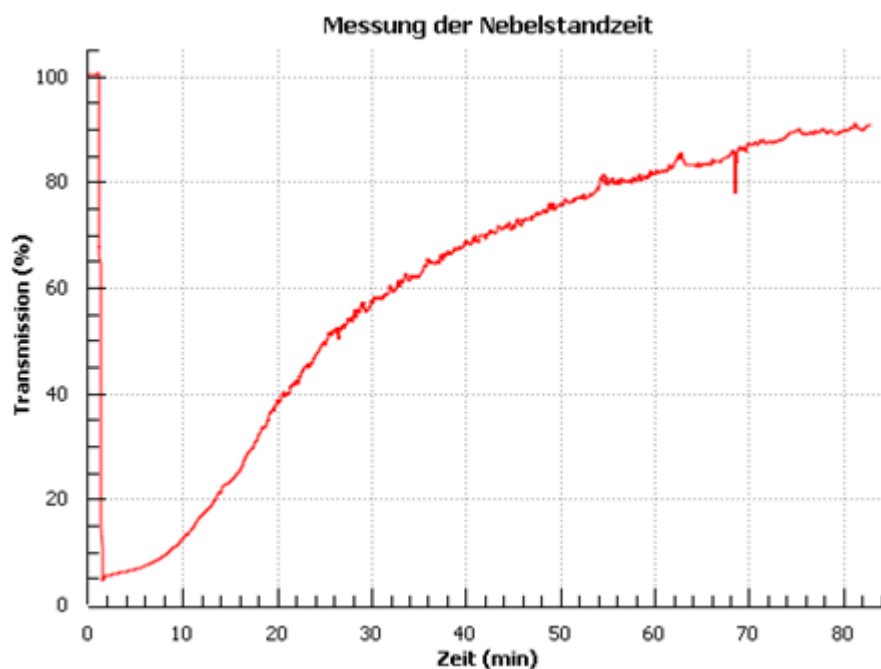


Abbildung 45: Messung der Nebelstandzeit

Die Außentemperatur betrug direkt an der Box über die gesamte Dauer der Messung $T_a = 20^\circ\text{C}$. Die Innentemperatur wurde zum Abschluss der Nebelstandzeit ebenfalls mit $T_i = 20^\circ\text{C}$ gemessen. Im Nachhinein hat sich herausgestellt, dass eine kontinuierliche Messung der Innen und Außentemperatur zur Überwachung der Messvorrichtung sinnvoll wäre.

Als qualitative Beobachtung ist anzumerken, dass sich der Nebel nach ca. 10 Minuten in Richtung Mitte der Box sammelte. Weiterhin kam es durch den Lichtsender des Maurer-Messgeräts zu einer leichten Erwärmung. Bedingt durch die entstandene Konvektion direkt über der Lichtquelle strömte demzufolge Nebel nach oben. Unabhängig von der Nebelstandzeit legt das die Fragestellung nahe, ob auch die Lasermesssysteme das System durch Erwärmung beeinflussen.

4.5. Messung der Nebelablagerung

Als erstes wurde die Transmission mit einer in die Box eingestellten frischen Platte ohne Trübung gemessen. Im Anschluss daran wurde eine weitere Messung durchgeführt, bei der sich nun Nebel in der Box befand. Hierzu ergaben sich die Messwerte in Tabelle 4. Dabei stellt h die Höhe des Messpunkts und T allgemein die Transmission dar. In der letzten Spalte wurde die optische Trübung über die Differenz $T_{\text{vor}} - T_{\text{nach}}$ berechnet. Bei den Messwerten ist zu beachten, dass sich der Nebel auf beiden Seiten der Platte abgesetzt hat.

h / cm	$T_{\text{vor}} / \%$	$T_{\text{nach}} / \%$	$T_{\text{vor}} - T_{\text{nach}} / \%$
5	83	46	37
10	83	37	46
15	84	75	9
20	83	63	20
25	84	53	31
30	83	49	34
35	83	60	23
40	83	62	21
45	83	76	7

Tabelle 3: Messwerte zur Nebelablagerung an Plexiglas

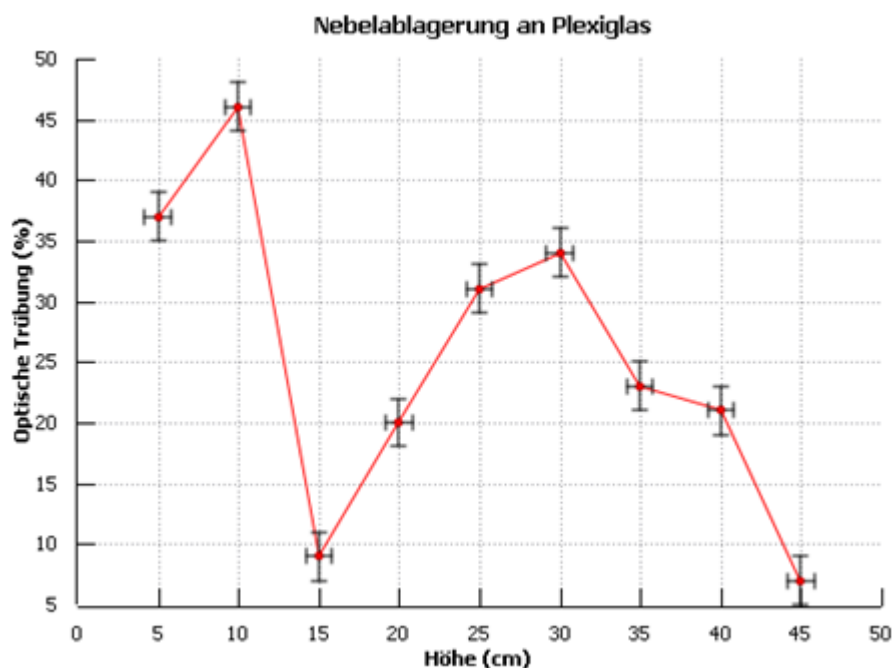


Abbildung 46: Messung der Nebelablagerung an Plexiglas

In Abbildung 46 ist die optische Trübung durch Nebelablagerung als Funktion der Höhe dargestellt. Für die Fehler wurden bei der Höhe $\pm 0,8$ cm und bei der optischen Trübung ± 2 % geschätzt. Der Verlauf der Messwerte lässt auf keine verwertbare Aussage schließen. Detailuntersuchungen könnten zu einem späteren Zeitpunkt und unabhängig von den hier durchgeführten Messungen wieder aufgenommen werden. Hierbei ist bei Anwendung des Messsystems auf die Bewertung von Strömungsfeldern in Modellversuchen zu entscheiden, ob die Anlagerungseffekte an Oberflächen während der Ausbreitungsphase der Strömung einen besonderen Einfluss auf den Gesamtfehler des Messergebnisses nehmen können. Bei kurzen Versuchsdauern im Bereich weniger Minuten ist die nach unserer Auffassung zu verneinen.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wurde ein neues optisches Messsystem auf der Basis von Laserlicht entwickelt. Das Messsystem bietet die Möglichkeit, unter der Verwendung von Ersatzgasen einschließlich Nebelpartikeln bei Strömungssimulationen in unterschiedlichen geometrischen Maßstäben die Erfassung der Bewegung und Verdünnung zum Beispiel brennbarer Gase vorzunehmen.

Die in diesem Bericht beschriebene Methode zur Auswertung der Ergebnisse beruht auf dem Prinzip der Transmissionsmessung. Dazu wurde in einen Ersatzstoff ein sogenannter Tracer eingebracht. Durch diesen kann der Strömungsverlauf sichtbar gemacht werden und letztlich eine optische Dichtemessung über den Transmissionsverlauf hergeleitet werden. Die Bestimmung der Gaskonzentration ergibt sich durch Umrechnung aus der optischen Dichte. Der verwendete Ersatzstoff ist dann – unabhängig vom angewendeten Messverfahren hinsichtlich seiner Eigenschaften entsprechend den Gesetzen der physikalischen Ähnlichkeit auszuwählen.

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit sind:

- Die Lasermessstrecke mit einer Photodiode in Sperrrichtung kann innerhalb der Fehlergrenzen zum Messen verwendet werden. Um die Abweichungen zum Maurer Messgerät zu kompensieren, wurden eine lineare und eine kubische Korrekturgleichung berechnet.
- Die Lasermessstrecke mit einer Photodiode in Durchlassrichtung hat sich in dieser Arbeit als nicht geeignet herausgestellt. Der Grund sind herstellungsbedingte Schwankungen der Photodiode und damit einem nicht linearen Verlauf in Durchlassbetrieb.
- Über Folienmessungen wurde festgestellt, dass der gemessene Transmissionswert bei der Lasermethode von der Position der optischen Trübung in der Messstrecke abhängt. Die größte Messgenauigkeit liegt in der Mitte der Messstrecke.
- Im theoretischen Abschnitt wird die Abhängigkeit der Konzentration von einer Intensitätsmessung beschrieben. Dafür wurde der Extinktionskoeffizient für Wassertröpfchen berechnet.

6. Literaturverzeichnis

[Bronstein u. a. 2005] Bronstein, Ilja N. ; Semendjajew, Konstantin A. ; Musiol, Gerhard: Taschenbuch der Mathematik. 6. Verlag Harri Deutsch, 2005

[Brein et al. in Vorbereitung] Risikoermittlung bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen in Garagen – Konsequenz für Lüftungsanlagen. In: Brandschutzforschung der Bundesländer Bericht 50 (1983), Dezember

[Centronic 2008a] Centronic: General Purpose Silicon Sensors (Series 5T). Croydon, Surrey CR9 0BG, UK: Centronic, 2008. [http://www.centronic.co.uk/downloads/general_purpose_silicon_sensors_\(series_5T\).pdf](http://www.centronic.co.uk/downloads/general_purpose_silicon_sensors_(series_5T).pdf)

[Centronic 2008b] Centronic: Silicon Photodiode Theory. Croydon, Surrey CR9 0BG, UK: Centronic, 2008. <http://www.centronic.co.uk/downloads/3-1-6photodiode theory.pdf>

[Demtroder 2006] Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme. 4. Springer-Verlag, 2006

[Drysdale 1998] Drysdale, Dougal: An Introduction to Fire Dynamics. 2. John Wiley & Sons, 1998

[Hommel 2010] Hommel, Günter (Hrsg.): Hommel interaktiv: Handbuch der gefährlichen Güter. 9. Springer, 2010

[John 1983] John, Reiner: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenstrome zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Maß - Teil 2: Optische Brandrauchdichte. In: Brandschutzforschung der Bundesländer Bericht 50 (1983), Dezember

[Kaufmann 2010] Kaufmann, Sven: Risikoermittlung bei alternativ angetriebenen Fahrzeugen in Tiefgaragen - Konsequenzen für Lüftungsanforderungen, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Bachelorthesis, 2010

[Maurer] Maurer: Lichtmessgerät Type ME 82 zur Rauchdichtemessung nach brandschutztechnischen Verfahren. D-72664 Kohlberg: Dr. Georg Maurer GmbH - Optoelektronik

[Meier 2010] Meier, Jürgen: Nebelfluide. <http://www.3d-meier.de/tut15/Seite304.html>. Version: 2010. – abgerufen am: 17. August 2010

[Meschede 2006] Meschede, Dieter (Hrsg.): Gerthsen Physik. 23. Springer-Verlag, 2006

[Michel 2007] Michel, Bernhard: MieCalc - frei konfigurierbares Programm für Streulichtberechnungen (Mie-Theorie). <http://www.lightscattering.de/MieCalc>. Version: 2007. – abgerufen am: 08. September 2010

[Mie 1908] Mie, Gustav: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. In: Annalen der Physik Vierte Folge, Band 25 (1908), Nr. 3, S. 377–445

[Orth 2010] Orth, Benjamin: Messtechnische Erfassung der Ausbreitung brennbarer Gase in geschlossenen Garagen. Bachelorthesis, 2010