

Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM₁₀-Belastung

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 204

bast

Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM₁₀-Belastung

von

David Bracke
Ganna Reznik
Helga Mölleken
Wolfgang Berteilt
Eberhard Schmidt

Bergische Universität Wuppertal
Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 204

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 02.271/2006/LRB
Einfluss der Straßenrandbegrünung auf die PM₁₀-Belastung

Projektbetreuung
Anja Baum

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86918-086-1

Bergisch Gladbach, November 2010

Kurzfassung – Abstract

Einfluss der Straßenrandbegrünung auf die PM10-Belastung

In der vergangenen Zeit ist das Thema Feinstaub durch die Einrichtung der Umweltzonen in das Blickfeld der Öffentlichkeit getreten. Neben den gesundheitlichen Risiken werden auch die Quellen und mögliche Maßnahmen zur Eindämmung im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte untersucht. Der motorisierte Straßenverkehr stellt eine bedeutende Quelle für Feinstäube dar, weshalb hier im Rahmen des Projekts "Einfluss der Straßenrandbegrünung auf die PM10-Konzentration" Möglichkeiten zur Beeinflussung der Feinstaubkonzentration durch Pflanzen entlang von Fernstraßen bewertet werden sollten.

Ziel des Projektes war es zu ermitteln, in wie weit Pflanzen am Straßenrand Feinstäube auf ihren Blattoberflächen abscheiden und so einen Beitrag zur Senkung der Feinstaubbelastung leisten können. Auf der anderen Seite sollten aber auch die Belastungen der Pflanzen untersucht werden, der sie durch die Feinstäube ausgesetzt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass Pflanzen grundsätzlich in der Lage sind, größere Mengen an Feinstaub auf ihren Blättern abzuscheiden. Darüber hinaus haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Blätter durch den Regen zumindest teilweise von ihrer Staubfracht befreit werden können. Durch Messungen an Autobahnen im Raum Wuppertal konnten diese ersten Ergebnisse zum Teil bestätigt werden. Teilweise zeigten sich aber auch lokale Erhöhungen der Feinstaubkonzentration, für die bislang keine eindeutige Begründung gefunden werden konnte.

Die Ergebnisse zeigen eine erste Möglichkeit auf, die Feinstaubbelastung mit Hilfe von Pflanzen zu senken. Allerdings sind bis zu einem gezielten, für die PM10-Konzentration relevanten Einsatz von Pflanzen noch umfangreiche Untersuchungen erforderlich, um die hier aufgeworfenen Fragestellungen abschließend klären zu können.

Investigations into the collection of fine dust upon plants

The issue of fine-dust came into the focus of public through setup of the low emission zones. In addition to the risks for health, the sources and possible measures for confinement of fine-dust were subjects in several research projects. Motorized traffic is an important source of fine-dust and that is why in this research project "Investigations into the collection of fine dust upon plants" options for an influence on the concentration of fine-dust by plants along motorways should be evaluated.

Aim of the project was to find out, to which amount plants along motorways can separate fine-dust on the surfaces of their leaves and contribute to the reduction of fine-dust. On the other side stress to the plants should have been investigated, which is caused by the exposure to fine-dust.

The project has shown, that plants are generally able to separate fine-dust on their leaves. Additionally the experiments have also shown, that the leaves can partly be cleaned from the fine-dust by the rain. This first results could be confirmed in parts by measurements along motorways in the area of Wuppertal. But on the other side there was an increase of fine-dust concentration in some measurements, for which no clear explanation has been found yet.

The results show a first way to reduce the concentration of fine-dust. But there is a need for additional investigations to answer the questions that came up here.

Inhalt

1 Einführung	7
2 Literaturrecherche	7
3 Laborversuche	11
3.1 Bestäubungsversuche	11
3.1.1 Theoretische Grundlagen	11
3.1.2 Versuchsdurchführung	14
3.1.3 Ergebnisse	22
3.1.4 Zusammenfassung und Diskussion	36
3.2 Windkanal	37
3.2.1 Einleitung	37
3.2.2 Aufbau	37
3.2.3 Pflanzliche Versuchsobjekte	38
3.2.4 Abiotisches Material	39
3.2.5 Durchführung	40
3.2.6 Ergebnisse	44
3.2.7 Zusammenfassung und Diskussion	86
3.3 Pflanzenphysiologische Untersuchungen	87
3.3.1 Einleitung	87
3.3.2 Methoden	87
3.3.3 Ergebnisse	90
3.3.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	103
4 Feldmessungen	105
4.1 Einleitung	105
4.2 Messplatz Autobahn A1	105
4.3 Messplatz Autobahn A46	119
4.4 FTIR-Messungen	131
4.4.1 Einleitung	132
4.4.2 Autobahn A1	133
4.4.3 Autobahn A46	134
4.5 Staubproben	136
4.6 Zusammenfassung und Diskussion	137
5 Simulationen	139
5.1 Einleitung	139
5.2 Simulationen einzelner Blätter und Blattkombinationen	139
5.3 Strömungskanal	148
5.4 Bestimmung von Blattoberflächen	149
5.5 Simulation von Hecken	153
6 Zusammenfassung und Diskussion	155
7 Ausblick	157
8 Glossar	158
9 Formelzeichen	159
Literatur	160

1 Einführung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einfluss der Straßenrandbegrünung auf die PM10-Konzentration“ sollte untersucht werden, ob und in welchem Maße Pflanzen entlang von Fernstraßen zu einer Minderung der verkehrsbedingten PM10-Konzentration beitragen können.

Um die Untersuchungen zielgerichtet durchführen zu können, wurde zunächst ein geeignetes Modell aufgestellt. In diesem Modell werden vom Verkehr generierte Partikeln unterschiedlicher Größe und Beschaffenheit durch den Wind zu den Pflanzen getragen und dort aufgrund physikalischer Vorgänge, wie zum Beispiel Diffusion oder Impaktion, auf den Blättern der Pflanzen abgeschieden. Die auf den Blättern abgeschiedenen Partikeln verbleiben dann entweder dauerhaft bis zum Ende der Vegetationsperiode auf den Blättern oder werden zum Teil mit dem Regen abgewaschen oder durch den Wind wieder aufgewirbelt. Auf der anderen Seite stellen die abgeschiedenen Partikeln aber auch eine mögliche Belastung für die Pflanzen selbst dar. Dieser Stress kann dann zu verminderterem Wachstum oder anderen Schäden an den Pflanzen führen.

Um eine Aussage über die Richtigkeit des oben formulierten Modells machen und alle in ihm vorkommenden Fragestellungen beantworten zu können, mussten eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungsmethoden angewendet werden. Dabei wurde versucht, die Zusammenhänge, die zu einer Abscheidung der Partikeln auf den pflanzlichen Oberflächen führen, umfassend und in verschiedenen Größen-Maßstäben zu erfassen und zu erklären.

Die Abscheidung an einzelnen Blättern und kleinen Pflanzenstrukturen wurde in einer Bestaubungskammer bei sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten untersucht. Diese Bestaubungen dienten gleichzeitig als Grundlage für die Untersuchung zur Abwaschung der Partikeln von den Blattoberflächen durch den Regen. Diese Versuche wurden in einer eigenen Beregnungskammer durchgeführt.

Den nächst größeren Maßstab deckte ein Windkanal ab, in dem einzelne Pflanzen und kleine Hecken bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten untersucht wurden. Ergänzend wurden abiotische Materialien als mögliche Alternativen zu Pflanzen auf ihr Abscheidevermögen für Feinstaub hin untersucht.

Die Überprüfung des Modells unter realen Bedingungen wurde durch Feldmessungen an den Autobahnen A1 und A46 vorgenommen. Hier wur-

den reale Pflanzenstrukturen vermessen, die entlang von Autobahnen vorkommen.

Ergänzend zu den Laborversuchen und Feldmessungen wurden Simulationen mit dem CFD-Programm Fluent durchgeführt. Hier sollte ein mathematisches Modell der Abscheidung von Partikeln und der Umströmung von Pflanzen erstellt und mit den Ergebnissen der anderen Versuche verglichen werden. Der Maßstab der Simulationen reichte vom einzelnen Blatt bis hin zu ganzen Pflanzen und Hecken.

Der Frage nach einer möglichen Schädigung der Pflanzen durch Feinstaub wurde in einer Reihe von biologischen Untersuchungen nachgegangen. Erfasst wurden in diesen Versuchen diverse biologische Parameter wie Photosyntheseaktivität oder die Aktivität verschiedener Enzyme in den Pflanzen, die auf eine Stressreaktion oder Schädigung hindeuten. Hierfür wurden Blattproben von Pflanzen genommen, die entlang von Autobahnen im Raum Wuppertal stehen. Um eine Vergleichsmöglichkeit zu weniger oder nicht belasteten Pflanzen zu erhalten, wurden zusätzliche Proben von Pflanzen genommen, die geschützt im Bereich der Bergischen Universität Wuppertal standen.

2 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche wurde mit dem Ziel betrieben, vorhandenes Wissen in Bezug auf die Abscheidung von Feinstaub auf Pflanzen offen zu legen. Das Ergebnis hierzu fällt zweigeteilt aus. Auf der einen Seite wurde die Entstehung von Feinstaub durch den Straßenverkehr sehr intensiv untersucht und es liegen belastbare Erkenntnisse vor. Auf der anderen Seite fehlen, von einigen wenigen Studien abgesehen, Untersuchungen zur Abscheidung von Feinstaub auf Pflanzen.

Die Emission von Feinstaub durch den Straßenverkehr ist in den letzten Jahren verstärkt untersucht worden. So liegen Erkenntnisse über die verschiedenen Wege der Entstehung, der Zusammensetzung und der Ausbreitung vor. Dies trifft sowohl auf den Verkehr in Städten wie auf Fernstraßen zu.

Es konnte gezeigt werden, dass PM1-Emissionen in erster Linie von den Verbrennungsprozessen in den Motoren stammen, wohingegen die Fraktion PM10 den gesamten emittierten Feinstaub darstellt. Die Differenz aus PM10 und PM1 kann dem Abrieb von Reifen und Straße und der Aufwirbelung deponierter Partikeln zugeordnet werden. Eine Zuordnung von Partikeln aus Abrieb und Aufwirbelung einzig zur Größenfraktion PM2,5 wurde wegen schlechter Übereinstimmung abgelehnt (GEHRING, 2003). Neben den Angaben zu

den Größenverteilungen konnten auch relative Aussagen über den Ursprung der emittierten PM10-Fraktion gemacht werden. Rund 50 % stammen aus Auspuffemissionen und 20 % von Reifenabrieb. Der restliche Anteil stammt aus Straßenabrieb und wieder aufgewirbeltem Staub (BAST, 2005).

Die Emissionen des Fahrzeugverkehrs können mit Hilfe sog. Emissionsfaktoren (EF) gut abgeschätzt werden. Diese können für unterschiedliche Wochentage, Fahrzeugklassen und teilweise auch klimatische Verhältnisse angegeben werden (GEHRING, 2003 und BAST, 2005). Sie drücken die mittlere Emission einer Komponente je Fahrzeug bezogen auf die gefahrene Strecke aus. Ein Teil dieser Werte kann kostenfrei über das Internet abgerufen werden (INFRAS, 2007).

Zwischen dem Verkehrsfluss und der Größenverteilung des emittierten Staubs konnten deutliche Zusammenhänge festgestellt werden. Bei gleichmäßigem Verkehrsfluss ist der Anteil von Abrieb und Aufwirbelung an PM10 nahezu genau so groß wie die Emissionen aus den Abgasen der Fahrzeuge. Bei wechselnden Verkehrsflüssen übersteigt der Anteil aus Abrieb und Aufwirbelung den der Fahrzeugabgase jedoch. Dieser Umstand ist bereits in mehreren Studien nachgewiesen worden (GEHRING, 2003). Zurückgeführt wird dies auf die verstärkte Beanspruchung von Bremsen, Reifen und Kupplungen. Auch zeigt sich ein Einfluss der Qualität des Fahrbahnbelags auf die Partikelemissionen. Bei einer schlechten Beschaffenheit steigt der Anteil der Partikel, die aus Abrieb und Aufwirbelung stammen (GEHRING, 2003).

Einen großen Einfluss haben klimatische Faktoren auf die Feinstaubkonzentration. Wind führt grundsätzlich zu einer Verdünnung und zu einem Abtransport des Feinstaubes. Darüber hinaus wird auch die Sedimentation erschwert. Die Ausbildung einer Inversionswetterlage führt zu einer Aufkonzentrierung der Partikel, was hauptsächlich nachts im innerstädtischen Bereich beobachtet wurde (GEHRING, 2003). Die Wirkung von Niederschlag ist nicht eindeutig geklärt und die Ergebnisse aus mehreren Studien widersprechen sich teilweise. Die Aussagen reichen von einer deutlichen Reduktion des Feinstaubgehaltes bis hin zu einem Anstieg (GEHRING, 2003). Zurückzuführen sind diese Widersprüche vorrangig auf unterschiedliche Messverfahren und Umweltbedingungen. Der Einfluss der Luftfeuchte auf die PM10-Fraktion scheint jedoch belegt zu sein. Untersuchungen an Autobahnen zeigten eine Abnahme der PM10-Konzentration bei Zunahme der relativen Luftfeuchte (BAST, 2006). Eine Zunahme der Temperatur hingegen führt auch zu einer Zunahme der PM10-Konzentration (BAST,

2006). In keiner der vorliegenden Studien spielte Pflanzenwuchs eine Rolle bei der Betrachtung der Strömungsverhältnisse an der Messstelle.

Wie bereits eingangs erwähnt stehen diesen umfangreichen Erkenntnissen zu der Entstehung von Feinstaub lückenhafte Ergebnisse im Bereich der Abscheidung auf Pflanzen gegenüber. Es sind aktuell in Deutschland nur wenige Forschungsberichte zu diesem Themenbereich veröffentlicht worden. Es handelt sich dabei in erster Linie um die Arbeiten von Thönessen und Langner (THÖNESSEN, 2005 und LANGNER, 2002). Beide befassen sich mit der Abscheidung von Feinstaub im städtischen Umfeld auf typischen Stadtpflanzen. Thönessen betrachtete vorrangig die Bedeutung von Fassadenbegrünung (Wein) und Platanen. Langner untersuchte in zwei Arbeiten die Abscheidung an den Blättern von Spitzahorn in Karlsruhe. Die Arbeiten von Langner greifen auch unveröffentlichte Studien auf und werten diese aus. Beiden Arbeiten gemeinsam ist jedoch, dass sie nur eine bzw. zwei Pflanzenarten an wenigen Standorten betrachten. Allerdings belegen die Arbeiten deutlich die Fähigkeit von Pflanzen, vom Straßenverkehr emittierten Feinstaub an ihren Blättern abzuscheiden (THÖNESSEN, 2005; LANGNER, 2002 und LANGNER 2006). Die Wirksamkeit der Abscheidung und die abgeschiedenen Staubmengen werden in den untersuchten Quellen unterschiedlich angegeben und variieren je nach Messverfahren und Ansatz der Untersuchung. So werden über die gleiche Pflanzenart je nach Autor gegensätzliche Angaben zu den Abscheideleistungen gemacht (THÖNESSEN, 2005).

Die Fähigkeit von Pflanzen zur Abscheidung von Feinstaub ist bereits seit den 1970er Jahren bekannt, wurde allerdings nur für Waldgebiete untersucht. Fellenberger zeigte 1977 Unterschiede in der Abscheidefähigkeit von Anpflanzungen, jedoch nur für die Abscheidung groben Staubs in der Umgebung von Steinbrüchen. Dichte Anpflanzungen, die nur über eine geringe Permeabilität verfügen, scheiden nur wenig Staub aus der Luft ab. Dies liegt daran, dass der Großteil der Luft über die Pflanzen hinweg geführt wird und Partikeln auf diese Weise nicht auf den Blättern abgeschieden werden können. Darüber hinaus werden bereits deponierte Partikeln wieder aufgewirbelt und fort getragen. Bei einer permeablen Anordnung der Pflanzen wird die anströmende Luft abgebremst. Damit wird die Zeit für die Sedimentation größerer Partikeln verlängert und die partikelbeladene Luft direkt an den Blättern vorbeigeführt, an denen die Abscheidung erfolgt (FELLENBERG, 1977 und FELLENBERG 1999).

Staubschutzpflanzungen sollten daher eine Tiefe von 10 bis 30 Metern aufweisen und mit Pflanzen versehen werden, die unterschiedliche Wuchshöhen aufweisen (FELLENBERG, 1999). In einer weitergehenden Empfehlung werden konkrete Höhenangaben gemacht. Die erste Schicht sollte aus krautartigen Pflanzen mit einer Wuchshöhe von bis zu 0,75 Metern bestehen, gefolgt von Sträuchern mit einer Höhe zwischen 2 und 3 Metern. Abschließend sollen Bäume mit einer Höhe von mehr als 3 Metern gepflanzt werden. Jedoch wird auch hier auf den bestehenden Forschungsbedarf hingewiesen (DST, 2006). Abweichend von diesen Empfehlungen führt Langner an, dass die Abscheidung von Partikeln mit zunehmender Höhe in der Pflanze abnimmt. Es sollten daher vorrangig Boden bedeckende Pflanzen zum Einsatz kommen (LANGNER, 2006).

Für die Abscheidung von Partikeln auf Blättern wurden als wesentliche Vorgänge Diffusion, Trägheitsabscheidung und Sedimentation identifiziert. Für Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser $> 1 \mu\text{m}$ sind die Trägheitsabscheidung und die Sedimentation relevant. Diffusion oder die Abscheidung durch elektrostatische Anziehung spielen nur bei sehr viel kleineren Partikeln ($< 0,1 \mu\text{m}$) eine Rolle (LANGNER, 2006).

Die Aussagen zum Zusammenhang zwischen Permeabilität und der Abscheidung von Feinstaub an Pflanzen wurden in einer neueren Studie an der Universität Nottingham bestätigt. Dazu wurden Modellrechnungen durchgeführt und mit den Ergebnissen realer Messungen verglichen. Dabei wurden die oben genannten Ergebnisse bestätigt und ein Modell erstellt, mit dem am Computer die Abscheidung an unterschiedlichen Pflanzen simuliert werden kann. Die britischen Untersuchungen zeigen auch, dass Partikeln mit einem Durchmesser von mehr als $5 \mu\text{m}$ deutlich besser abgeschieden werden können als kleinere. Für den Größenbereich zwischen 10 und $20 \mu\text{m}$ liegt die Wahrscheinlichkeit der Abscheidung zwischen 10 und 35 %, für Partikeln mit einer Größe zwischen 0,5 und $3,5 \mu\text{m}$ nur in einem Bereich von 1 bis 5 % (TIWARY, 2005). Diese Größenordnung wird auch durch andere Studien untermauert (LANGNER 2002 und LANGNER 2006).

Zusammenfassend können für die Abscheidung von Feinstaub auf Pflanzen folgende Faktoren genannt werden:

- Meteorologische Bedingungen (Wind, Niederschlag, Luftfeuchte, Temperatur)
- Eigenschaften des Staubs (Größe der Partikeln, chemische Zusammensetzung)

- Pflanzenart und -wuchs (Permeabilität, Dichte, Wuchshöhe)
- Blattbeschaffenheit (Oberfläche, Rauigkeit, Steifigkeit)
- Anordnung der Pflanzen (Entfernung zur Quelle und anderen Objekten/Pflanzen)

Neben diesen positiven Effekten sind allerdings auch eine Reihe negativer beobachtet worden. Eine Langzeitstudie des thüringischen Umweltministeriums zeigte zwar die wirksame Abscheidung von Staub durch Wälder, aber auch eine fehlende Versorgung des Bodens mit Mineralien, die in Form von Staub an den Blättern abgeschieden wurden (TMLNU, 2006). Im Extremfall kann dies zu einer dauerhaften Veränderung des Bodens und Schädigung der Pflanzen führen.

Weiterhin ist bekannt, dass die Ablagerung von Staub auf Pflanzenblättern die biologischen Vorgänge im Inneren beeinträchtigen kann. Die möglichen Einschränkungen können die Atmungsaktivität, die Photosyntheseleistung oder das Wachstum betreffen. Allerdings sind noch viele Zusammenhänge ungeklärt und werden in weiteren Studien genauer untersucht (LANGNER, 2006).

Der Verbleib des abgeschiedenen Staubs muss ebenfalls weiter untersucht werden. Teilweise wird der Staub durch Niederschlag oder Wind von den Blättern entfernt, teilweise gelangt er über den Abwurf der Blätter im Herbst in den Boden. Auf den Verbleib des Staubs hat auch der Aufbau der Blätter einen direkten Einfluss. Bei Pflanzen mit glatten oder mit speziellen Oberflächen ausgestatteten Blättern kann die Staubaufgabe leicht durch Niederschläge abgewaschen werden (THÖNNESEN, 2005). Andere Pflanzen akkumulieren den Staub auf ihren Blättern. Dies ist besonders im Hinblick auf Schwermetalle im Boden und im Grundwasser interessant.

Besonderes Augenmerk ist hier auf die Vertreter der Platingruppenelemente (PGE) zu richten. In mehreren Studien hat sich ein schädigendes Potential gezeigt. Dies gilt sowohl für gelöste Formen, wie auch für partikuläre. Partikuläre PGE-Emissionen werden durch den Verkehr verursacht, indem Austräge aus den Katalysatoren mit dem Abgasstrom stattfinden. Die PGE können tierische und menschliche Zellen schädigen bzw. Stressreaktionen auslösen. Die Toxizität ist je nach Element unterschiedlich, es scheint jedoch Synergie-Effekte bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Metalle zu geben (SURES, 2005). Ein Einfluss auf pflanzliche Zellen ist ebenfalls nicht auszuschließen.

Die Konzentration an PGE ist in einer Entfernung von bis zu 5 Metern von der Straße am höchsten und nimmt dann exponentiell auf das Niveau der Hintergrundbelastung ab. Besonders hoch ist die Ablagerung auf Pflanzen und der Bodenoberfläche. Ein Eintrag in den Boden selbst ist durch Versuchsreihen bestätigt worden (PUCHELT, 1995). Eine besonders hohe Anreicherung an PGE wird im abgelagerten Staub im Bereich von Straßen gefunden (PUCHELT, 1995). Ein wesentlicher Anteil von rund 21 % der partikulären PGE-Emissionen liegt als PM10 vor (IME, 2004).

Durch Simulationen großer Heckenanordnungen wurde eine Erhöhung der Feinstaubkonzentration im Windschatten der Vegetationsstruktur vorhergesagt, was direkt auf die Veränderung des Strömungsfeldes durch die Pflanzen zurückzuführen ist (KAPPIS, 2007). Ein entscheidender Faktor für die Beeinflussung des Strömungsfeldes ist die Porosität der Pflanze. Die Porosität einer Pflanze sollte im Bereich zwischen 50 und 70 % liegen, wenn eine wirksame Abscheidung über einen weiten Partikelgrößenbereich erfolgen soll. Eine zu niedrige Porosität führt zu einer vermehrten Ablagerung von Feinstaub hinter der Pflanze, allerdings ohne dass die Pflanze den Staub abgeschieden hat. Ebenso findet unter diesen Umständen eine Umlenkung der Luft statt, so dass die Partikel nicht in die Nähe der Blätter kommen und so auch nicht abgeschieden werden können (KAPPIS, 2007). In Berechnungen wurde eine maximale Abscheidung von 20 % für die Fraktion PM10 errechnet, bei einer Porosität der Pflanze von 80 % (KAPPIS, 2007). Darüber hinaus führen Bäume mit Hochstamm zur Bildung von Turbulenzen, die eine wirksame Staubabscheidung verhindern. Daher müssen in die Nähe der Stämme solcher Bäume Sträucher und Hecken gepflanzt werden, die dann die Turbulenzen brechen und eine Abscheidung ermöglichen (KAPPIS, 2007).

Mehrere Studien befassen sich mit dem Einfluss der Morphologie der Pflanzen auf die Abscheidung des Staubs sowie dem Verbleib des abgeschiedenen Staubs. Zum einen wird untersucht, welche Eigenschaften eine Pflanze aufweisen muss, um Feinstaub besonders effektiv abzuscheiden. Von besonderem Interesse sind hier die Blätter, da sie die größte Oberfläche für eine Abscheidung anbieten. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine große Anzahl kleiner Blätter zu einer besseren Abscheidung führt, als wenige große Blätter (KAPPIS, 2007). Uneinigkeit besteht in Bezug auf die Beweglichkeit und die Blattoberflächen. Es gibt Studien, die leicht bewegliche und flexible Blätter im Vorteil sehen. Andere Studien kommen hingegen zu dem Ergebnis, dass steife Blätter mit rauer

Oberfläche besser für eine Abscheidung von Feinstaub geeignet sind. Aufgrund der zahlreichen Widersprüche müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um in diesem Punkt Klarheit zu erlangen (KAPPIS, 2007).

Alle Studien kommen zu dem Schluss, dass Pflanzen Feinstäube an ihren Blättern oder auch anderen Strukturen (Stämme, Äste) abscheiden können. Bezüglich der Wirksamkeit gehen die vorgestellten Untersuchungsergebnisse allerdings weit auseinander. Die Angaben über den Abscheidungsgrad für die Fraktion PM10 variieren, je nach Quelle der Angabe, zwischen 1 und 30 % (KAPPIS, 2007 und ENDLICHER, 2007). Dies liegt unter anderem an unterschiedlichen Fragestellungen der Studie, Untersuchungsmethoden, Standortbedingungen und der Interpretation der Ergebnisse. Dies führt dazu, dass die erzielten Ergebnisse nur schwer miteinander verglichen werden können. Eine Verallgemeinerung oder Übertragung der Ergebnisse auf andere Situationen ist daher ebenfalls nur sehr eingeschränkt möglich. Daher sind Untersuchungen im Einzelfall erforderlich, um Aussagen über die Wirksamkeit einer bestimmten Vegetationsstruktur als Abscheider für Feinstäube treffen zu können (KAPPIS, 2007). Teilweise wird, basierend auf innerstädtischen Feldmessungen, einzelnen Vegetationsstrukturen eine Abscheidewirkung für Feinstäube sogar gänzlich abgesprochen. Es wird davon ausgegangen, dass PM10 homogen in der Luft verteilt ist und damit der lokale und vereinzelte Einsatz von Pflanzen als Filter keinen Nutzen erbringt (ENDLICHER, 2007).

Ebenfalls diskutiert wird der schädliche Einfluss, den Feinstaub möglicherweise auf die Pflanzen ausübt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Verstopfung der Stomata, was zu einer Behinderung des Gasaustauschs führt, der Ausbildung einer lichtdämpfenden Staubschicht oder der Verstärkung der Wirkung anderer Luftschadstoffe (KAPPIS, 2007 und ENDLICHER, 2007). Allerdings muss noch geklärt werden, ob der Feinstaub allein diese Effekte hervorruft oder ob auch andere Schadstoffe eine Rolle spielen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Pflanzen die Fähigkeit haben, die unterschiedlichen Fraktionen des Feinstaubes mit unterschiedlich großer Wahrscheinlichkeit abzuscheiden. Als wesentliche Einflussfaktoren wurden die Veränderung des Strömungsfeldes durch die Pflanzen, mikroklimatische Faktoren wie Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte sowie die morphologischen Eigenschaften der Pflanzen erkannt. Die Veränderung des Strömungsfeldes kann durch den Menschen aktiv mitbestimmt werden, indem er zum Beispiel entsprechende

Anpflanzungsformen wählt und einen gezielten Rückschnitt der Pflanzen vornimmt (KAPPIS, 2007). Zusätzlich kann die Auswahl geeigneter und an den Standort angepasster Pflanzen vorteilhaft sein. Da es über die Wirksamkeit der Abscheidung widersprüchliche Angaben gibt, muss die Überprüfung der Wirksamkeit einer Staubschutzpflanzung im Einzelfall und auf den Standort bezogen erfolgen.

3 Laborversuche

3.1 Bestäubungsversuche

3.1.1 Theoretische Grundlagen

In der Bestäubungskammer wurden einzelne Blätter und kleinere Pflanzenstrukturen bezüglich ihres Abscheidevermögens für Feinstaub untersucht. Damit sollte eine generelle Eignung der Pflanzen für diese Aufgabe festgestellt werden. Nachfolgend werden die angewandten Untersuchungsmethoden, die zu Grunde liegenden theoretischen Überlegungen und die bereits gewonnenen Ergebnisse dargestellt.

Gesamtabscheidegrad

In der Filtertechnik haben Abscheider die Aufgabe, eine möglichst vollständige Phasentrennung zu gewährleisten. Durch die nicht vollständige Lösung dieser Aufgabe verbleibt meistens ein Rest an Partikeln in dem gereinigten Gas. Die Effizienz der Abscheidung wird durch Angabe sog. Gesamtabscheidegrade und Fraktionsabscheidegrade quantifiziert (SCHMIDT, 2001).

Es wurde angenommen, dass die Staubabscheidung durch Pflanzen mit den Methoden der Filtertechnik beschrieben werden kann. Die Blätter wirken als einzelne Kollektoren mit einer aufsummierten Filterfläche A. Für die Gesamtheit der als Tiefenfilter wirkenden Kollektoren ist der von der Mengengart r abhängige Gesamtabscheidegrad g_r wie folgt definiert:

$$g_r = \frac{C_{r,roh} - C_{r,rein}}{C_{r,roh}} = 1 - \frac{C_{r,rein}}{C_{r,roh}} = 1 - f_r, \quad (1)$$

wobei f_r der Gesamtdurchlassgrad ist (SCHMIDT, 2001).

Die Mengengart r gibt an, auf welche Weise die Menge der Partikeln bestimmt wurde und kann folgende Bedeutungen haben:

- 0 Anzahl
- 2 Oberfläche
- 3 Masse bzw. Volumen

Der Feinstaub scheidet sich sowohl in der leeren Bestäubungskammer (incl. Einbauten) als auch an

pflanzlichen Blattoberflächen ab. Unter der Annahme einer Reihenschaltung von Abscheidern definiert sich der anzahlbezogene Gesamtabscheidegrad alleine für die Pflanzen $g_{0,Pfl.allein}$ wie folgt (REZNIK, 2008):

$$g_{0,Pfl.allein} = 1 - \frac{1 - g_{0,ges}}{1 - g_{0,Anl}}. \quad (2)$$

Fraktionsabscheidegrad

Abscheider trennen Partikeln bezüglich deren Größe unterschiedlich ab. Um die Feinstaubabscheidung bezüglich einer jeweils konstanten Partikelgröße x zu beschreiben, berechnet man den Fraktionsabscheidegrad nach folgender Gleichung:

$$T(x) = 1 - \frac{f_0 \cdot q_{0,rein}(x)}{q_{0,roh}(x)}, \quad (3)$$

wobei q_0 die anzahlbezogene Verteilungsdichte in μm^{-1} ist. Diese beschreibt den Mengenanteil der Partikeln in den Größenklassen, bezogen auf die Intervallbreite der jeweiligen Klassen (SCHMIDT, 2001).

Unter der Annahme, dass die Partikelanzahlkonzentration im Rohgas sowohl bei der Messung ohne Pflanze als auch mit Pflanze konstant ist

$$C_{A,roh} = C_{E,roh} = C_{roh} = \text{const.},$$

kann der Fraktionsabscheidegrad für die Pflanze allein wie folgt definiert werden:

$$T_{Pfl.allein}^*(x) = 1 - \frac{C_{E,rein}(x)}{C_{A,rein}(x)}. \quad (4)$$

Unter der Annahme, dass C_{roh} Schwankungen unterworfen ist, ist der Wert $C_{E,rein}(x)$ zu korrigieren. Falls bei der Messung mit der zu untersuchenden Pflanze im Rohgas höhere Werte auftreten als ohne Pflanze, sind auch im Reingas höhere Werte zu erwarten, was den Fraktionsabscheidegrad verschlechtern würde. Daraus ergibt sich folgende Gleichung mit einem Korrekturfaktor für den Fraktionsabscheidegrad:

$$T_{Pfl.allein}^*(x) = 1 - \frac{C_{E,rein}(x)}{C_{A,rein}(x)} \cdot k. \quad (5)$$

Dabei ist der Korrekturfaktor

$$k = \frac{C_{A,roh}(x)}{C_{E,roh}(x)}. \quad (6)$$

Die Partikelanzahlkonzentrationen im Roh- bzw. Reingas für die jeweilige Messreihe werden mithilfe eines PC-Programms ausgewertet und in tabellarischer Form zur weiteren Auswertung dargestellt.

Mittlere Aufnahmekapazität an Feinstaub pro m^2 pflanzlicher Blattoberfläche

Die mittlere Aufnahmekapazität wird mit Hilfe eines Bildanalyse-Systems sowie des Auswertungsprogramms PGV numerisch abgeschätzt. Aufgrund der für eine an der Probe abgeschiedenen Partikel (bzw. für die jeweiligen von dem Programm erkannten Flecken) definierten Partikelprojektionsfläche A_p wird der Äquivalentpartikeldurchmesser x_p in μm wie folgt berechnet:

$$x_p = \sqrt{\frac{4 \cdot A_p}{\pi}}. \quad (7)$$

Unter der Annahme, dass die betrachteten Partikeln kugelförmig sind, wird das Äquivalentvolumen V_p einzelner Partikeln derselben Probe in μm^3 wie folgt berechnet:

$$V_p = \frac{\pi \cdot x_p^3}{6}. \quad (8)$$

Die mittlere Aufnahmekapazität m ist eine Abschätzung der abgeschiedenen Masse auf der Oberfläche der Probe und wird in der Einheit gm^{-2} angegeben. Sie wird für die jeweilige Probe nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$m = \frac{\sum V_p \cdot \rho_{CaCO_3}}{A_{Probe}}. \quad (9)$$

Dabei ist

$\sum V_p$ aufsummiertes Äquivalentvolumen einzelner Partikeln,

ρ_{CaCO_3} Dichte des Kalksteines,

A_{Probe} Probenfläche.

Die mittlere Aufnahmekapazität wird für die jeweilige Messreihe arithmetisch gemittelt und ermöglicht damit eine Aussage über die mögliche Masse an Partikeln, die auf den Blattoberflächen abgeschiedene werden kann.

Quantifizierung der Wiederfreisetzung des Staubs durch die Abwaschung unter aktiver Beregnung

Abschätzung der Feinstaubflächenbelegung

Als ein Maß zur flächenbezogenen Charakterisierung der Wiederfreisetzung des Feinstaubes wird die Feinstaubflächenbelegung herangezogen. Diese beschreibt die gesamte Partikelprojektionsfläche, bezogen auf die Probenfläche. Sie kann damit als eine Art Bedeckungsgrad verstanden werden, der angibt wie groß der Anteil der Blattoberfläche ist, der durch Partikeln bedeckt ist. Die dimensionslose Feinstaubflächenbelegung wird nach folgender Gleichung definiert:

$$B = \frac{A_p \cdot N_p}{A_{Probe}}. \quad (10)$$

Dabei ist

A_p für eine Probe arithmetisch gemittelte Partikelprojektionsfläche,

N_p an der Probenfläche abgeschiedene bzw. Restpartikelanzahl,

A_{Probe} Probenfläche.

Im Gegensatz zur mittleren Aufnahmekapazität wird durch die Feinstaubflächenbelegung keine Aussage über die abgeschiedene Masse auf der Blattoberfläche gemacht. Allerdings ist sie von den Stoffeigenschaften des abgeschiedenen Staubs wie zum Beispiel der Dichte weitgehend unabhängig und ermöglicht so einen einfachen Vergleich der Wiederfreisetzung auch bei der Untersuchung unterschiedlicher Stäube.

Bestimmung der Partikelrestmasse

Die flächenbezogene Restmasse m_{rest} wird als ein Maß zur massenbezogenen Quantifizierung der Reinigungseffizienz verwendet. Es beschreibt die Masse der Partikeln, die nach der Abwaschung auf den Blattoberflächen verbleiben. Die Bestimmungsmethode beruht ebenfalls auf einem Bildanalyse-System, das ähnlich dem zur Bestimmung der mittleren Aufnahmekapazität eingesetzt ist.

Zur Charakterisierung der Wiederfreisetzung des Feinstaubes wird auch die normierte Restmasse m_n eingesetzt, die wesentlich aussagekräftiger ist und als Quotient der Partikelrestmasse m_{rest} zur Aufnahmekapazität m definiert ist:

$$m_n = \frac{m_{rest}}{m}. \quad (11)$$

Ermittlung der Reinigungsgrade

Die gröÙenselektive Reinigungseffizienz der Blattoberflächen bezüglich des Feinstaubes wird durch Angabe des partikelgrößenbezogenen Reinigungsgrades quantitativ beschrieben, der wie folgt definiert wird:

$$R_i(x_i) = 1 - \frac{N_{i,nachher}}{N_{i,vorher}}. \quad (12)$$

Dabei ist

$N_{i,vorher}$ Anzahl der an der Probenfläche abgeschiedenen Partikeln jeweils definierter PartikelgröÙe x_i ,

$N_{i,nachher}$ Restanzahl der Partikeln derselben GröÙe an der Probenfläche nach der Abwaschung.

Analyse der Partikelgrößenverteilungen der Partikelkollektive in zu untersuchenden Medien

Trägergas

Um die Frage zu beantworten, welche Partikelfractionen mit dem Reingas nach der Abtrennung in der Bestäubungskammer und an der Pflanze austreten, wird die massenbezogene Verteilungssumme $Q_3(x)$ als ein Mengenmaß zu deren quantitativen Beschreibung verwendet. Die Verteilungssumme beschreibt den Mengenanteil der Partikeln, die kleiner als oder gleich einer bestimmten Partikelgröße x_i sind. Zur Kennzeichnung einer Partikelgrößenverteilung wird in unserem Fall der massenbezogene Medianwert $x_{50,3}$ verwendet. Dies bedeutet, dass 50 % aller Partikeln im Trägergas kleiner oder gleich groß wie diese Partikelgröße sind (SCHMIDT, 2001).

Die Ermittlung der Summenhäufigkeit der Partikelgrößenverteilung beruht auf dem optischen Messverfahren der Streuung von Licht an Partikeln. Als Messgerät wird der Partikelzähler und -größenanalysator PCS-2000 der Firma PALAS verwendet. Die Hauptbestandteile des optischen Sensors des PCS-2000 sind ein Beleuchtungssystem und zwei gegenüberliegend angeordnete Detektorsysteme, deren optische Achsen im Achsenschnittpunkt senkrecht zur optischen Achse des Beleuchtungssystems stehen. Der Partikelzähler misst das von einzelnen Partikeln beim Durchqueren eines gleichmäßig ausgeleuchteten Messvolumens gestreute Weißlicht. Die Intensität des Streulichtes, das von den Partikeln gesendet wird, ist ein Maß für ihre Größe, während die Anzahl der Streulichtimpulse proportional zur Partikelkonzentration ist. Der Vorteil des verwendeten Weißlichts gegenüber monochromatischem Licht besteht darin, dass Fehler aufgrund von Interferenzerscheinungen an den Partikeln minimiert werden. Daher kann auch die Fläche von nicht sphärischen Partikeln zufrieden stellend erfasst werden, was bei der Messung mit Kalkstein der Fall ist (PALAS, 1997). Die Messergebnisse werden mithilfe des Auswertungs- und Steuerungsprogramms des PCS-2000 ausgewertet und tabellarisch dargestellt.

Blattoberflächen

Die an den Blattoberflächen der Versuchspflanzen abgeschiedenen bzw. nach der Abwaschung anhaftenden Partikelkollektive werden durch die Angabe von Summenhäufigkeitsfunktionen quantitativ beschrieben. Deren Bestimmung erfolgt mit Hilfe eines Bildanalyseprogramms. Dieses beinhaltet ein Auflichtmikroskop des Typs SMZ 1500 der Firma Nikon mit angeschlossener Digitalkamera, eine Analysesoftware der Firma

Soft Imaging System GmbH und das selbst entwickelte Auswertungsprogramm PGV. Die Vorgehensweise lässt sich wie folgt beschreiben: Eine aus dem Blattmaterial entnommene Probe wird mit dem Auflichtmikroskop charakterisiert und ein Bild von der Probe mit der Digitalkamera aufgenommen. Ein Bildanalyseprogramm binarisiert die Bilder und misst u. a. die Fläche und den Formfaktor jedes einzelnen Flecks. Die als Partikeln erkannten Flecken werden registriert und dann nach dem flächenäquivalenten Kugeldurchmesser in Partikelgrößenklassen eingeteilt. Zur weiteren Auswertung werden Statistik- und Klassifizierungsfunktionen des Auswertungsprogramms PGV herangezogen. Das Ergebnis wird tabellarisch ausgegeben.

Flüssigkeit

Die Analyse der Partikelgrößenverteilung des abgewaschenen Feinstaubes in der Flüssigkeit beantwortet vor allem die Frage, welche Partikelfractionen durch den Regen abgewaschen werden, in die Flüssigkeit übergehen und sich darin verteilen.

Unter der Annahme, dass die Kalksteinpartikeln bzw. Agglomerate im Laufe des jeweiligen Versuchs als kaum wasserlöslich betrachtet werden können, werden oberflächliche Abschwemmungen wie quasi kolloide Lösungen analysiert. Die Analyse der Partikelgrößenverteilung beruht auf dem optischen Messverfahren der statischen Streuung von Laserlicht an Partikeln gemäß DIN ISO 3320. Zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in einem Bereich zwischen 0,01 und 3000 μm wird das Laserstreulichtspektrometer LA-950 der Firma RETSCH Technology eingesetzt. Das Gerät wird über einen eigenen PC gesteuert, auf dem auch die Auswertung der Daten erfolgt. Als ein Mengenmaß zur quantitativen Charakterisierung der Partikelgrößenverteilung in der Abschwemmung verteilter Partikelkollektive wird die massenbezogene Verteilungsdichte bestimmt.

Die Verteilungsdichte beschreibt den Mengenanteil der Partikeln in einer bestimmten Größenklasse, bezogen auf die Intervallbreite dieser Klasse (SCHMIDT, 2001). Die Partikelgrößenverteilung wird durch einen Modalwert charakterisiert.

Der massenbezogene Modalwert fällt mit dem Maximum der Dichtefunktion zusammen und kennzeichnet demnach die mengenreichste Partikelgröße (SCHMIDT, 2001). Die Messergebnisse werden mithilfe eines Auswertungsprogramms der Firma RETSCH Technology ausgewertet und dann tabellarisch sowie in Form von Diagrammen dargestellt.

3.1.2 Versuchsdurchführung

Die oben beschriebenen Größen zur Charakterisierung der Abscheideleistung von Pflanzen und der Abwaschung durch Regen werden durch die Verwendung zweier Versuchsanlagen, der Bestäubungskammer und der Beregnungskammer, bestimmt.

Bei den Versuchen mit der Bestäubungskammer steht die Abscheidung von Feinstaub an den Versuchspflanzen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten im Vordergrund. Mit der Beregnungskammer wird hingegen untersucht, in wie weit an den Blättern abgeschiedener Staub durch Regen von den Blattoberflächen abgewaschen werden kann.

Versuchspflanzen

Für die Durchführung der Versuche wurden sieben Pflanzenarten ausgewählt, die häufig entlang von Straßen im städtischen Bereich anzutreffen sind.

Es handelt sich hierbei um

- Efeu,
- Kartoffel-Rose
- Kirschlorbeer,
- Purpurbeere,
- Brennessel,
- Rote Heckenkirsche,
- Berg-Johannisbeere,
- Fichte.

Von diesen Pflanzen werden Efeu, Kartoffel-Rose, Purpurbeere, Rote Heckenkirsche und Berg-Johannisbeere in der RAS-LP 2 als geeignet für die Anpflanzung an Straßen genannt (FGSV, 1993).

Die Eigenschaften der Blätter der verwendeten Versuchspflanzen ist in Tabelle 1 dargestellt.

Pflanzenart	Blattgröße	Blattform	Behaarung
Kirschlorbeer	großblättrig	einfach	glatt
Fichte	kleinblättrig	einfach	glatt
Purpurbeere	kleinblättrig	einfach	wenig
Efeu „Wörner“	mittelgroß	3 bis 5-lappig	mäßig
Kartoffel-Rose	mittelgroß	5 bis 9 Fieder-Blättchen	mäßig
Rote Heckenkirsche	klein bis mittelgroß	einfach	stark behaart
Berg-Johannisbeere	kleinblättrig	3 bis 5-lappig	behaart
Brennessel	mittelgroß bis groß		stark behaart

Tab. 1: Blatteigenschaften der Versuchspflanzen

Die Bilder 1 bis 8 zeigen die verwendeten Pflanzenarten jeweils vor der Durchführung einer Messreihe.



Bild 1: Kirschlorbeer



Bild 2: Fichte



Bild 3: Efeu



Bild 5: Kartoffel-Rose



Bild 4: Berg-Johannisbeere



Bild 6: Purpurbeere



Bild 7: Rote Heckenkirsche



Bild 8: Brennnessel

Bestäubungskammer

Im nachfolgenden Abschnitt wird die experimentelle Vorgehensweise bei der Bestimmung der Abscheideleistung von Pflanzen in der Bestäubungskammer beschrieben.

Die Vorbereitung einer Messreihe umfasst sowohl die Konditionierung des Teststaubs als auch die Präparation der Versuchspflanzen für ihren Einsatz in der Bestäubungskammer.

Als Teststaub wird Ulmer Weiss XMF (Kalkstein CaCO_3) der Firma Eduard Merkle GmbH verwendet. Die Partikelgrößenverteilung wird durch einen Massenmedianwert $x_{50,3}$ von $3 \mu\text{m}$ charakterisiert. Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Teststaubs werden in Tabelle 2 wiedergegeben.

Parameter	Wert
Dichte	$2,7 \text{ gcm}^{-3}$
Schüttdichte	$0,61 \text{ gcm}^{-3}$
Stampfdichte	$1,15 \text{ gcm}^{-3}$
pH-Wert	9,6

Tab. 2: Physikalisch-chemische Eigenschaften Ulmer Weiss

Vor der Verwendung des Teststaubs muss dieser für die nachfolgenden Versuche konditioniert werden, um stets vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Dazu wird der Teststaub zunächst in einem Trockenofen bei einer Temperatur von $105 \text{ }^\circ\text{C}$ über einen Zeitraum von zwei Stunden getrocknet. Anschließend wird der Staub unter Verwendung eines Riffelteilers Typ 6,5 sowie zweier Rotationsteiler in gleiche Proben aufgeteilt.

Vor dem jeweiligen Versuch wird das Untersuchungsobjekt (Einzelpflanze in einem runden Topf bzw. frisch geschnittene Zweige) mit einem weichen Pinsel unter Leitungswasser sorgfältig abgespült und in Umgebungsluft getrocknet.

Vor der Bestäubung wird die Blattoberfläche jeder Versuchspflanze nach folgendem Verfahren bestimmt:

- Blätter werden mit einem Bleistift vorsichtig auf Papier umrissen,
- die erhaltenen Umrissse werden mithilfe eines Scanners mit dem Programm XSane digitalisiert,
- die digitalisierten Bilder werden mit dem Bildverarbeitungsprogramm GIMP von einander getrennt und als separate Daten gespeichert,
- die Blattoberfläche einzelner Blätter wird mit dem selbst entwickelten Auswertungsprogramm PF bestimmt,
- die gesamte Blattoberfläche der jeweiligen Messreihe wird mit Excel ausgewertet.

Nach Abschluss der Vorbereitungen folgen die Messungen in der Bestäubungskammer. Die Bestäubungskammer besteht aus einem ca. 0,05 m³ umfassendes Plexiglasrohr, das beiderseits über Stahltrichter mit einer Rohrleitung verbunden wird. Die Kammer wird in Gegenrichtung zur Schwerkraft durchströmt, um die Beiträge zur Partikelabscheidung aufgrund Sedimentation sowie sonstigen Transportmechanismen voneinander unterscheiden zu können. Die Probenentnahmestellen befinden sich unterhalb und oberhalb der Kammer. Die untere Probenentnahmestelle befindet sich 0,74 m oberhalb des Dosierers (Rohgas) und die obere 0,31 m über dem Trichter der Bestäubungskammer (Reingas). An den Probenentnahmestellen wird die Probenluft isokinetisch entnommen, um eine repräsentative Luftprobe zu erhalten (SCHWISTER, 2005). Die so erhaltene Luftprobe wird dem Messgerät PCS-2000 zur Analyse der Partikelgrößenverteilung zugeführt.

Für die Erzeugung des Testaerosols wird ein Bürstenstaubdosierer mit rotierender Bürste Modell Moll des Instituts für MVM der Universität Karlsruhe verwendet. In diesen wird der zuvor konditionierte und aufgeteilte Teststaub eingefüllt.

Eine Messreihe beinhaltet jeweils eine Messung ohne Pflanze bzw. mit einer leeren Bestäubungskammer und eine Messung mit Pflanze. Die Bilder 9 und 10 zeigen beispielhaft die Anordnung eines Efeus während einer Messreihe.



Bild 9: Efeu in Bestäubungskammer



Bild 10: Efeu in Bestäubungskammer

Die Versuchspflanzen werden mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 13 mms⁻¹, 21 mms⁻¹ oder 30 mms⁻¹ angeströmt. Dies entspricht jeweils einem Volumenstrom von 3 m³h⁻¹, 5 m³h⁻¹ bzw. 7 m³h⁻¹. Die Strömungsgeschwindigkeit in der Kammer wird mit einem Hitzdrahtanemometer und dem Messgerät Testo 425 der Firma Testo AG bestimmt.

Zu Beginn und nach Ende jeder Messreihe werden Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in und außerhalb der Bestäubungskammer mit einem Messgerät Testo 625 der Firma Testo AG bestimmt. Die Versuchsbedingungen der einzelnen Messreihen werden in den Tabellen 3 bis 10 für jede Pflanzenart dargestellt.

Datum	Versuchsreihe	Lufttemperatur in der Kammer / °C	Rel. Luftfeuchte in der Kammer / % r.F.	Volumenstrom / m ³ h ⁻¹	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzentration im Rohgas / gm ⁻³
29.07.08	Anlage leer	27,4 ... 28,0	40,2 ... 40,9	5,0	0,02	0,38
	Mit Pflanze	28,1 ... 28,6	41,7 ... 42,3			
05.08.08	Anlage leer	25,4 ... 26,1	42,6 ... 41,6			0,38
	Mit Pflanze	26,1 ... 26,1	42,1 ... 41,8			
12.08.08	Anlage leer	24,8 ... 24,6	44,9 ... 49,6			0,44
	Mit Pflanze	24,8 ... 24,8	49,0 ... 52,9			
22.08.08	Anlage leer	24,8 ... 25,4	47,0 ... 45,9			0,42
	Mit Pflanze	25,4 ... 25,7	45,9 ... 45,3			
27.08.08	Anlage leer	24,5 ... 25,7	46,4 ... 42,6			0,42
	Mit Pflanze	25,7 ... 26,1	42,0 ... 41,2			
05.09.08	Anlage leer	23,9 ... 24,5	40,0 ... 40,4			0,41
	Mit Pflanze	24,5 ... 24,9	40,6 ... 41,6			
09.09.08	Anlage leer	23,6 ... 24,8	40,9 ... 38,9	0,40		
	Mit Pflanze	24,8 ... 24,8	39,9 ... 39,7			

Tab. 3: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Efeu

Datum	Versuchsreihe	Lufttemperatur in der Kammer / °C	Rel. Luftfeuchte in der Kammer / % r.F.	Volumenstrom / m ³ h ⁻¹	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzentration im Rohgas / gm ⁻³
12.11.08	Anlage leer	22,0 ... 22,5	32,2 ... 29,0	5,0	0,02	0,38
	Mit Pflanze	22,1 ... 22,4	30,4 ... 29,4			
13.11.08	Anlage leer	21,7 ... 23,0	32,0 ... 30,9	3,0	0,01	0,65
	Mit Pflanze	23,1 ... 23,1	32,2 ... 32,6			
20.11.08	Anlage leer	20,5 ... 21,5	42,2 ... 34,5	7,0	0,03	0,30
	Mit Pflanze	21,5 ... 21,5	35,3 ... 33,7			

Tab. 4: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Kirschlorbeer

Datum	Versuchsreihe	Lufttemperatur in der Kammer / °C	Rel. Luftfeuchte in der Kammer / % r.F.	Volumenstrom / m ³ h ⁻¹	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzentration im Rohgas / gm ⁻³
26.11.08	Anlage leer	20,7 ... 21,5	30,2 ... 25,5	3,0	0,01	0,73
	Mit Pflanze	21,2 ... 21,7	27,2 ... 26,4			
27.11.08	Anlage leer	21,1 ... 21,5	31,1 ... 26,7	5,0	0,02	0,43
	Mit Pflanze	21,5 ... 21,6	27,4 ... 27,4			
03.12.08	Anlage leer	21,1 ... 21,8	26,4 ... 22,0	7,0	0,03	0,32
	Mit Pflanze	22,1 ... 22,1	22,0 ... 22,0			

Tab. 5: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Fichte

Datum	Versuchsreihe	Luft-temperatur in der Kammer / °C	Rel. Luft-feuchte in der Kammer / % r.F.	Volumen- strom / m ³ h ⁻¹	Mittlere Strömungs- geschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzent- ration im Rohgas / gm ⁻³
04.12.08	Anlage leer	21,5 ... 21,5	26,6 ... 23,4	3,0	0,01	0,70
	Mit Pflanze	21,6 ... 22,4	24,2 ... 23,3			
10.12.08	Anlage leer	20,7 ... 21,5	27,8 ... 23,4	5,0	0,02	0,44
	Mit Pflanze	21,5 ... 21,6	27,9 ... 27,2			
17.12.08	Anlage leer	20,2 ... 20,7	25,4 ... 22,7	7,0	0,03	0,33
	Mit Pflanze	20,8 ... 20,9	24,0 ... 24,2			

Tab. 6: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Purpurbeere

Datum	Versuchsreihe	Luft-temperatur in der Kammer / °C	Rel. Luft-feuchte in der Kammer / % r.F.	Volumen- strom / m ³ h ⁻¹	Mittlere Strömungs- geschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzent- ration im Rohgas / gm ⁻³
10.03.09	Anlage leer	20,4 ... 21,2	32,0 ... 27,1	5,0	0,02	0,44
	Mit Pflanze	21,3 ... 21,4	30,3 ... 30,5			
13.03.09	Anlage leer	21,5 ... 22,4	29,2 ... 26,0	7,0	0,03	0,33
	Mit Pflanze	22,2 ... 22,4	27,6 ... 25,7			
04.05.09	Anlage leer	21,6 ... 22,9	29,7 ... 21,6	3,0	0,01	0,71
	Mit Pflanze	22,4 ... 22,4	26,5 ... 24,4			

Tab. 7: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Kartoffel-Rose

Datum	Versuchsreihe	Luft-temperatur in der Kammer / °C	Rel. Luft-feuchte in der Kammer / % r.F.	Volumen- strom / m ³ h ⁻¹	Mittlere Strömungs- geschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzent- ration im Rohgas / gm ⁻³
18.03.09	Anlage leer	21,0 ... 22,0	27,5 ... 21,4	5,0	0,02	0,46
	Mit Pflanze	21,8 ... 22,4	21,6 ... 19,3			
19.03.09	Anlage leer	21,8 ... 22,1	22,6 ... 20,3	7,0	0,03	0,33
	Mit Pflanze	22,5 ... 22,9	24,5 ... 20,0			
24.03.09	Anlage leer	19,1 ... 20,1	26,5 ... 25,8	3,0	0,01	0,77
	Mit Pflanze	20,2 ... 20,0	28,9 ... 28,8			

Tab. 8: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Rote Heckenkirsche

Datum	Versuchsreihe	Luft-temperatur in der Kammer / °C	Rel. Luft-feuchte in der Kammer / % r.F.	Volumen- strom / m ³ h ⁻¹	Mittlere Strömungs- geschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzent- ration im Rohgas / gm ⁻³
03.04.09	Anlage leer	22,4 ... 23,4	36,0 ... 31,7	3,0	0,01	0,73
	Mit Pflanze	23,3 ... 23,7	57,3 ... 35,6			
28.04.09	Anlage leer	22,9 ... 23,4	35,7 ... 30,7	5,0	0,02	0,43
	Mit Pflanze	23,5 ... 23,4	31,7 ... 29,7			
30.04.09	Anlage leer	22,1 ... 22,5	32,0 ... 24,2	7,0	0,03	0,32
	Mit Pflanze	22,6 ... 23,3	25,2 ... 25,6			

Tab. 9: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Berg-Johannisbeere

Datum	Versuchsreihe	Luft-temperatur in der Kammer / °C	Rel. Luft-feuchte in der Kammer / % r.F.	Volumen- strom / m ³ n ⁻¹	Mittlere Strömungs- geschwindigkeit / ms ⁻¹	Staubkonzentration im Rohgas / gm ⁻³
05.05.09	Anlage leer	21,5 ... 22,2	33,7 ... 30,4	5,0	0,02	0,44
	Mit Pflanze	22,4 ... 22,4	31,7 ... 32,8			
07.05.09	Anlage leer	22,0 ... 22,4	39,8 ... 33,6	3,0	0,01	0,73
	Mit Pflanze	22,9 ... 22,9	34,8 ... 34,9			
08.05.09	Anlage leer	22,5 ... 23,3	40,2 ... 31,9	7,0	0,03	0,31
	Mit Pflanze	23,3 ... 23,4	32,8 ... 32,1			

Tab. 10: Versuchsbedingungen während der Messreihen mit Brennessel

Nach Abschluss der Bestäubung wurden von jeder Versuchspflanze drei bis fünf Blattproben entnommen und unter dem Auflichtmikroskop SMZ 1500 der Firma Nikon untersucht. Mit Hilfe einer angeschlossenen Digitalkamera wurden die Proben fotografiert. Bild 11 zeigt einen Ausschnitt aus einer solchen Aufnahme der Blattoberseite von Efeu bei 225-facher Vergrößerung vor der Bestäubung, während Bild 12 die Blattoberseite von Efeu nach der Bestäubung darstellt.



Bild 11: Blattprobe vor der Bestäubung (Efeu)

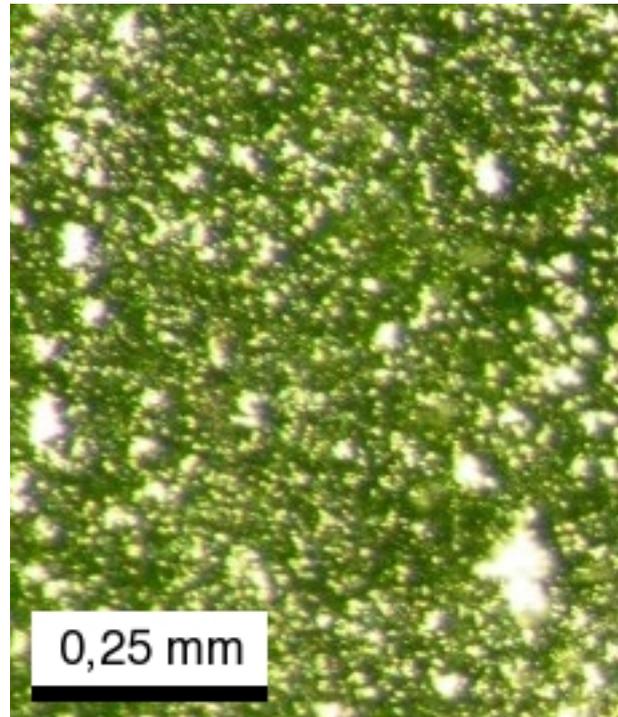


Bild 12: Blattprobe nach der Bestäubung (Efeu)

Beregnungskammer

Die Entfernung abgeschiedener Partikeln von den Blattoberflächen durch Regen wurde mit Hilfe einer Beregnungskammer untersucht. Die Beregnungskammer besteht aus einem Plexiglaszylinder, der identisch dem der Bestäubungskammer ist und der Aufnahme der Versuchspflanzen dient. Oberhalb des Zylinders befindet sich ein Behälter für die Aufnahme des Wassers. Am Boden des Behälters befinden sich die Sprühdüsen, die eine definierte Abgabe des Wassers auf die Pflanzen ermöglichen. Der Wasserspiegel im Behälter wird mit Hilfe einer Wasserpumpe mit einer variablen Förder-

menge von 4 bis 40 Liter pro Stunde konstant gehalten. Unterhalb des Plexiglaszylinders befindet sich ein Auffangbehälter, der es ermöglicht, die aufgegebene Wassermenge zu bestimmen. Bild 13 zeigt die Beregnungskammer. Zu erkennen sind die Wasserbehälter mit den Regendüsen, der Plexiglaszylinder mit der Pflanze und der Behälter zum Auffangen des ablaufenden Wassers.



Bild 13: Beregnungskammer

Zur Veranschaulichung der Versuchsbedingungen sind in Tabelle 11 die Parameter während der Messungen mit Efeu, Fichte und Purpurbeere wiedergegeben.

Parameter	Wert
Beregnungsdichte D / m^2	754
Arithmetisch gemittelte Tropfen- größe (gemessen) x / mm	4,54
Stationäre Sinkgeschwindigkeit $w_{\text{sg}} / \text{ms}^{-1}$	9,94
Mittlere Tropfenmasse m_{TR} / g	0,049
Tropfenenergie $E_{\text{TR}} / 10^{-5} \text{ J}$	242
Füllhöhe / mm	43
Beregnungsdauer / h	1
Regenintensität $I_{\text{R}} / \text{mmh}^{-1}$	50

Tab. 11: Versuchsparameter für Versuche in der Beregnungskammer

Die Bilder 14 und 15 zeigen beispielhaft die Anordnung der Versuchspflanzen in der Beregnungskammer am Beispiel von Efeu und Fichte.



Bild 14: Efeu in der Beregnungskammer



Bild 15: Fichte in der Beregnungskammer

Das auf die Pflanzen aufgegebene Wasser wird für weiterführende Untersuchungen aufgefangen. Um die Partikelgrößenverteilung im Wasser zu analysieren, muss die Probe zunächst ein Prüfsieb mit der Lochgröße $20 \mu\text{m}$ passieren. Dies soll verhindern, dass große aber instabile Agglomerate in die

Probe gelangen und das Messergebnis verfälschen. Anschließend werden die Proben in einem zeitlichen Abstand von 5, 10 und 20 Minuten nach Passieren des Siebs entnommen. Die unterschiedlichen Zeitabstände resultieren aus den Sinkgeschwindigkeiten der Kalkpartikeln mit einer Größe von bis zu 10 μm im Wasser. Die so gewonnenen Proben werden mit dem Laserstreulichtspektrometer LA-950 der Firma RETSCH Technology untersucht.

Neben der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung mit dem Laserstreulichtspektrometer werden auch die abgewaschenen Blattproben unter dem Auflichtmikroskop untersucht. Dies erfolgt hier analog dem Vorgehen nach der Bestäubung in der Bestäubungskammer. Bild 16 zeigt einen Bildausschnitt einer Blattprobe von Efeu in 225-facher Vergrößerung nach der Abwaschung.

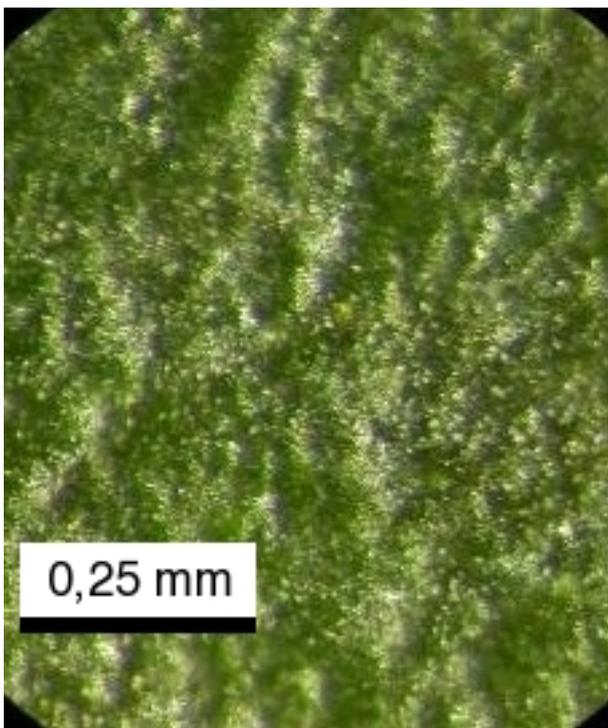


Bild 16: Blattprobe nach der Abwaschung (Efeu)

3.1.3 Ergebnisse

Gesamtabscheidegrad

Die grafische Darstellung der anzahlbezogenen Gesamtabscheidegrade für PM₁₀ an Testpflanzen für drei Strömungsgeschwindigkeiten kann Bild 17 entnommen werden.

Die Versuchsdauer wurde konstant bei 96 min gehalten. An den Achsen sind die gesamte Blattoberfläche in m^2 und die dimensionslosen Gesamtabscheidegrade für die Pflanzen alleine angegeben. Der Scharparameter stellt die Strö-

mungsgeschwindigkeiten in ms^{-1} dar. Aus Bild 17 geht hervor, dass trotz der Streuung der Resultate der Gesamtabscheidegrad von der gesamten Blattoberfläche abhängt. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit nimmt tendenziell auch der Gesamtabscheidegrad ab. Die untersuchten Pflanzen werden durch folgende Buchstaben im Diagramm gekennzeichnet:

- B Brennessel,
- E Efeu,
- F Fichte,
- J Berg-Johannisbeere,
- K Kirschlorbeer,
- P Purpurbeere,
- R Kartoffel-Rose.

Fraktionsabscheidegrad

Die Bilder 18 bis 26 veranschaulichen grafisch die Fraktionsabscheidegrade für Partikeln kleiner 10 μm an den untersuchten Pflanzen bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,01, 0,02 und 0,03 ms^{-1} . Auf der Abszisse ist jeweils die Partikelgröße x_{ae} (aerodynamischer Durchmesser) in μm im logarithmischen Maßstab aufgetragen, auf der Ordinate der dimensionslose Fraktionsabscheidegrad der Pflanze alleine $T_{\text{Pfl. alleine}}(x_{ae})$. Der Scharparameter stellt jeweils die untersuchten Testpflanzen dar.

Aus Bild 18 kann man entnehmen, dass die Trennkurve der kleinblättrigen Purpurbeere im Größenbereich bis 1,7 μm über der Trennkurve des großblättrigen Kirschlorbeers liegt, obwohl dessen Blattoberfläche rund 3-mal größer ist. Die Trennkurve der Fichte mit einer gesamten Blatt- bzw. Nadeloberfläche von 10722,4 cm^2 ist (im Vergleich zu den oben betrachteten) deutlich nach oben hin verschoben. Eine eindeutige Abhängigkeit von der gesamten Blattoberfläche ist hier nicht erkennbar.

Bild 19 zeigt, dass die Trennkurven hier flacher liegen, als bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,01 ms^{-1} . Im Größenbereich bis zu 0,9 μm (Partikeltransport aufgrund von Diffusion) zeigen Purpurbeere und Kirschlorbeer eine etwa gleich große Abscheideeffizienz. Die Trennkurve der Fichte liegt im betrachteten Größenbereich höher als die der anderen Pflanzen.

Man kann in Bild 20 erkennen, dass die Trennkurven starken Streuungen unterworfen sind. Allerdings ist die Abhängigkeit des Fraktionsabscheidegrads von der gesamten Blattoberfläche deutlich zu erkennen.

In Bild 21 sieht man, dass bei Efeu die Approximationskurve sinkt. Bei der Kartoffel-Rose nimmt die Abscheideeffizienz mit zunehmender Partikelgröße aufgrund der Trägheit tendenziell zu, was vermutlich durch ihre Blattform zu erklären ist. Im Größenbereich von 0,5 bis etwa 1,0 μm scheidet der Efeu effizienter ab als die Kartoffel-Rose.

Trotz der Streuung der Resultate ist in Bild 22 deutlich zu sehen, dass bei der Kartoffel-Rose die Partikelabscheidung aufgrund von Trägheit mit steigender Strömungsgeschwindigkeit zunimmt.

Bild 23 zeigt, dass der Kirschlorbeer schon bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ eine erhöhte Abscheideleistung im betrachteten Größenbereich aufweist. Die Abscheidegrade der Brennnessel sind dagegen im Größenbereich von 0,5 bis 1,0 μm negativ. Dies weist auf die höhere Konzentration der feinsten Partikelfraktionen im Reingas gegenüber dem Rohgas hin und kann am ehesten durch eine Wiederfreisetzung von den Haaroberflächen erklärt werden. Im Größenbereich über 1,0 μm nimmt die Abscheideeffizienz der Brennnessel dagegen deutlich zu.

Aus Bild 24 geht hervor, dass bei der rauen und stark behaarten Brennnessel die Abscheideeffi-

zienz deutlich über der des Kirschlorbeers liegt, obwohl die gesamte Blattoberfläche der Brennnessel etwa um den Faktor 2 kleiner ist.

In Bild 25 ist dargestellt, dass im Größenbereich bis etwa 2,5 μm die Trennkurven der Berg-Johannisbeere mit ihren wenig behaarten, lappigen Blättern und der Roten Heckenkirsche mit stark behaarten, aber einfachen Blättern in weiten Teilen übereinstimmen. Allerdings ist die gesamte Blattoberfläche der Roten Heckenkirsche um mehr als den Faktor 2 geringer als die der Berg-Johannisbeere. Die Abscheideleistung der Purpurbeere (wenig behaarte, einfache Blätter) liegt nochmals deutlich höher.

Im Größenbereich oberhalb von 2,5 μm nimmt die Abscheideleistung der Purpurbeere ab, während bei der Berg-Johannisbeere diese aufgrund der Trägheit der Partikeln zunimmt. Die Fraktionsabscheidegrade für Kalkpartikeln an der Roten Heckenkirsche sind meistens negativ, was vermutlich auf eine Wiederfreisetzung größerer Partikeln aufgrund der erhöhten Beweglichkeit der Blätter bei der maximalen Strömungsgeschwindigkeit zurückzuführen ist.

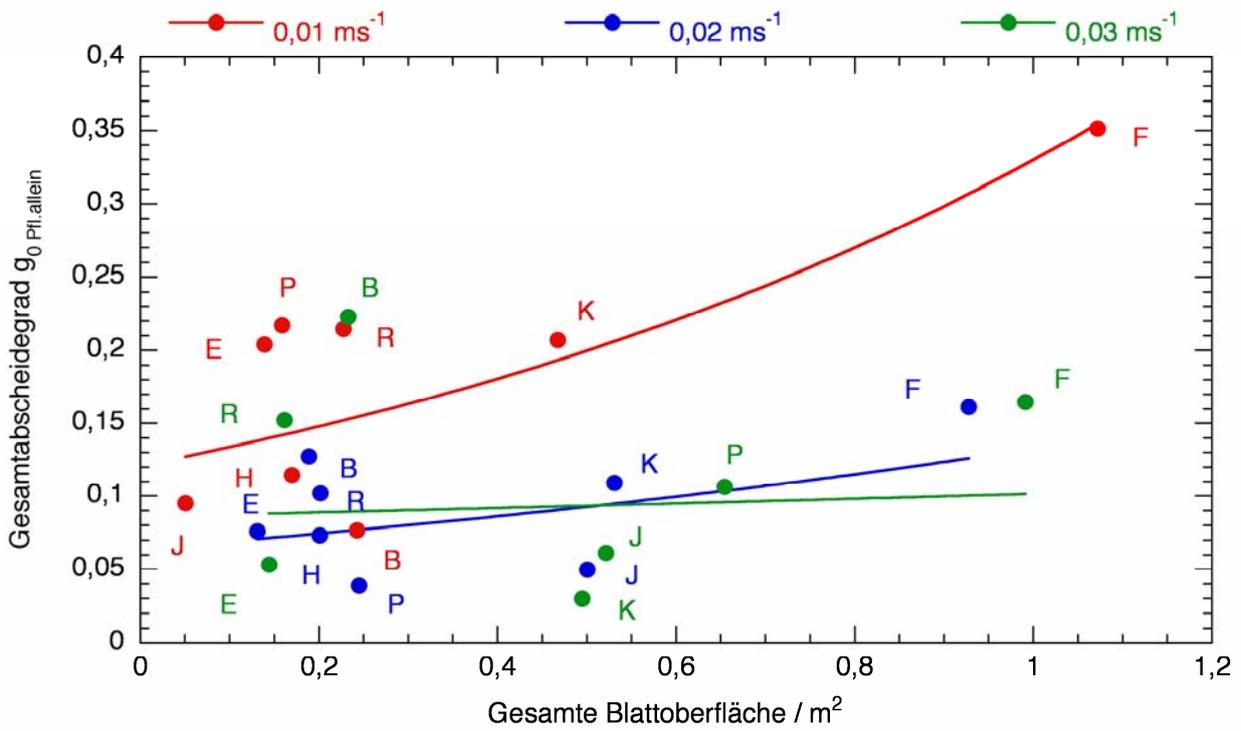


Bild 17: Gesamtabscheidegrade der Testpflanzen bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten (Abkürzungen S. 22)

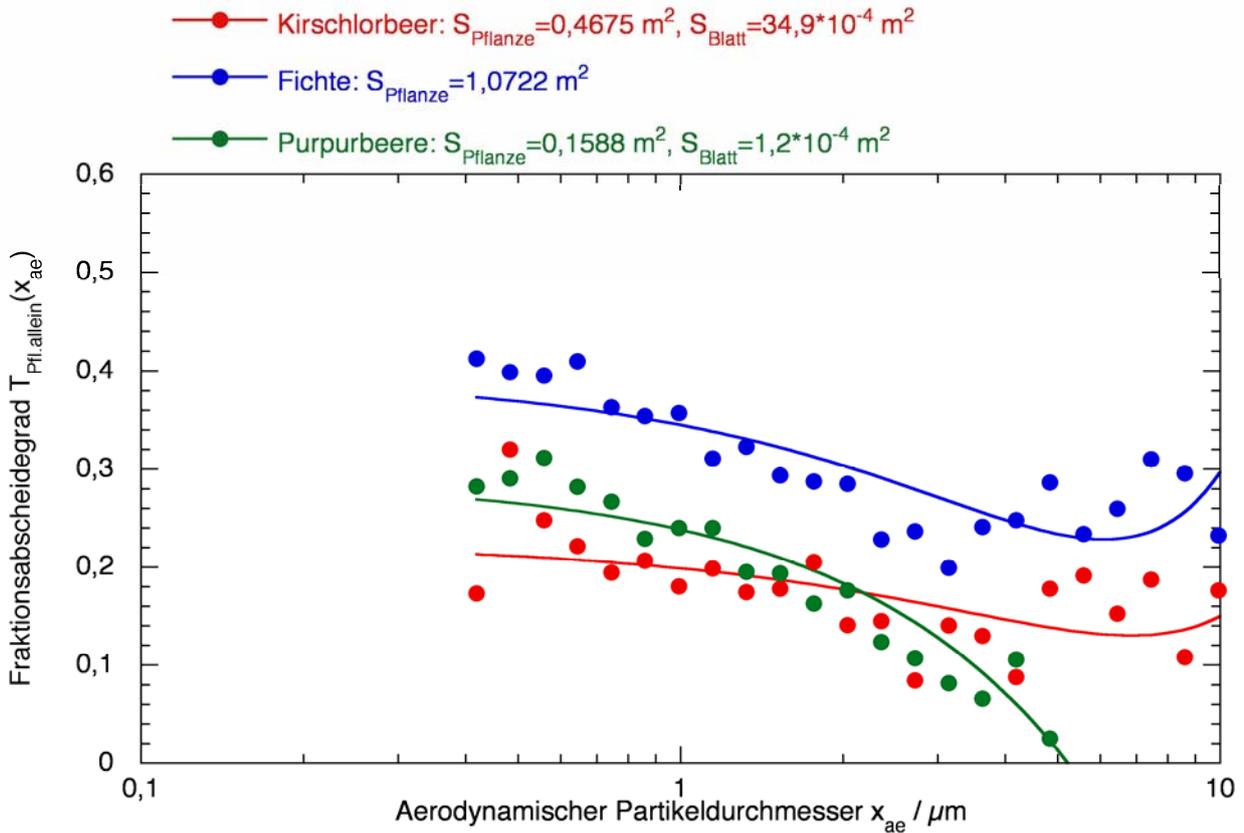


Bild 18: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,01 \text{ ms}^{-1}$

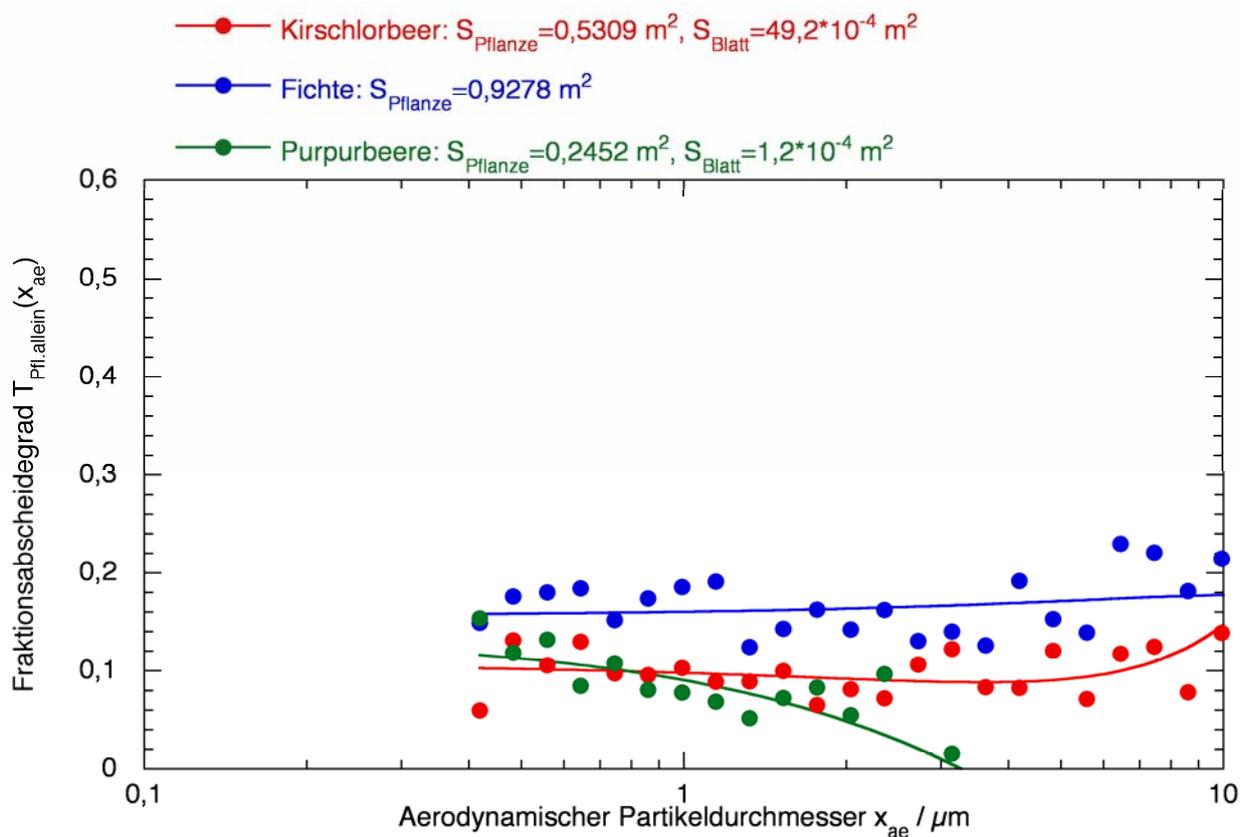


Bild 19: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,02 \text{ ms}^{-1}$

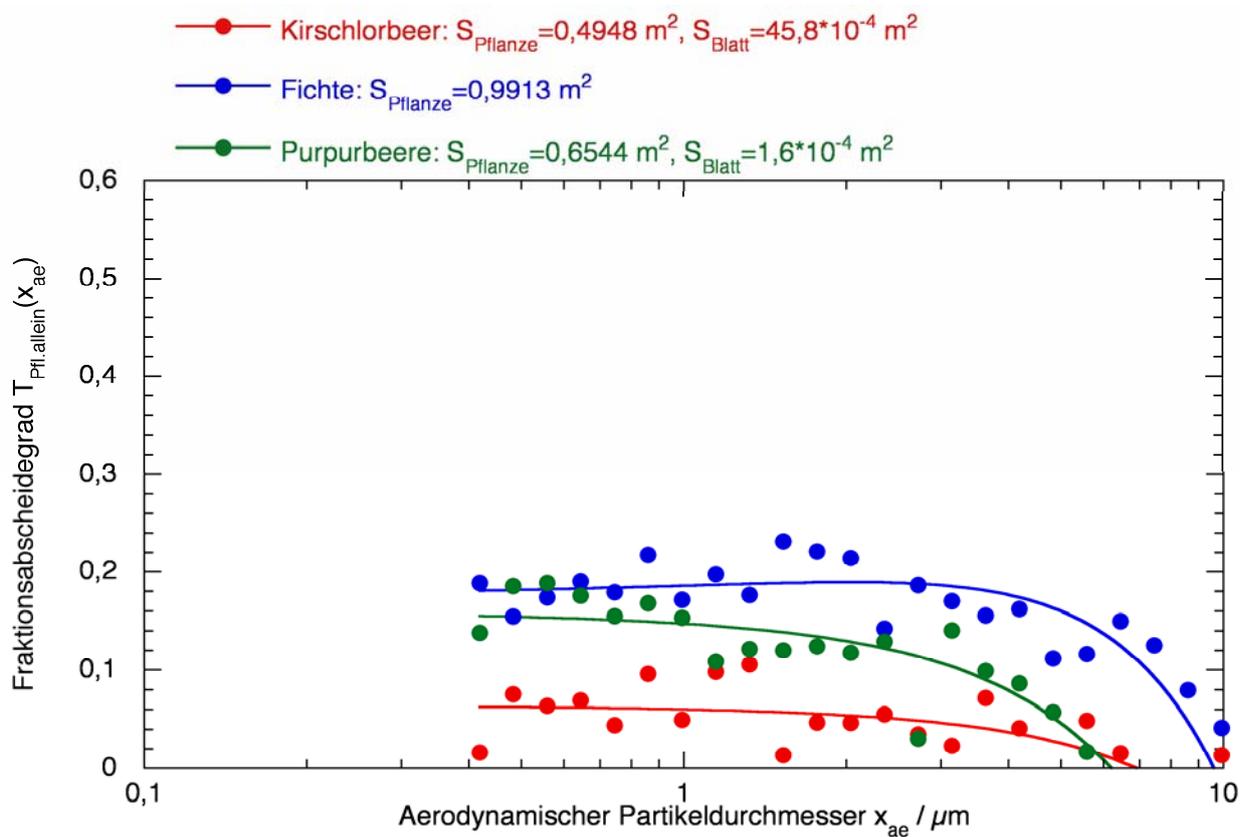


Bild 20: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,03 \text{ ms}^{-1}$

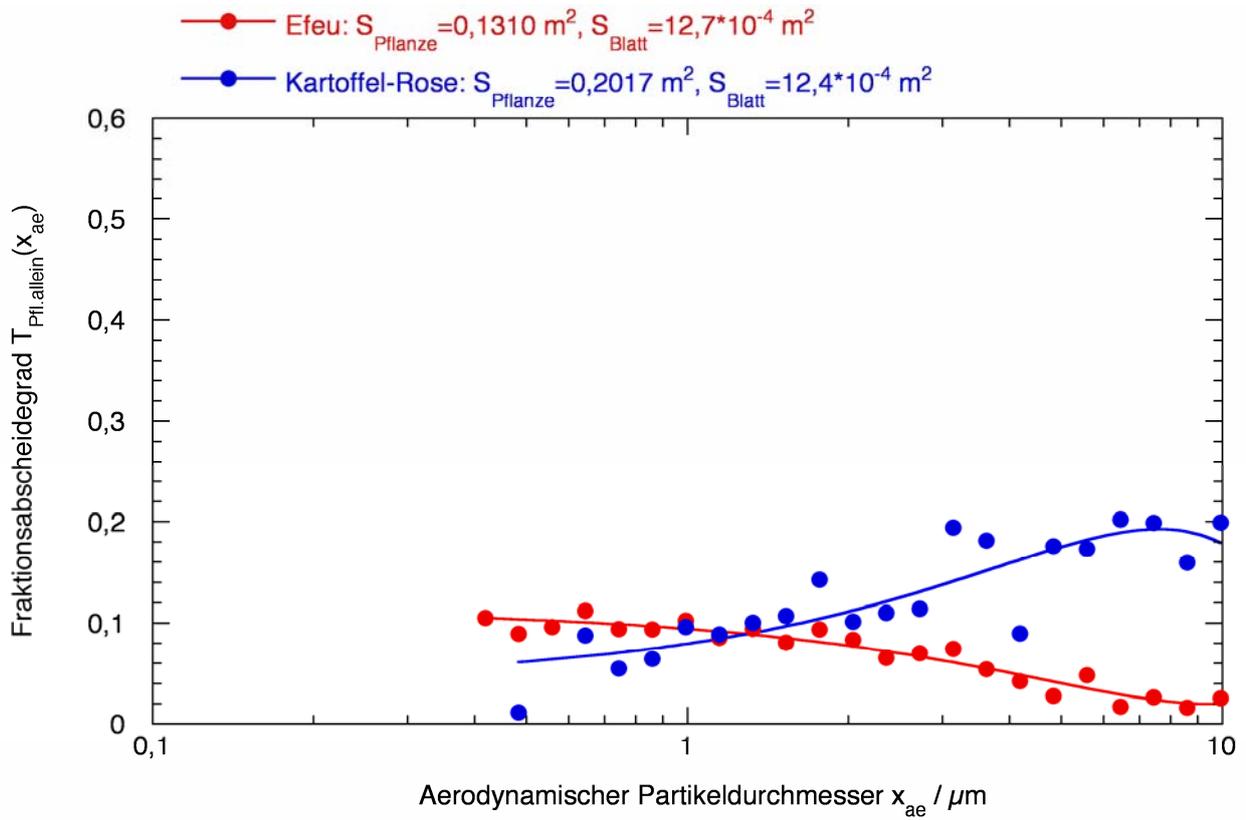


Bild 21: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,01 \text{ ms}^{-1}$

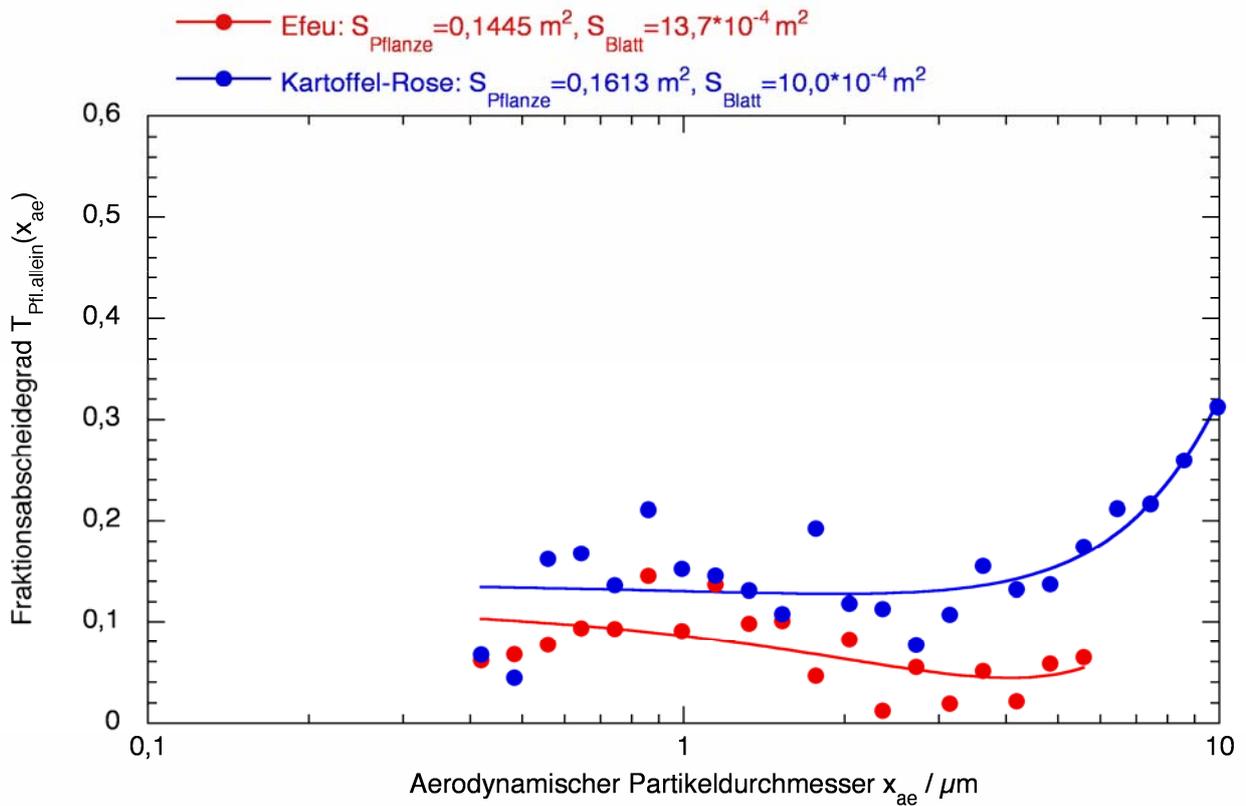


Bild 22: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,03 \text{ ms}^{-1}$

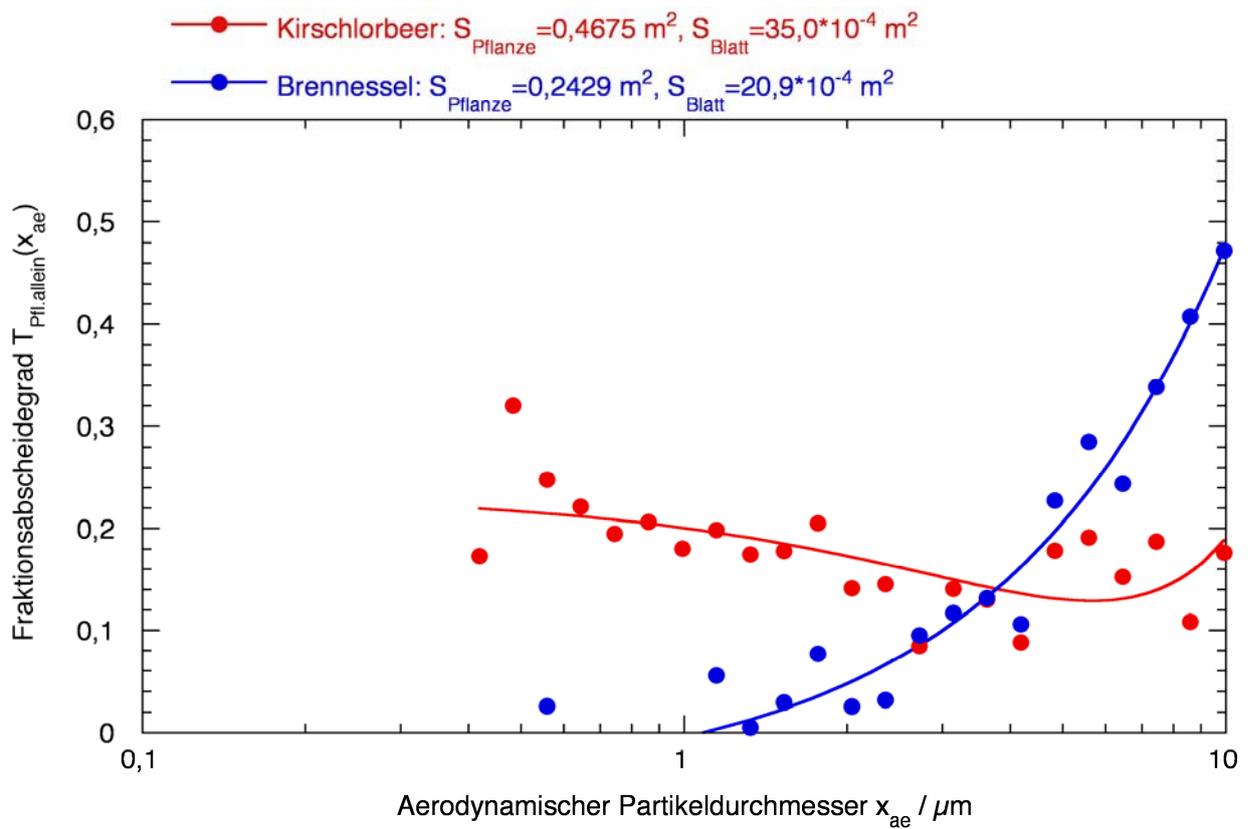


Bild 23: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,01 \text{ ms}^{-1}$

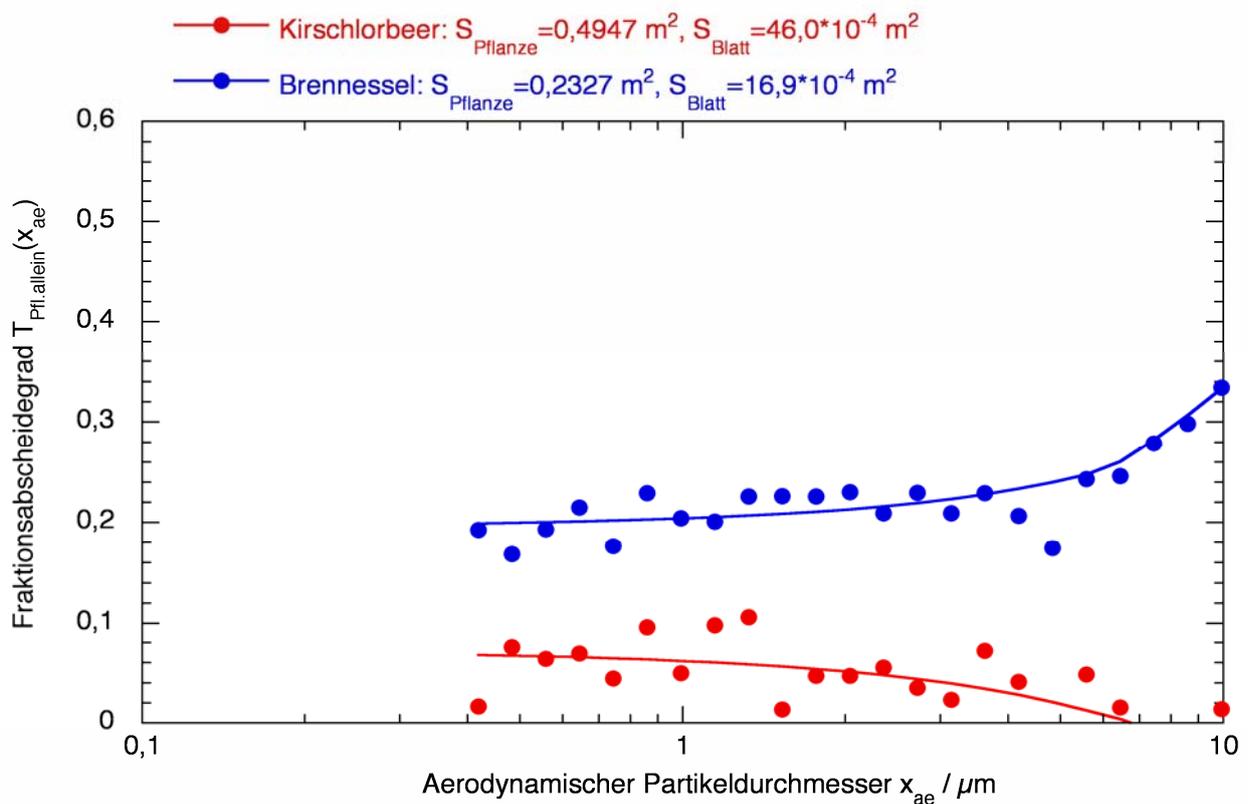


Bild 24: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,03 \text{ ms}^{-1}$

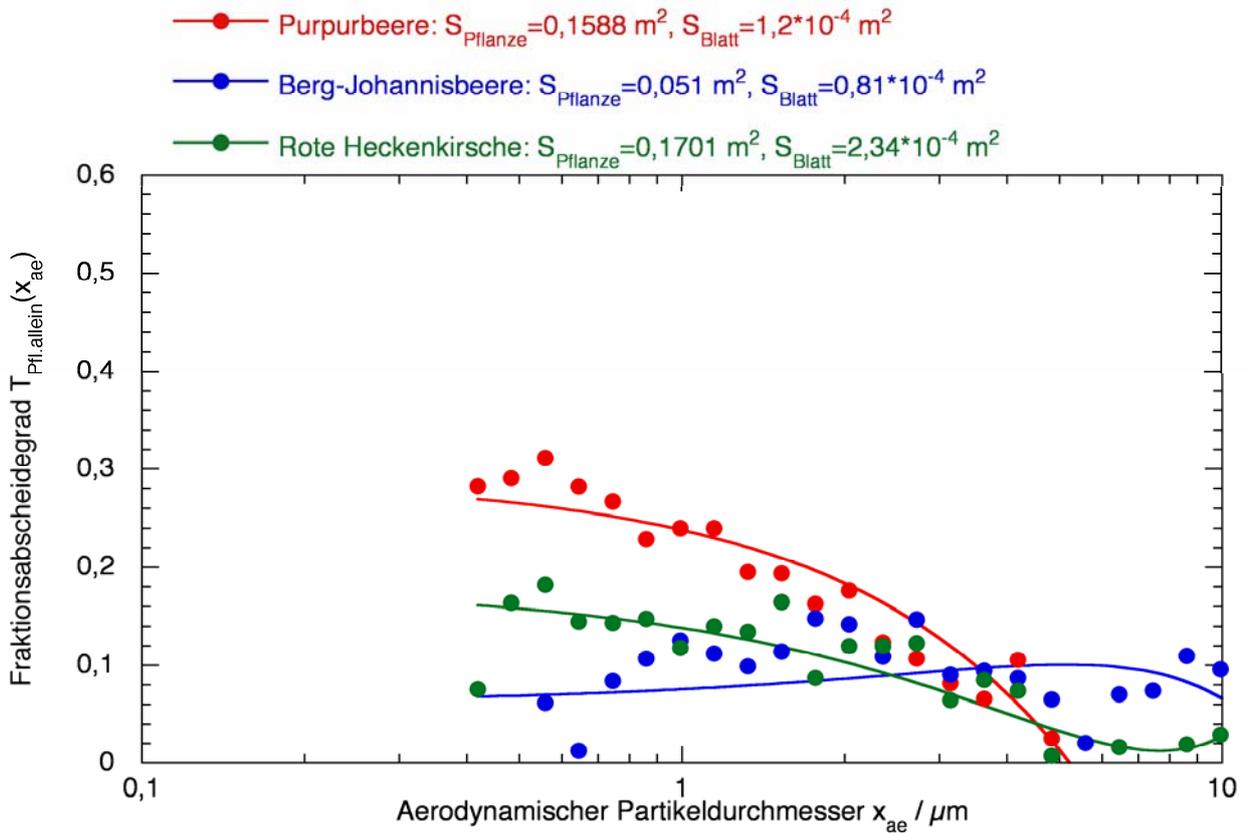


Bild 25: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,01 \text{ ms}^{-1}$

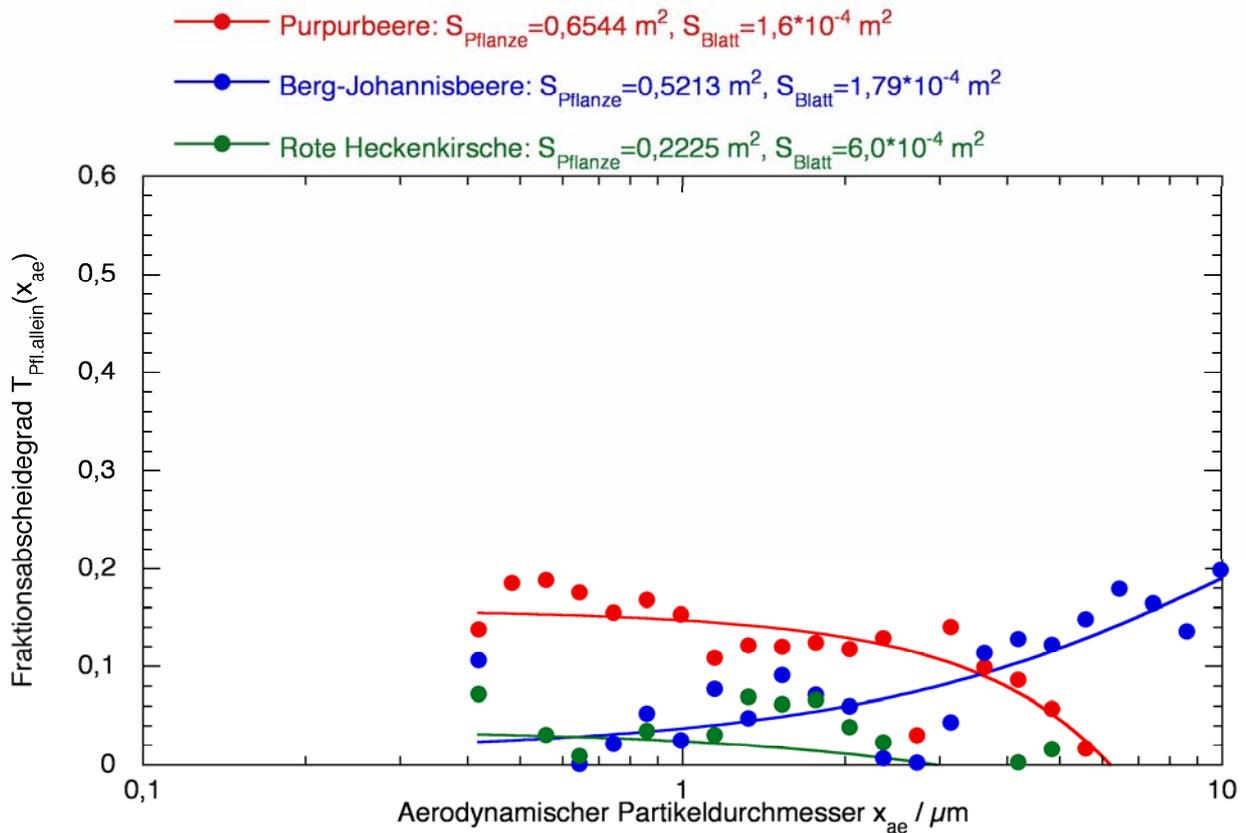


Bild 26: Fraktionsabscheidegrad als Funktion des aerodynamischen Partikeldurchmessers, $v = 0,03 \text{ ms}^{-1}$

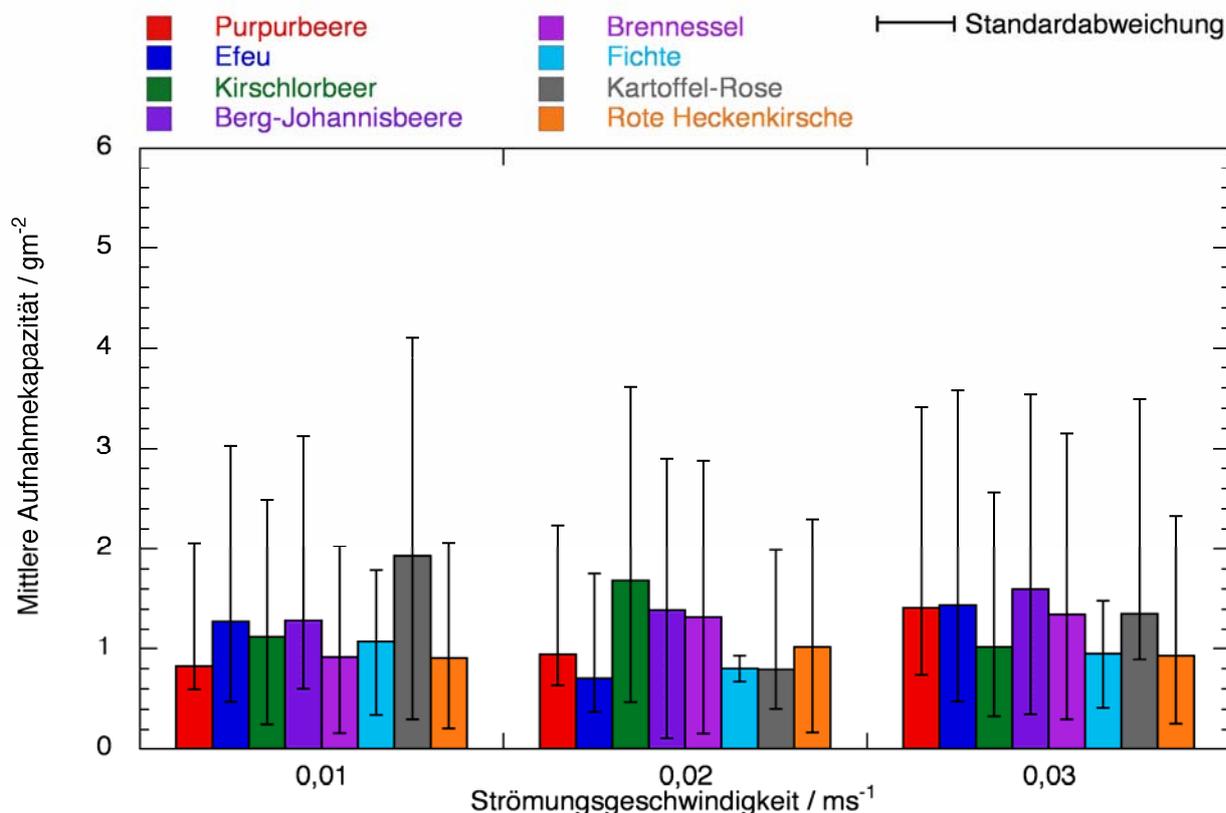


Bild 27: Mittlere Aufnahmekapazität bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten

Aufnahmekapazität

Die flächenbezogene abgeschiedene Staubmenge wird für die jeweilige Messreihe in Bild 27 dargestellt. Auf den Achsen sind die Strömungsgeschwindigkeit in ms^{-1} und die mittlere Aufnahmekapazität an Feinstaub in gm^{-2} pflanzlicher Blattoberfläche aufgetragen. Die Balken zeigen den Wertebereich für die jeweilige Messreihe. Man kann erkennen, dass trotz der relativ geringen Versuchsdauer alle Testpflanzen durch signifikante Werte der flächenbezogenen abgeschiedenen Partikelmasse charakterisiert werden. Weiter werden die Einflüsse der Blattparameter Größe, Form und Behaarung auf die mittlere Aufnahmekapazität betrachtet.

Einfluss der Blattgröße:

Bei Strömungsgeschwindigkeiten von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ und $0,02 \text{ ms}^{-1}$ sind die ermittelten Werte beim großblättrigen Kirschlorbeer größer als bei der kleinblättrigen Purpurbeere. Dem gegenüber wird die Purpurbeere bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,03 \text{ ms}^{-1}$ durch eine größere Aufnahmekapazität charakterisiert.

Einfluss der Form:

Die Aufnahmekapazitäten der 3 bis 5-lappigen Berg-Johannisbeere sind bei allen Strömungsgeschwindigkeiten höher als bei der Purpurbeere mit ihrer einfachen Blattform.

Einfluss der Behaarung:

Bei Strömungsgeschwindigkeiten von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ und $0,02 \text{ ms}^{-1}$ sind die ermittelten Werte beim glattflächigen Kirschlorbeer größer als bei der stark behaarten Brennessel. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,03 \text{ ms}^{-1}$ wird die Brennessel, wie erwartet, durch einen größeren Wert charakterisiert.

Obwohl die Werte in einem weiten Bereich schwanken, ist deutlich zu sehen, dass mit einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ auf $0,03 \text{ ms}^{-1}$ die mittlere Aufnahmekapazität, wie erwartet, sowohl bei der kleinblättrigen Purpurbeere mit ihrer einfachen Blattform von $0,8244 \text{ gm}^{-2}$ auf $1,413 \text{ gm}^{-2}$ wie auch bei der kleinblättrigen Berg-Johannisbeere mit dem lappigen Blattrand von $1,2866 \text{ gm}^{-2}$ auf $1,5972 \text{ gm}^{-2}$ kontinuierlich zunimmt. Außerdem nimmt diese bei der rauen und stark behaarten Brennessel (Blattgröße $16,9$ bis $20,9 \text{ cm}^2$) von $0,9149 \text{ gm}^{-2}$ auf $1,3451 \text{ gm}^{-2}$ kontinuierlich zu.

Der Efeu zeigt bei steigender Strömungsgeschwindigkeit eine Zunahme der abgelagerten Partikelmasse. Aufgrund der arithmetischen Mittelung von Messwerten kommt es bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,02 \text{ ms}^{-1}$ zu einem Minimum.

Im Gegensatz dazu führt die spezifische Blattanordnung des Kirschlorbeer bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,02 \text{ ms}^{-1}$ zu einem Maximum der abgelagerten Partikelmasse. Unabhängig von diesem Wert sinkt die abgelagerte Partikelmasse auf der Blattoberfläche des Kirschlorbeers mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit.

Bei den anderen Pflanzenarten (der Fichte, der Roten Heckenkirsche und der Kartoffel-Rose) sind die gewonnenen Werte für $0,02$ und $0,03 \text{ ms}^{-1}$ unerwartet klein.

Wiederfreisetzung durch die Abwaschung unter aktiver Beregnung

Feinstaubflächenbelegung

Der Tabelle 12 kann die Feinstaubflächenbelegung entnommen werden, die nach Gleichung (10) berechnet wurde. Aus der Tabelle geht hervor, dass die Werte im Bereich von $0,0461$ bis $0,083$ bei $0,01 \text{ ms}^{-1}$, von $0,0407$ bis $0,0770$ bei $0,02 \text{ ms}^{-1}$ und von $0,0499$ bis $0,0807$ bei $0,03 \text{ ms}^{-1}$ liegen. Mit der Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ auf $0,03 \text{ ms}^{-1}$ nimmt die Flächenbelegung bei dem Kirschlorbeer von $0,0566$ auf $0,0802$ kontinuierlich zu. Bei einigen Testpflanzen, wie z.B. bei Fichte, Purpurbeere, Efeu und Berg-Johannisbeere, ist die Zunahme nicht kontinuierlich und bei $0,02 \text{ ms}^{-1}$ wird jeweils der minimale Wert erreicht. Die Flächenbelegungen der Roten Heckenkirsche und Brennnessel erreichen bei $0,02 \text{ ms}^{-1}$ hingegen ihre maximalen Werte. Dem gegenüber sind bei der Kartoffel-Rose bei dieser Strömungsgeschwindigkeit die geringsten Werte aufgetreten.

Nach der Abwaschung nimmt die Flächenbelegung bei allen Testpflanzen deutlich ab. Allerdings ergeben sich bezüglich der Abnahme der Flächenbelegung zwei Gruppen. In der ersten Gruppe ergibt sich die Reihenfolge Fichte > Rote Heckenkirsche > Kartoffel-Rose, deren Flächenbelegung nach der Abwaschung zwischen dem $0,588$ und $0,685$ -fachen des Ausgangswertes liegt. In der zweiten Gruppe mit Berg-Johannisbeere (Abnahme auf den $0,26$ -fachen Wert), Efeu (auf das $0,235$ -fache), Brennnessel ($0,194$) und Purpurbeere ($0,085$) ist eine deutlich stärkere Abnahme der Flächenbelegung durch die Beregnung zu verzeichnen.

Partikelrestmasse

In Tabelle 13 wird die massenbezogene Reinigungseffizienz dargestellt. Anhand der Tabelle kann man erkennen, dass die Restmasse der, auf den Blattoberflächen verbleibenden, Partikeln beim Efeu bzw. der Purpurbeere gegenüber der Roten Heckenkirsche bzw. der Fichte um etwa eine Größenordnung geringer ist. Bei der gleichen Beregnungsdichte bzw. der Tropfenenergie bilden

die untersuchten Pflanzenarten entsprechend dem Wert der normierten Restmasse nach Gleichung (11) die folgende Reihe: Rote Heckenkirsche > Fichte > Kartoffel-Rose > Berg-Johannisbeere > Brennnessel > Efeu > Purpurbeere. Dieses Ergebnis stimmt tendenziell mit der Flächenbelegung überein, die in Tabelle 12 wiedergegeben ist.

Pflanzenart	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Kammer / ms^{-1}	Flächenbelegung			
		Oberseite	Std. Abw.	Oberseite nach Abwaschung	Std. Abw.
Kirschlorbeer	0,01	0,0566	0,0072	Nicht bestimmt	
Fichte		0,0548	0,0200	Nicht bestimmt	
Purpurbeere		0,0492	0,0484	Nicht bestimmt	
Efeu		0,0726	0,0046	Nicht bestimmt	
Kartoffel-Rose		0,0833	0,0072	Nicht bestimmt	
Rote Heckenkirsche		0,0461	0,0047	Nicht bestimmt	
Berg-Johannisbeere		0,0785	0,0123	Nicht bestimmt	
Brennnessel		0,0468	0,0075	Nicht bestimmt	
Kirschlorbeer	0,02	0,0770	0,0048	Nicht bestimmt	
Fichte		0,0469	0,0364	0,0321	0,0299
Purpurbeere		0,0471	0,0187	0,0040	0,0015
Efeu		0,0477	0,0072	0,0112	0,0003
Kartoffel-Rose		0,0407	0,0084	0,0238	0,0058
Rote Heckenkirsche		0,0607	0,0005	0,0384	0,0071
Berg-Johannisbeere		0,0660	0,0031	0,0172	0,0008
Brennnessel		0,0639	0,0006	0,0124	0,0002
Kirschlorbeer	0,03	0,0802	0,0020	Nicht bestimmt	
Fichte		0,0559	0,0385	Nicht bestimmt	
Purpurbeere		0,0753	0,0320	Nicht bestimmt	
Efeu		0,0697	0,0154	Nicht bestimmt	
Kartoffel-Rose		0,0665	0,0149	Nicht bestimmt	
Rote Heckenkirsche		0,0499	0,0077	Nicht bestimmt	
Berg-Johannisbeere		0,0807	0,0008	Nicht bestimmt	
Brennnessel		0,0599	0,0091	Nicht bestimmt	

Tab. 12: Feinstaubflächenbelegung nach Gleichung (10)

Pflanzenart	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Kammer / ms^{-1}	Berechnungsdichte / m^{-2}	Tropfenenergie E_{Tr} $10^{-5} / \text{J}$	Versuchsdauer / h	Restmasse an Oberseiten nach Abwaschung / gm^{-2}	normierte Restmasse
Efeu	0,02	754,0	241,8	1,0	0,08	0,09
Fichte					0,56	0,70
Purpurbeere					0,05	0,05
Kartoffel-Rose					0,40	0,51
Rote Heckenkirsche					0,78	0,77
Berg-Johannisbeere					0,30	0,22
Brennnessel					0,15	0,12

Tab. 13: Partikelrestmasse an Blattoberseiten nach der Abwaschung

Reinigungsgrade

In Bild 28 sind die Reinigungsgrade von Testpflanzen durch logarithmische Approximationskurven größenabhängig dargestellt. Auf der Abszisse ist die Partikelgröße x_i in μm im linearen Maßstab aufgetragen. Die Ordinate stellt den größenabhängigen Reinigungsgrad $R_i(x_i)$ dimensionslos dar. Der Scharparameter zeigt die untersuchten Testpflanzen.

Aus Bild 28 geht hervor, dass der Reinigungsgrad der Purpurbeere im betrachteten Größenbereich trotz Streuungen von 0,76 auf 1,00 ansteigt, während die Kurve der Fichte etwa bei 0,7 liegt. Die Reinigungsgrade von Efeu und Purpurbeere stimmen im Größenbereich oberhalb von $4,0 \mu\text{m}$ etwa

überein. Durch steigende Reinigungskurven werden auch die Brennnessel und die Berg-Johannisbeere (mit einer etwas geringeren Leistung) charakterisiert. Bei der Kartoffel-Rose und der Roten Heckenkirsche sinken die Approximationskurven hingegen. Die erste liegt bei ungefähr 0,4, die andere bei etwa 0,3. Hier handelt es sich vermutlich um die Bildung neuer Agglomerate nach der Trocknung der Blattoberflächen.

Partikelgrößenverteilungen in den untersuchten Medien

Die Partikelgrößenverteilungen der Partikelkollektive in den untersuchten Medien werden in Tabelle 14 dargestellt.

Pflanzenart	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Kammer / ms ⁻¹	Massenmedianwert $x_{50,3}$ / μm					Massenmodalwert $x_{\text{mod},3}$ in Flüssigkeit / μm
		im Trägergas		an Blattunterseiten nach Bestäubung	an Blattoberseiten		
		roh	rein		nach Bestäubung	nach Abwaschung	
Kirschlorbeer	0,01	7,79	9,02	Nicht best.	8,26	Nicht bestimmt	
Fichte		7,38	8,24	9,17	8,13	Nicht bestimmt	
Purpurbeere		5,92	9,43	6,45	8,70	Nicht bestimmt	
Efeu		6,12	10,78	Nicht best.	7,73	Nicht bestimmt	
Kartoffel-Rose		8,14	6,43	Nicht best.	10,84	Nicht bestimmt	
Rote Heckenkirsche		8,73	7,85	Nicht best.	9,42	Nicht bestimmt	
Berg-Johannisbeere		7,69	6,77	Nicht best.	5,97	Nicht bestimmt	
Brennnessel		6,50	6,43	Nicht best.	8,36	Nicht bestimmt	
Kirschlorbeer	0,02	8,89	11,35	Nicht best.	10,10	Nicht bestimmt	
Fichte		7,30	9,39	5,24	8,08	7,48	8,33
Purpurbeere		6,98	8,48	Nicht best.	7,61	6,05	5,15
Efeu		8,16	10,15	8,184	9,06	2,57	9,33
Kartoffel-Rose		7,71	7,22	Nicht best.	9,09	9,24	7,95
Rote Heckenkirsche		8,67	8,22	Nicht best.	7,16	8,59	Nicht best.
Berg-Johannisbeere		8,92	9,65	Nicht best.	9,58	7,07	7,21
Brennnessel		8,58	7,33	Nicht best.	9,94	4,22	Nicht best.
Kirschlorbeer	0,03	7,68	10,33	Nicht best.	8,31	Nicht bestimmt	
Fichte		7,47	9,14	5,80	6,54	Nicht bestimmt	
Purpurbeere		6,63	8,57	5,54	7,78	Nicht bestimmt	
Efeu		8,01	8,02	Nicht best.	9,36	Nicht bestimmt	
Kartoffel-Rose		6,87	5,78	Nicht best.	8,92	Nicht bestimmt	
Rote Heckenkirsche		8,33	7,49	Nicht best.	7,83	Nicht bestimmt	
Berg-Johannisbeere		7,82	7,05	Nicht best.	8,55	Nicht bestimmt	
Brennnessel		8,53	6,58	Nicht best.	11,51	Nicht bestimmt	

Tab. 14: Partikelgrößenverteilung der Partikelkollektive in den untersuchten Medien

Trägergas

In Tabelle 14 sieht man, dass bei glattflächigen und wenig behaarten Testpflanzen die PGV im Reingas durch größere Medianwerte charakterisiert werden als im Rohgas, wie z.B. $9,02 \mu\text{m}$ gegen $7,79 \mu\text{m}$ bei Kirschlorbeer (die Strömungsgeschwindigkeit $0,01 \text{ ms}^{-1}$). Dies kann durch die Entnahme feinsten Partikelfractionen aus dem Rohgas erklärt werden. Dem gegenüber werden bei behaarten Testpflanzen die Partikelgrößenverteilungen der im Reingas verbliebenen Partikelkollektive durch einen kleineren Medianwert charakterisiert. Am Beispiel der roten Heckenkirsche sieht man, dass der Medianwert im Reingas $7,85 \mu\text{m}$ gegenüber $8,73 \mu\text{m}$ im Rohgas beträgt, bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,01 \text{ ms}^{-1}$. Dies kann durch die Entnahme größerer Partikelfractionen aus dem Rohgas erklärt werden.

Blattoberflächen

Aus Tabelle 14 geht weiterhin hervor, dass die Medianwerte der Summenfunktionen von Partikelgrößenverteilungen der an den Unterseiten der kaum behaarten Testpflanzen abgelagerten Partikelkollektive kleiner (oder etwa gleich groß durch die Agglomeration) gegenüber den Medianwerten im Rohgas sind. Dies ist am Beispiel der Fichte in Bild 29 grafisch veranschaulicht.

Anhand von Bild 29 wird auch deutlich, dass die Summenfunktionskurve, die die mit dem Reingas austretenden Partikelfractionen charakterisiert, gegenüber der Rohgas-Kurve von kleinen ($x_{50,3}=7,47 \mu\text{m}$) zu großen Partikelgrößen ($x_{50,3}=9,14 \mu\text{m}$) hin verschoben ist. Dies kann durch die Abscheidung der feinen Partikelfractionen sowohl an den Nadeloberseiten ($x_{50,3}=6,54 \mu\text{m}$) als auch an den Nadelunterseiten ($x_{50,3}=5,80 \mu\text{m}$) erklärt werden.

An den Oberseiten glatter bzw. wenig behaarter Testpflanzen scheiden sich die Partikelfractionen ab, deren Medianwert meistens größer als der entsprechende Medianwert im Rohgas und kleiner als der im Reingas ist. Wie z.B. $7,79 \mu\text{m}$ (Rohgas) $< 8,26 \mu\text{m}$ (Oberseite) $< 9,02 \mu\text{m}$ (Reingas) bei Kirschlorbeer. Bei den behaarten Testpflanzen ist zu sehen, dass die an den Oberseiten abgeschiedenen Partikelfractionen durch den größeren Medianwert charakterisiert werden, als die im Reingas verbleibenden Kollektive, wie z.B. $8,36 \mu\text{m}$ gegen $6,43 \mu\text{m}$ bei der Brennnessel ($0,01 \text{ ms}^{-1}$). Die mäßig behaarte fiederblättrige Kartoffel-Rose demonstriert ein ähnliches Verhalten gegenüber Partikeln, wie behaarte Pflanzen, was vermutlich durch ihre spezielle Blattform erklärt werden kann. Der unerwartet kleine Medianwert von $5,97 \mu\text{m}$ für die Berg-Johannisbeere bei $0,01 \text{ ms}^{-1}$, der als Ausreißer betrachtet wird, kann durch die Messungenauigkeit der Bildanalyse aufgrund der rauen Blattoberfläche

und der zu hellen Blattfarbe der Blattproben erklärt werden.

Zur Partikelabscheidung an den Oberseiten trägt erheblich die Sedimentation bei, die stark von der Konzentration der Grobpartikeln in der Bestäubungskammer abhängig ist. Diese hängt ihrerseits von der Luftfeuchtigkeit ab. Der unerwartet kleine Medianwert für die Rote Heckenkirsche von $7,16 \mu\text{m}$ kann vermutlich durch den Verlust größerer Partikeln aufgrund von Elektrostatik bei geringer Luftfeuchtigkeit erläutert werden. Die relative Luftfeuchtigkeit lag permanent unter 30% r.F., wie man anhand von Tabelle 8 erkennen kann.

Der unerwartet große Medianwert von $9,36 \mu\text{m}$ bei Efeu ($0,03 \text{ ms}^{-1}$) ist wahrscheinlich durch die vermehrte Agglomeration aufgrund der erhöhten Luftfeuchtigkeit von über 39% r.F. zu erklären, wie aus Tabelle 3 hervorgeht.

Beim Vergleich der entsprechenden Medianwerte vor und nach der Abwaschung wird deutlich, dass bei Fichte, Purpurbeere, Efeu, Berg-Johannisbeere und Brennnessel die an Blattoberflächen nach der Abwaschung verbleibenden Partikelkollektive durch kleinere Medianwerte als zuvor charakterisiert werden, wie z.B. $2,57 \mu\text{m}$ gegen $9,06 \mu\text{m}$ bei Efeu. Dies bedeutet, dass die größeren Partikelfractionen durch die Beregnung von den Blattoberflächen abgewaschen und in die Flüssigkeit übertragen werden. Die größeren Werte bei Kartoffel-Rose ($9,24 \mu\text{m}$ gegen $9,09 \mu\text{m}$) und Roter Heckenkirsche ($8,59 \mu\text{m}$ gegen $7,16 \mu\text{m}$) können vermutlich durch die Bildung neuer Agglomerate nach der Trocknung der Blattoberflächen erklärt werden.

Flüssigkeit

In Tabelle 14 sieht man, dass die für die Partikelgrößenverteilungen der aus Blattoberflächen ausgewaschenen Partikeln beispielsweise ermittelten Modalwerte im Bereich von $5,15 \mu\text{m}$ bei der Purpurbeere bis $8,33 \mu\text{m}$ bei der Fichte liegen.

Die unerwartet kleinen Modalwerte nach der Abwaschung von Purpurbeere ($5,15 \mu\text{m}$ bei $7,07 \mu\text{m}$ an der bestaubten Oberseite) und Berg-Johannisbeere ($7,21 \mu\text{m}$ gegen $9,58 \mu\text{m}$) können wegen der Zerlegung durch die Wassertropfen der an Blattoberflächen dieser kleinblättrigen Pflanzen abgeschiedenen Agglomerate erläutert werden. Ähnlich kann vermutlich auch der Fall bei der fiederblättrigen Kartoffel-Rose ($7,95 \mu\text{m}$ gegen $9,09 \mu\text{m}$) erläutert werden.

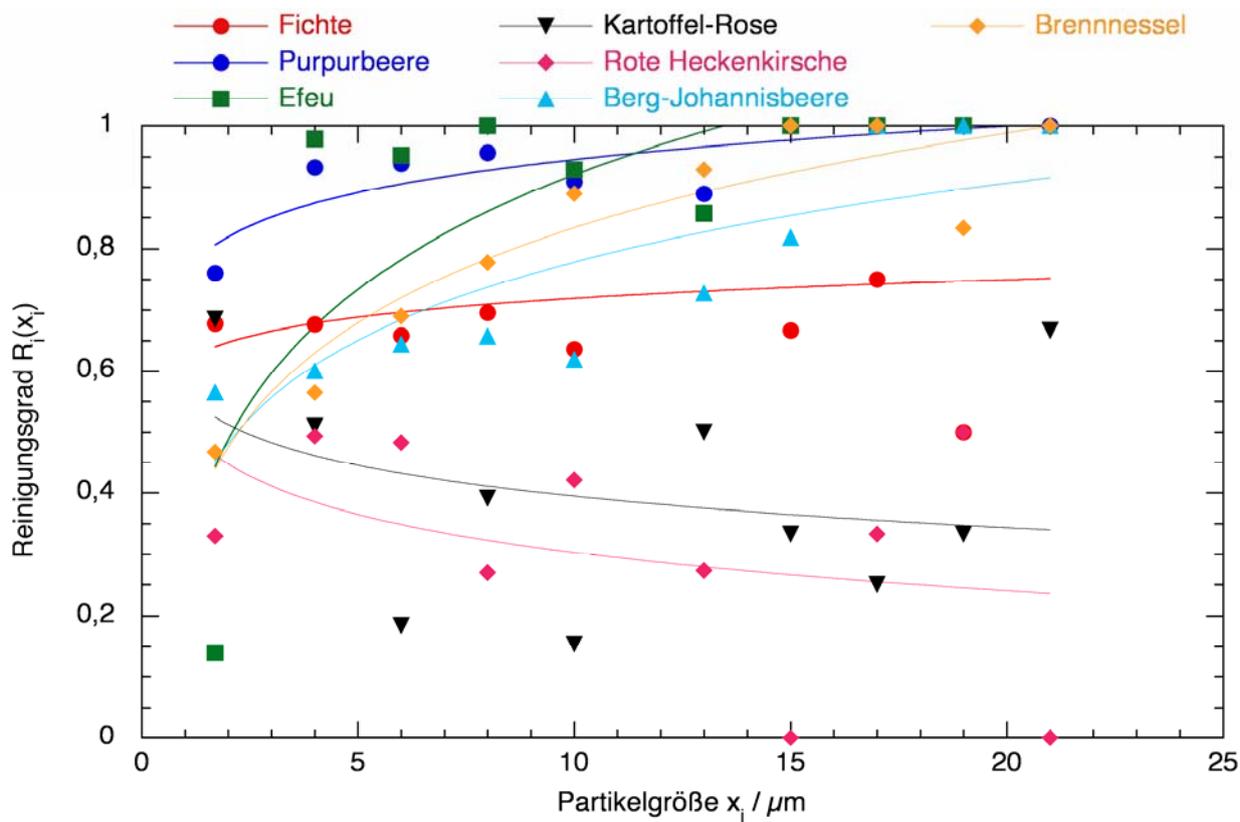


Bild 28: Reinigungsgrad in Abhängigkeit von der Partikelgröße

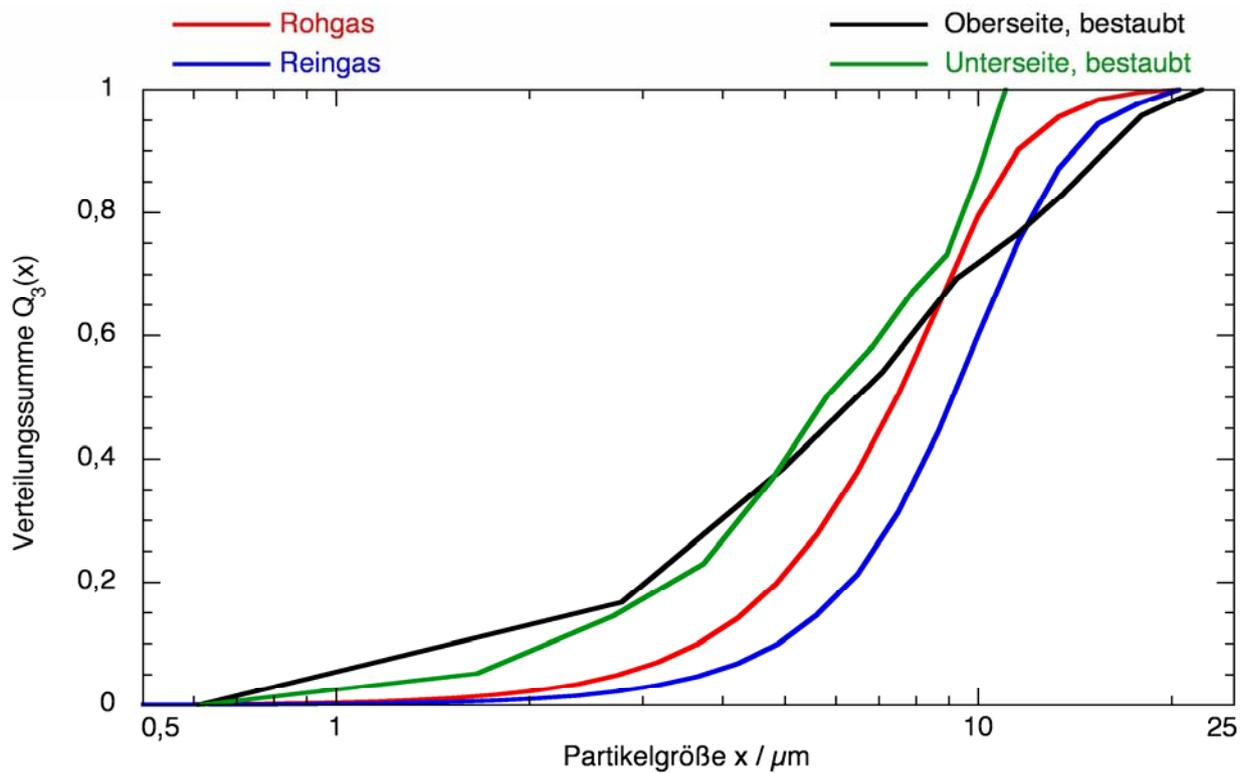


Bild 29: Verteilungssummen der Partikelgrößen, Fichte, $v = 0,03 \text{ ms}^{-1}$

3.1.4 Zusammenfassung und Diskussion

Abschließend lassen sich die erzielten Ergebnisse aus den Versuchen in der Bestäubungs- und Beregnungskammer wie folgt zusammenfassen:

- Die Abscheideleistung der untersuchten Pflanzen steigt bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit mit Zunahme der Gesamtblattoberfläche.
- Der Trennungsvorgang wird bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ bzw. $0,02 \text{ ms}^{-1}$ durch die Oberfläche eines Einzelblattes stark beeinflusst.
- Bei steigender Strömungsgeschwindigkeit nimmt die Abhängigkeit des Fraktionsabscheidegrades im Größenbereich von $0,5$ bis zu $10 \mu\text{m}$ von der gesamten Blattoberfläche zu, was mit den Ergebnissen zum Gesamtabscheidegrad übereinstimmt.
- Die Parameter Blattform und Blattbehaarung beeinflussen die Abscheideeffizienz der Testpflanzen für die Fraktion PM10.
- Die mittlere Aufnahmekapazität an Feinstaub nimmt mit der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von $0,01 \text{ ms}^{-1}$ auf $0,03 \text{ ms}^{-1}$ bei den kleinblättrigen Testpflanzen sowie bei der Brennessel kontinuierlich zu, während bei den anderen Testpflanzen eine Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit nicht zu erkennen ist.
- Die Flächenbelegung nimmt beim Kirschlorbeer mit steigender Strömungsgeschwindigkeit zu. Bei den anderen Pflanzenarten ist diese Abhängigkeit dagegen nicht erkennbar.
- Betrachtet man die Werte der normierten Restmasse von Kalksteinpartikeln nach der Abwaschung, ergibt sich für die untersuchten Pflanzenarten folgende Reihenfolge: Rote Heckenkirsche > Fichte > Kartoffel-Rose > Berg-Johannisbeere > Brennessel > Efeu > Purpurbeere. Diese Ergebnisse stimmen ihrerseits tendenziell mit denen der Flächenbelegung überein.
- Beim Efeu sinkt die normierte Restmasse mit zunehmender Beregnungsdichte bzw. Tropfenenergie bei konstanter Versuchsdauer entsprechend von etwa $0,20$ auf $0,07$.
- Die Erhöhung der Beregnungsdauer bei einer Beregnungsdichte von 1508 m^{-2} (Regenintensität 110 mmh^{-1}) beeinflusst die Restmasse auf den Blättern des Efeus kaum.
- Beim Efeu bzw. der Purpurbeere wird eine rund 100 %-ige Reinigung im Größenbereich $x_i > 5 \mu\text{m}$ aufwärts erreicht, bei der Fichte eine etwa 70 %-ige, bei Kartoffel-Rose und roter Heckenkirsche eine weniger als 50 %-ige Reinigung.
- Im Größenbereich $x_i > 10 \mu\text{m}$ wird bei der Brennessel eine etwa 90 %-ige Reinigung erreicht.
- Die Berg-Johannisbeere zeigt eine etwa 80 %-ige Reinigung im Größenbereich $x_i > 15 \mu\text{m}$.
- Die massenbezogenen Verteilungssummenkurven bestätigen einen Trennvorgang durch die untersuchten Pflanzenarten.
- Der Belag auf den Blattoberflächen der untersuchten Pflanzen nach der Abwaschung besteht sowohl aus feinsten wie auch aus groben Partikelfraktionen.
- Die Abwaschung unter aktiver Beregnung des Efeus bzw. der Fichte führt zum Übergang größerer Partikelfraktionen von den Blattoberflächen in die oberflächliche Abschwemmung. Der Abfluss von den Blattoberflächen von Purpurbeere, Kartoffel-Rose und Berg-Johannisbeere wird durch einen relativ kleinen massenbezogenen Modalwert charakterisiert.

Während der Durchführung der Versuche wurden in der Staubkammer hohe Staubkonzentrationen erzeugt, die um bis zu drei Größenordnungen über realen Werten liegen, wie aus den Tabellen 3 bis 10 hervorgeht. Diese hohen Werte dienen nicht dazu, eine Abscheidung zu provozieren oder zu erzwingen, sondern in verhältnismäßig kurzer Zeit eine für weitere Untersuchungen nutzbare Staubmenge zu deponieren. Durch die hohen Konzentrationen wird innerhalb einer Stunde die Abscheidung einer Staubmenge erreicht, die der eines Zeitraumes von sechs Wochen unter realen Bedingungen entspricht. Allerdings müssen bei derart hohen Konzentrationen zwei Faktoren besonders berücksichtigt werden. Dies sind auf der einen Seite eine mögliche Beeinflussung der Strömung durch die Partikeln und auf der anderen Seite eine Agglomeration der Partikeln vor dem Auftreffen auf der Blattoberfläche.

Trotz der hohen Konzentrationen von bis zu $0,77 \text{ gm}^{-3}$ während einer Messreihe (Tabelle 8) wird die Strömung in der Staubkammer durch die Partikeln nicht beeinflusst. Bei einer Massenkonzentration von $0,77 \text{ gm}^{-3}$ ergibt sich eine Masse von $0,77 \text{ g}$ Staub in einer Luftmenge mit einer Masse von 1200 g . Somit liegt der Massenanteil des aufgegebenen Staubs bei rund $0,06 \%$.

Die mögliche Agglomeration von Partikeln vor dem Auftreffen auf die Blattoberfläche kann ebenfalls vernachlässigt werden. Entscheidendes Kriterium ist hierbei der mittlere Abstand der Partikeln untereinander. Dieser liegt bei einer ungestörten Anströmung und einer maximalen Partikelanzahl von 20.000 Partikeln / cm³ bei rund 0,4 mm also 400 µm. Der größte im Rohgas gemessene Massenmedianwert lag bei 8,92 µm, wie aus Tabelle 14 hervorgeht. Damit ist der mittlere Partikelabstand von 400 µm ausreichend groß, so dass eine Beeinflussung der Ergebnisse durch eine vorzeitige Agglomeration vernachlässigt werden kann.

Die Frage nach möglichen Aufkonzentrierungen innerhalb der Staubkammer durch Wirbelgebiete wird im Laufe weiterer Untersuchungen beantwortet werden.

3.2 Windkanal

3.2.1 Einleitung

Das zu Beginn beschriebene Modell, das für die Bearbeitung des Projekts zu Grunde gelegt wurde, sieht Untersuchungen an Pflanzen in verschiedenen Größen-Maßstäben vor. Die zuvor dargestellten Versuche in der Bestäubungskammer lieferten die Grundlagen in Bezug auf die Abscheidung von Partikeln an Pflanzen. Allerdings konnten hierfür nur kleine Pflanzen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten verwendet werden. Um die Lücke zwischen den Versuchen in der Bestäubungskammer und realen Hecken entlang von Fernstraßen schließen zu können, wurden als Zwischenschritt Untersuchungen im Windkanal vorgesehen. Im Windkanal konnten größere Pflanzen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten untersucht werden. Erfasst wurde die Beeinflussung des Strömungsfeldes durch die Pflanzen sowie die Abscheidung von Feinstaub an den

Pflanzen. Zusätzlich wurden als mögliche Alternativen zu Pflanzen abiotische Materialien auf ihre Funktion als Abscheider für Feinstaub untersucht.

3.2.2 Aufbau

Der Windkanal wurde in offener Bauart realisiert, auch bekannt als Eiffel-Bauart. Im Gegensatz zu anderen Bauarten (z.B. Göttinger Bauart) wird die Luft hier nicht im Kreis geführt, sondern nach Durchtritt durch den Windkanal ins Freie ausgestoßen. Der Vorteil dieser Bauart liegt u.a. im geringeren Aufwand hinsichtlich der Konstruktion und des einfacheren Betriebes, so sind hier beispielsweise keine Klimaanlage für die Kühlung des Luftstroms erforderlich. Darüber hinaus ist die Verwendung eines offenen Windkanals bei der Aufgabe von Stäuben in den Luftstrom von Vorteil, da der Staub nicht aufwendig aus dem Luftstrom entfernt werden muss. Nachteilig ist allerdings, dass die Parameter der geförderten Luft wie Temperatur oder Feuchtigkeit kaum oder gar nicht reguliert werden können und somit eine starke Abhängigkeit vom Wetter vorliegt, sofern die Luft wie in diesem Fall direkt aus dem Freien entnommen wird. Beim hier verwendeten Windkanal wird die Luft durch den Kanal gesaugt. Dadurch kann der Austrag von Teststäuben aus dem Kanal durch undichte Stellen vermieden und gleichzeitig das Auftreten von Turbulenzen reduziert werden.

Der Windkanal besteht aus drei Hauptteilen, dem Einlauf, der Messstrecke und dem Auslauf. Einen Überblick über den Aufbau des Windkanals gibt Bild 30. Im Einlauf tritt die Luft in den Windkanal ein. Hier ist bei Bedarf eine Aufgabe von Teststäuben auf den Luftstrom möglich. Die hierfür benötigte Aufgabevorrichtung bestand aus einem Bürstendispergierer RGB1000 der Firma Palas und einem Gebläse, welches den erzeugten Staub weitflächig im Luftstrom verteilt

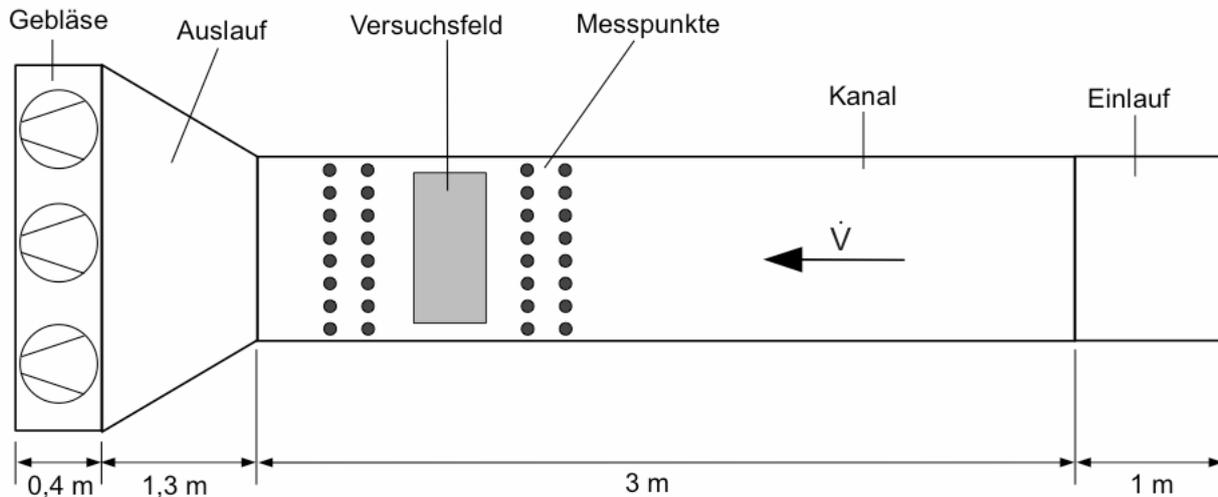


Bild 30: Aufbau des Windkanals

An den Einlauf schließt sich der Mittelteil des Kanals an, in dem die Untersuchungen durchgeführt werden. Der Mittelteil besteht aus einem drei Meter langen Aluminiumrahmen, der Scheiben aus Acrylglas und einen stabilen Holzboden trägt. Der Mittelteil ist ebenso wie die anderen Teile des Windkanals auf einer stabilen Holzkonstruktion aufgebaut, die den Kanal zum einen sicher trägt und gleichzeitig den Einsatz von Messgeräten unterhalb des Kanalbodens ermöglicht. Das Versuchsfeld befindet sich im hinteren Drittel des Mittelteils, so dass sich eine stabile Luftströmung ausgebildet und aufgegebenen Teststaub gleichmäßig verteilt haben sollte. Für die Unterbringung von Pflanzgefäßen und Messgeräten steht eine rund 50 Zentimeter tiefe und 40 Zentimeter lange Grube zur Verfügung. Dadurch können auch größere Pflanzen in den Windkanal eingebracht werden, ohne dass die Pflanzgefäße die Messungen stören würden. Für die Messung der interessierenden Parameter stehen vor und hinter der Grube Öffnungen im Kanalboden zur Verfügung, die eine Positionierung von Sonden zulassen, ohne den Kanal während der Messungen öffnen oder betreten zu müssen.

Den Abschluss des Windkanals stellt der Auslauf dar. Hier wird die Luft durch fünf Gebläse aus dem Windkanal heraus befördert. Die fünf Gebläse sind x-förmig am Ende des Kanals angebracht und stoßen die Luft direkt ins Freie aus. Als Gebläse wurde das Modell TTV4500HP der Firma Trotec gewählt. Dieses Modell weist einen maximalen Förderstrom von $4500 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ und einen maximalen Druckgewinn von 250 Pa auf. Darüber hinaus ist es gegen Staub und Feuchtigkeit geschützt, was ein weiteres wesentliches Kriterium für die Aus-

wahl war. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, bei jedem Gebläse eine von drei Geschwindigkeitsstufen für den Betrieb zu wählen. Jedes der fünf Gebläse hat eine maximale elektrische Leistungsaufnahme von 300 W, so dass sich insgesamt 1,5 kW an installierter Leistung ergeben. Bedingt durch den Platzbedarf der Gebläse muss der Querschnitt des Kanals im Auslauf vergrößert werden. Um Druckverluste durch eine plötzliche Erweiterung des Querschnitts zu vermeiden, wurden die Übergänge in Form eines Trichters ausgeführt.

3.2.3 Pflanzliche Versuchsobjekte

Es wurden drei verschiedene Pflanzenarten vermessen. Für die Durchführung der Untersuchungen wurden Kirschlorbeer (*Prunus lauroceratus*) und Efeu (*Hedera helix* Woerner) als Blattpflanzen sowie die Fichte (*Picea abies*) als Nadelgewächs ausgewählt. Kirschlorbeer und Fichte konnten über den Gartenfachhandel bezogen werden, was besonders im Fall des Kirschlorbeers aufgrund seiner weiten Verbreitung als Heckenpflanze sehr einfach war. Die Beschaffung von Fichten in der gewünschten Größenklasse bis 1,2 Metern gestaltete sich hingegen etwas schwieriger und war mit längeren Lieferzeiten verbunden. Im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten Pflanzenarten wurde der Efeu nicht in Form einzelner Pflanzen, sondern als vorkonfektionierte Heckenelemente geliefert. Diese Heckenelemente der Firma Helix Pflanzensysteme GmbH bestehen aus mehreren vorgezuchteten Efeu-Pflanzen, die in ein gemeinsames Substrat eingepflanzt und an einem Rankgitter befestigt werden. Dieses Rankgitter besteht aus rund fünf

Millimeter dickem Stahldraht, das dem Efeu als Stütze dient und so die Form der Hecke definiert. Der Efeu wächst bereits beim Hersteller an diesem Rankgitter zu einer Hecke heran und wird als fertiges Heckenelement zum Kunden geliefert. Für die Messungen im Windkanal mussten die Elemente erst auf das gewünschte Maß zugeschnitten werden, was aufgrund der stabilen Konstruktion sehr aufwändig war. An den Efeu-Heckenelementen kam es im Laufe der Messungen zu mehreren Schädlingsbefällen (u.a. Spinnmilben). Durch die Schädlinge wurde ein starker Verlust an Pflanzen und Blattmaterial verursacht, der zu Beeinträchtigungen der Messreihen führte. Um trotz des rasch fortschreitenden Absterbens der Pflanzen eine ausreichende Menge an Daten generieren zu können, mussten Messungen zusammengelegt werden. Dies führte dazu, dass die Messreihen mit der niedrigsten Porosität (POR3) und der mittleren Breite (B2), sowie die Messungen der größten Breite (B3) und der größten Höhe (H3) identisch sind.

3.2.4 Abiotisches Material

Als abiotische Materialien kamen ein Netz aus Kokosfasern, ein Polyester-Filz und ein Windschutznetz aus PVC zum Einsatz. Auswahlkriterien waren unter anderem der einfache Bezug des Materials und eine gute zu erwartende Verrotungsbeständigkeit.

Das Netz aus Kokosfasern weist eine Maschenweite von zehn Millimetern auf, bei einem Durchmesser der einzelnen Fäden von 2,5 Millimetern. Die Fäden des Netzes zeigen eine stark

aufgeraute Oberfläche mit abstehenden einzelnen Fasern. Durch das Verweben der einzelnen Fäden hat eine Lage des Netzes eine Dicke von 4,5 Millimetern. Normalerweise dient dieses Netz zur Begrünung von Teichböschungen. Es wurde aufgrund seiner leichten Verfügbarkeit und seiner guten Durchströmbarkeit ausgewählt.

Als zweite abiotische Alternative wurde ein Polyester-Filz ausgewählt. Dieses Filz kommt von seinem Material und seiner Beschaffenheit her einem industriellen Filtermedium am nächsten und wurde aus diesem Grund ausgewählt. Der eigentliche Einsatzbereich des Filzes liegt jedoch ebenfalls im Gartenbau, wo es als Teichvlies die Teichfolie vor Beschädigungen durch Steine und andere spitze Gegenstände schützt. Eine Lage des Filzes ist rund 1,5 Millimeter dick. Bei genauerer Betrachtung des Materials fallen inhomogene Stellen auf, an denen das Material weniger dicht zu sein scheint, als an anderen Stellen.

Ein Windschutznetz aus PVC wurde als dritte abiotische Alternative ausgewählt. Windschutznetze werden in landwirtschaftlichen Betrieben zum Schutz des Viehs vor Zugluft in den Ställen eingesetzt. Das Netz weist eine Maschenweite von einem Millimeter auf, bei einer Breite der Fäden von ebenfalls einem Millimeter. Eine Lage des Netzes ist 0,5 Millimeter dick.

Bild 31 zeigt Proben der drei abiotischen Alternativen in einer Gegenüberstellung. Links ist eine Probe der Kokosfaser abgebildet, in der Mitte das Polyester-Filz und rechts das Windschutznetz.



Bild 31: Gegenüberstellung der abiotischen Alternativen (links: Kokosfaser, mittig: Polyester-Filz, rechts: Windschutznetz)

3.2.5 Durchführung

Vor Beginn einer Messreihe wurden Messgeräte und die Verbindung zum PC auf ihre Funktion hin überprüft. Nach Abschluss dieser Überprüfung wurden die Versuchsobjekte vorbereitet. Diese Vorbereitung umfasste das Zuschneiden und Befestigen im Windkanal. Die Pflanzen wurden durch das Abschneiden von Blättern und Ästen in ihrer Höhe, Breite und Porosität variiert. Für eine spätere Bestimmung der Blattoberfläche wurden die entfernten Blätter aufbewahrt. Die abiotischen Materialien konnten im Gegensatz dazu einfach auf das gewünschte Maß zugeschnitten werden. Die Variation der Porosität erfolgte hier durch das Aufeinanderlegen mehrerer gleich großer Zuschnitte. Die Abmessungen der Pflanzen und abiotischen Materialien in den einzelnen Messreihen werden in den Tabellen 15 bis 20 wiedergegeben.

Nach dem Zuschnitt der Pflanzen oder des abiotischen Materials musste dieses in den Windkanal eingebracht und gesichert werden. Da durch die Luftströmung im Kanal eine starke Kraft auf die Versuchsobjekte ausgeübt wird, musste dieser Schritt besonders sorgfältig durchgeführt werden. Dies war insbesondere bei den Efeu-Heckenelementen wichtig, da diese aufgrund ihres tiefen Schwerpunktes und der großen Angriffsfläche zum Kippen neigen und es dann zur Unterbrechung der Messreihe kommen konnte. Zur Absicherung wurden die Pflanzgefäße mit Steinen beschwert oder mit Hölzern verkeilt. Die abiotischen Materialien wurden hingegen in einen eigens entwickelten Rahmen eingespannt. Dazu wurde das Material zuerst an den Seitenrändern gelocht und dann zwischen zwei Aluminium-Winkel eingelegt. Anschließend wurde das Material mit Kabelbindern mit den Winkeln verbunden. Die Anordnung von Material und Winkeln wurde mit Maurerschnur im Stahlrahmen eingehängt und verspannt. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass das abiotische Material während der Messreihen stets gespannt war und am vorgesehenen Platz verblieb. Auf den Bildern 32 und 33 ist exemplarisch die Anordnung von zwei Kirschlorbeer-Pflanzen und des Polyester-Filzes im Windkanal während der Versuchsreihen zu sehen.



Bild 32: Kirschlorbeer im Windkanal

Nach Abschluss der Vorbereitungen wurde die Messreihe mit dem Einschalten der fünf Gebläse und dem Einstellen der gewünschten Geschwindigkeitsstufe begonnen. Die Strömungsgeschwindigkeiten vor und hinter dem Versuchsobjekt wurden mit zwei Hitzkugelanemometern vom Typ 0635.1549 und einem Messgerät Testo 400 der Firma Testo ermittelt. Die Daten des Messgerätes wurden direkt an einen PC zur Aufzeichnung und späteren Auswertung übertragen. Für die Ermittlung der Umströmung der Versuchsobjekte wurde der Kanalquerschnitt in einem Raster von 10 Zentimetern vermessen. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde in zehn Reihen in einer Höhe zwischen 10 und 100 Zentimetern über dem Kanalboden und zusätzlich in neun Spalten in einem seitlichen Abstand zwischen 10 und 90 Zentimetern zur linken Kanalwand gemessen. Somit ergeben sich 90 Messpunkte für die Vermessung des Strömungsfeldes im Bereich des Versuchsobjektes. Der Messtakt des Messgerätes wurde auf eine Sekunde eingestellt, um auch schnelle Veränderungen erfassen zu können. Die Messdauer betrug an jedem Messpunkt 30 Sekunden, so dass für die Bildung des Mittelwertes an jedem Messpunkt 30 Messwerte zur Verfügung standen.



Bild 33: Polyester-Filz im Windkanal

Da mit zwei Hitzkugelanemometern simultan gearbeitet wurde, konnte die Strömungsgeschwindigkeit vor und hinter dem Objekt in einem Arbeitsschritt bestimmt werden. Zusätzlich zur Bestimmung der Umströmung wurde die Feinstaubkonzentration vor und hinter dem Versuchsobjekt bestimmt. Da hierfür nur ein Messgerät zur Verfügung stand, musste in zwei getrennten Messreihen nacheinander vor und hinter dem Objekt gemessen werden. Zur Anwendung kam ein laseroptisches Feinstaubmessgerät vom Typ 1.108 der Firma Grimm Aerosoltechnik. Die Messung erfolgte in einem weiten Messraster mit neun Messpunkten. Die Messpunkte lagen in einer Höhe von 20, 50 und 80 Zentimetern über dem Kanalboden, sowie in einem seitlichen Abstand von 20, 50 und 80 Zentimetern zur linken Kanalwand. Das Messgerät wurde unterhalb des Kanalbodens positioniert und saugt die Probenluft über ein geeignetes Aluminiumrohr an. Die Position der einzelnen Messpunkte vor und hinter dem Versuchsobjekt ist in den Bildern 34 und 35 zu sehen. Die blauen Punkte zeigen die Messpunkte der Strömung, die roten Punkte die der Feinstaubmessung. Bild 34 zeigt dabei die Lage der Messpunkte in Blickrichtung der Strömung, während Bild 35 eine Draufsicht darstellt.

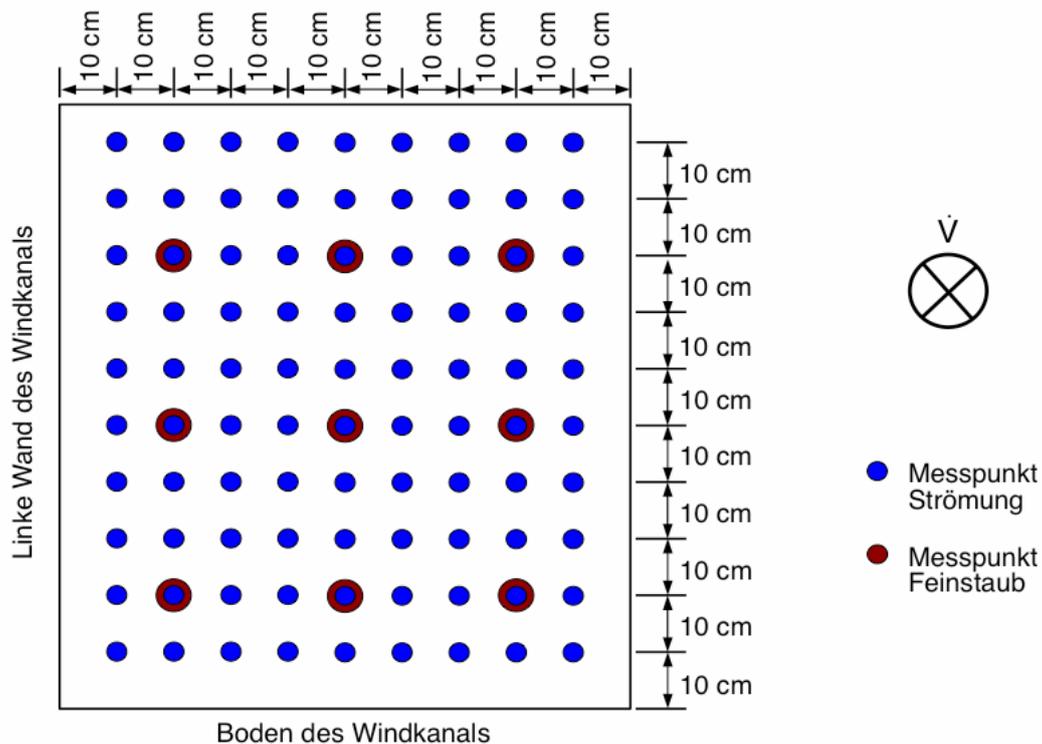


Bild 34: Verteilung der Messpunkte, Blick in Strömungsrichtung

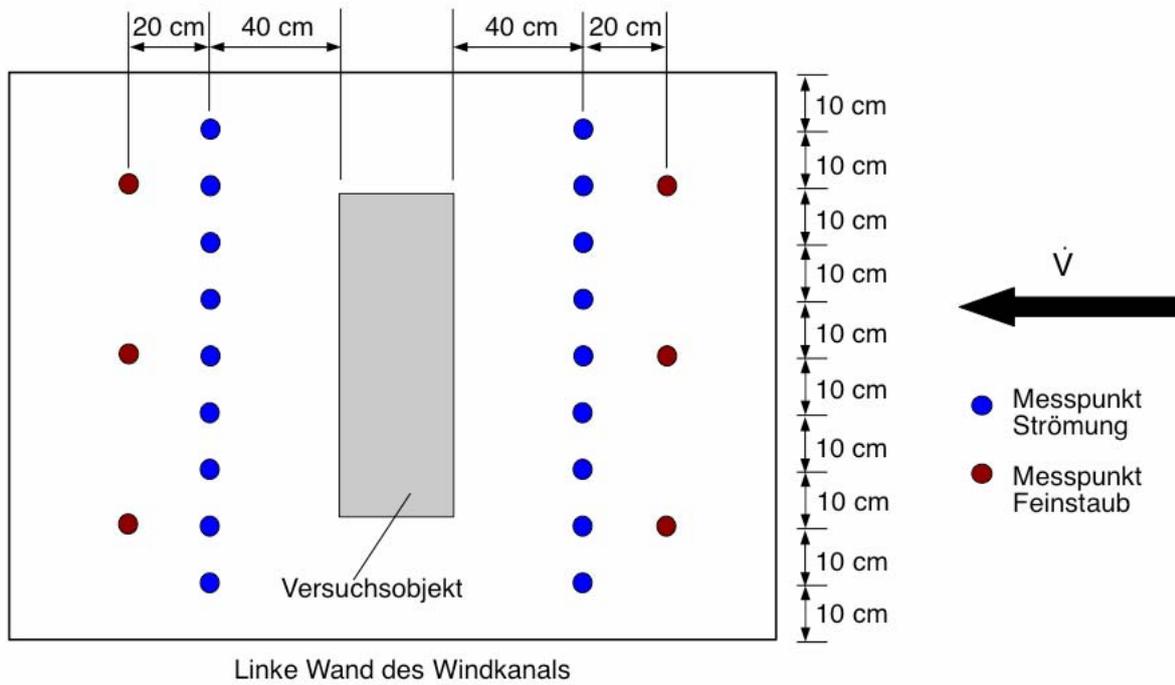


Bild 35: Verteilung der Messpunkte, Draufsicht

Messreihe	Höhe / cm	Breite / cm	Tiefe / cm	Anzahl Elemente
Breite 1	96	20	30	1
Breite 2	96	40	30	1
Breite 3	96	60	30	1
Höhe 1	40	60	30	1
Höhe 2	60	60	30	1
Höhe 3	96	60	30	1
Porosität 1	96	40	30	1
Porosität 2				1
Porosität 3				1

Tab. 15: Abmessungen Efeu-Heckenelemente im Windkanal

Messreihe	Höhe / cm	Breite / cm	Tiefe / cm	Anzahl Pflanzen
Breite 1	77	50	50	1
Breite 2	77	70	50	2
Breite 3	77	100	50	2
Höhe 1	40	100	60	2
Höhe 2	75	100	60	2
Höhe 3	110	100	60	2
Porosität 1	77	100	50	2
Porosität 2				2
Porosität 3				2

Tab. 16: Abmessungen Kirschlorbeer im Windkanal

Messreihe	Höhe / cm	Breite / cm	Tiefe / cm	Anzahl Pflanzen
Breite 1	108	72	66	1
Breite 2	108	40	66	1
Breite 3	108	100	50	1
Höhe 1	40	100	72	2
Höhe 2	70	100	72	2
Höhe 3	108	100	72	2
Porosität 1	77	100	50	1
Porosität 2				1
Porosität 3				1

Tab. 17: Abmessungen Fichte im Windkanal

Messreihe	Höhe / cm	Breite / cm	Tiefe / cm	Fläche / cm ²	Anzahl Lagen
Breite 1	100	25	0,45	2500	1
Breite 2	100	50	0,45	5000	1
Breite 3	100	90	0,45	9000	1
Höhe 1	30	80	0,45	2400	1
Höhe 2	55	80	0,45	4400	1
Höhe 3	85	80	0,45	6800	1
Porosität 1	100	82	0,45	8200	1
Porosität 2			0,9		2
Porosität 3			1,35		3

Tab. 18: Abmessungen Kokosfaser-Netz im Windkanal

Messreihe	Höhe / cm	Breite / cm	Tiefe / cm	Fläche / cm ²	Anzahl Lagen
Breite 1	80	25	0,15	2000	1
Breite 2	80	50	0,15	4000	1
Breite 3	80	80	0,15	6400	1
Höhe 1	25	67	0,15	1675	1
Höhe 2	50	67	0,15	3350	1
Höhe 3	80	67	0,15	5360	1
Porosität 1	80	70	0,15	5600	1
Porosität 2			0,3		2
Porosität 3			0,45		3

Tab. 19: Abmessungen Polyester-Filz im Windkanal

Messreihe	Höhe / cm	Breite / cm	Tiefe / cm	Fläche / cm ²	Anzahl Lagen
Breite 1	60	25	0,05	1500	1
Breite 2	60	50	0,05	3000	1
Breite 3	60	75	0,05	4500	1
Höhe 1	25	70	0,05	1750	1
Höhe 2	50	70	0,05	3500	1
Höhe 3	75	70	0,05	5250	1
Porosität 1	75	70	0,05	5250	1
Porosität 2			0,1		2
Porosität 3			0,15		3

Tab. 20: Abmessungen Windschutznetz im Windkanal

3.2.6 Ergebnisse

Aus den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Messpunkten vor und hinter den Versuchsobjekten wurde die jeweilige Geschwindigkeitsdifferenz berechnet. Diese gibt für jeden der 90 Messpunkte Aufschluss darüber, ob sich durch das Versuchsobjekt eine Verringerung oder eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit ergeben hat. Bei der Betrachtung aller Messpunkte erhält man so eine Verteilung der Geschwindigkeitsdifferenzen über den Kanalquerschnitt.

Es hat sich herausgestellt, dass sich hinter dem Versuchsobjekt ein Windschatten mit zum Teil deutlich verminderten Strömungsgeschwindigkeiten ausbildet. Die Ausbildung des Windschattens ist grundsätzlich unabhängig von der Art und den geometrischen Eigenschaften des Versuchsobjektes. Allerdings wird die Größe des Gebietes mit

verringerteter Strömungsgeschwindigkeit durch die Abmessungen des Versuchsobjektes bestimmt. Ein großes Objekt verursacht einen größeren Windschatten als ein kleineres. Das absolute Maß der Geschwindigkeitsdifferenz ist zudem noch abhängig von der Anströmgeschwindigkeit. Je höher die Anströmgeschwindigkeit in einem Messpunkt ist, desto größer ist die absolute Geschwindigkeitsdifferenz. Betrachtet man dem gegenüber die Randbereiche des Versuchsobjektes, so ergibt sich ein umgekehrtes Bild. Zwischen den Rändern des Versuchsobjektes und den Wänden des Windkanals ergibt sich eine positive Geschwindigkeitsdifferenz, dass heißt die Strömungsgeschwindigkeit hinter dem Objekt ist größer als davor. Auch hier spielen sowohl die Geometrie des Objektes wie auch die Anströmgeschwindigkeit eine Rolle. Je mehr Fläche das Objekt im Kanalquerschnitt einnimmt, desto größer wird die Geschwindigkeitsdifferenz in den Randbereichen. Bei kleineren

Objekten ist der Effekt immer noch zu erkennen, aber weniger stark ausgeprägt. Die Höhe der Geschwindigkeitsdifferenz hängt auch hier wieder von der Anströmgeschwindigkeit ab. Je höher die Anströmgeschwindigkeit, desto höher ist in den Randbereichen die Geschwindigkeit hinter dem Objekt. Zwischen den Randbereichen mit ihren hohen Strömungsgeschwindigkeiten und dem Windschatten findet ein kontinuierlicher Übergang statt. Die Größe dieses Übergangsbereiches ist wiederum von der Größe des Objektes abhängig.

Die zuvor beschriebenen Effekte lassen sich dadurch erklären, dass die von den Ventilatoren angesaugten Luftmengen die Heckenstruktur nicht passieren können und dabei auf dem Weg des geringsten Widerstandes um die Hecke herum fließen. Bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten tritt dieser Effekt nur abgeschwächt zu Tage, da zum einen die Luftmengen geringer sind und der Luft auch mehr Zeit bleibt, die Heckenstruktur zu

durchqueren. Daher spielen die Eigenschaften der Hecke wie Porosität, Breite oder Höhe bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten nur eine untergeordnete Rolle, so dass sich zwischen den einzelnen Messreihen nur geringe Unterschiede ergeben. Die Bilder 36 bis 38 zeigen die grafische Umsetzung der Ergebnisse einer Messreihe mit drei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten für die Messreihe mit niedrigster Porosität des Efeus. Die Farben in den Bildern geben das Maß der Geschwindigkeitsveränderung wieder, wobei blaue Farben für eine Verminderung und rote Farben für eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit stehen. Deutlich zu erkennen ist die Ausbildung des Windschattens im Kernbereich des untersuchten Heckenelements und die Umströmung in den Randbereichen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten.

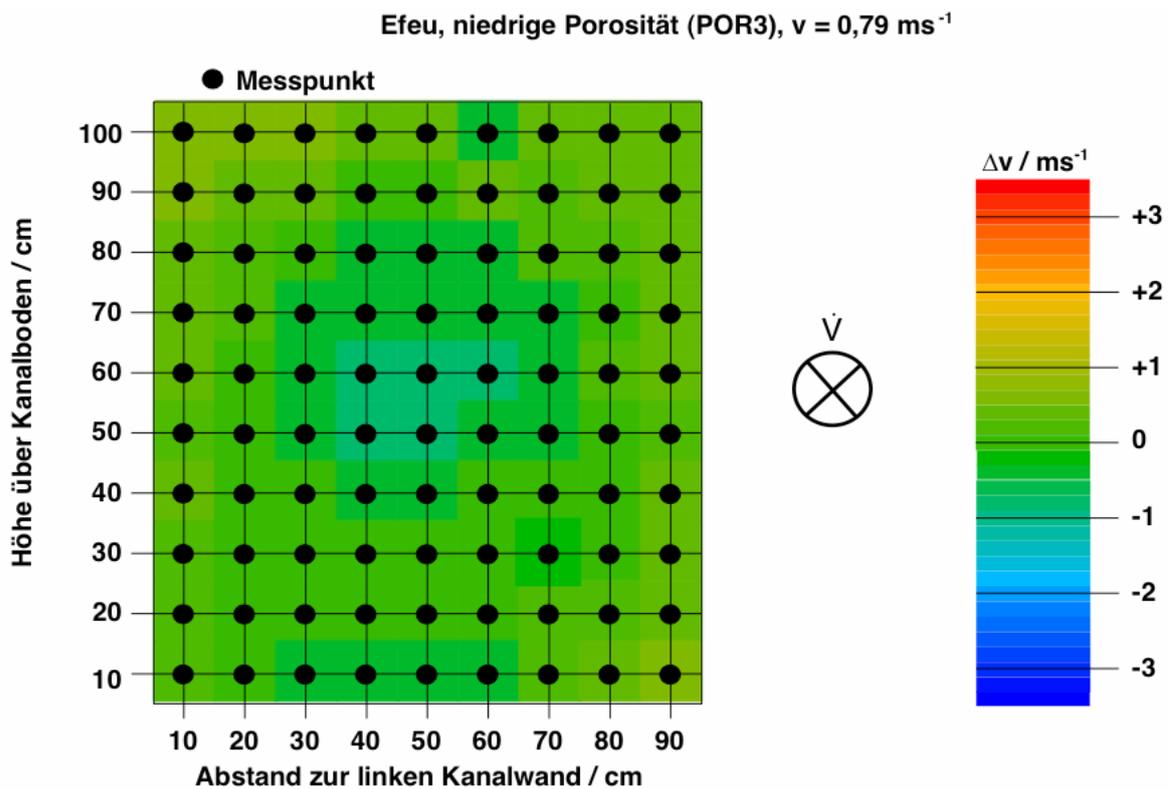


Bild 36: Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten, niedrigste Geschwindigkeit, Efeu

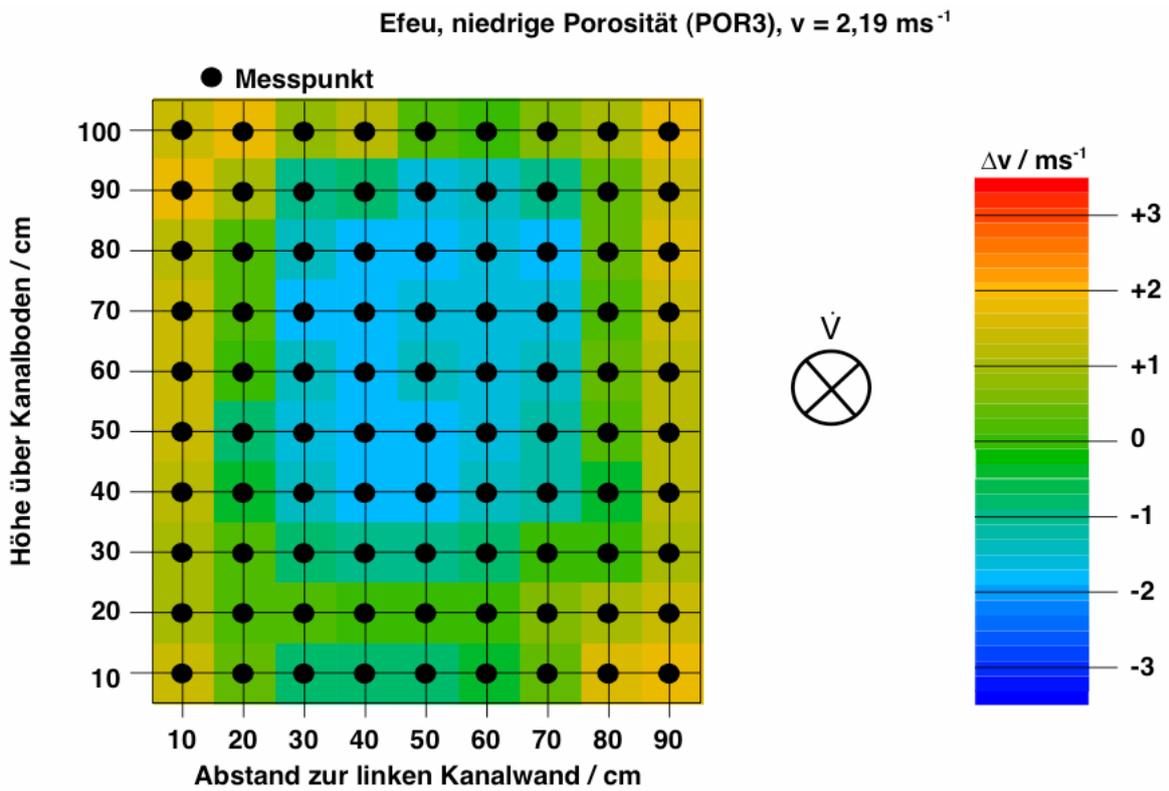


Bild 37: Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten, mittlere Geschwindigkeit, Efeu

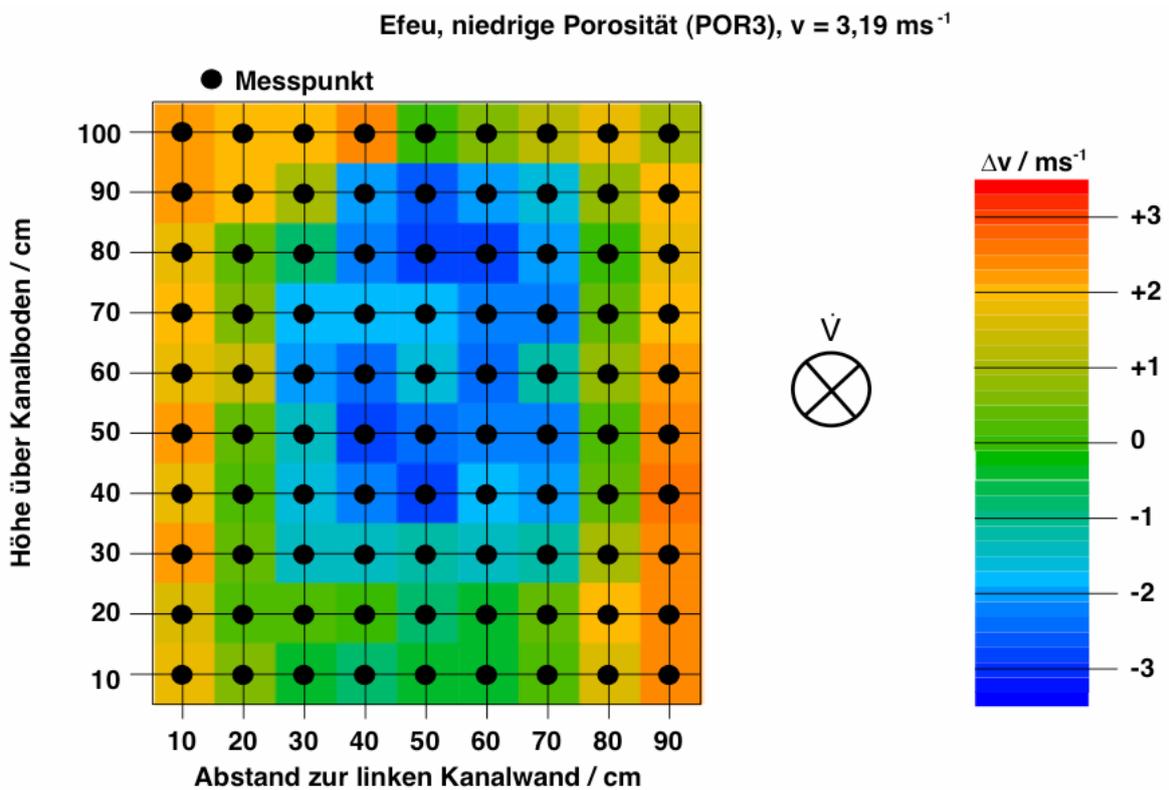


Bild 38: Differenzen der Strömungsgeschwindigkeiten, höchste Geschwindigkeit, Efeu

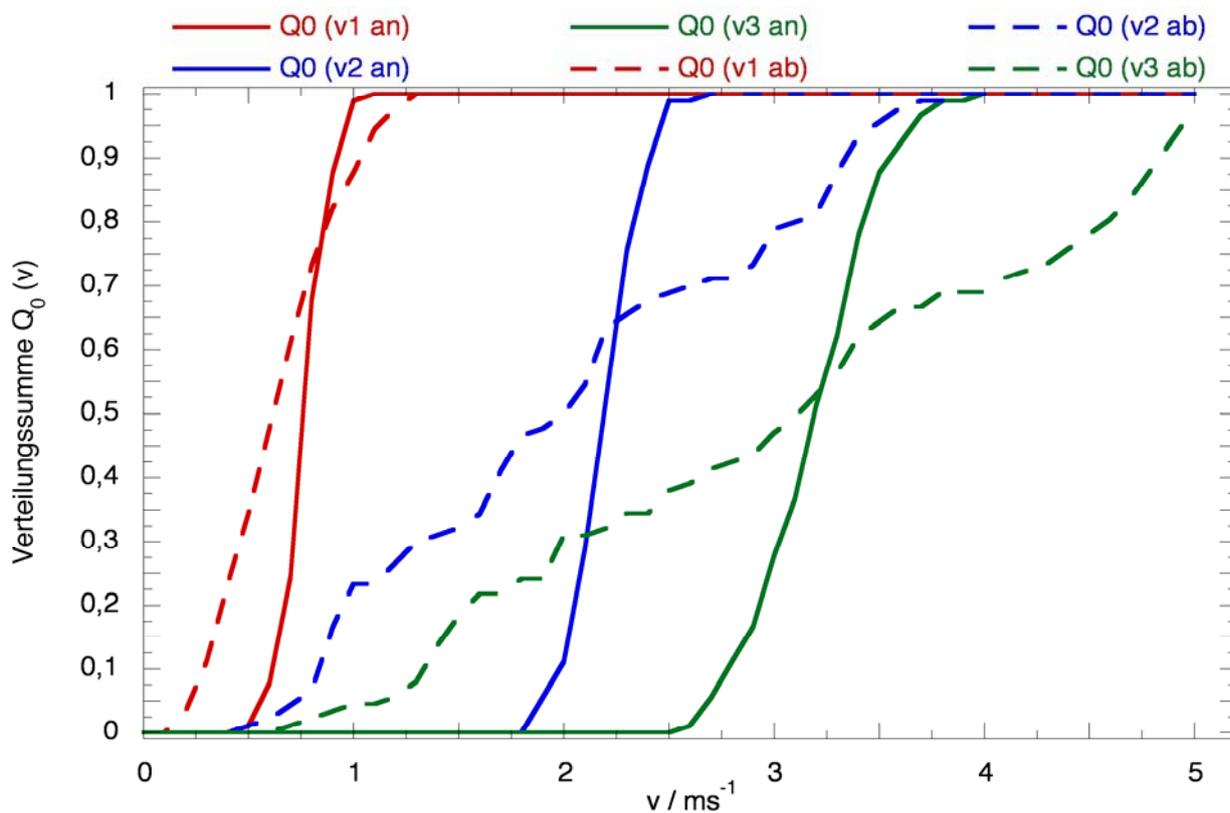


Bild 39: Verteilungssummen der an- und abströmenden Geschwindigkeiten, Porosität 3, Efeu

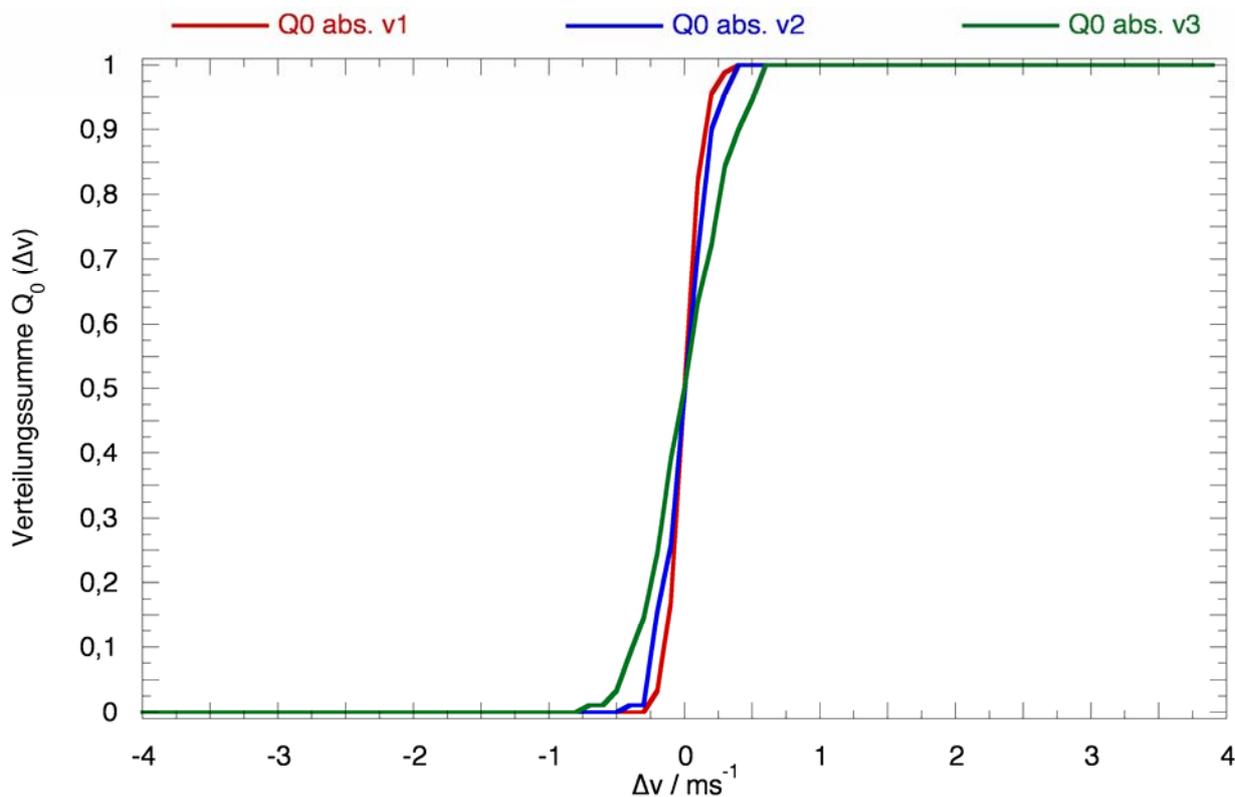


Bild 40: Verteilungssummen der absoluten Geschwindigkeitsdifferenzen, Porosität 3, Efeu

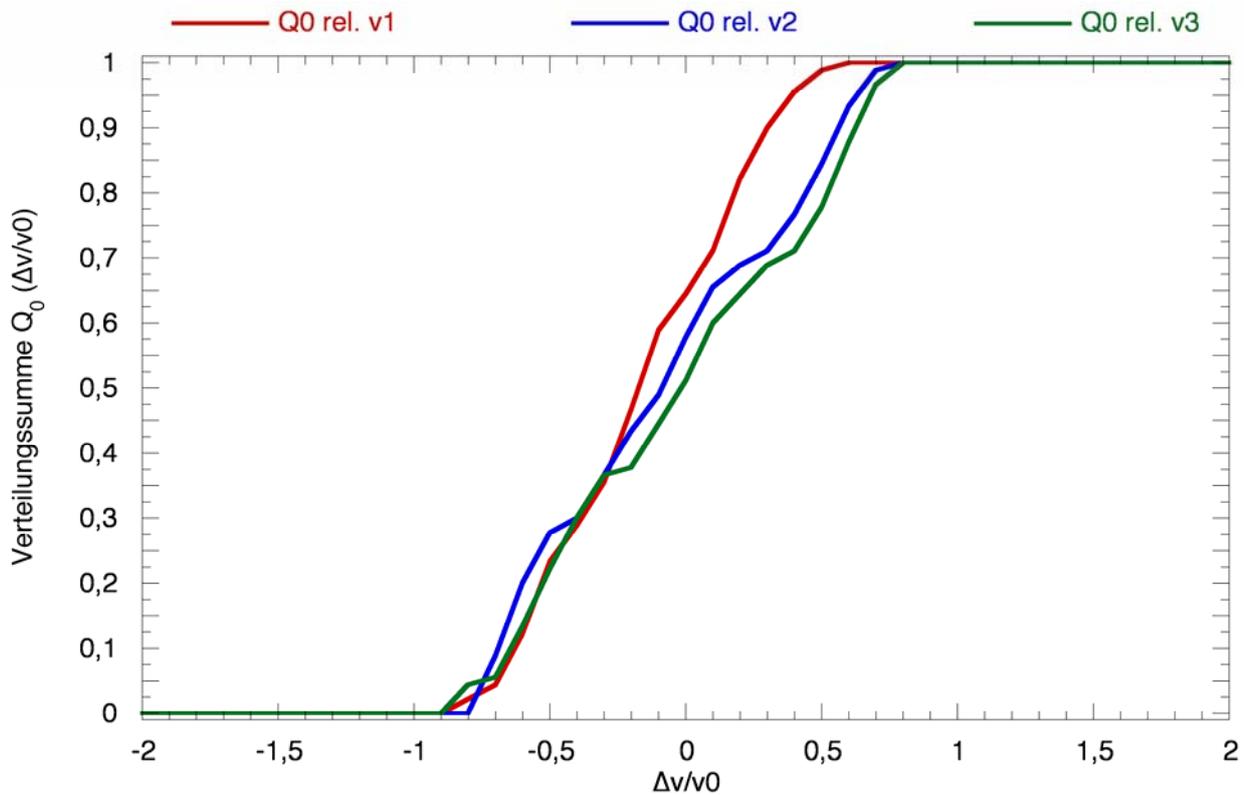


Bild 41: Verteilungssummen der relativen Geschwindigkeitsdifferenzen, Porosität 3, Efeu

Die Bilder 36 bis 38 zeigen zwar anschaulich die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten im Windkanal, sind für eine weitergehende Auswertung aber zu ungenau. Um diese Ungenauigkeiten zu umgehen, bietet sich die Möglichkeit, die Geschwindigkeitsdifferenzen in Form von Verteilungssummen darzustellen. Die Bilder 39 bis 41 zeigen die Verteilungssummen für dieselbe Messreihe mit Efeu. Bild 39 zeigt die Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten in den drei vermessenen Geschwindigkeitsstufen. Anhand des Bildes lassen sich die Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen anströmender Luft (durchgezogene Linien) und abströmender Luft (unterbrochene Linien) leicht ablesen. Zu erkennen ist eine Verschiebung der Kurven nach links, verursacht durch die Ausbildung des Windschattens hinter dem Objekt. Gleichzeitig flacht die Kurve durch die zunehmende Umströmung an den Randbereichen des Efeus ab. Bild 40 zeigt die absoluten Geschwindigkeitsdifferenzen der Strömung, die sich nach Gleichung (14) aus der lokalen Abströmgeschwindigkeit an jedem Messpunkt hinter dem Efeu und der über alle Messpunkte gemittelten Anströmgeschwindigkeit ergeben.

$$\Delta v_{\text{absolut}} = v_{\text{Abstr.},\text{lokal}} - \bar{v}_{\text{Anstr.}} \quad (14)$$

Dem gegenüber stellt Bild 41 die Verteilungssummen der relativen Geschwindigkeitsdifferenzen dar, die nach Gleichung (15) berechnet werden.

$$\Delta v / v_0 = \frac{(v_{\text{Abstr.},\text{lokal}} - v_{\text{Anstr.},\text{lokal}})}{\bar{v}_{\text{Anstr.}}} \quad (15)$$

Diese ergeben sich aus den lokalen Geschwindigkeitsdifferenzen in jedem Messpunkt, die wiederum auf die gemittelte Anströmgeschwindigkeit bezogen werden.

Betrachtet man die relativen Geschwindigkeitsdifferenzen in Bild 48, so erkennt man, dass die Kurven sehr eng zusammen liegen. Das heißt, das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeitsdifferenz und der Anströmgeschwindigkeit ist von der Lage des Messpunktes im Kanalquerschnitt und nicht von der Anströmgeschwindigkeit selbst abhängig. Da die Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit eliminiert wurde, bleibt nur noch die Abhängigkeit von den Eigenschaften des Versuchsobjektes bestehen.

Dies führt zu dem Schluss, dass die Strömungseigenschaften eines Versuchsobjektes mit Messungen in einer Geschwindigkeitsstufe beschrieben werden können.

Aus diesem Grund und um Verfälschungen durch äußere Einflüsse bei niedrigen Geschwindigkeiten so weit wie möglich ausschließen zu können, wer-

den im Folgenden nur die Ergebnisse der Messungen in der höchsten Geschwindigkeitsstufe verglichen. Trägt man die Verteilungssummen der Strömungsgeschwindigkeiten vor und hinter dem Objekt für mehrere Messreihen in einem gemeinsamen Diagramm auf, so zeigt sich die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von dem jeweils veränderten Parameter. Die Bilder 42 bis 44 zeigen die Ergebnisse für Kirschlorbeer, während die Resultate der Messungen mit den Fichten in den Bildern 45 bis 47 dargestellt werden. Auf den Bildern 48 bis 56 werden die Ergebnisse der Messreihen mit den abiotischen Materialien dargestellt. Dabei stellen die Bilder 48 bis 50 die Messreihen mit Polyester-Filz dar, gefolgt von den Bildern 51 bis 53 für das Kokosfaser-Netz und die Bilder 54 bis 56 für das Windschutznetz. Die Verteilungssummen der Anströmgeschwindigkeit werden mit durchgezogenen Linien, die der Abströmgeschwindigkeiten mit unterbrochenen Linien dargestellt. Bei der Auswertung der Messreihen zeigte sich in nahezu allen Messreihen eine deutliche Verschiebung der Mittelwerte nach links, also zu geringeren Geschwindigkeiten. Gleichzeitig konnte aber keine Abflachung der Kurven festgestellt werden, die auf eine gleichzeitige Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten in den Randbereichen der Objekte hindeuten würde. Bislang konnte keine eindeutig

belegbare Begründung für diese Verschiebung gefunden werden. Als mögliche Ursachen kommen hierfür beispielsweise eine Nullpunktverschiebung des Messgerätes, ein Fehler in der Elektronik oder eine Störung der verwendeten Sonden in Betracht. Um dennoch eine Aussage über die Beeinflussung der Strömung durch die Untersuchungsobjekte machen zu können, wurden die Verteilungssummen der Abströmgeschwindigkeiten nach Gleichung (16) normiert.

$$v_{\text{Abstr.,lokal}}^* = \frac{v_{\text{Abstr.,lokal}}}{\bar{v}_{\text{Abstr.}}} \cdot \bar{v}_{\text{Anstr.}} \quad (16)$$

Bei der Normierung wird jeder lokale Einzelwert der Abströmgeschwindigkeit durch den arithmetischen Mittelwert aller Einzelwerte dividiert. Dann wird dieses Zwischenergebnis mit dem arithmetischen Mittel aller Einzelwerte der Anströmgeschwindigkeit multipliziert. Abschließend wird aus diesen Werten die normierte Verteilungssumme berechnet. Auf diese Weise wird eine Verschiebung der Kurven nach rechts erreicht, ohne ihre Aussage zu verändern. Nachfolgend werden in den Tabellen 21 bis 25 die Mittelwerte der An- und Abströmgeschwindigkeiten wiedergegeben, die für die Normierung der Kurven verwendet wurden.

Messreihe	$\bar{v}_{\text{Anstr.}} / \text{ms}^{-1}$			$\bar{v}_{\text{Abstr.}} / \text{ms}^{-1}$		
	v1	v2	v3	v1	v2	v3
B1	0,97	2,6	3,56	0,86	2,25	3,02
B2	1,0	2,56	3,59	0,86	2,18	2,99
B3	0,93	2,43	3,55	0,81	2,10	2,93
H1	0,96	2,46	3,56	0,92	2,48	3,75
H2	0,76	2,45	3,54	0,71	2,39	3,58
H3	0,82	2,15	3,51	0,82	2,42	3,47
POR1	1,0	2,54	3,68	0,84	2,19	2,98
POR2	1,01	2,65	3,77	0,82	2,12	3,12
POR3	1,06	2,65	3,91	0,82	2,09	2,86

Tab. 21: Zur Normierung verwendete Mittelwerte der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kirschlorbeer

Messreihe	$\bar{v}_{\text{Anstr.}} / \text{ms}^{-1}$			$\bar{v}_{\text{Abstr.}} / \text{ms}^{-1}$		
	v1	v2	v3	v1	v2	v3
B1	1,07	2,50	3,65	0,86	2,01	2,82
B2	1,02	2,54	3,61	0,82	2,05	2,72
B3	0,99	2,38	3,60	0,71	1,49	2,1
H1	1,05	2,52	3,61	0,73	1,67	2,17
H2	0,93	2,43	3,53	0,61	1,52	2,1
H3	0,98	2,47	3,53	0,63	1,57	2,15
POR1	1,07	2,46	3,54	0,69	1,56	2,06
POR2	1,03	2,47	3,35	0,7	1,48	2,02
POR3	0,98	2,42	3,49	0,66	1,54	2,05

Tab. 22: Zur Normierung verwendete Mittelwerte der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Fichte

Messreihe	$\bar{v}_{\text{Anstr.}} / \text{ms}^{-1}$			$\bar{v}_{\text{Abstr.}} / \text{ms}^{-1}$		
	v1	v2	v3	v1	v2	v3
B1	0,87	2,32	3,29	0,73	1,76	2,34
B2	0,83	2,24	3,17	0,68	1,63	2,11
B3	0,78	2,12	3,07	0,66	1,39	1,83
H1	0,9	2,3	3,21	0,7	1,65	2,22
H2	0,87	2,24	3,13	0,72	1,64	2,2
H3	0,8	2,11	2,96	0,64	1,4	1,89
POR1	0,81	2,17	3,07	0,64	1,43	1,86
POR2	0,81	2,15	3,22	0,69	1,56	2,09
POR3	0,88	2,19	3,14	0,76	1,66	2,17

Tab. 23: Zur Normierung verwendete Mittelwerte der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Polyester-Filz

Messreihe	$\bar{v}_{\text{Anstr.}} / \text{ms}^{-1}$			$\bar{v}_{\text{Abstr.}} / \text{ms}^{-1}$		
	v1	v2	v3	v1	v2	v3
B1	1,01	2,45	3,64	0,92	2,28	3,3
B2	0,84	2,41	3,64	0,75	2,07	3,06
B3	1,01	2,5	3,66	0,78	2,08	2,85
H1	0,97	2,62	3,73	0,92	2,38	3,26
H2	1,0	2,57	3,63	0,88	2,19	3,07
H3	1,04	2,52	3,58	0,79	1,93	2,78
POR1	1,02	2,47	3,62	0,74	1,94	2,69
POR2	0,98	2,44	3,54	0,62	1,72	2,45
POR3	0,9	2,27	3,28	0,61	1,59	2,31

Tab. 24: Zur Normierung verwendete Mittelwerte der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kokosfaser-Netz

Messreihe	$\bar{v}_{\text{Anstr.}} / \text{ms}^{-1}$			$\bar{v}_{\text{Abstr.}} / \text{ms}^{-1}$		
	v1	v2	v3	v1	v2	v3
B1	0,99	2,44	3,51	0,75	1,72	2,34
B2	0,88	2,34	3,41	0,68	1,61	2,17
B3	1,0	2,32	3,37	0,67	1,42	1,88
H1	1,07	2,45	3,4	0,77	1,64	2,16
H2	0,92	2,3	3,45	0,66	1,47	2,09
H3	0,9	2,27	3,26	0,53	1,25	1,74
POR1	0,9	2,27	3,24	0,54	1,22	1,68
POR2	0,84	2,21	3,18	0,56	1,33	1,86
POR3	0,86	2,21	3,2	0,62	1,43	1,99

Tab. 25: Zur Normierung verwendete Mittelwerte der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Windschutznetz

Auf den Bildern 42 bis 44 werden die normierten Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten der Kirschlorbeer-Messungen dargestellt. Auffällig ist hier, dass die Kurven der Abströmgeschwindigkeiten in allen drei Bildern recht eng zusammen liegen, was besonders in Bild 42 zu sehen ist. In Bild 44 ist die bereits beschriebene Abflachung der Kurven zu erkennen. Die Kurve der Abströmgeschwindigkeit der Messung mit hoher Porosität (rote, unterbrochene Linie) verläuft recht steil, während die Kurven der Messungen mit abnehmender Porosität (blau und grün) eine zunehmende Abflachung zeigen, die auf eine zunehmende Umströmung der Pflanzen schließen lassen. Gleichzeitig wandert der Beginn der Kurven zur linken Seite des Diagramms, was für eine verminderte Abströmgeschwindigkeit im Windschatten der Kurven steht. In den anderen Bildern ist dieses Verhalten nicht zu erkennen, hier sind die Schwankungen der Messwerte zu groß (Bild

43) oder die Kurven liegen zu stark zusammen (Bild 42).

Ein vergleichbares Bild zeigt sich in den Diagrammen in den Bildern 45 bis 47, in denen die Ergebnisse der Messungen mit Fichten zu sehen sind. Auch hier sind starke Schwankungen der Messwerte (Bild 46) und das enge Zusammenliegen der Kurven (Bild 47) zu erkennen. Ähnlich wie bei den variierten Porositäten des Kirschlorbeers (Bild 44) ist bei der Fichte in Bild 45 eine leichte Abflachung der Kurven zu erkennen. Allerdings wurde hier die Breite der Fichten variiert und die zunehmende Abflachung der Kurven erfolgt mit zunehmender Breite der untersuchten Pflanzen. Auffällig ist auch das sehr enge Zusammenliegen der Kurven bei den variierten Porositäten der Fichte, die in Bild 47 zu dargestellt werden. Die während der Untersuchungen durchgeführten Veränderungen der Porosität scheinen nur einen begrenzten Einfluss auf die Beeinflussung der Strömungseigenschaften gehabt zu haben.

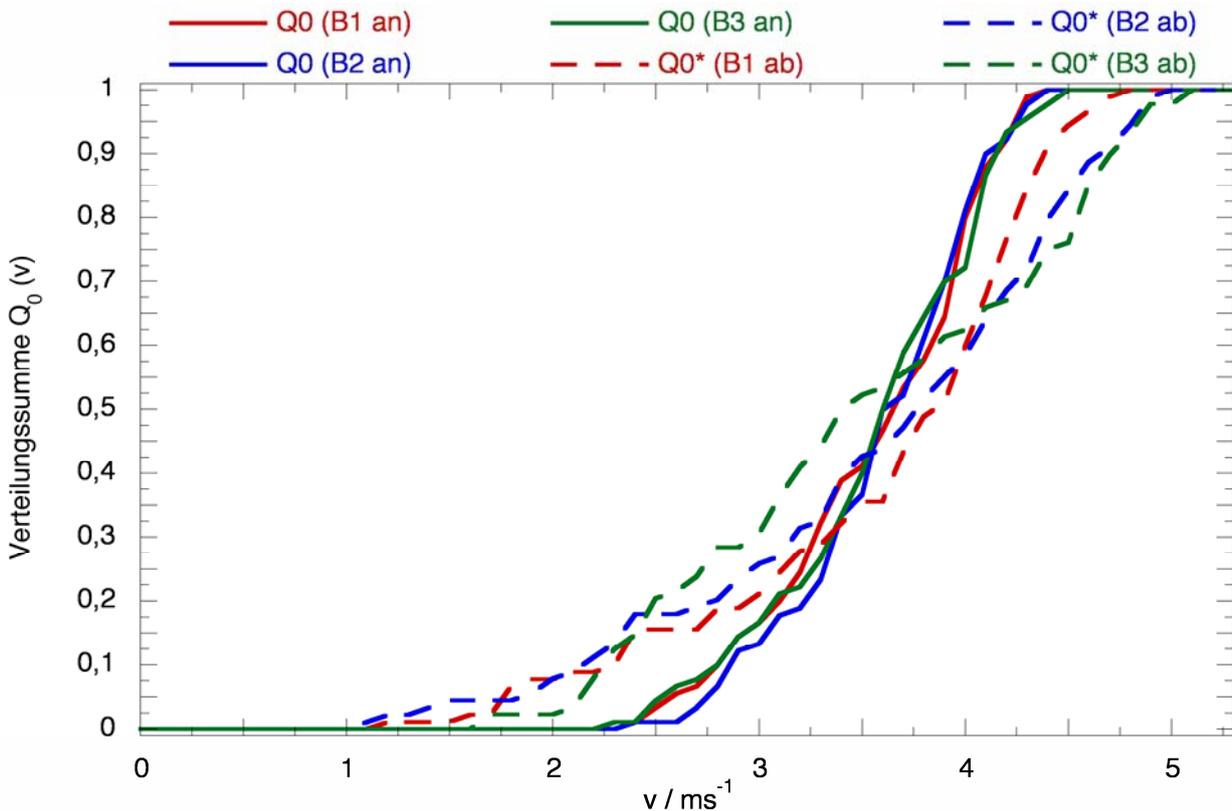


Bild 42: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kirschlorbeer, unterschiedliche Breiten, normiert

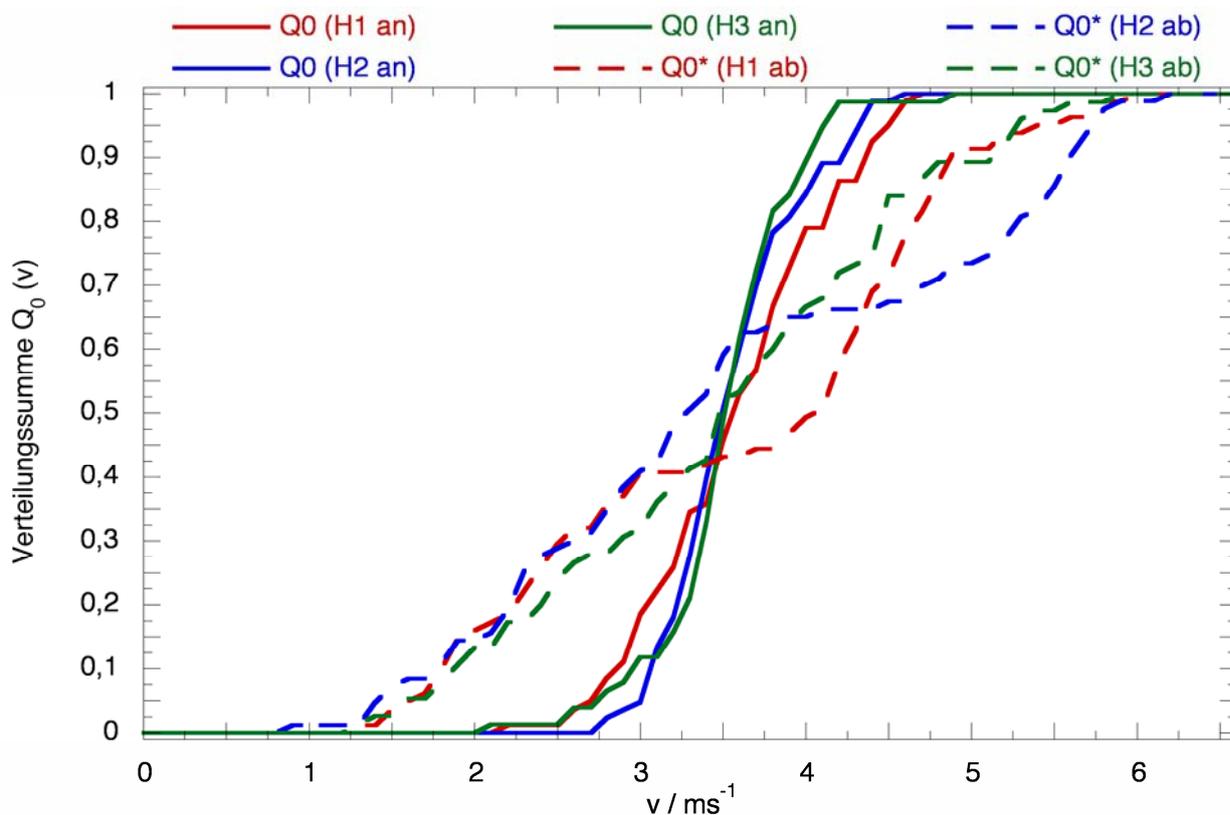


Bild 43: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kirschchlorbeer, unterschiedliche Höhen, normiert

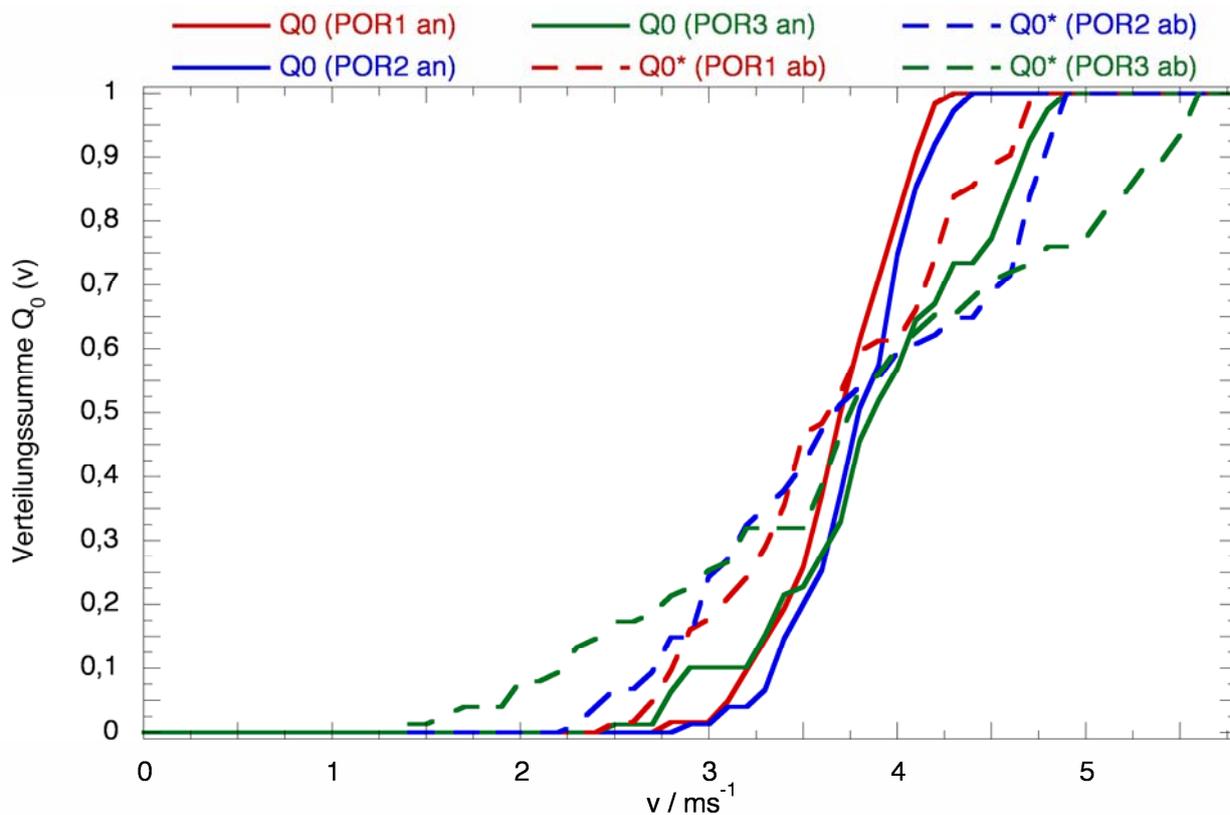


Bild 44: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kirschchlorbeer, unterschiedliche Porositäten, normiert

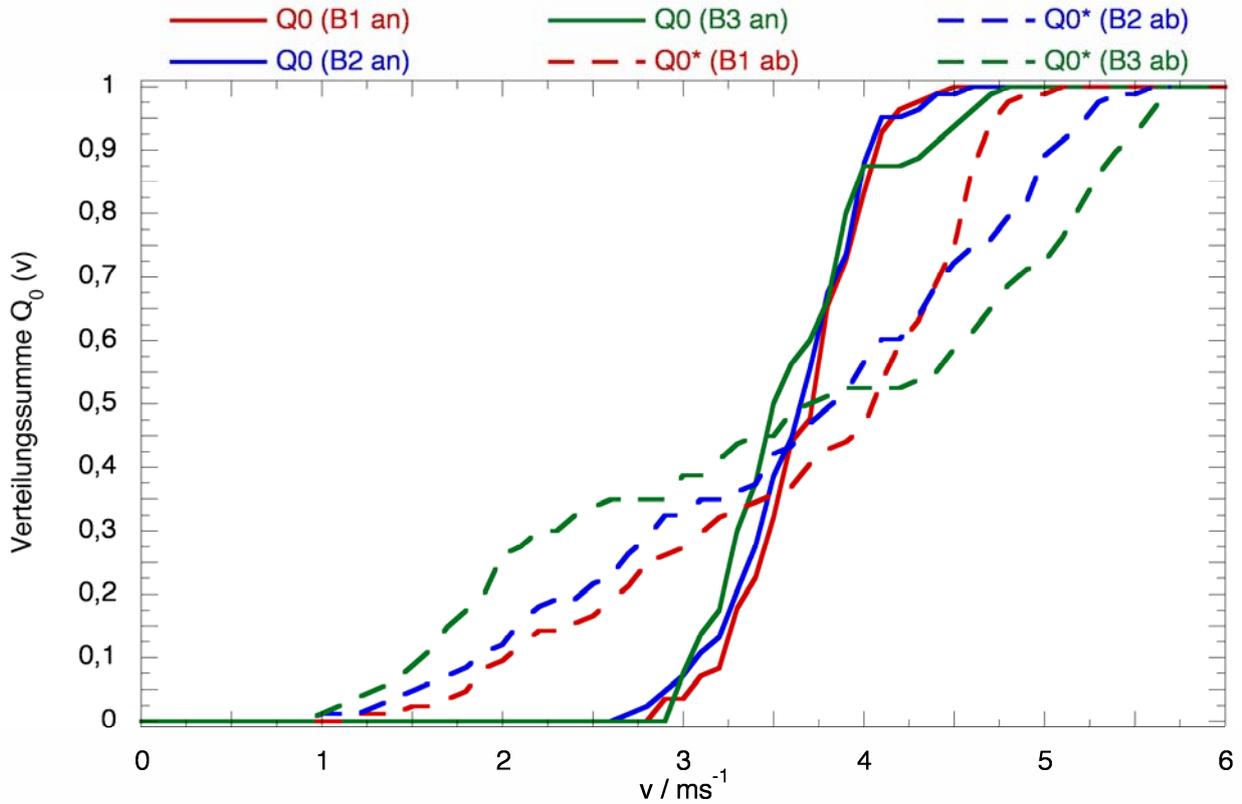


Bild 45: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Fichte, unterschiedliche Breiten, normiert

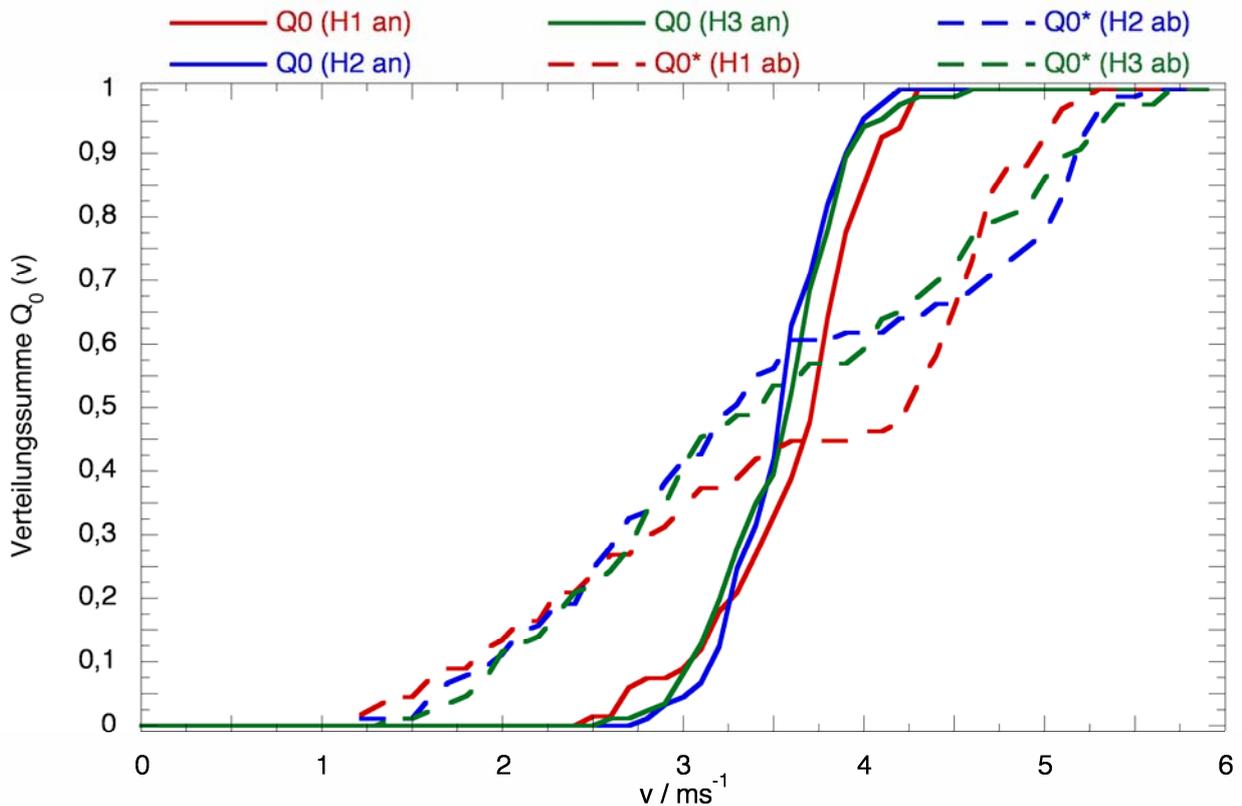


Bild 46: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Fichte, unterschiedliche Höhen, normiert

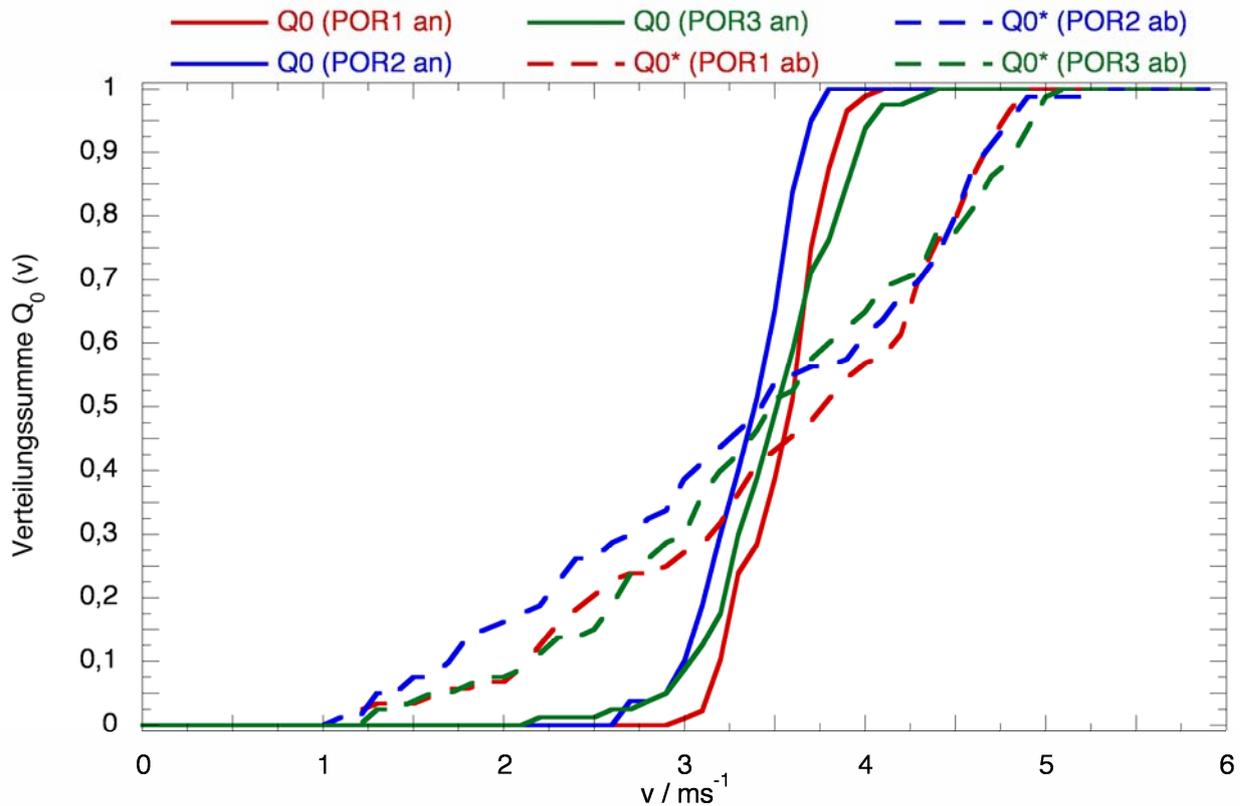


Bild 47: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Fichte, unterschiedliche Porositäten, normiert

Das zuvor anhand von Fichte und Kirschlorbeer beschriebene Verhalten der Strömungen ist auch bei den untersuchten abiotischen Materialien zu erkennen. Allerdings fällt bei der Betrachtung auf, dass sich die Ergebnisse der Messungen mit Polyester-Filz (Bilder 48 bis 50) und Windschutznetz (Bilder 54 bis 56) sehr stark ähneln, während die Ergebnisse des Kokosfaser-Netzes (Bilder 51 bis 53) hiervon zum Teil deutlich abweichen.

In den Bildern 48 und 49 kann man erkennen, dass mit zunehmender Breite und Höhe des Polyester-Filzes die Verteilungskurven der Abströmgeschwindigkeit bis zu einer Geschwindigkeit von 2 ms^{-1} steiler ansteigen und dann abgeflacht nach rechts weiter laufen. Auch hier kann die Ausbildung des Windschattens hinter dem abiotischen Material als Erklärung für dieses Verhalten dienen. Wird mehr Material in den Windkanal eingebracht, so vergrößert sich auch der Raum, der für die Ausbildung eines Windschattens zur Verfügung steht. Parallel dazu kommt es durch die Umströmung des Materials zu einer Anhebung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit, was durch die Abflachung einerseits und die Verlängerung der Kurven in den rechten Teil des Diagramms andererseits wiedergegeben wird.

In Bild 50 verlaufen bei den Ergebnissen der Messungen mit variiert Porosität die Kurven sehr eng

zusammen, eine deutliche Änderung der Abströmgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Porosität des Materials ist hier nicht zu erkennen. Es kann daher vermutet werden, dass die Porosität einer Lage des Materials bereits so gering ist, dass das Hinzufügen weiterer Lagen keinen nennenswerten Einfluss auf die Strömungseigenschaften hatte. Auf diese Weise kommt das sehr enge Zusammenliegen der Kurven trotz variiert Porosität des Materials zustande.

Betrachtet man die Ergebnisse der Untersuchungen des Windschutznetzes auf den Bildern 54 bis 56, so fällt eine starke Ähnlichkeit auf. Besonders im Fall der variiert Porosität (Bild 56) zeigen sich auffällige Parallelen zum Polyester-Filz (Bild 53). Auch hier liegen die Kurven sehr eng zusammen, was darauf schließen lässt, dass die Verringerung der Porosität durch das Hinzufügen zusätzlicher Lagen des Materials zu keiner nennenswerten Beeinflussung der Strömungseigenschaften geführt hat.

Auch bei den Messreihen mit variiert Breite und Höhe fallen Gemeinsamkeiten zwischen Polyester-Filz und Windschutznetz auf. Wie man in den Bildern 54 und 55 erkennen kann, steigen die Verteilungssummen bis zu einer Geschwindigkeit von rund 2 ms^{-1} steil an und laufen dann abgeflacht bis zum Maximalwert weiter, was auch hier

auf die Bildung eines Windschattens und die zunehmende Umströmung zurück zuführen ist. Mit zunehmender Fläche des Materials im Windkanal steigt auch der Maximalwert der gemessenen Abströmgeschwindigkeit an.

Die Ergebnisse der Messreihen mit dem Kokosfaser-Netz weichen hiervon allerdings ab. In den Bildern 51 und 52 kann man erkennen, dass sich die Verteilungssummen mit zunehmender Breite und Höhe des Netzes in ihrer Form und Position den Kurven der Anströmgeschwindigkeit annähern. In Bild 51 ist die grüne, unterbrochene Kurve der Abströmgeschwindigkeit der größten Breite in weiten Teilen mit der Kurve der Anströmgeschwindigkeit nahezu deckungsgleich, sie ist nur geringfügig nach links verschoben und flacht im oberen Teil früher ab. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist die sehr große Fläche von 9000 cm^2 , die bei dieser Messung in den Kanal eingebracht wurde. Dadurch wurden rund 90 Prozent des Kanalquerschnitts durch das Kokosfaser-Netz ausgefüllt. Dadurch und durch die hohe Porosität des Materials wurde der Luftstrom gleichmäßig geringfügig abgebremst und es konnte sich nur in einem sehr kleinen Bereich eine Umströmung ausbilden.

Ein vergleichbares Ergebnis zeigt sich in Bild 52. Mit zunehmender Fläche des Materials findet eine Angleichung der Kurven der Abströmgeschwindigkeit an die der Anströmgeschwindigkeit statt. Da die größte Fläche des Netzes in der Messung H3 aber nur 6800 cm^2 beträgt, ist der Unterschied zwischen An- und Abströmung hier deutlicher ausgeprägt als in Bild 51.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in Bild 53 fällt im Vergleich zu den vergleichbaren Messungen mit variierteter Porosität bei Polyester-Filz und Windschutznetz eine Abhängigkeit der Strömungseigenschaften von der Porosität auf. Mit abnehmender Porosität zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Kurven hin zu geringeren Strömungsgeschwindigkeiten. Im Bereich der höheren Strömungsgeschwindigkeiten liegen die Kurven jedoch wieder enger zusammen und weisen vergleichbare Maximalgeschwindigkeiten auf. Zu erklären ist dieses Ergebnis mit der vergleichsweise hohen Porosität des Kokosfaser-Netzes im Vergleich zu den beiden anderen abiotischen Alternativen, so dass das Hinzufügen zusätzlicher Lagen des Materials zu einer wirksamen Änderung der Porosität geführt hat.

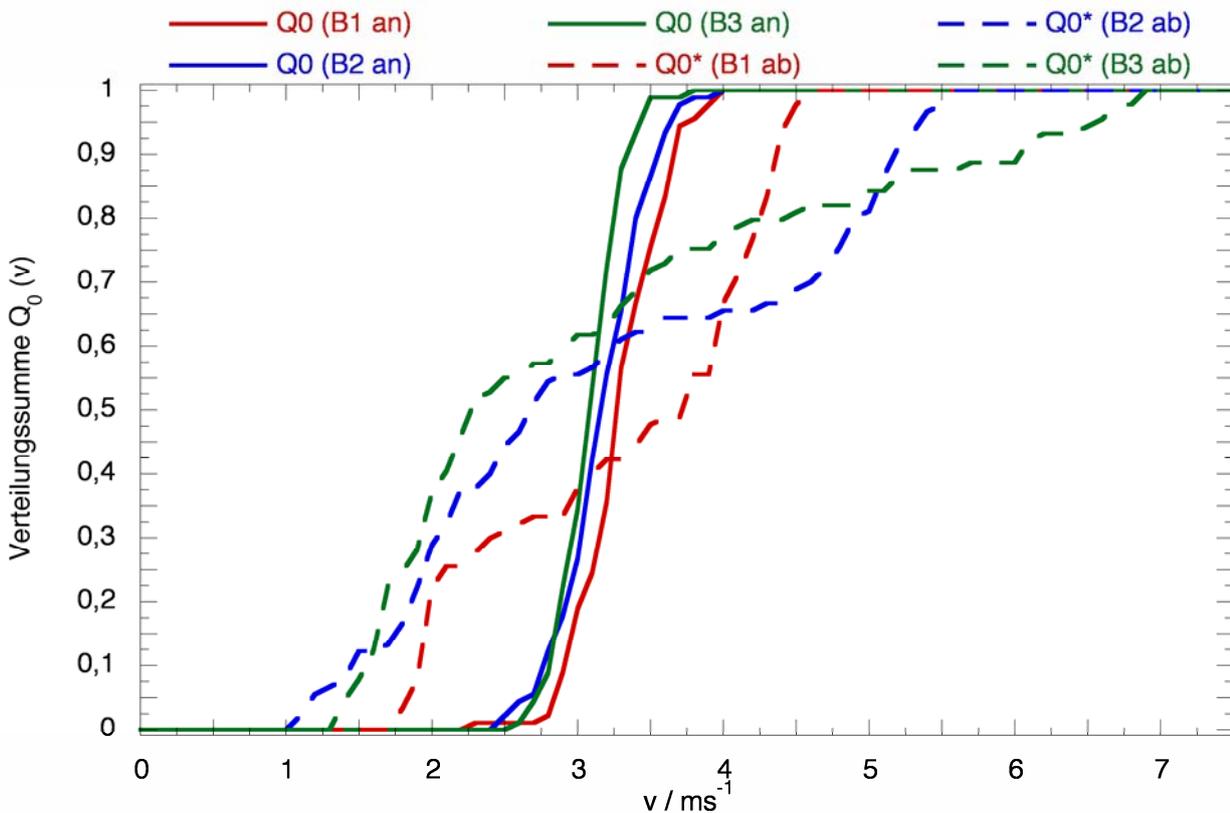


Bild 48: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Polyester-Filz, unterschiedliche Breiten, normiert

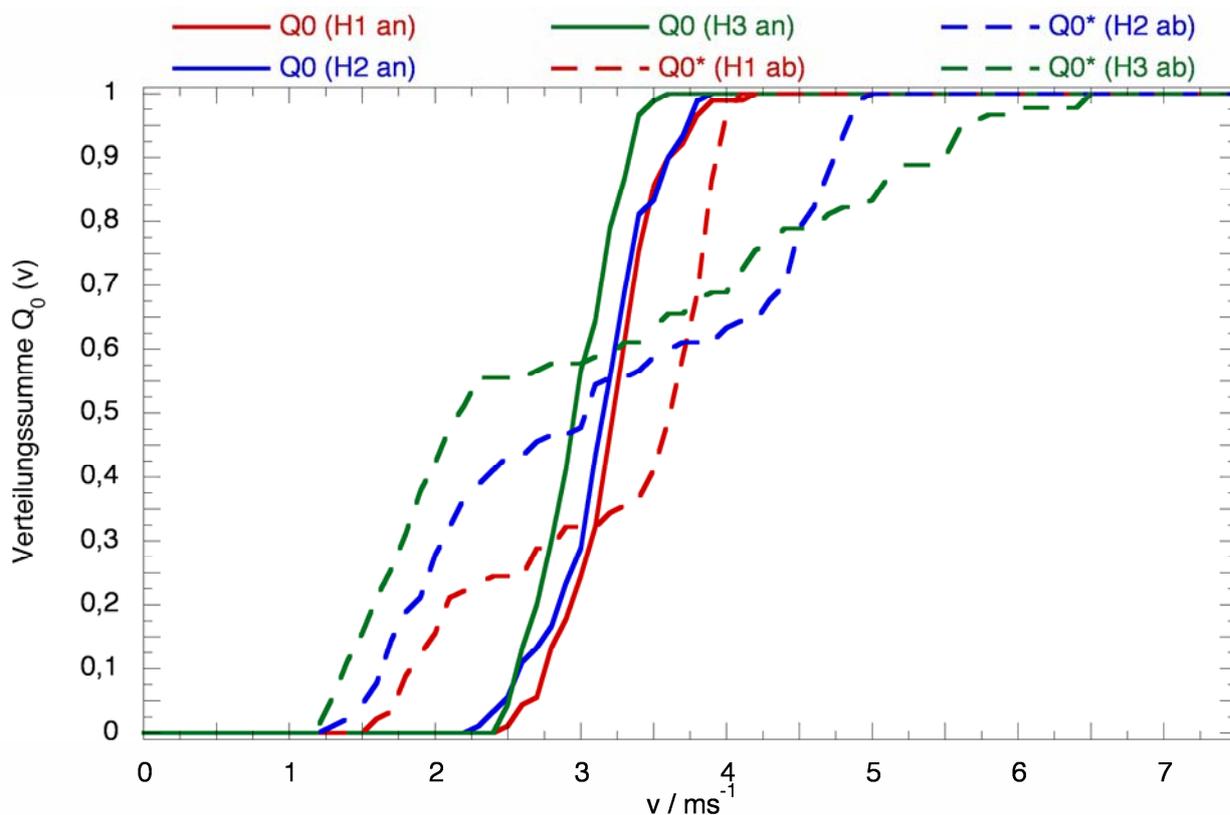


Bild 49: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Polyester-Filz, unterschiedliche Höhen, normiert

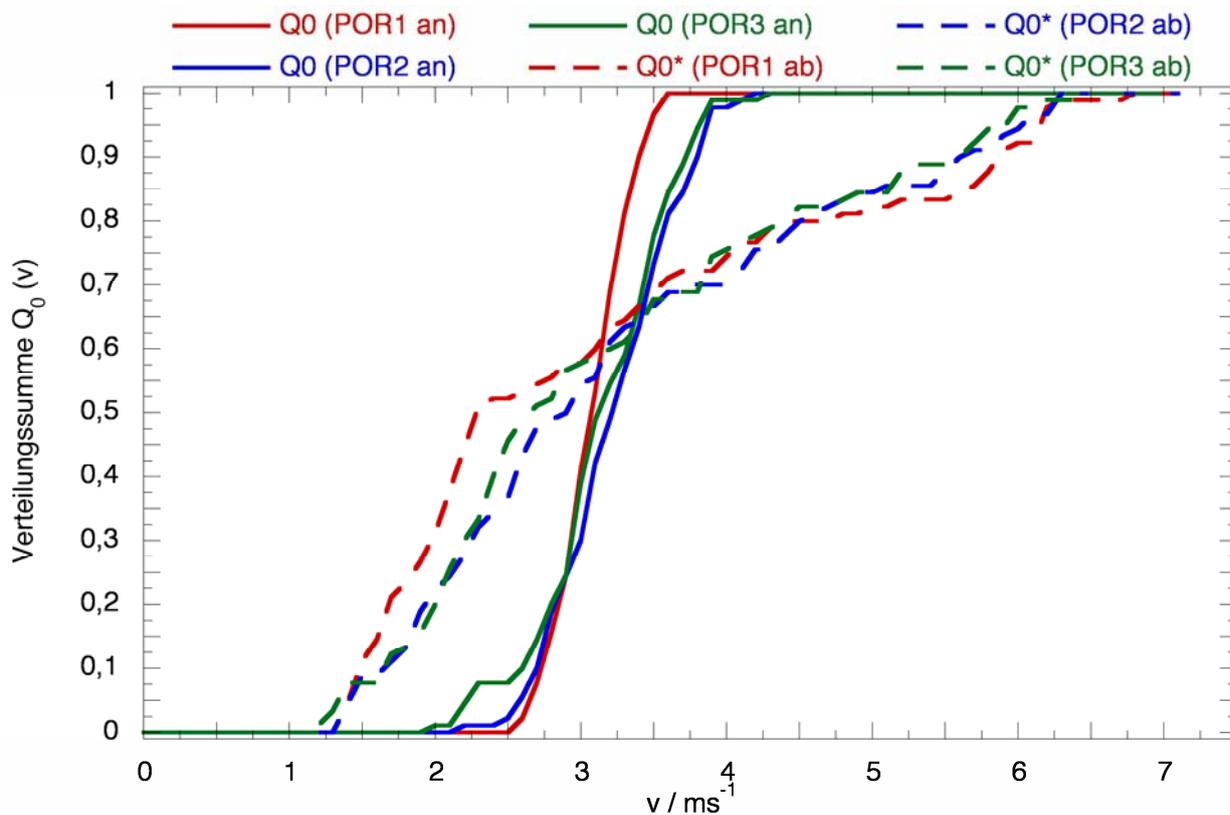


Bild 50: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Polyester-Filz, unterschiedliche Porositäten, normiert

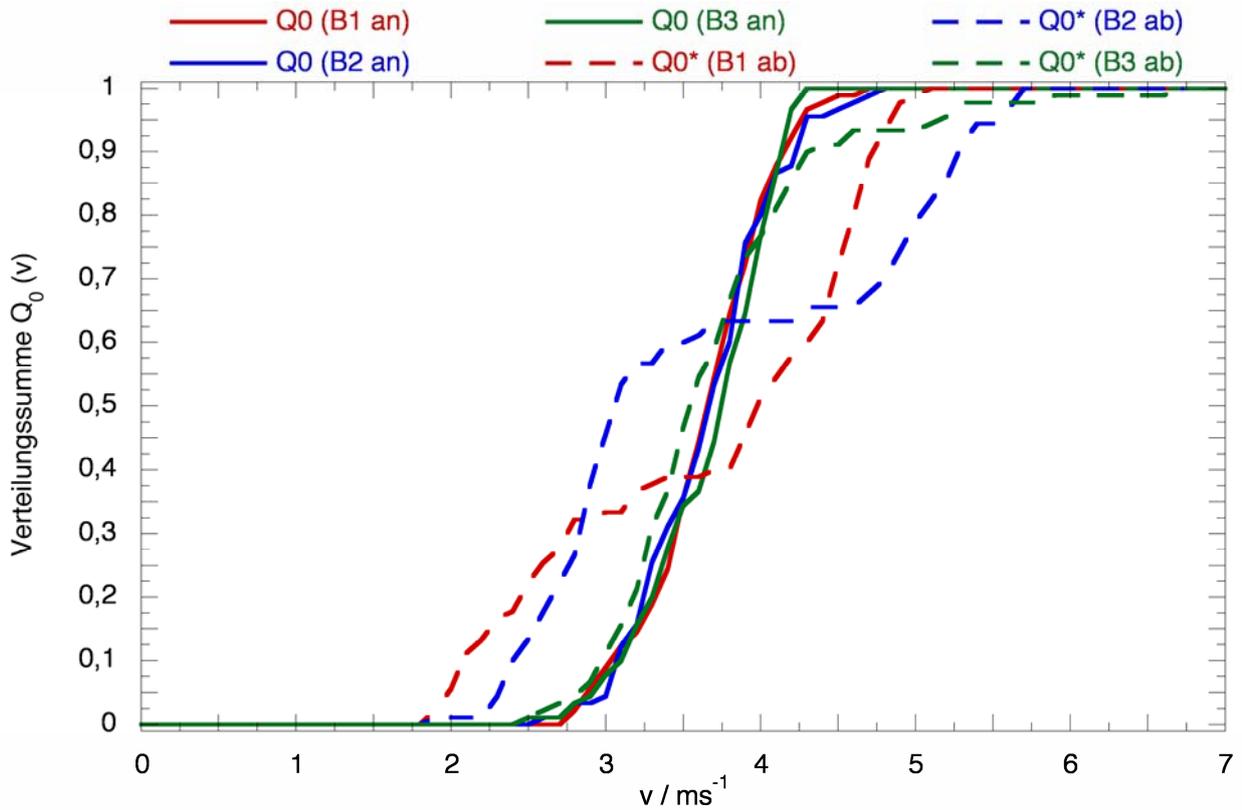


Bild 51: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kokosfaser-Netz, unterschiedliche Breiten, normiert

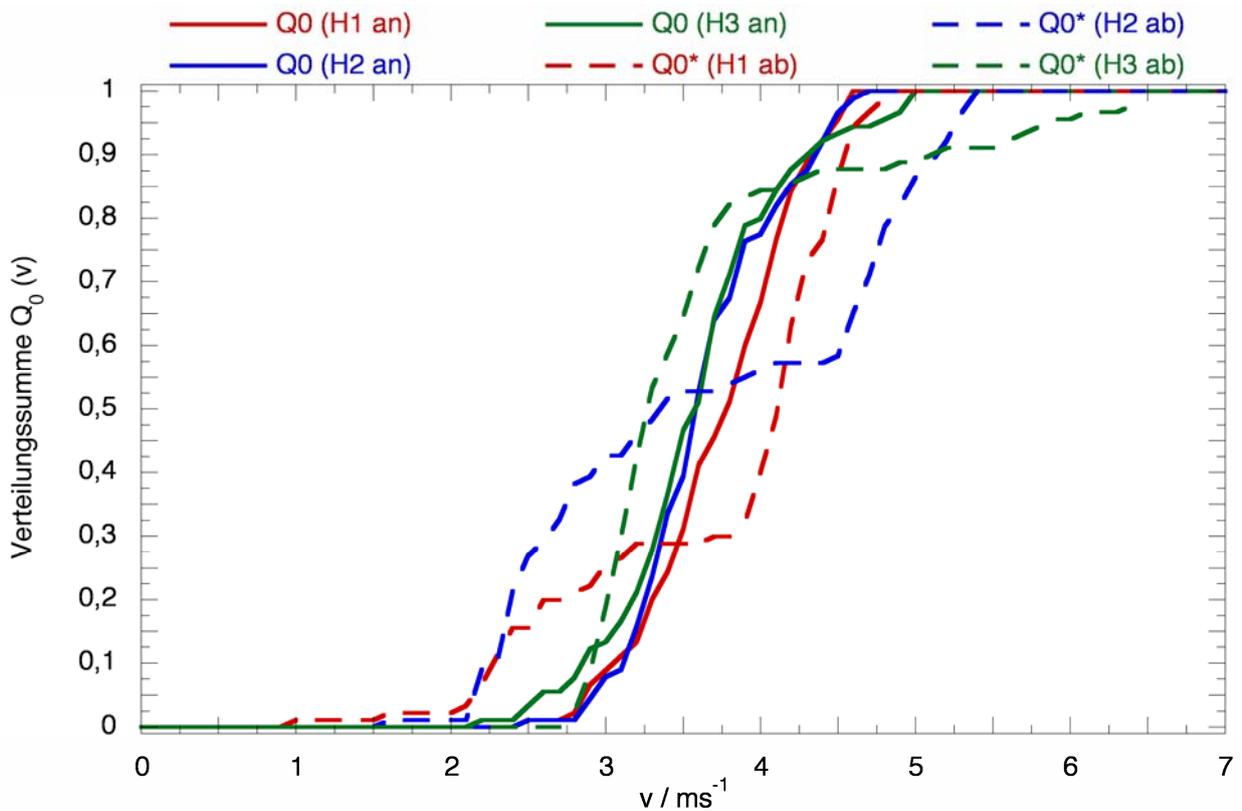


Bild 52: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kokosfaser-Netz, unterschiedliche Höhen, normiert

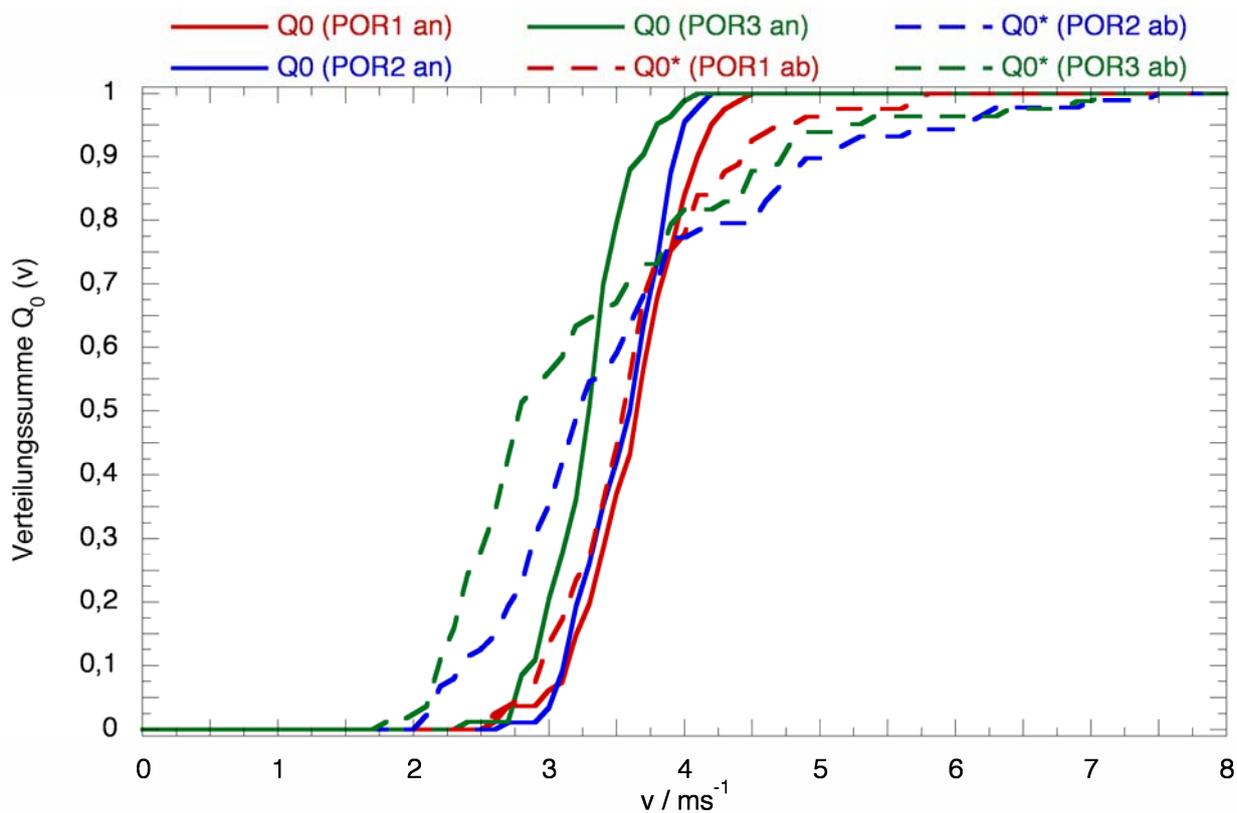


Bild 53: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Kokosfaser-Netz, unterschiedliche Porositäten, normiert

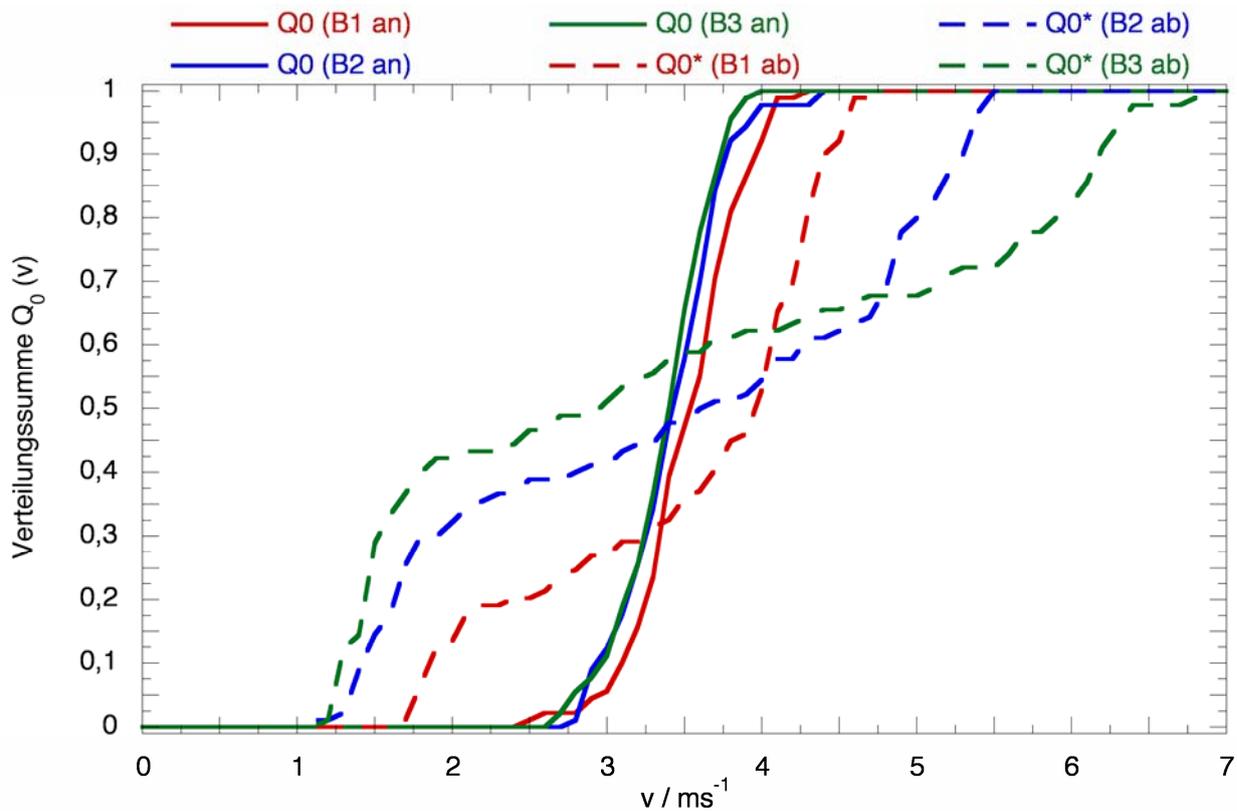


Bild 54: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Windschutznetz, unterschiedliche Breiten, normiert

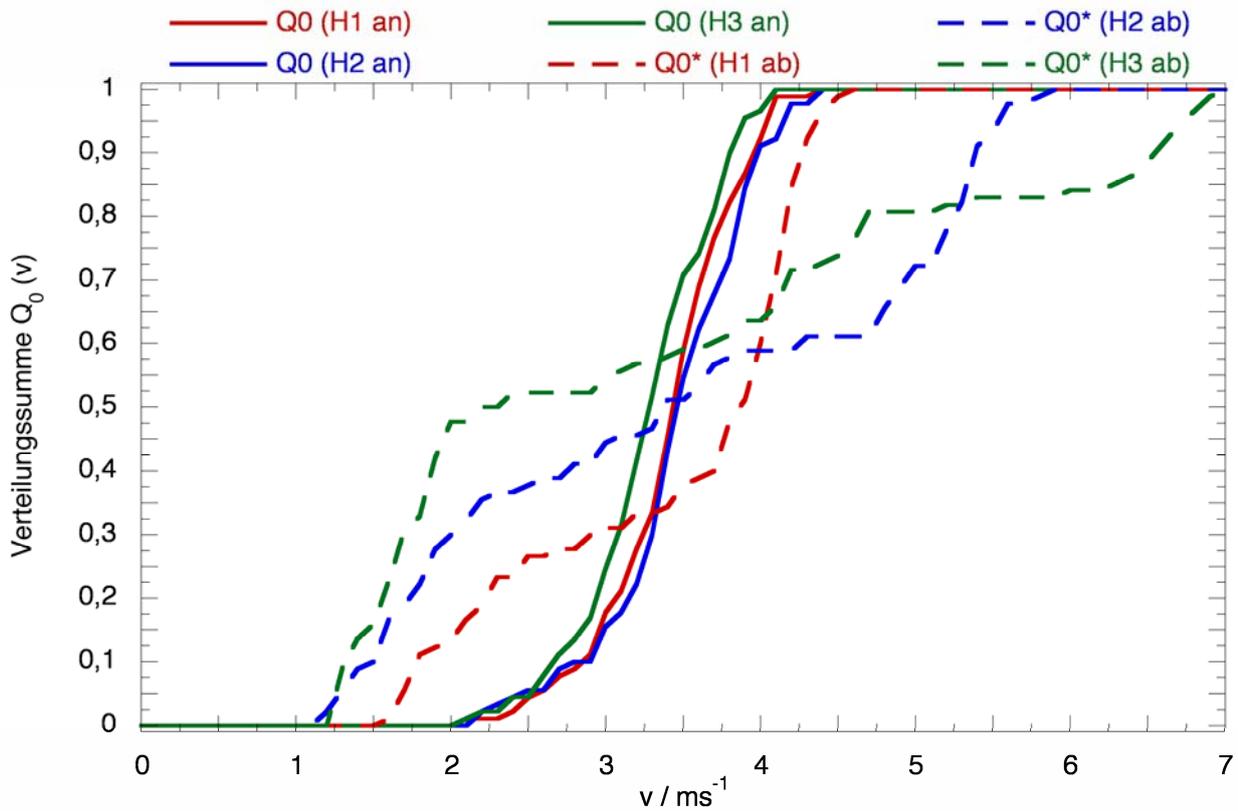


Bild 55: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Windschutznetz, unterschiedliche Höhen, normiert

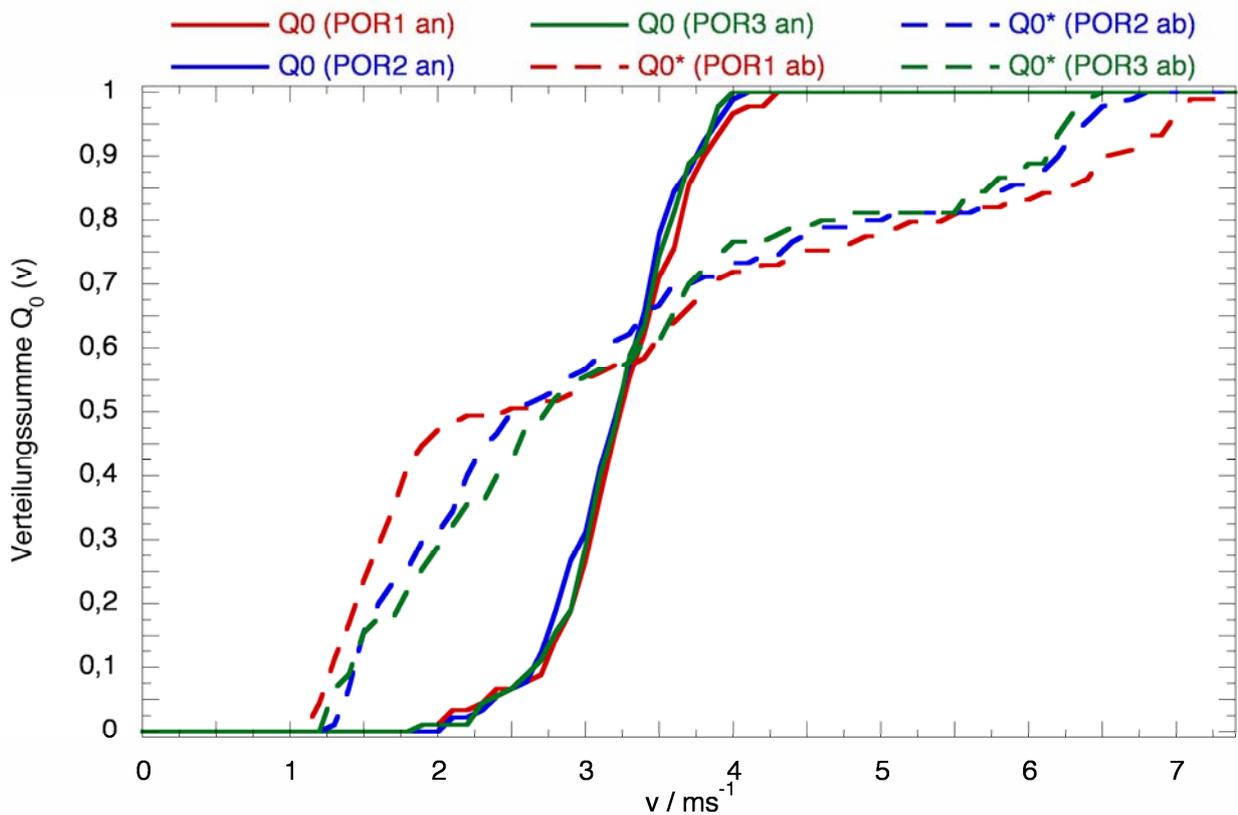


Bild 56: Verteilungssummen der An- und Abströmgeschwindigkeiten, Windschutznetz, unterschiedliche Porositäten, normiert

Die Ergebnisse der Untersuchung zur Staubabscheidung im Windkanal haben keine eindeutigen Resultate erbracht. Bei der Auswertung der Messreihen fielen starke Schwankungen der Messwerte hinter den Versuchsobjekten auf, ohne dass diese in einen Zusammenhang mit den Messwerten vor dem Objekt gebracht werden konnten. Es zeigten sich sowohl Erhöhungen wie auch Verminderungen in den Konzentrationen, ohne dass ein zugrunde liegendes Muster zu erkennen war. Als mögliche Gründe für dieses Verhalten wurden im Wesentlichen zwei Ursachen vermutet. Die erste Ursache wurde in der wechselnden Zusammensetzung des vermessenen Umweltaerosols vermutet. Hier kommen als variierende Partikelquellen in erster Linie Fahrzeugverkehr sowie Bauarbeiten mit Schneide- und Schweißarbeiten in der Nähe des Windkanals in Betracht. Dies erklärt auch die auffallend hohe Konzentration der Fraktion PM₁ in einigen Messungen. Weiterhin kann die Blüte von Bäumen und der damit verbundene Transport von Pollen als eine wahrscheinliche Quelle von Partikeln angesehen werden. Als zweite Ursache wurde ein Zusammenhang zwischen der Umströmung der Versuchsobjekte und der dadurch hervorgerufenen Ausbildung von Verwirbelungen vermutet, welche zu den Schwankungen in den Feinstaubkonzentrationen geführt haben. Da die Ergebnisse der Strömungsmessungen diese Vermutung weder bestätigen noch widerlegen konnten, wurde versucht, die eventuell vorhandenen Wirbel sichtbar zu machen. Hierzu wurden mit einer Nebelmaschine größere Mengen Theaternebel in den Windkanal eingeblasen. Die dabei entstandene Nebelfahne zog kompakt bis kurz vor das Versuchsobjekt, wo sich die Fahne aufteilte

und das Objekt umströmte. Hinter dem Versuchsobjekt zeigte sich jedoch eine starke Wirbelbildung. Da dieser Wirbel auf Fotos kaum zu erkennen ist, stellt Bild 57 die Umströmung und Wirbelbildung schematisch dar. Zu erkennen ist auch, dass sich der Wirbel erst hinter der Messstellen der Strömungsgeschwindigkeit ausgebildet hat, weshalb der Wirbel bei den Messungen der Strömungsgeschwindigkeit nicht bemerkt werden konnte. Allerdings betrifft die Wirbelbildung direkt die Bestimmung der Feinstaubkonzentration, da die Messstellen im Einflussbereich des Wirbels lagen. Im Gegensatz zu den Messpunkten vor dem Versuchsobjekt wurde hier nicht die Transportkonzentration des Aerosols im Luftstrom, sondern die durch den Wirbel verursachte Raumkonzentration vermessen. Zusätzlich konnte sich durch die labilen Strömungsverhältnisse keine konstante Feinstaubkonzentration über die Dauer einer Messreihe ausbilden. Daher lassen die erhaltenen Messwerte nur sehr begrenzt Rückschlüsse auf eine eventuelle Abscheidung des Feinstaubes durch Pflanzen oder die abiotischen Alternativen zu. Im Nachlauf zu diesen Ergebnissen durchgeführte Literaturrecherchen zeigten jedoch, dass die beschriebene Ausbildung von Wirbeln hinter den Pflanzen ein normaler Vorgang ist und nicht auf einen Fehler des Windkanals zurückzuführen ist. So wurde in Versuchen anderer Forschungsgruppen im Windkanal gezeigt, dass diese Wirbel bei der Umströmung stumpfer Körper auftreten (GROMKE, 2007). Da die hier untersuchten Objekte in ihrer Form stumpfen Objekten ähneln, kann dies als Erklärungsansatz für die hier gemachten Beobachtungen dienen.

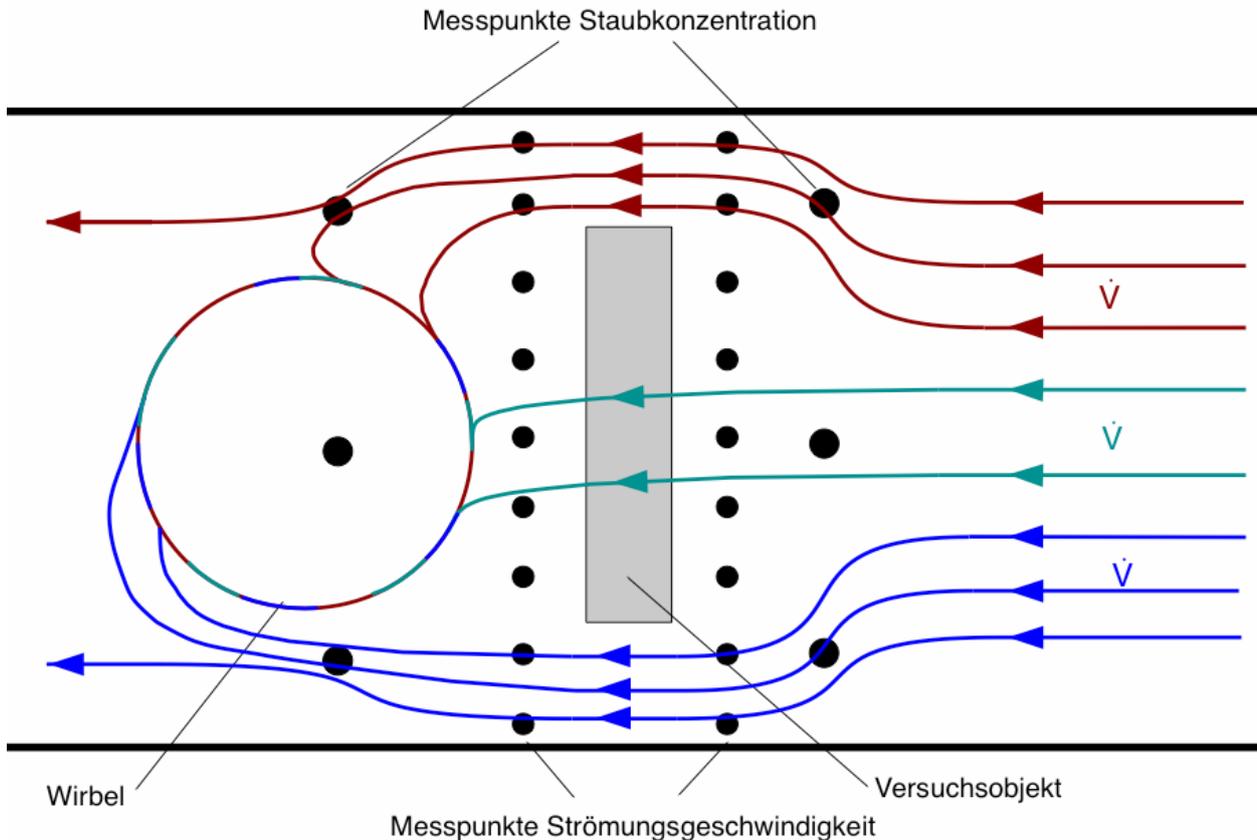


Bild 57: Schematische Darstellung der Wirbelbildung im Windkanal (Draufsicht)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der durchgeführten Staubmessungen anhand von Verteilungssummen dargestellt. Es werden dabei allerdings nur die Ergebnisse für die Fraktion PM₁₀ in den drei Geschwindigkeitsstufen gezeigt. Die zeitgleich vermessenen Konzentrationen der Fraktionen PM₁ und PM_{2,5} werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt, sind aber in den Diagrammen auf der beigefügten CD enthalten. Die Verteilungssummen zeigen die Konzentrationen der Fraktion PM₁₀ an den neun Messpunkten im Kanalquerschnitt. Die durchgezogenen Linien stehen für die Konzentrationen der anströmenden Luft vor dem Versuchssubjekt, die unterbrochenen Linien für die Konzentrationen in der abströmenden Luft hinter dem Versuchssubjekt. Befindet sich eine unterbrochene Linie links von

einer durchgezogenen Linie gleicher Farbe, so entspricht dies einer Verminderung der Konzentration. Befindet sie sich im umgekehrten Fall im Diagramm weiter rechts, so steht dies für eine Erhöhung der Konzentration.

Die Bilder 58 bis 66 zeigen die Ergebnisse der Messungen mit Fichten, wobei die Messungen mit variiertem Breite in den Bildern 58 bis 60, mit variiertem Höhe in den Bildern 61 bis 63 und schließlich mit variiertem Porosität in den Bildern 64 bis 66 zu sehen sind. Eine eindeutige Abhängigkeit der Konzentrationsänderung vom variierten Parameter oder der Strömungsgeschwindigkeit ist nicht erkennbar, es treten sowohl Erhöhungen wie auch Verringerungen ohne erkennbaren Zusammenhang auf.

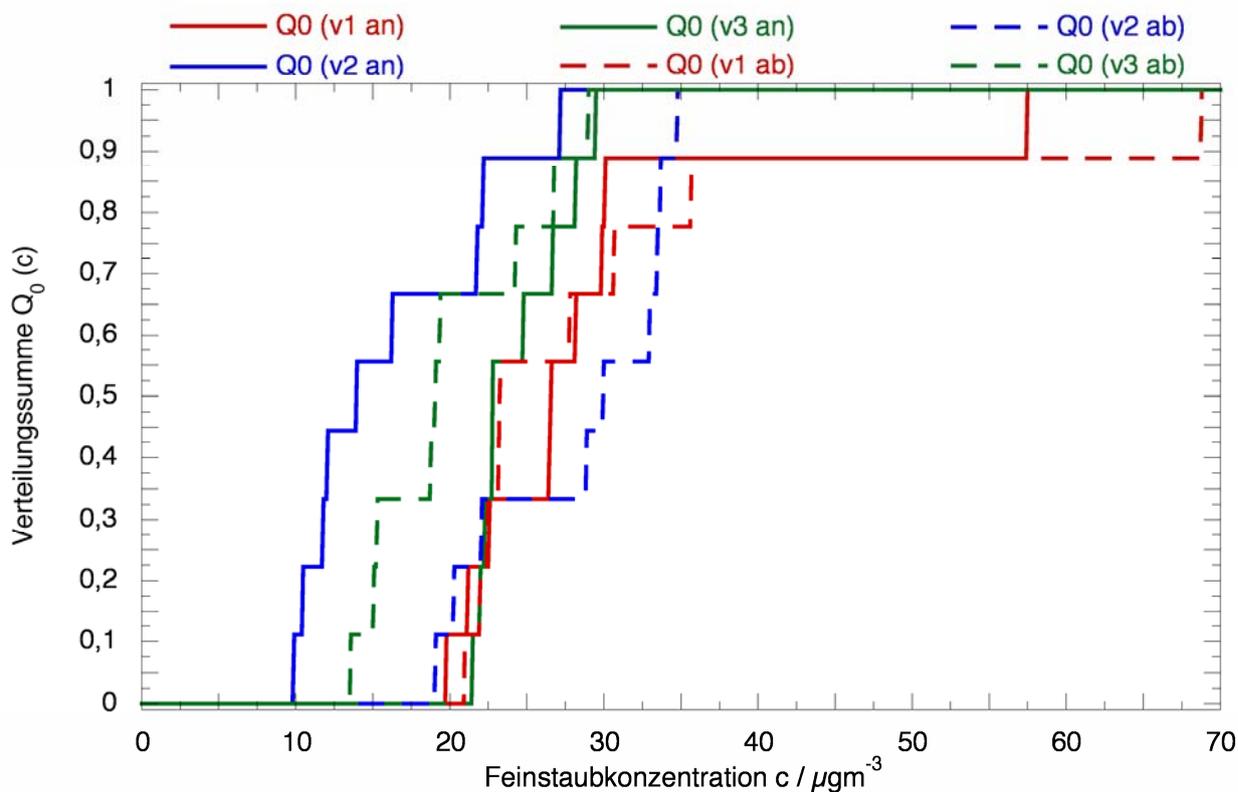


Bild 58: Konzentrationen der Fraktion PM10, Fichte, Breite 1

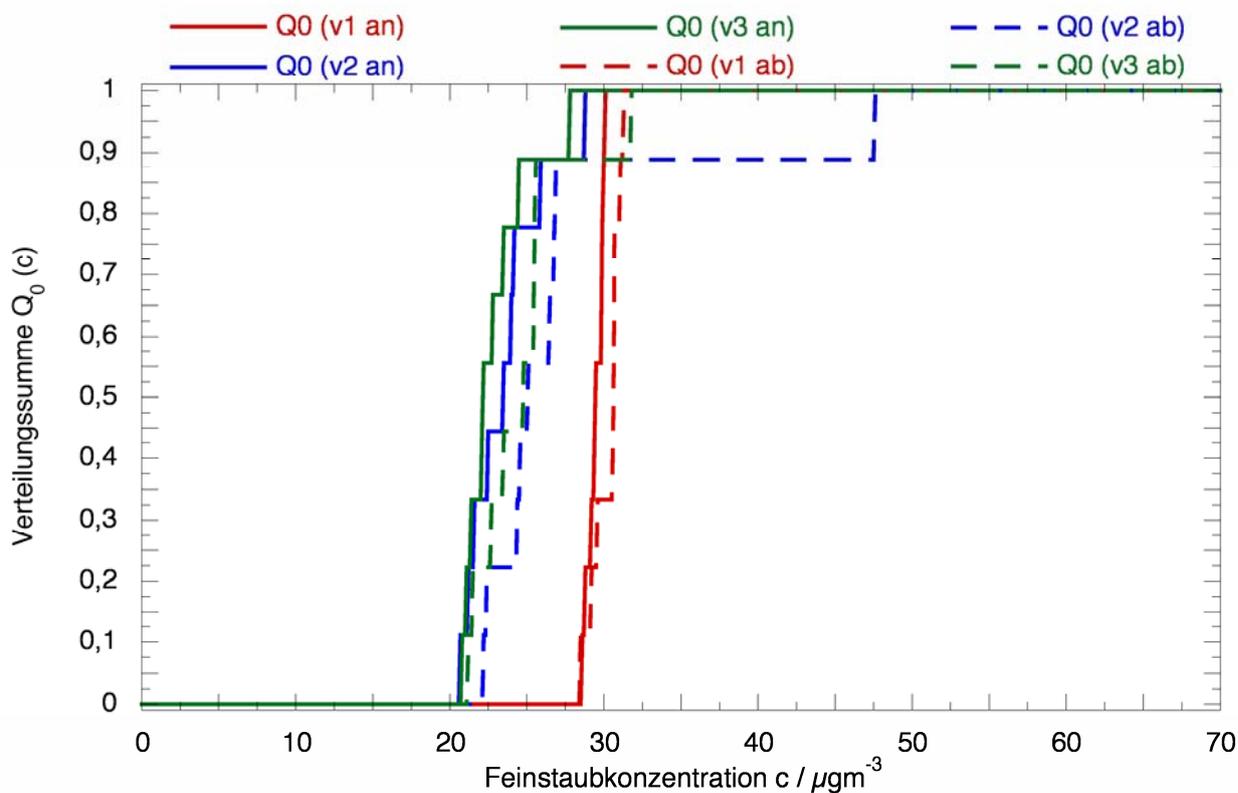


Bild 59: Konzentrationen der Fraktion PM10, Fichte, Breite 2

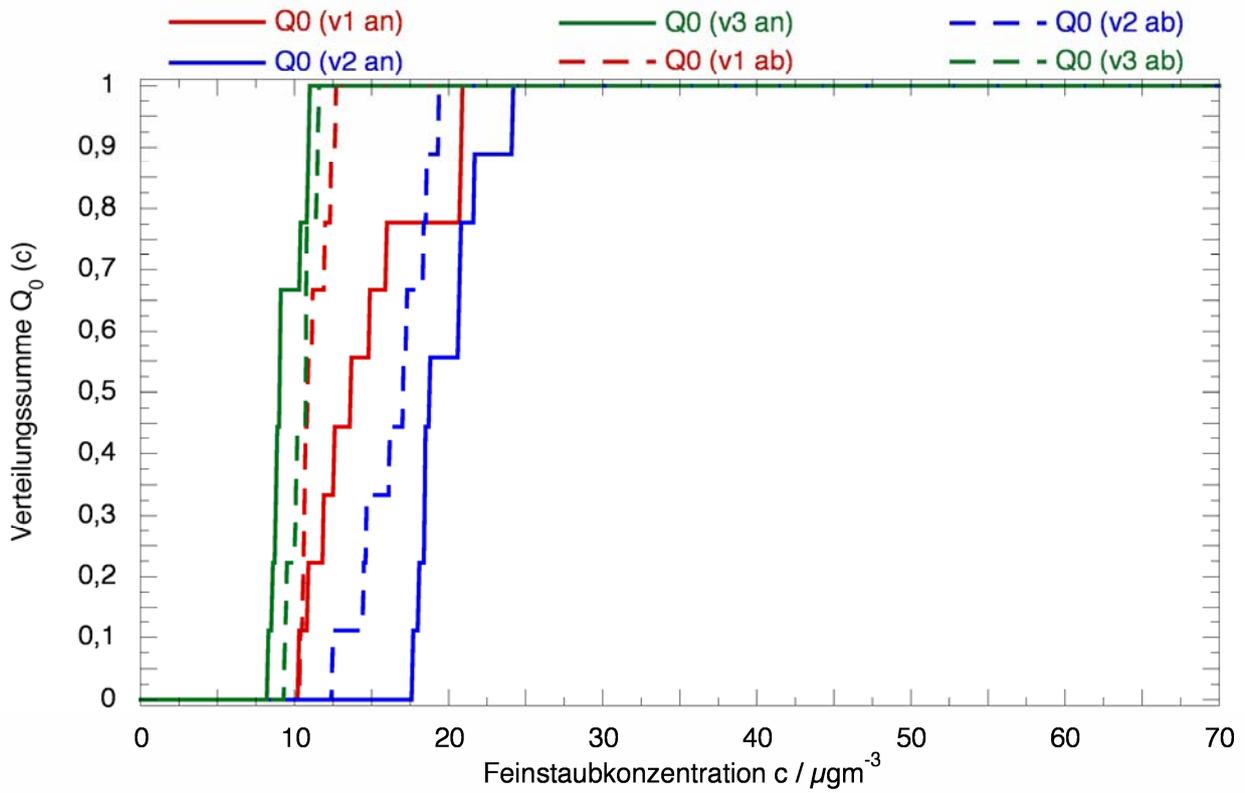


Bild 60: Konzentrationen der Fraktion PM10, Fichte, Breite 3

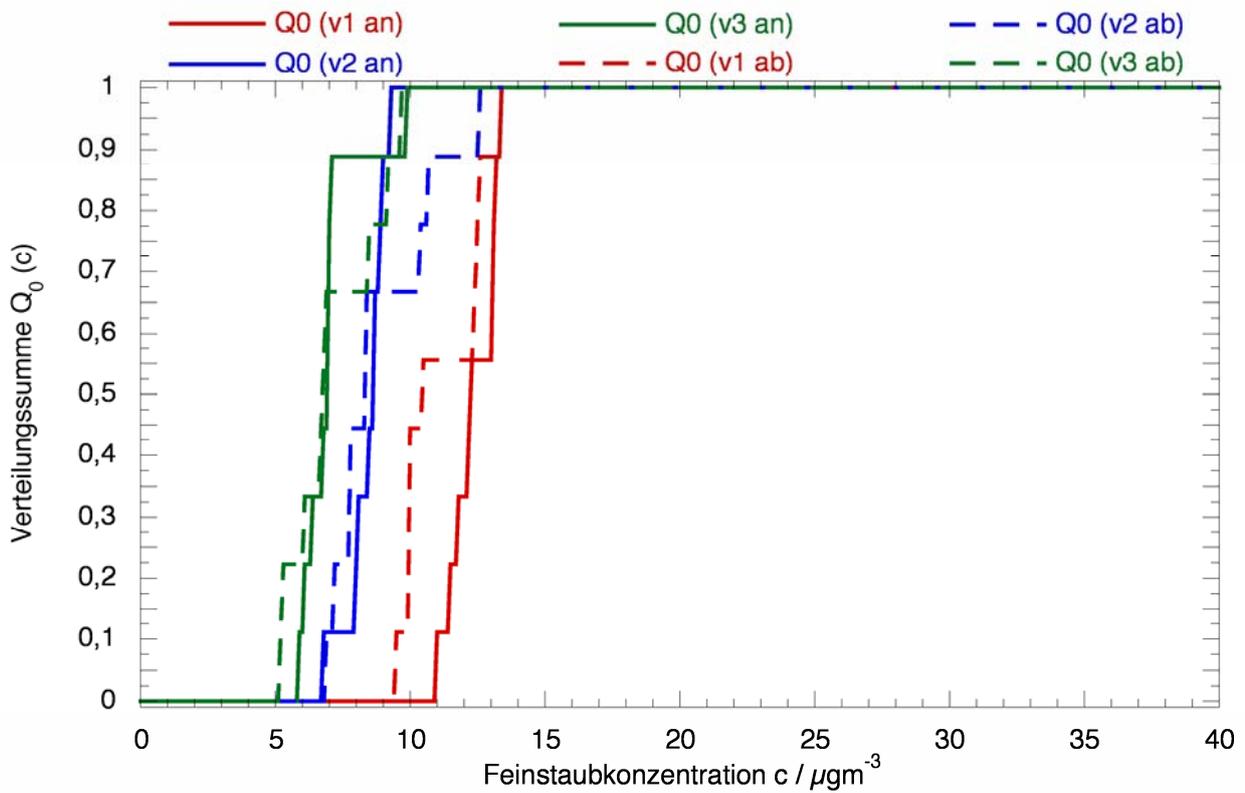


Bild 61: Konzentrationen der Fraktion PM10, Fichte, Höhe 1

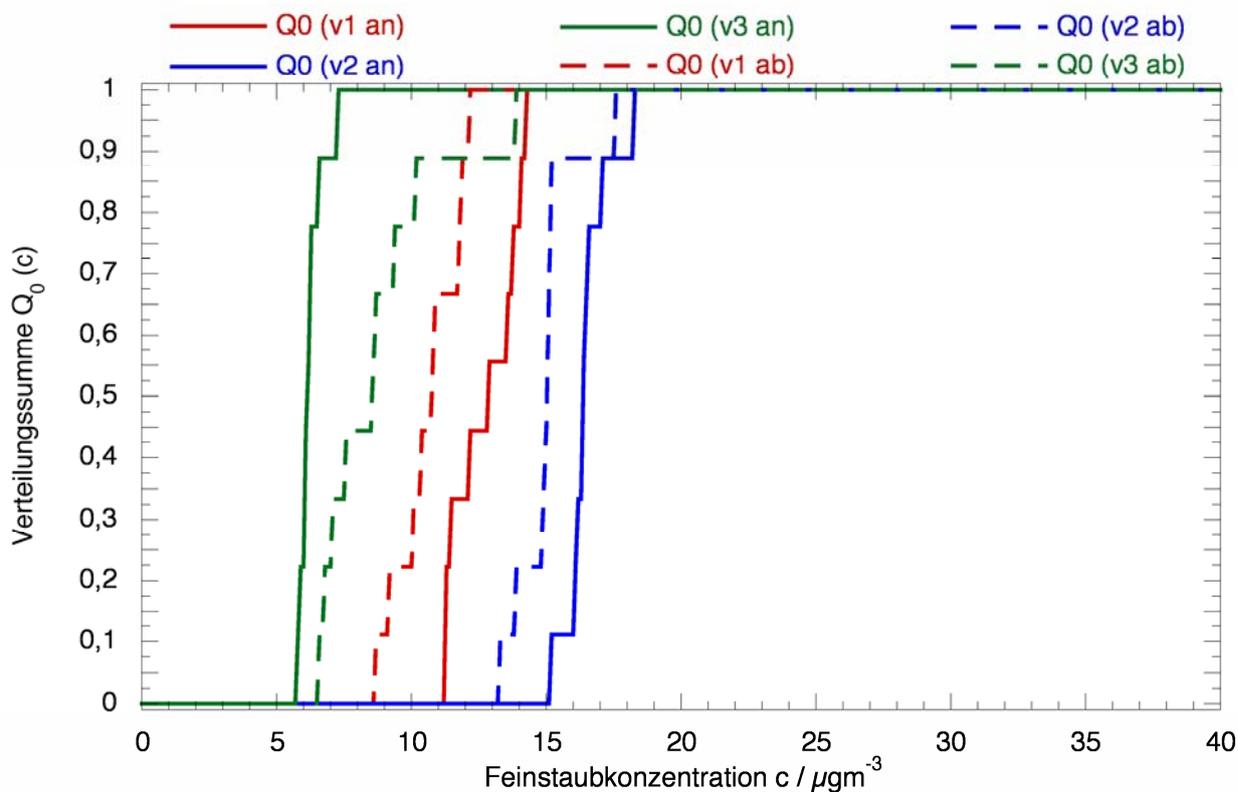


Bild 62: Konzentrationen der Fraktion PM10, Fichte, Höhe 2

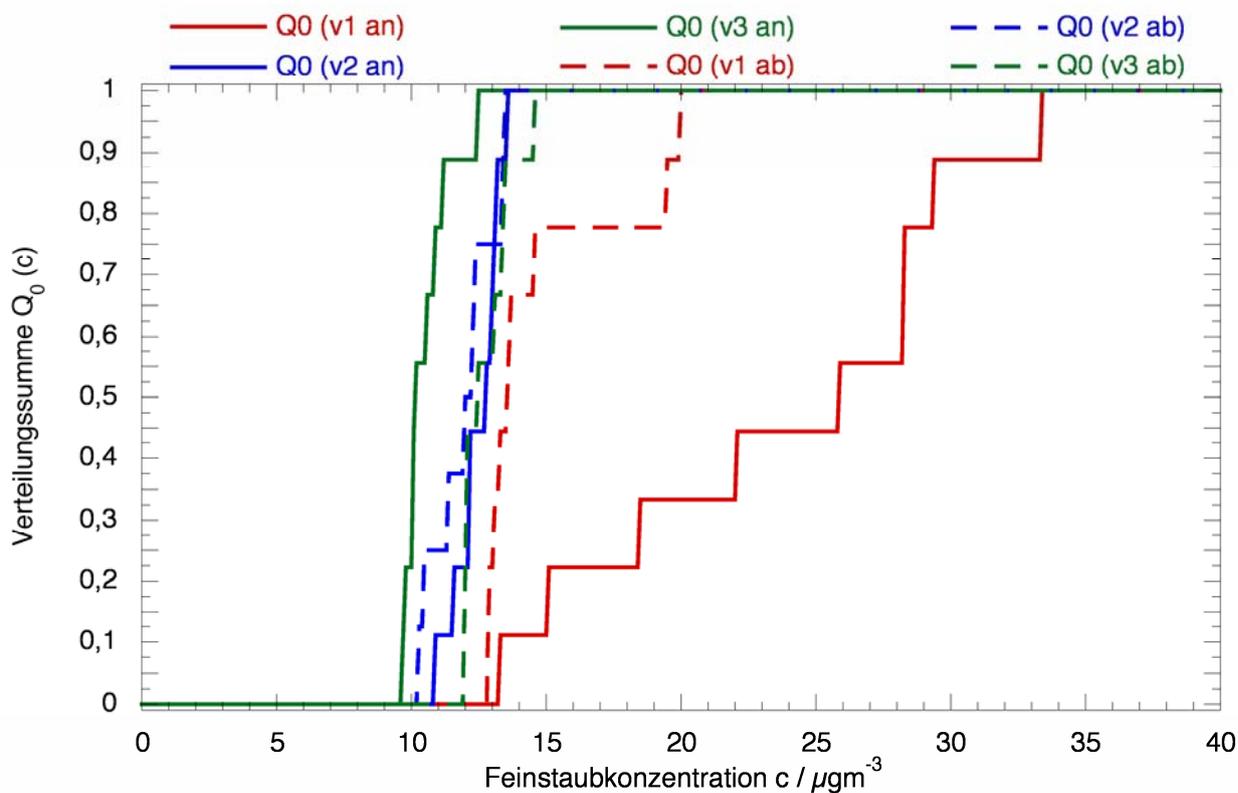


Bild 63: Konzentrationen der Fraktion PM10, Fichte, Höhe 3

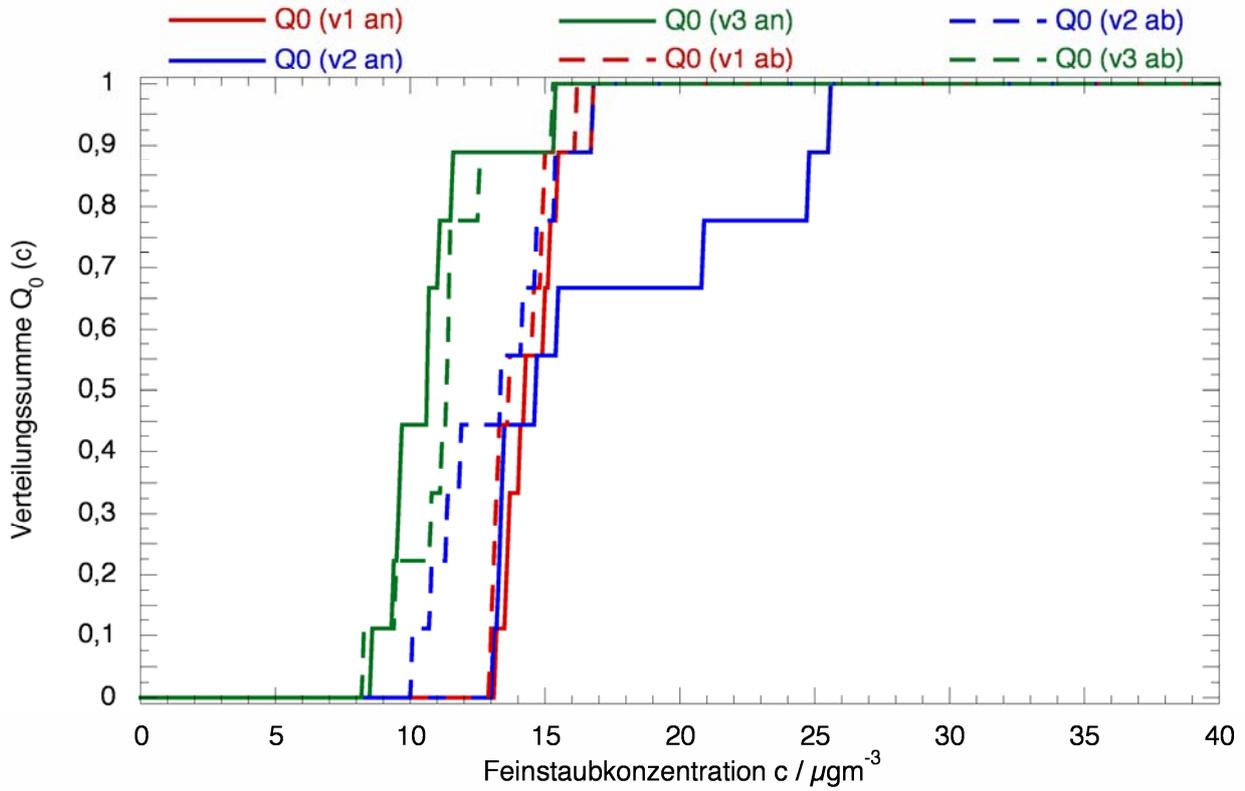


Bild 64: Konzentrationen der Fraktion PM₁₀, Fichte, Porosität 1

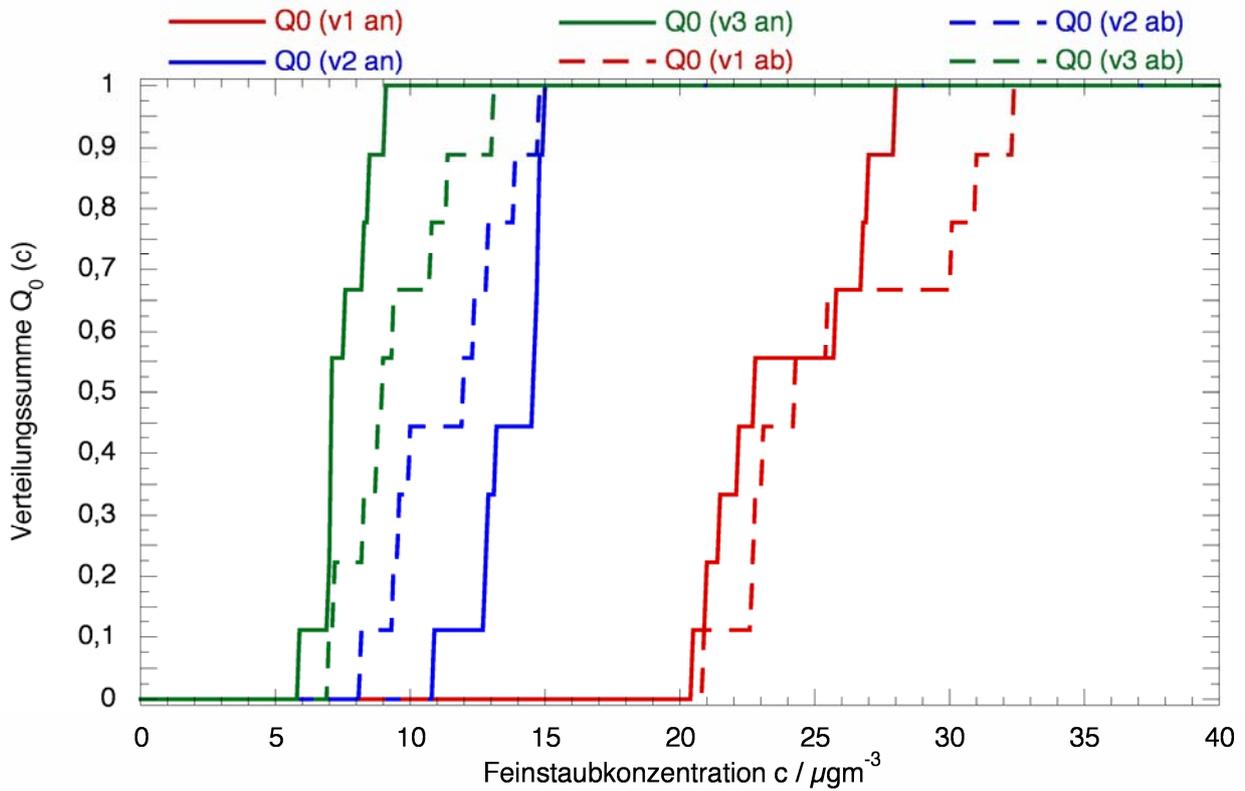


Bild 65: Konzentrationen der Fraktion PM₁₀, Fichte, Porosität 2

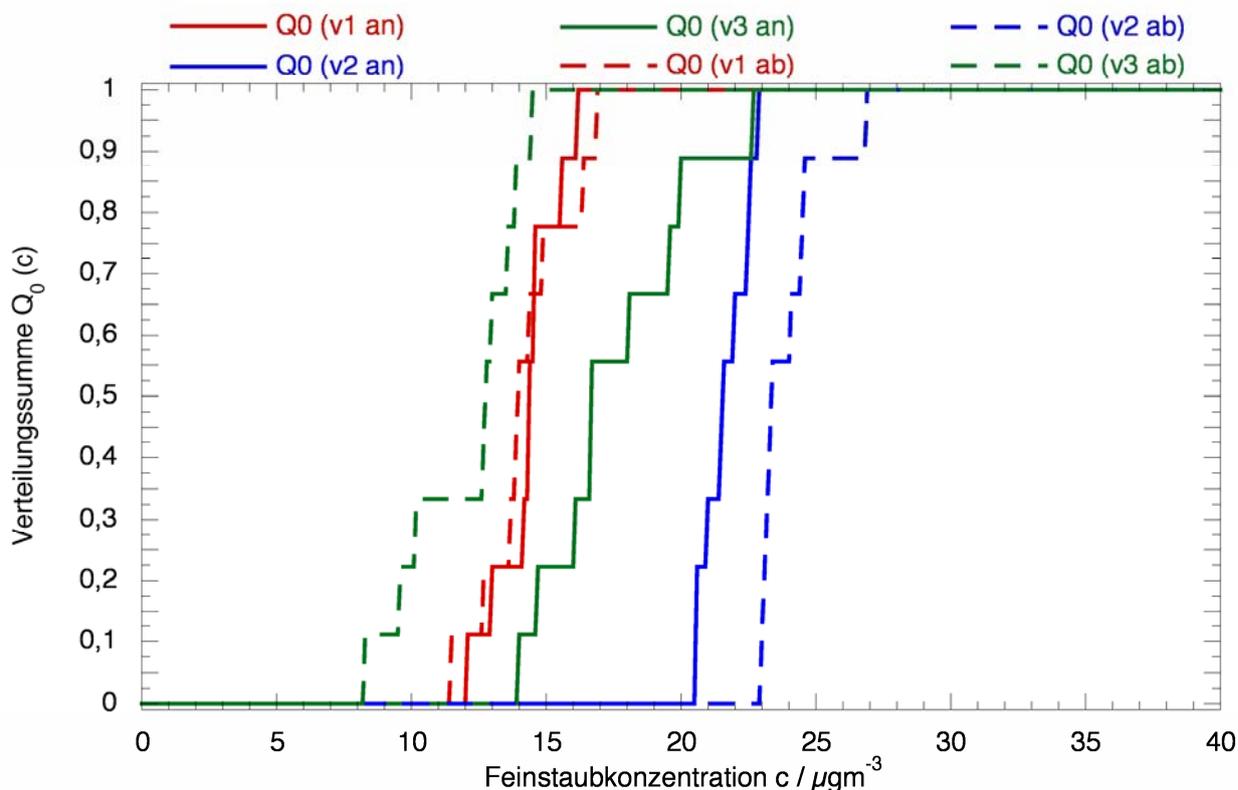


Bild 66: Konzentrationen der Fraktion PM10, Fichte, Porosität 3

Die nachfolgenden Bilder 67 bis 75 zeigen die Ergebnisse der Kirschlorbeer-Messreihen, wiederum mit variierter Breite (Bilder 67 bis 69), Höhe (Bilder 70 bis 72) und Porosität (Bilder 73 bis 75). Wie auch bei den vorangegangenen Messungen mit den Fichten zeigen sich sowohl Erhöhungen wie auch Verringerungen der festgestellten Feinstaubkonzentrationen. Auch hier sind anhand der Daten, die für die Auswertung zur Verfügung ste-

hen, keine Aussagen über die möglichen Ursachen dieser Resultate zu machen. Jedoch zeigen sich beispielsweise in den Bildern 69 und 70 teilweise recht deutliche Verringerungen der Feinstaubkonzentration. Bei anderen Messreihen zeigen sich sowohl Erhöhungen wie auch Verringerungen, abwechselnd mit den Geschwindigkeitsstufen, wie beispielsweise in den Bildern 68, 73 oder 75 zu sehen ist.

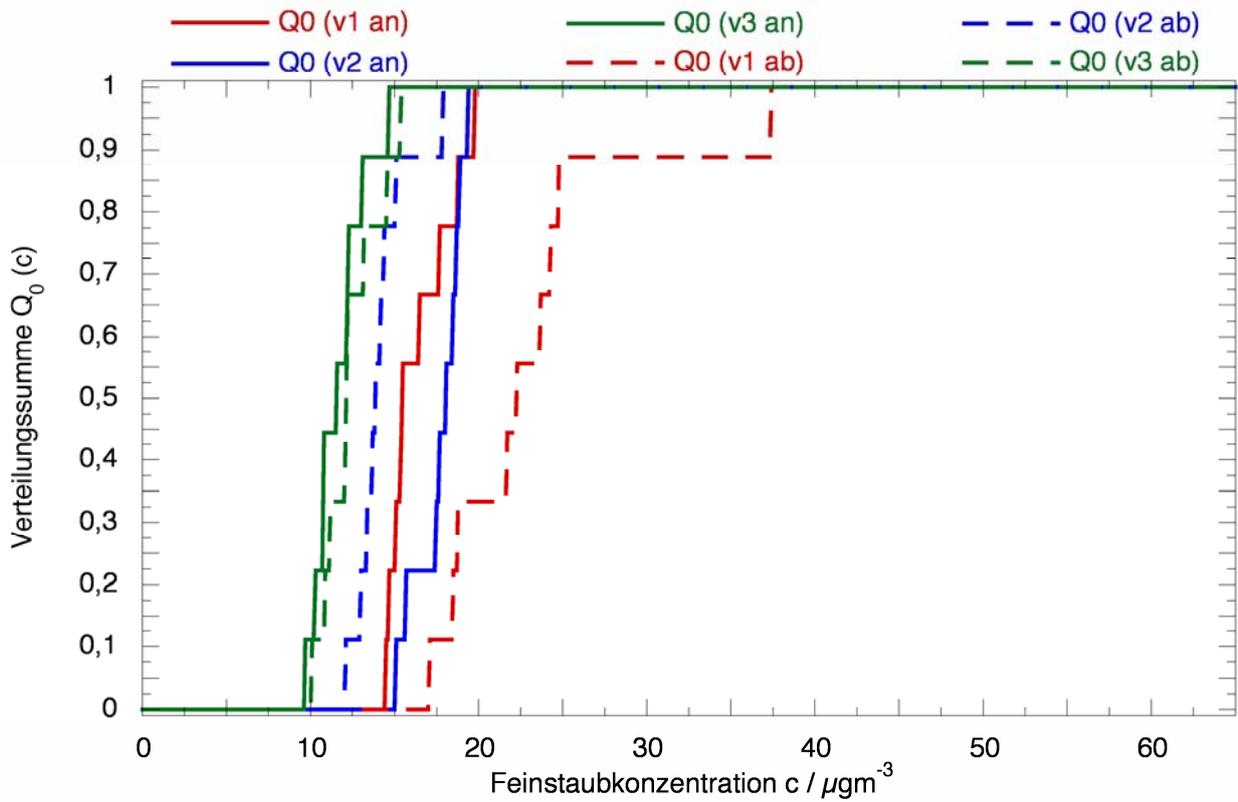


Bild 67: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschlorbeer, Breite 1

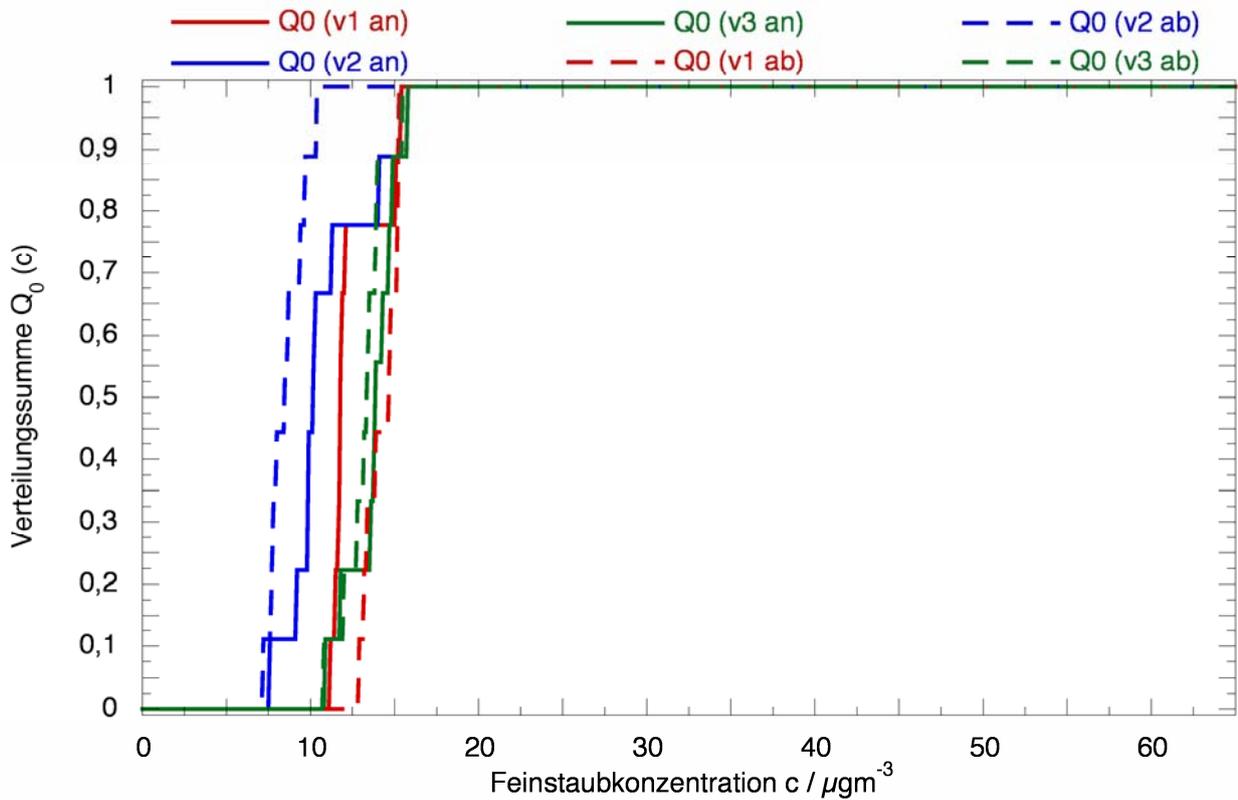


Bild 68: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschlorbeer, Breite 2

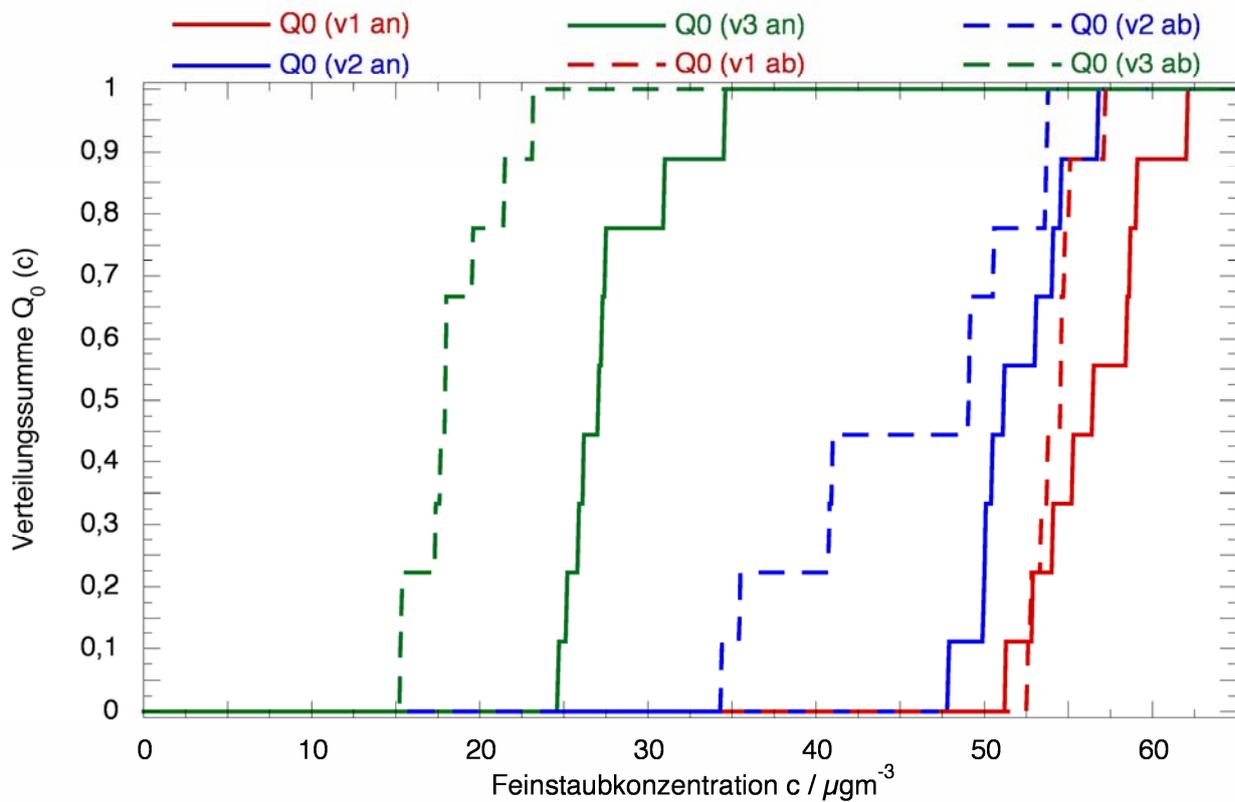


Bild 69: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschchlorbeer, Breite 3

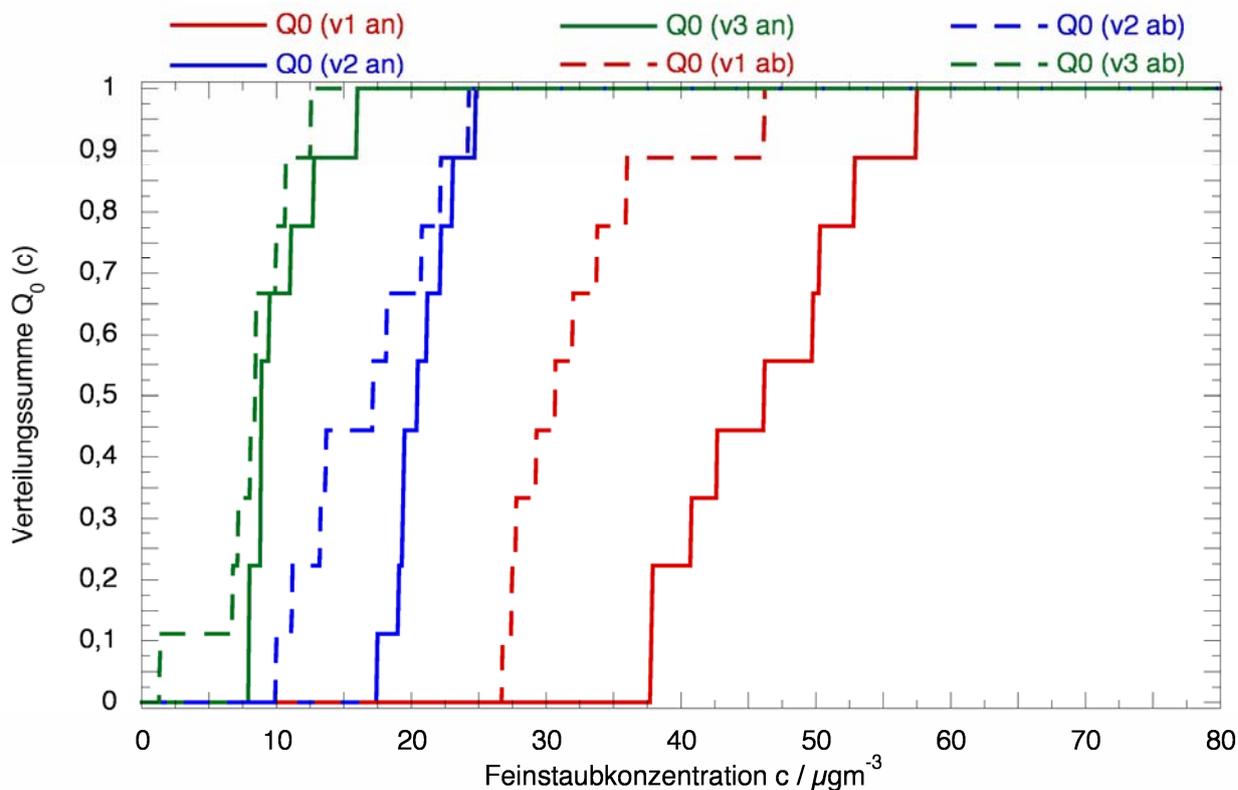


Bild 70: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschchlorbeer, Höhe 1

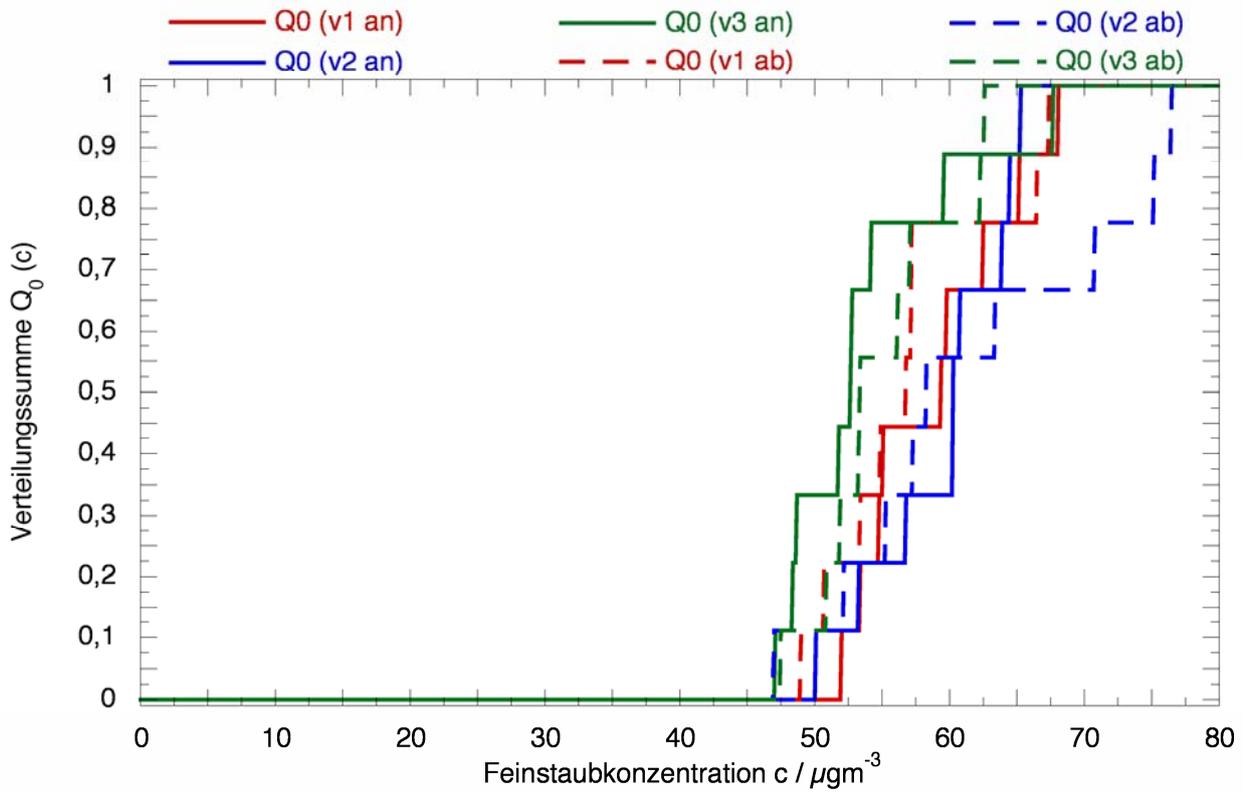


Bild 71: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschlorbeer, Höhe 2

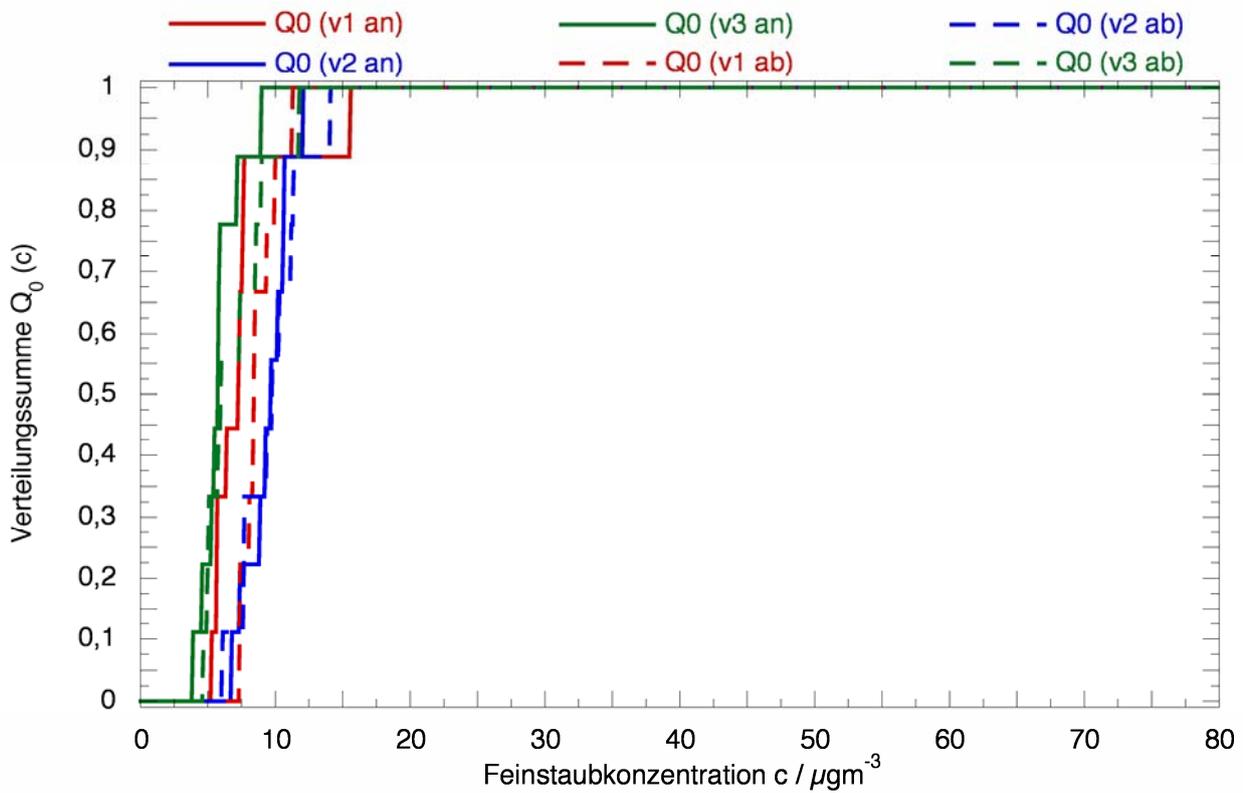


Bild 72: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschlorbeer, Höhe 3

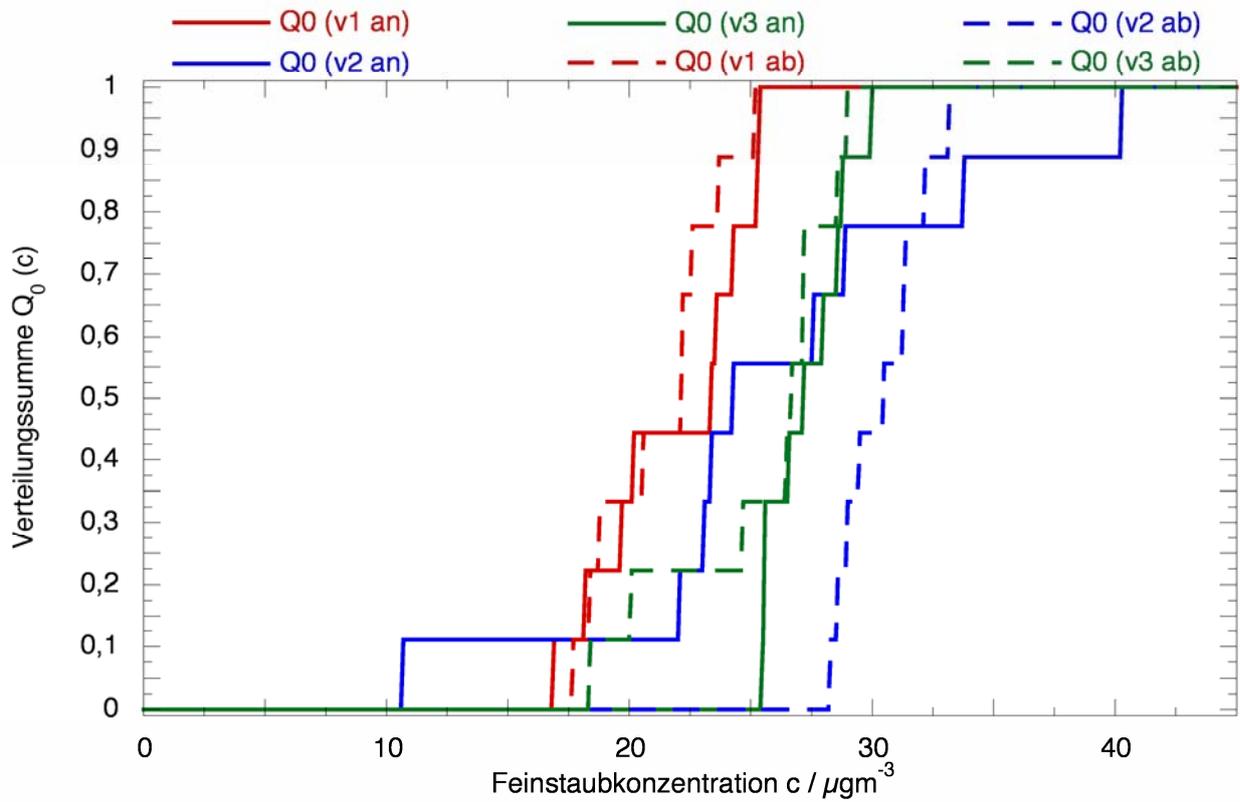


Bild 73: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschchlorbeer, Porosität 1

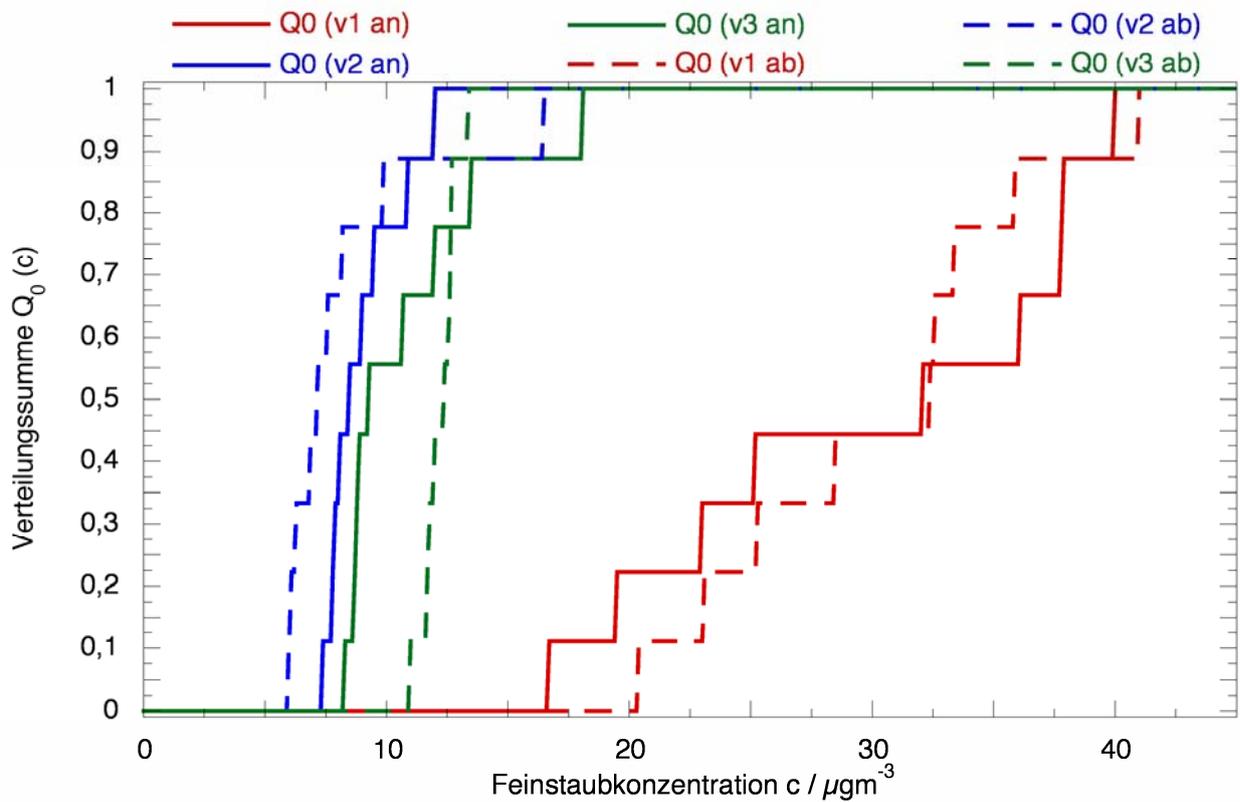


Bild 74: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschchlorbeer, Porosität 2

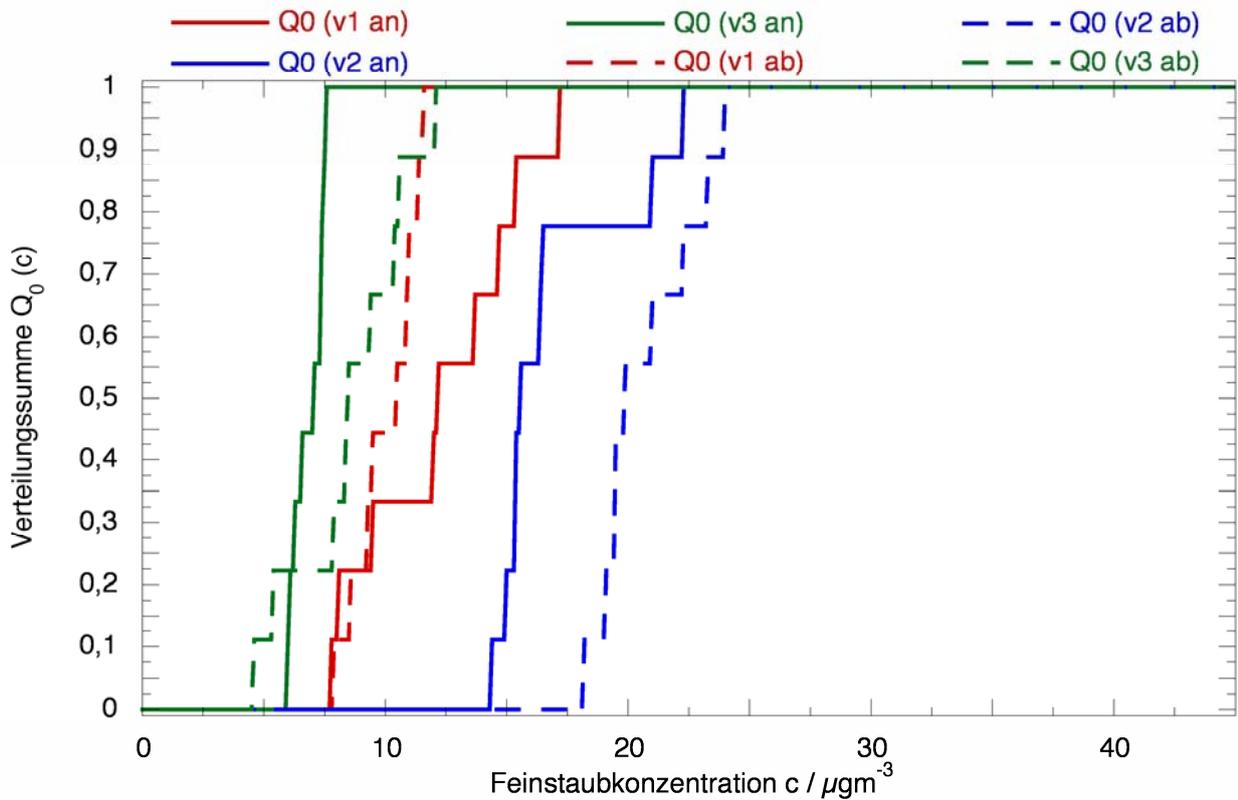


Bild 75: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kirschlorbeer, Porosität 3

Im Folgenden werden die durchgeführten Messreihen mit den abiotischen Alternativen Kokosfaser-Netz, Polyester-Filz und Windschutznetz dargestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen des Kokosfaser-Netzes sind in den Bildern 76 bis 84 zu sehen, die Ergebnisse zu den Messungen mit Polyester-Filz in den Bildern 78 bis 86 und die Resultate der Messreihen des Windschutznetzes werden in den Bildern 94 bis 102 dargestellt.

Auch bei diesen Messreihen zeigen sich Erhöhungen wie auch Verminderungen der beobachteten

Feinstaubkonzentrationen, die auch hier ohne konkreten Erklärungsansatz bleiben müssen. Allerdings überwiegen im Gegensatz zu den pflanzlichen Versuchsobjekten hier die Messreihen, in denen eine Verringerung der Feinstaubkonzentration hinter den Versuchsobjekten zu verzeichnen ist. Solche Fälle sind beispielsweise in den Bildern 88, 93 und 101 zu sehen.

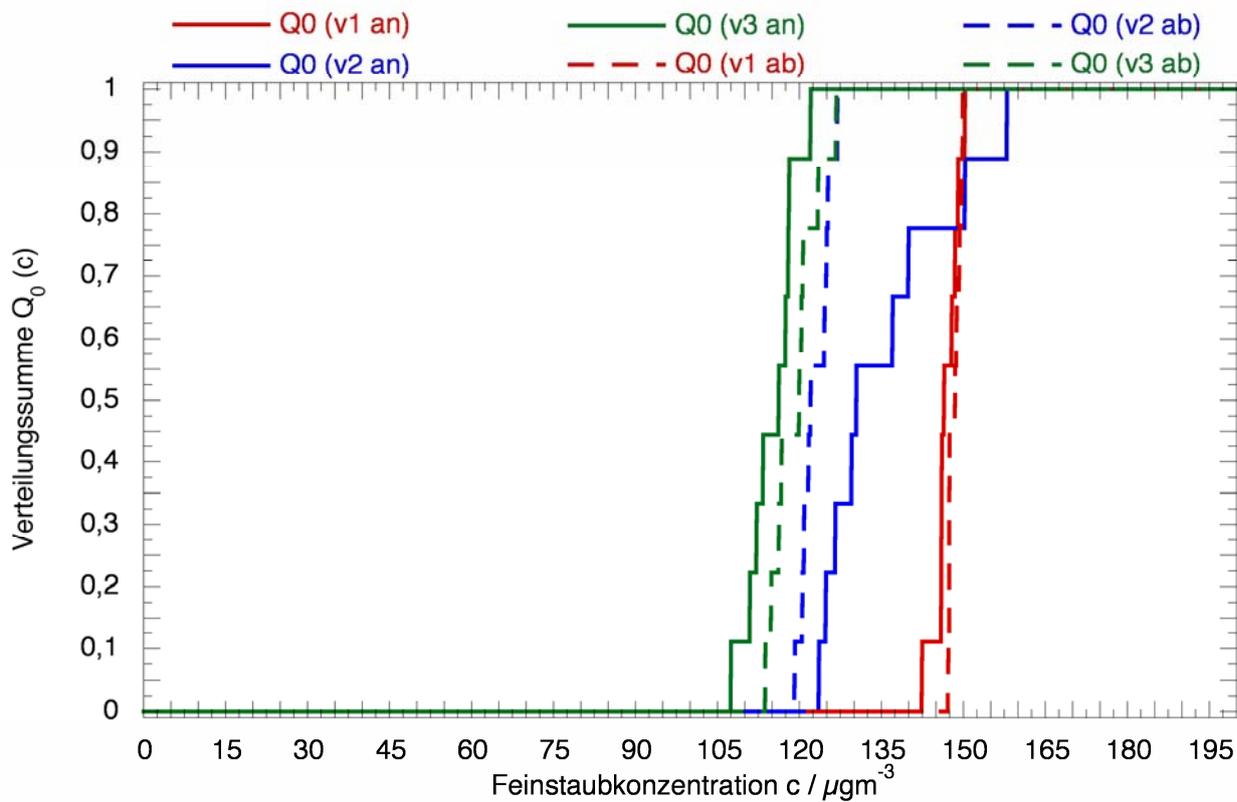


Bild 76: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Breite 1

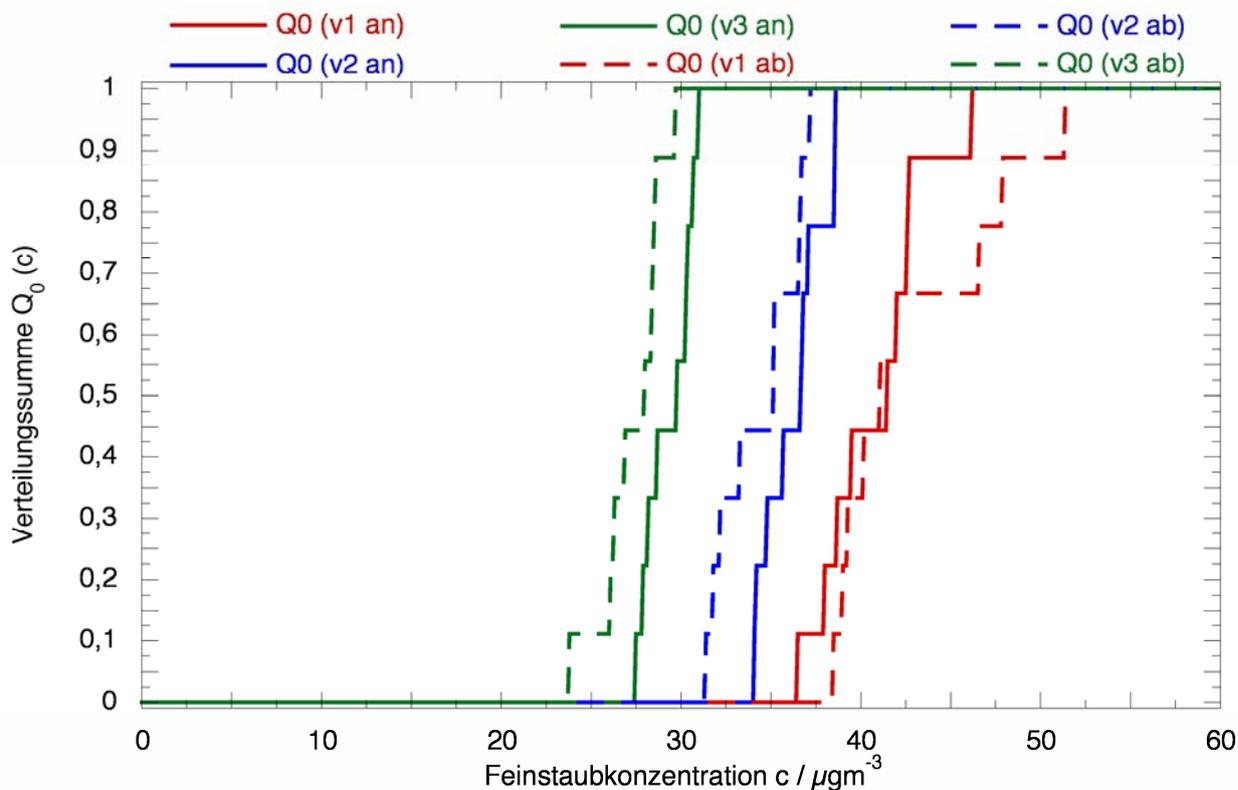


Bild 77: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Breite 2

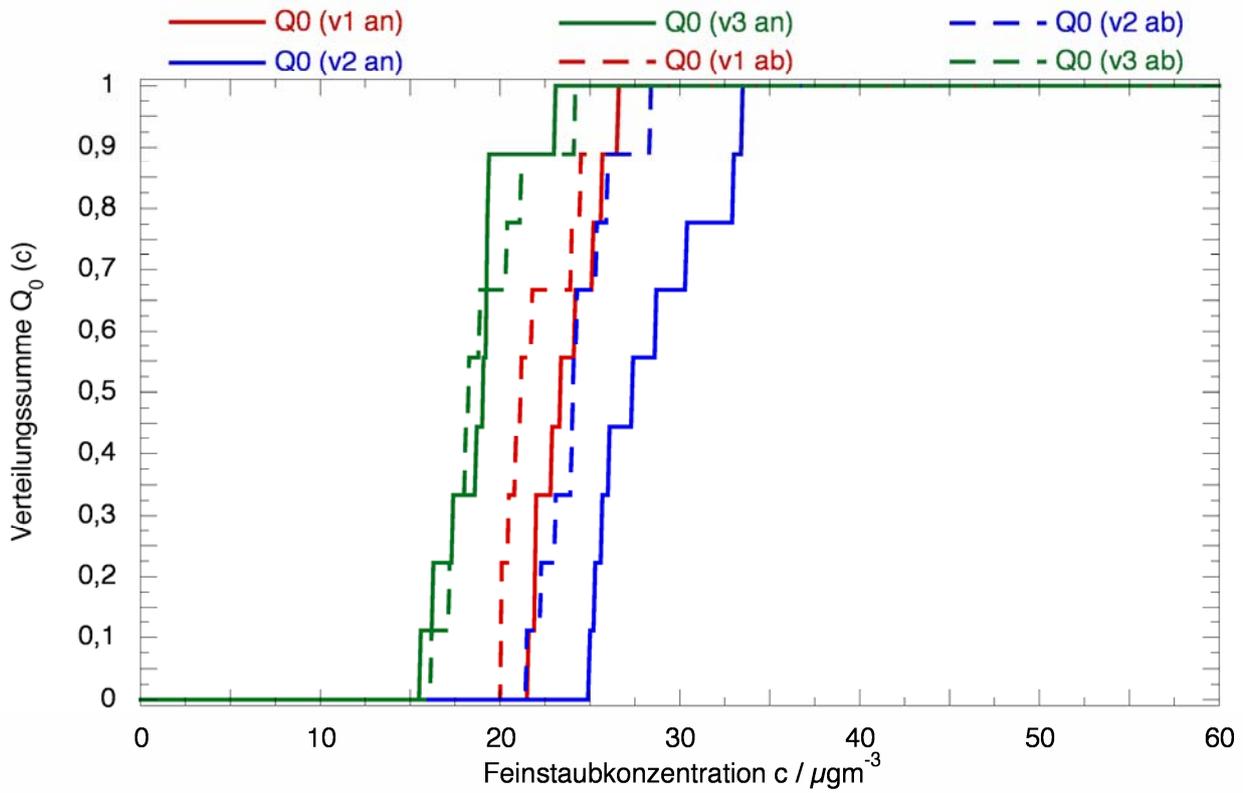


Bild 78: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Breite 3

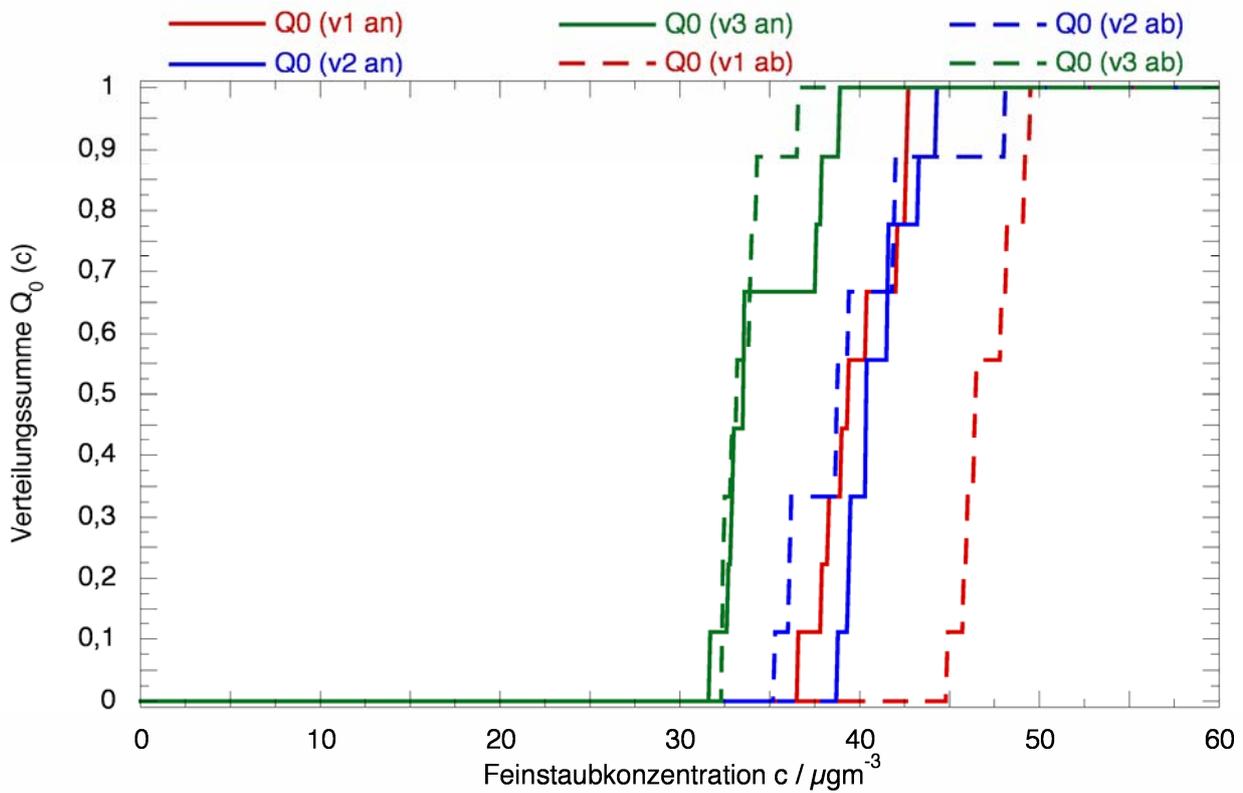


Bild 79: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Höhe 1

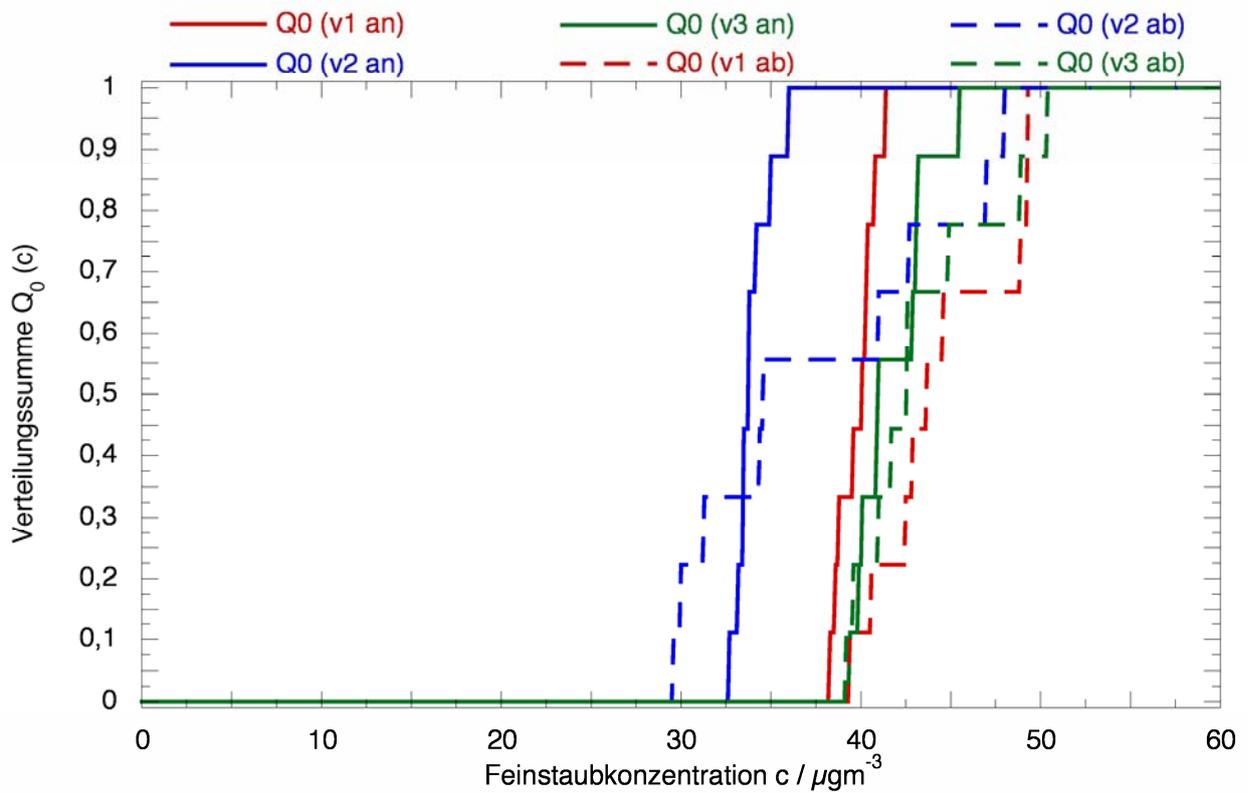


Bild 80: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Höhe 2

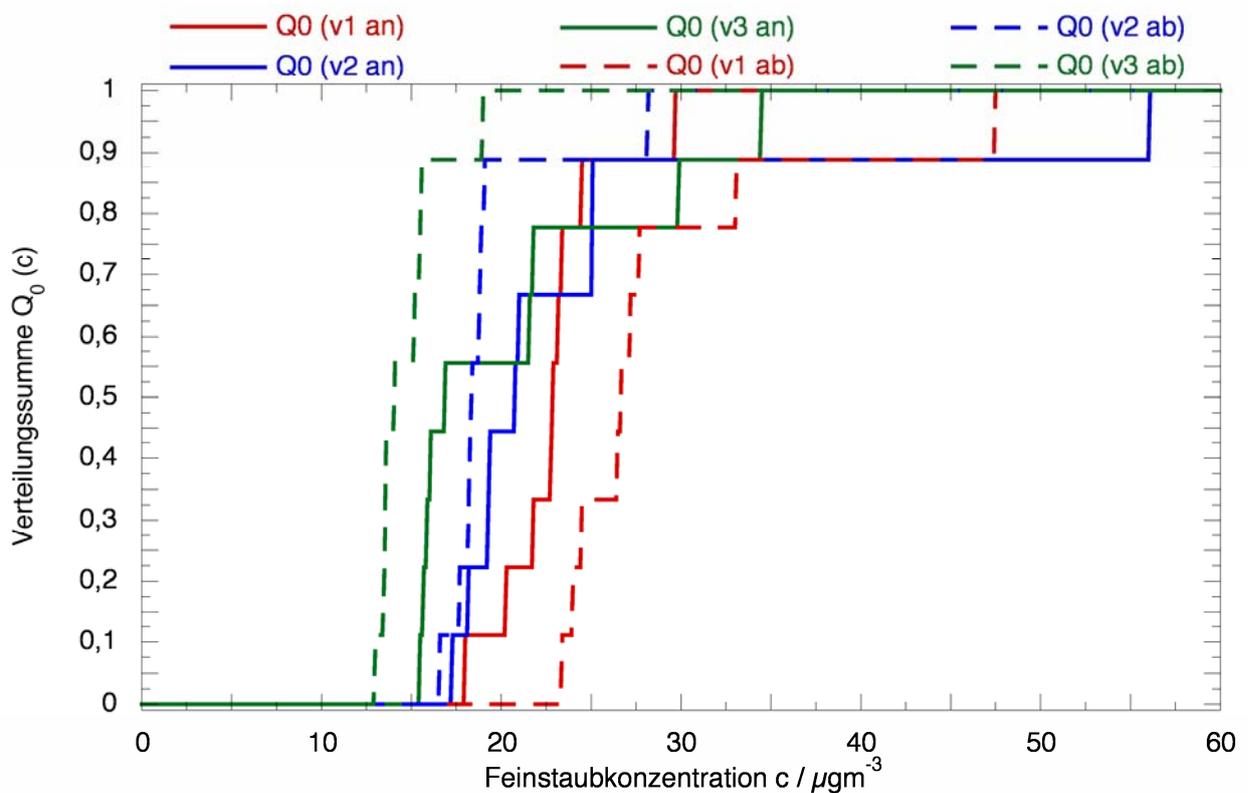


Bild 81: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Höhe 3

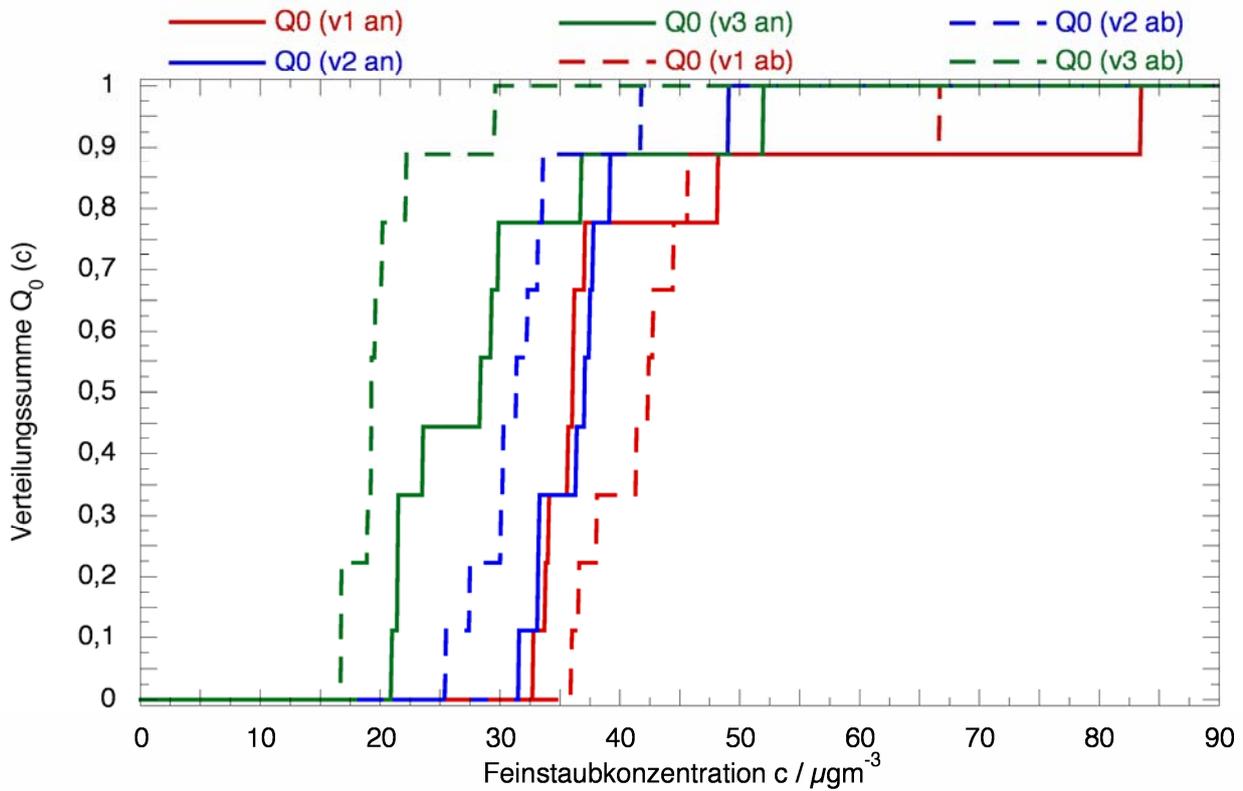


Bild 82: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Porosität 1

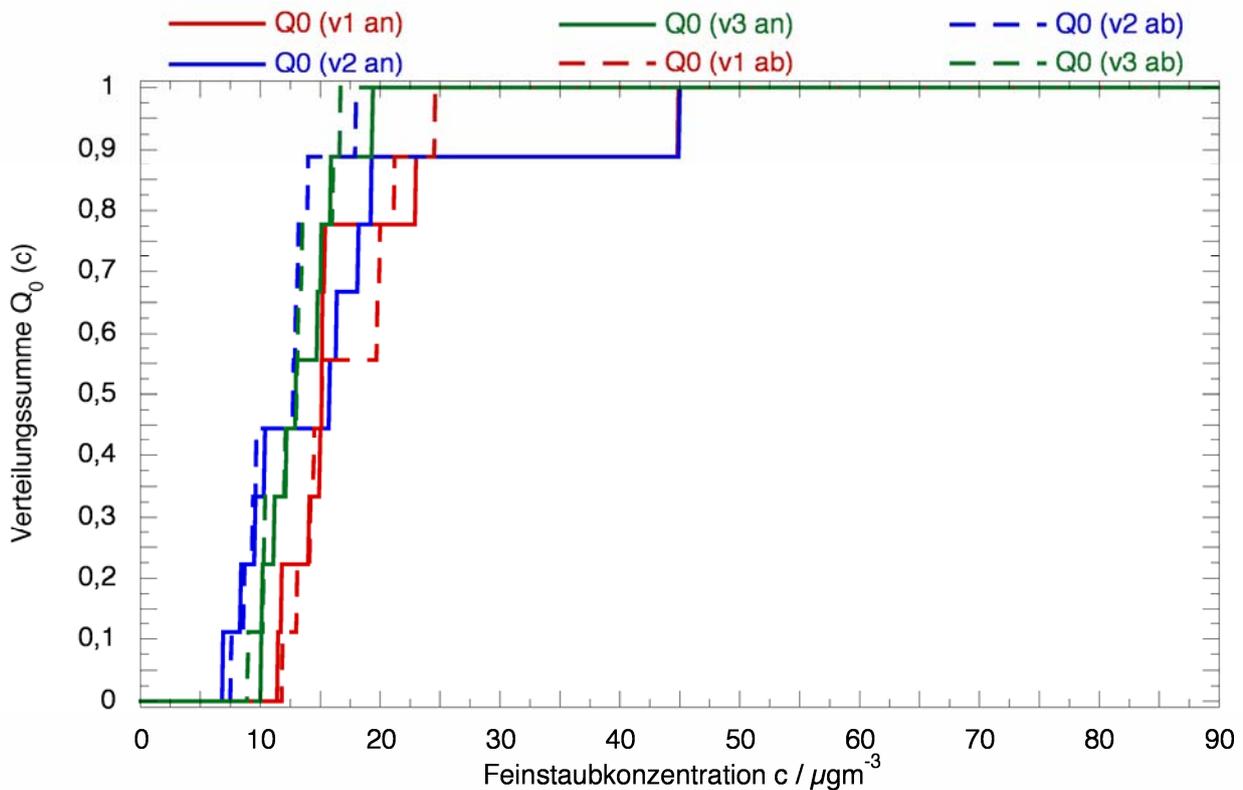


Bild 83: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Porosität 2

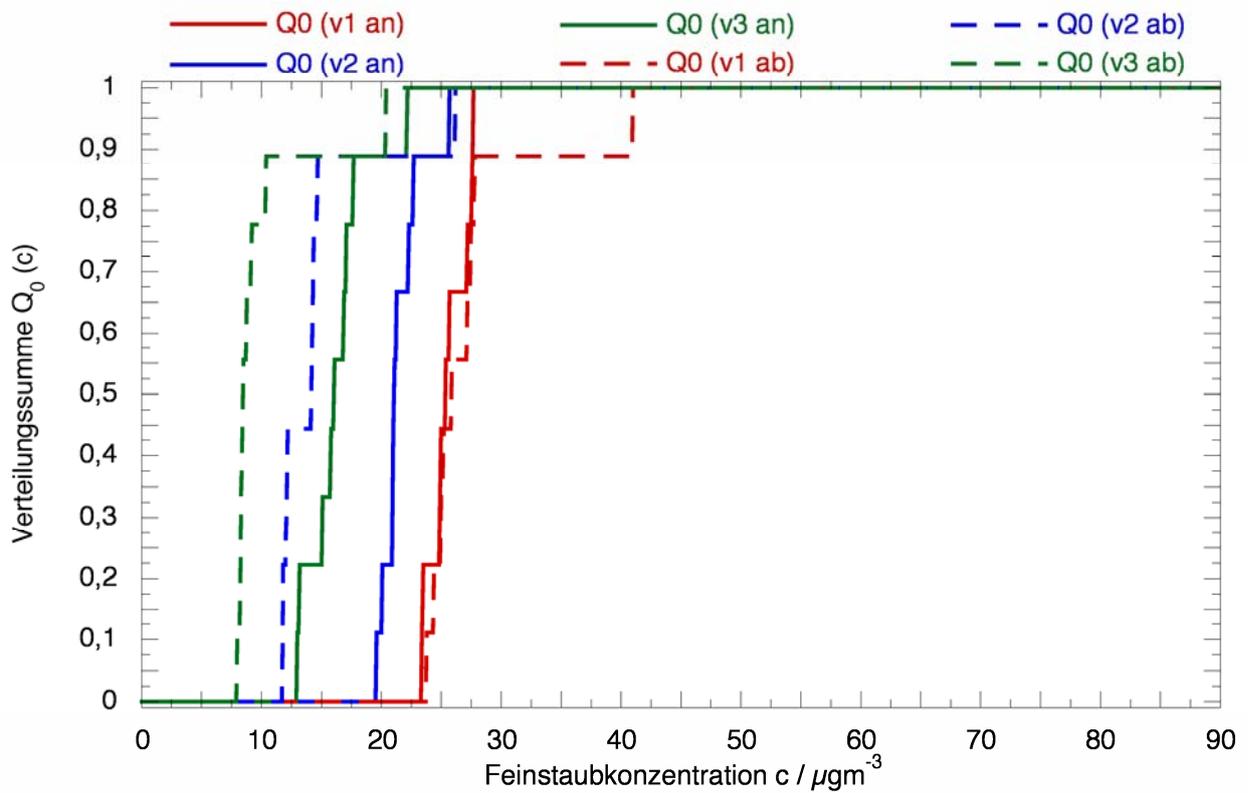


Bild 84: Konzentrationen der Fraktion PM10, Kokosfaser-Netz, Porosität 3

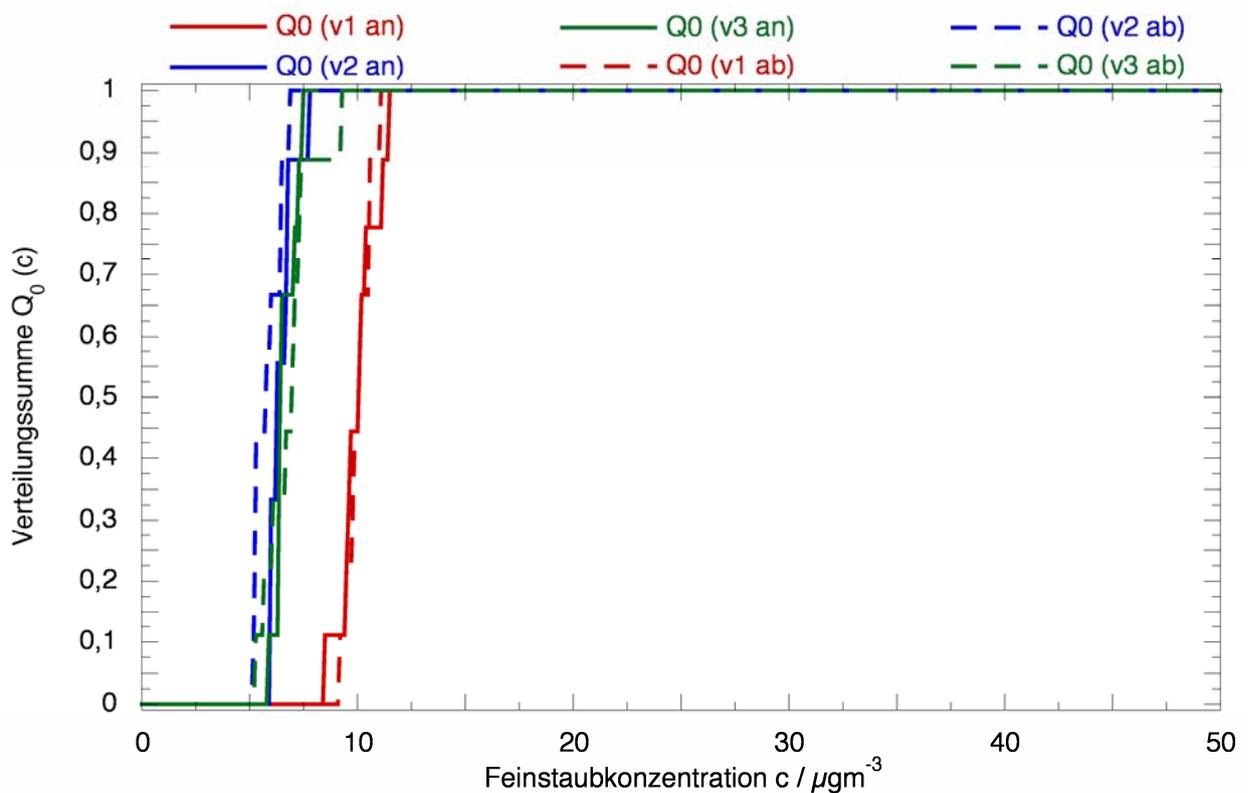


Bild 85: Konzentrationen der Fraktion PM10, Polyester-Filz, Breite 1

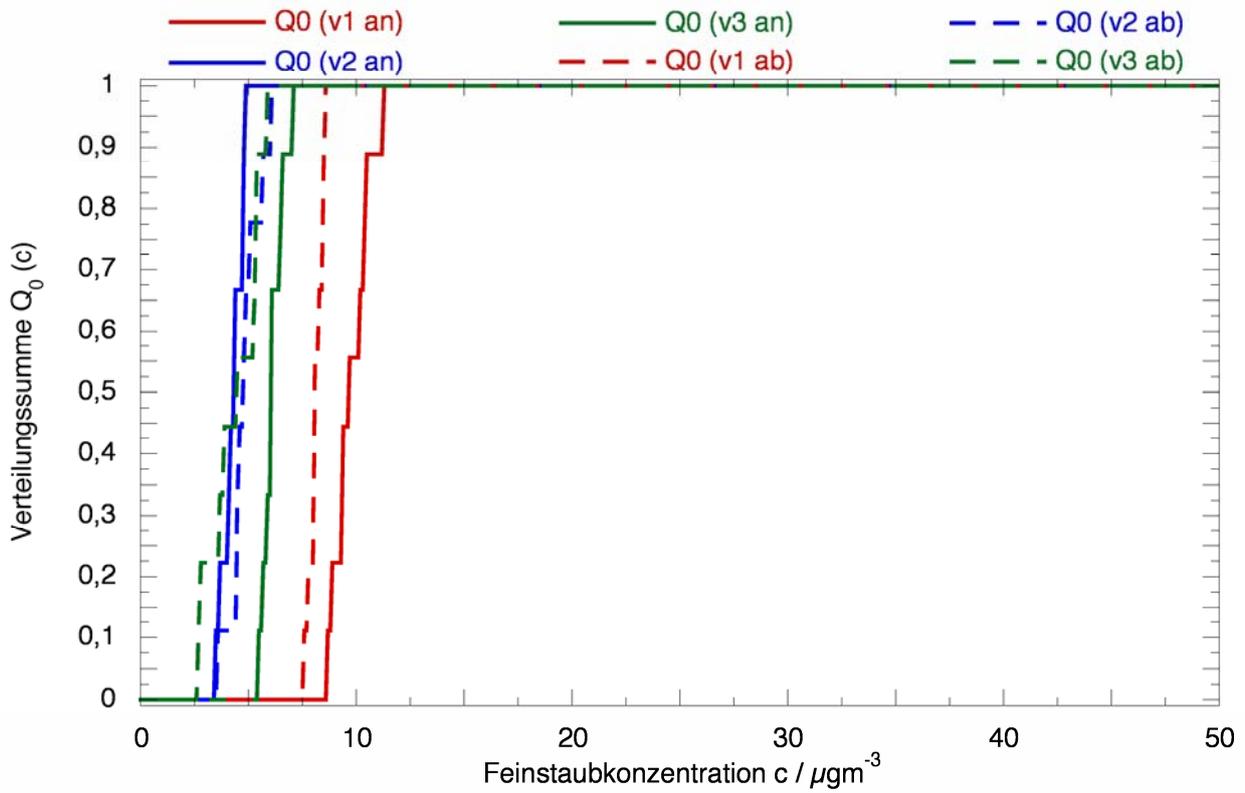


Bild 86: Konzentrationen der Fraktion PM10, Polyester-Filz, Breite 2

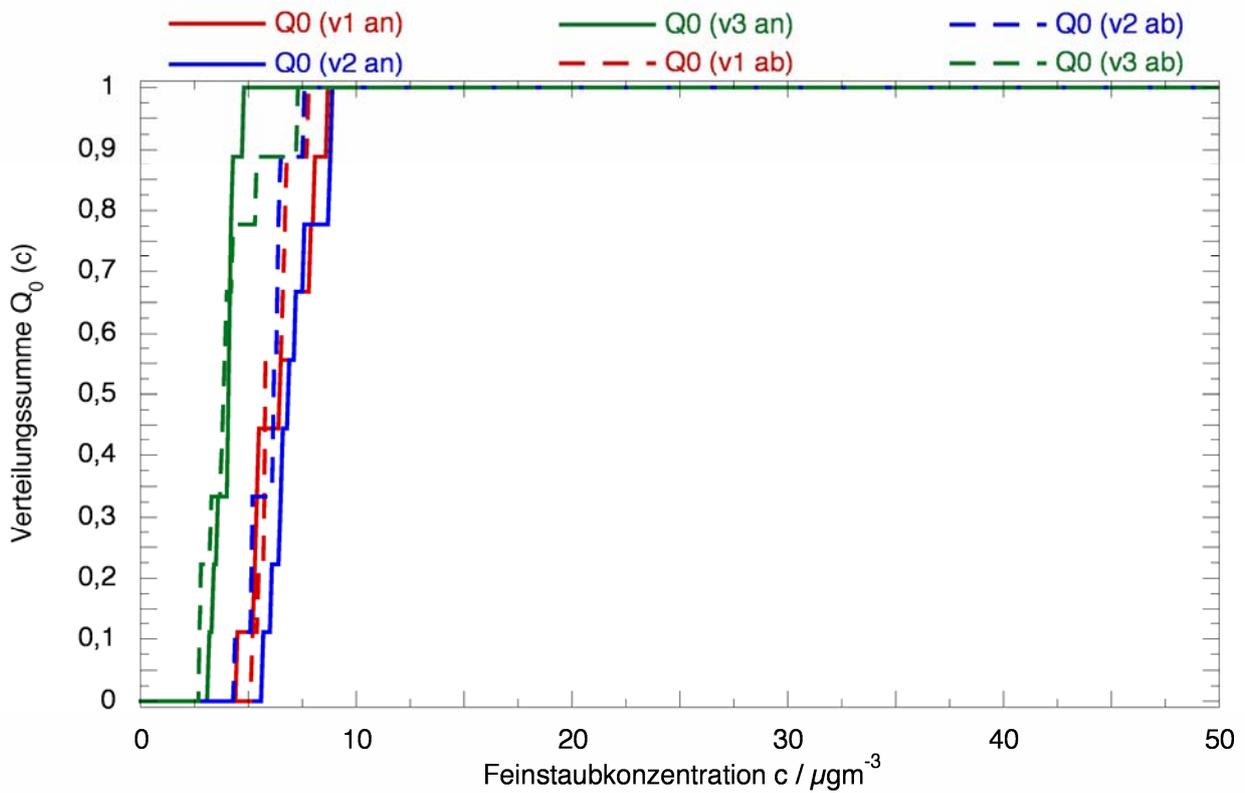


Bild 87: Konzentrationen der Fraktion PM10, Polyester-Filz, Breite 3

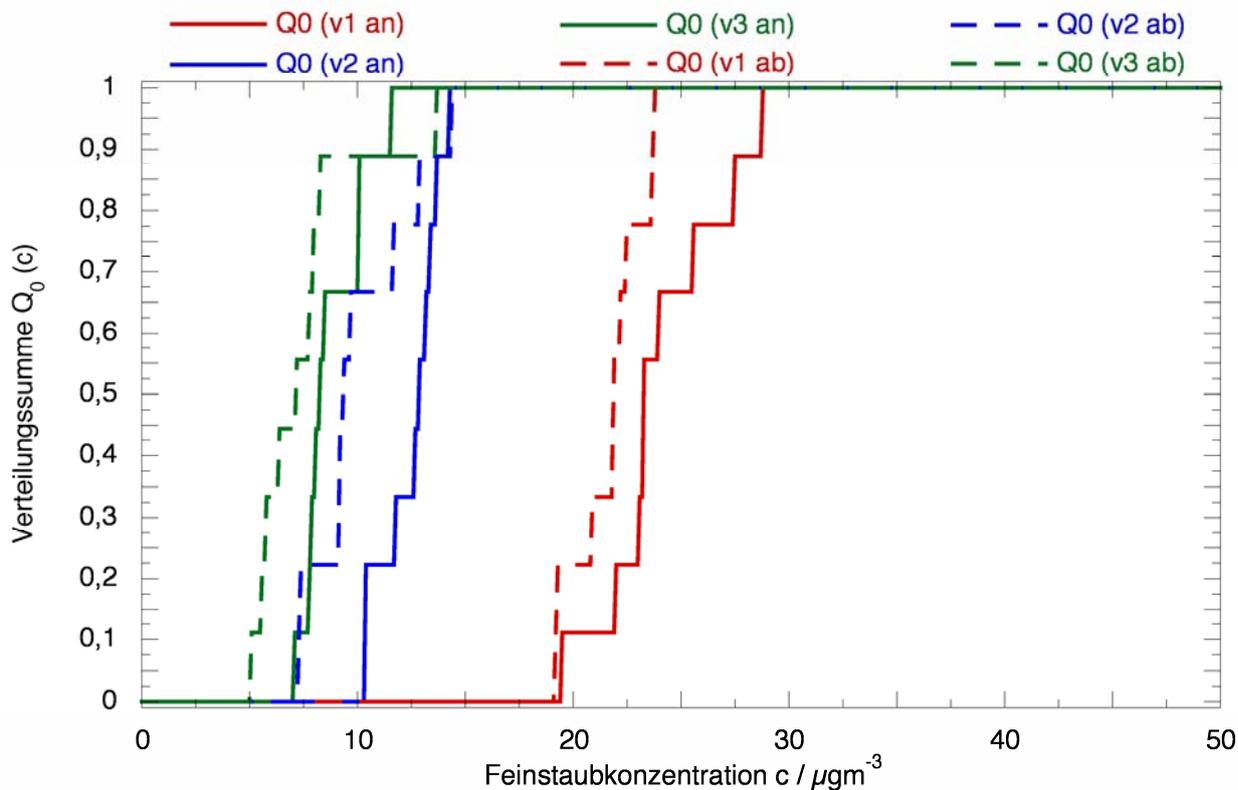


Bild 88: Konzentrationen der Fraktion PM10, Polyester-Filz, Höhe 1

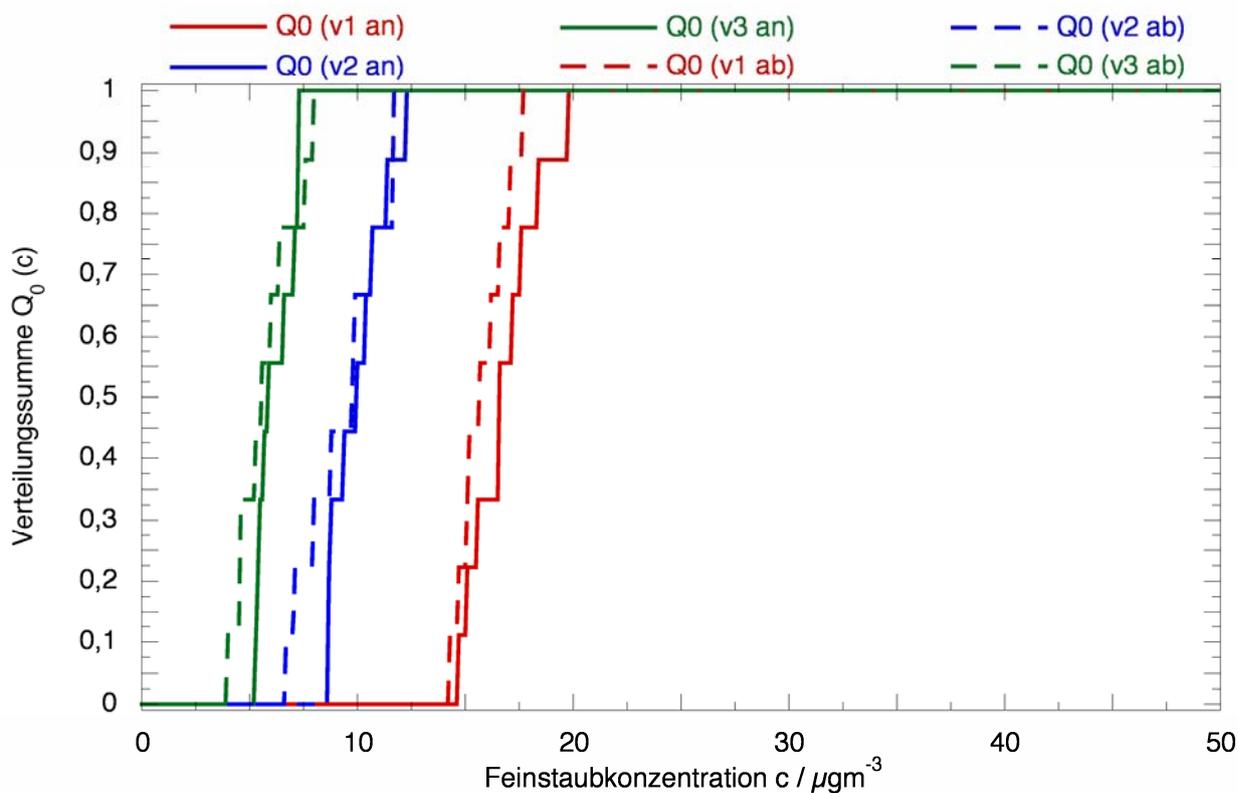


Bild 89: Konzentrationen der Fraktion PM10, Polyester-Filz, Höhe 2

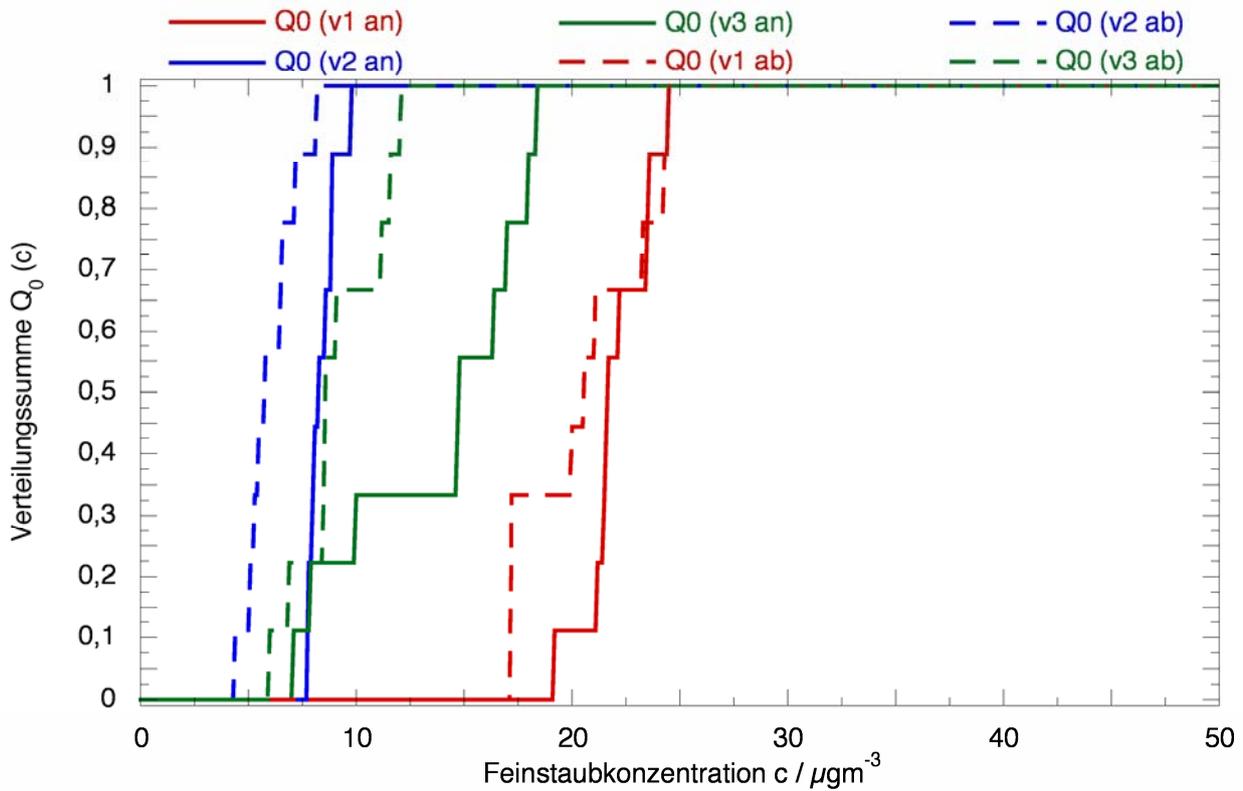


Bild 90: Konzentrationen der Fraktion PM₁₀, Polyester-Filz, Höhe 3

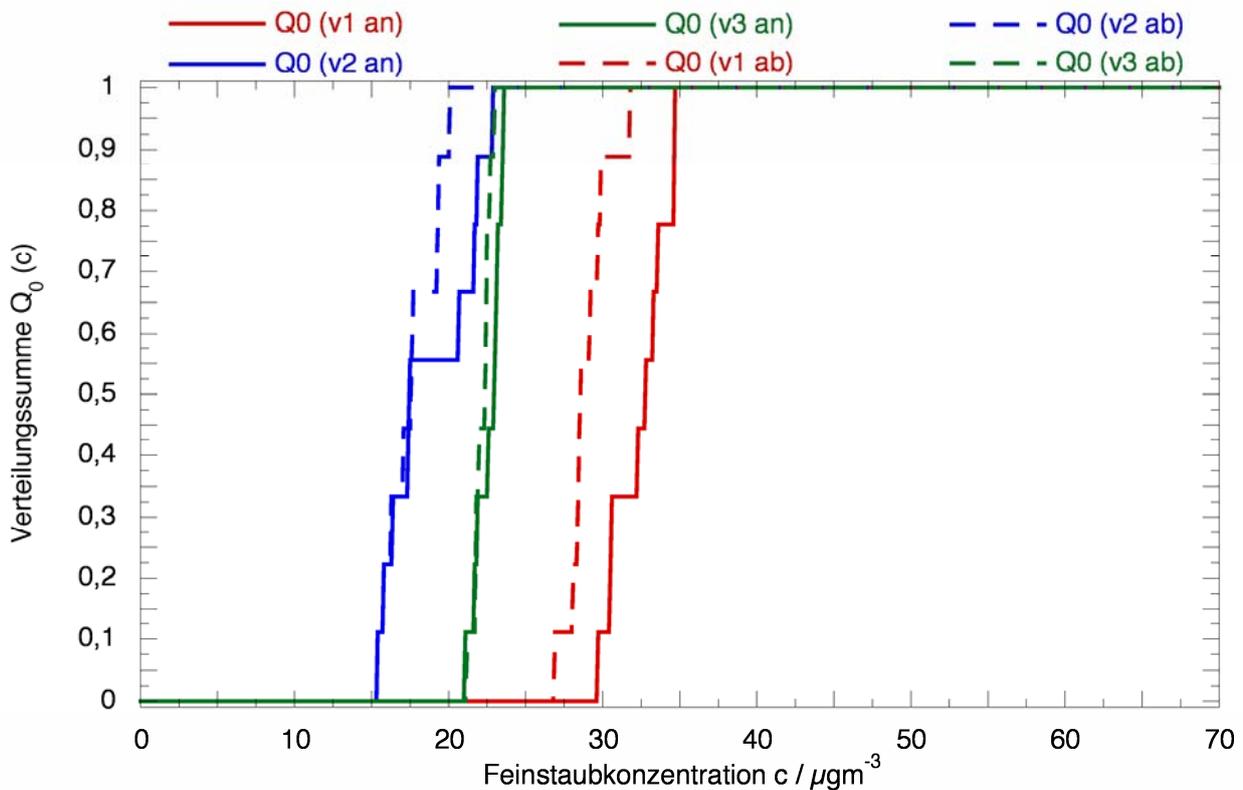


Bild 91: Konzentrationen der Fraktion PM₁₀, Polyester-Filz, Porosität 1

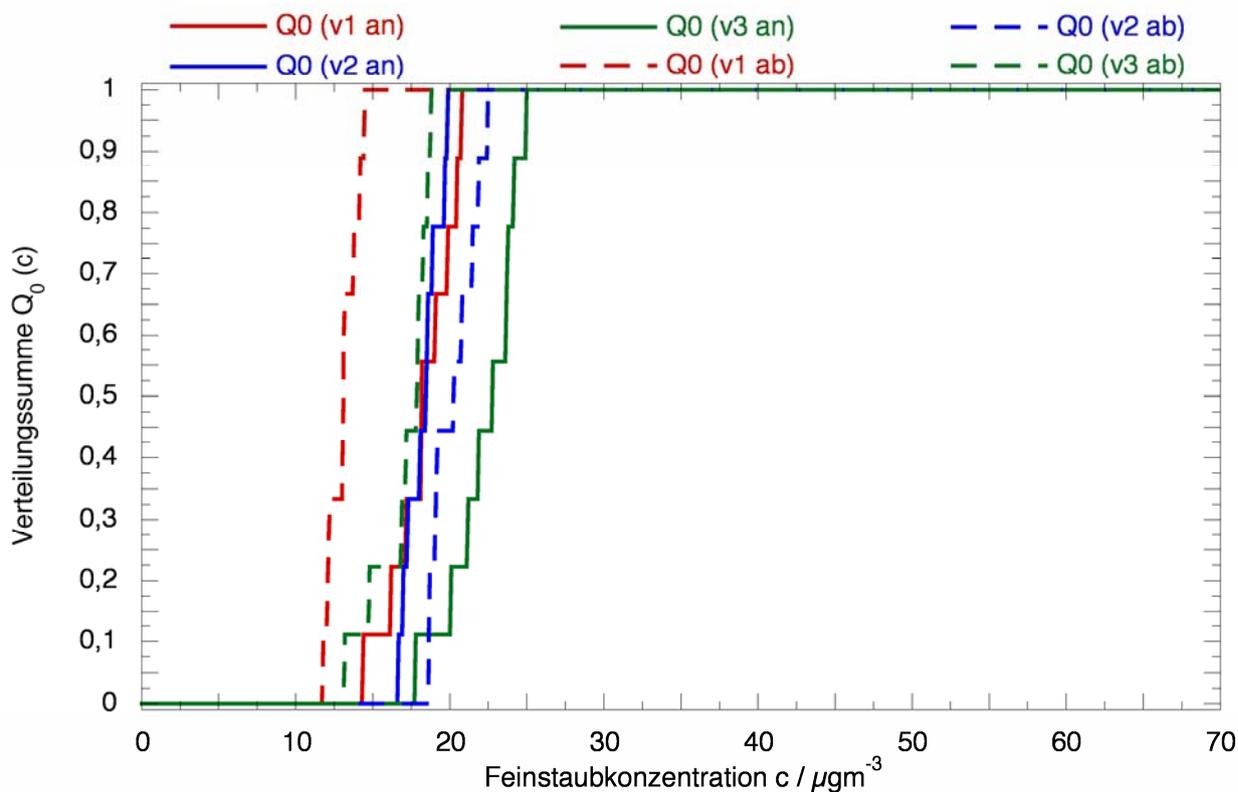


Bild 92: Konzentrationen der Fraktion PM10, Polyester-Filz, Porosität 2

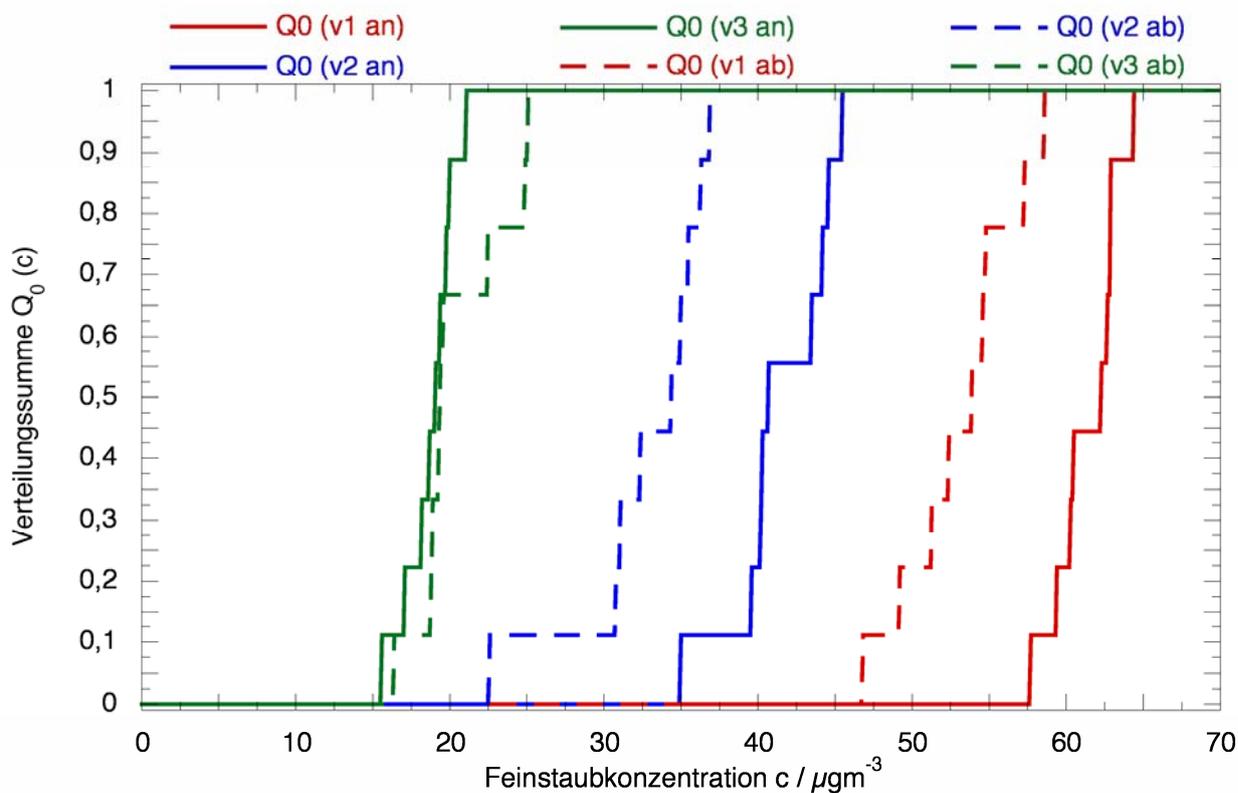


Bild 93: Konzentrationen der Fraktion PM10, Polyester-Filz, Porosität 3

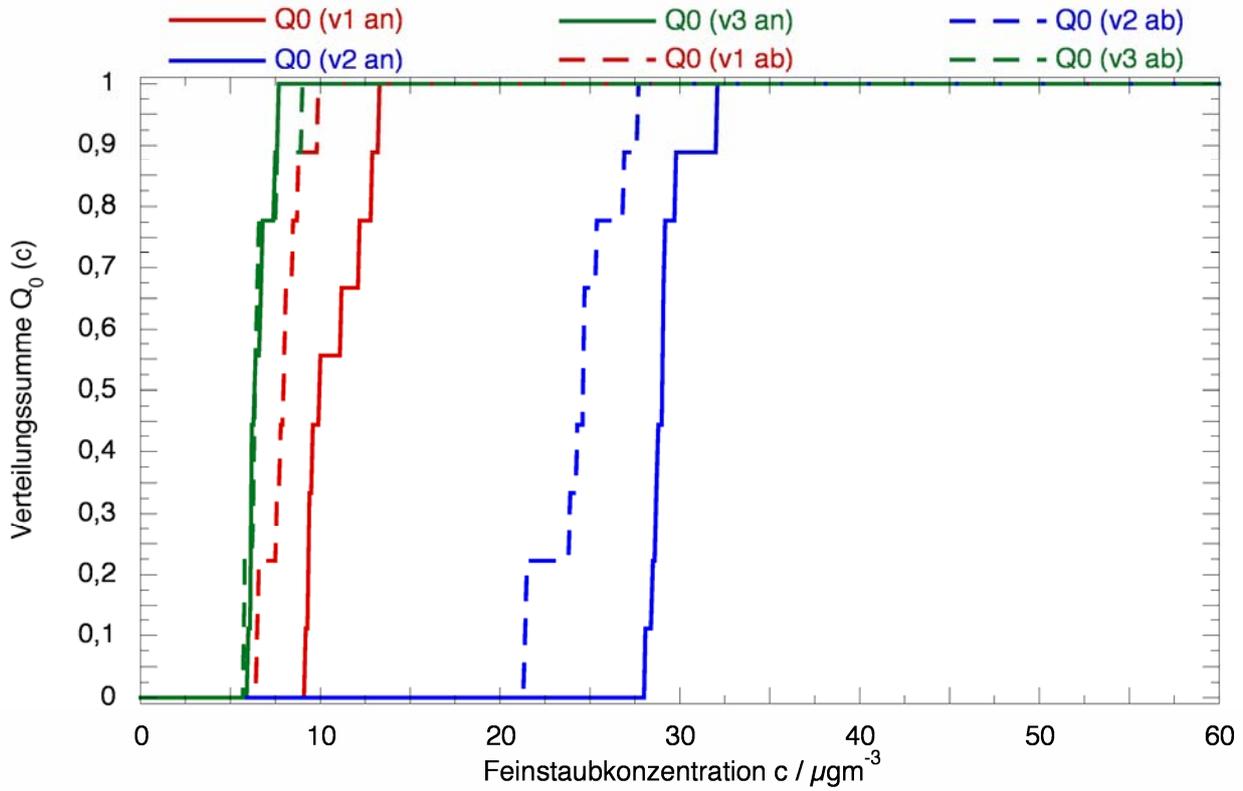


Bild 94: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Breite 1

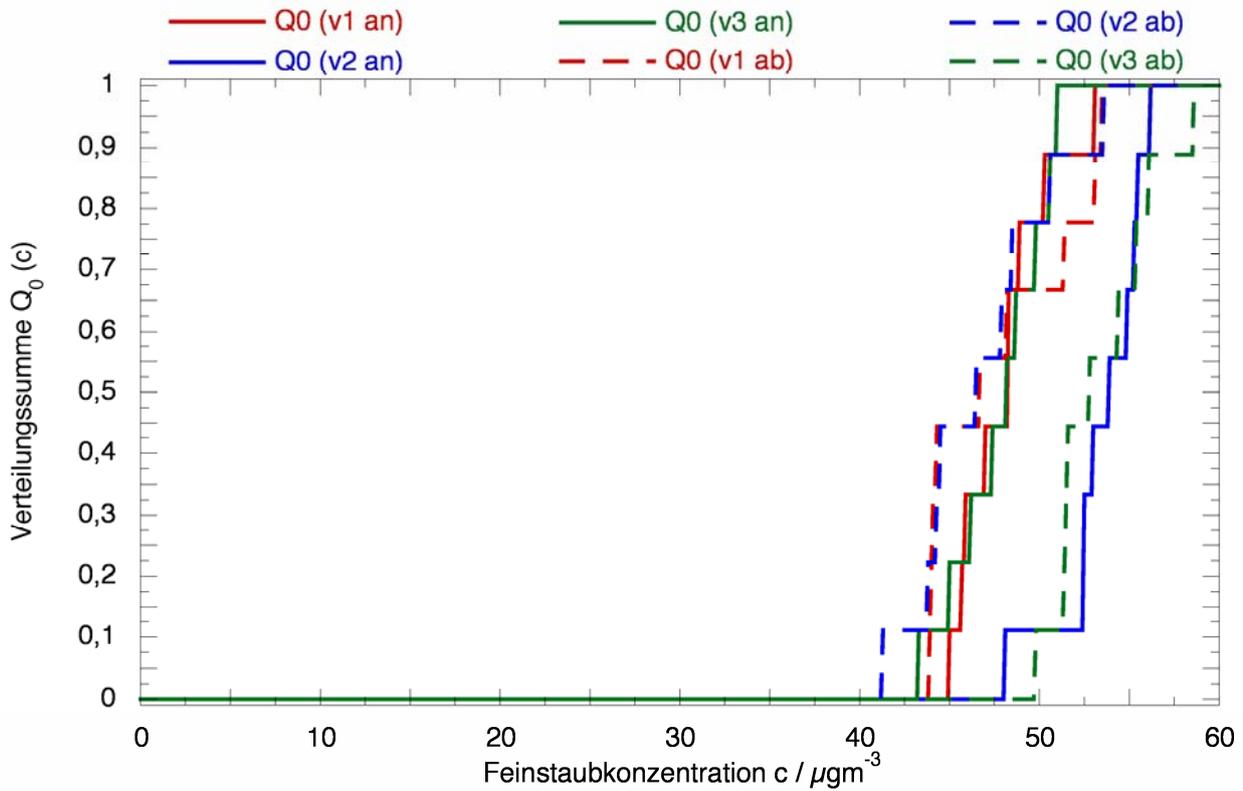


Bild 95: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Breite 2

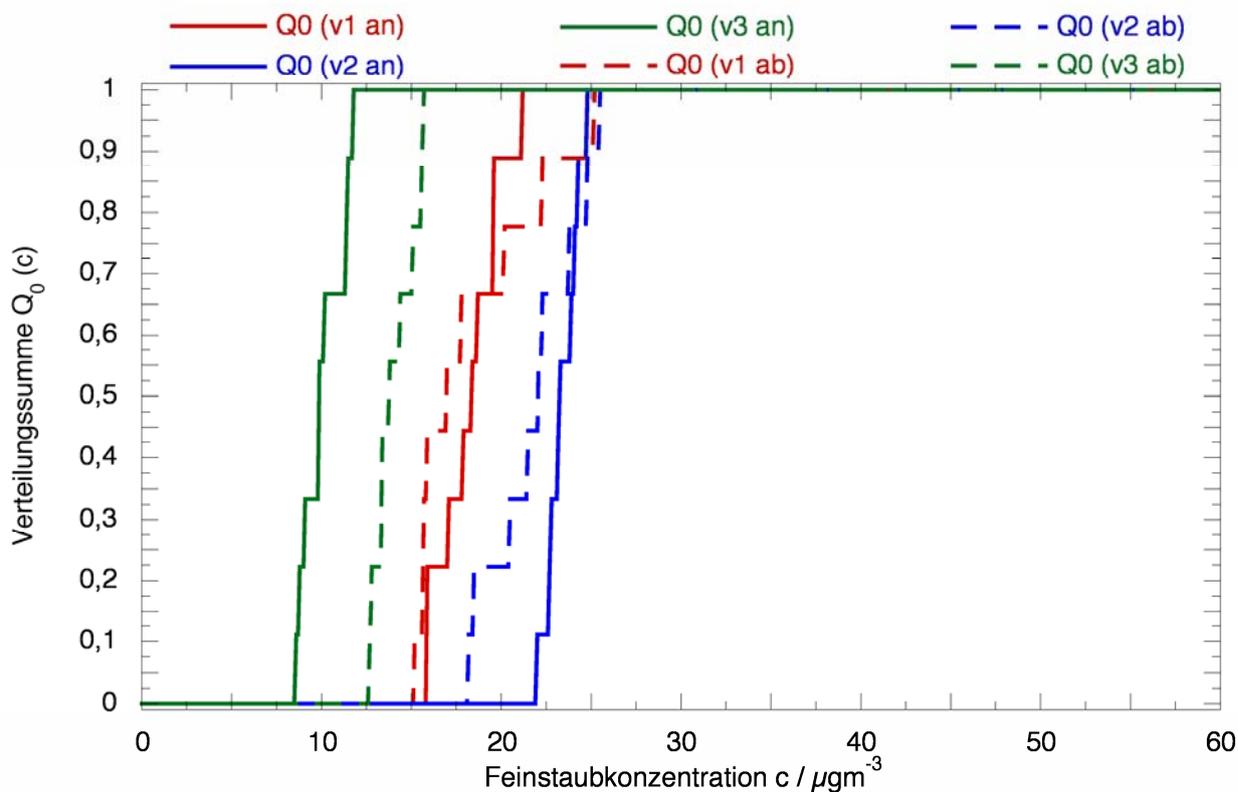


Bild 96: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Breite 3

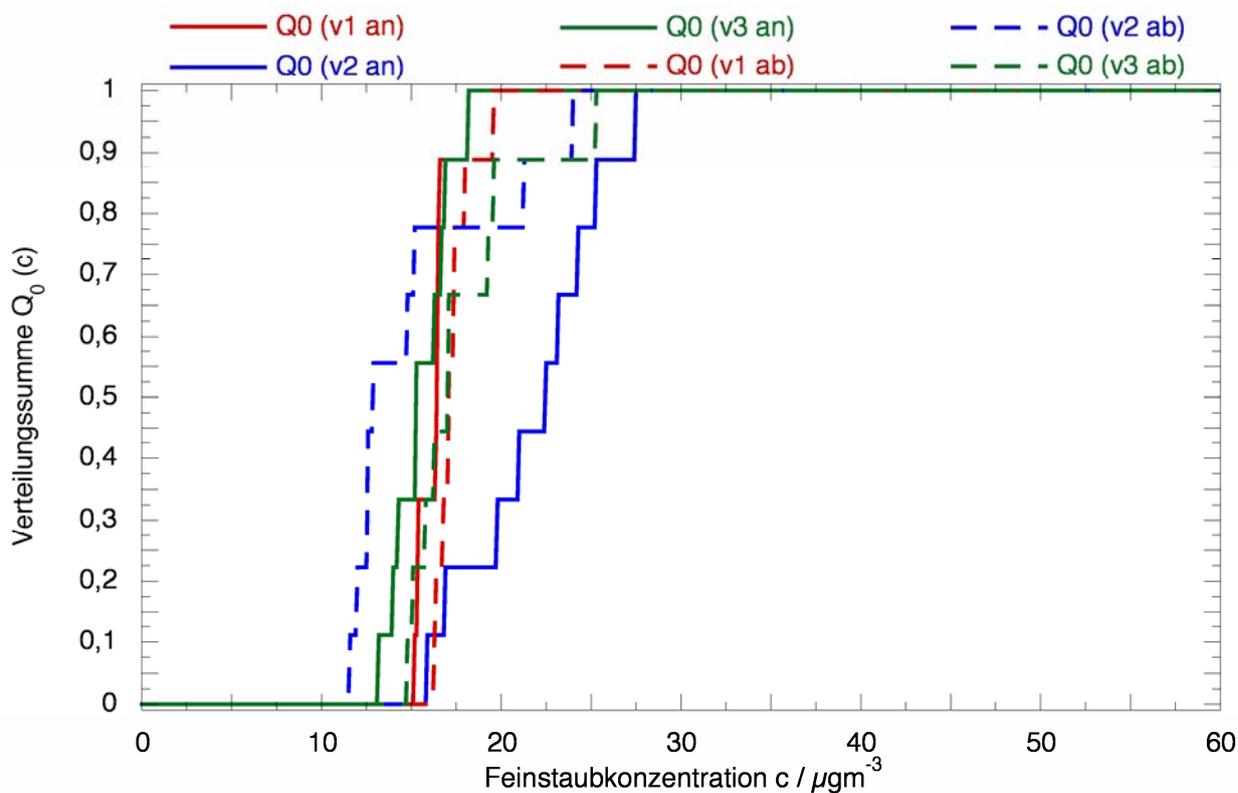


Bild 97: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Höhe 1

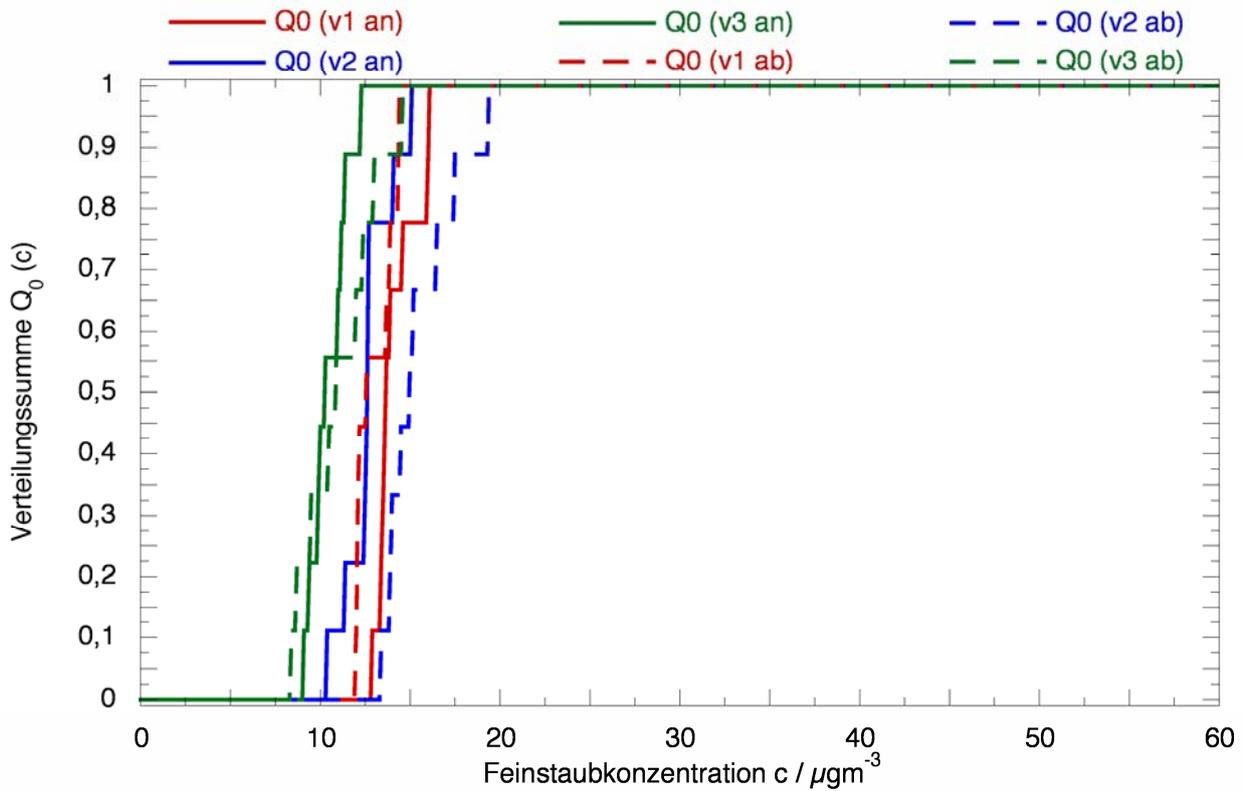


Bild 98: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Höhe 2

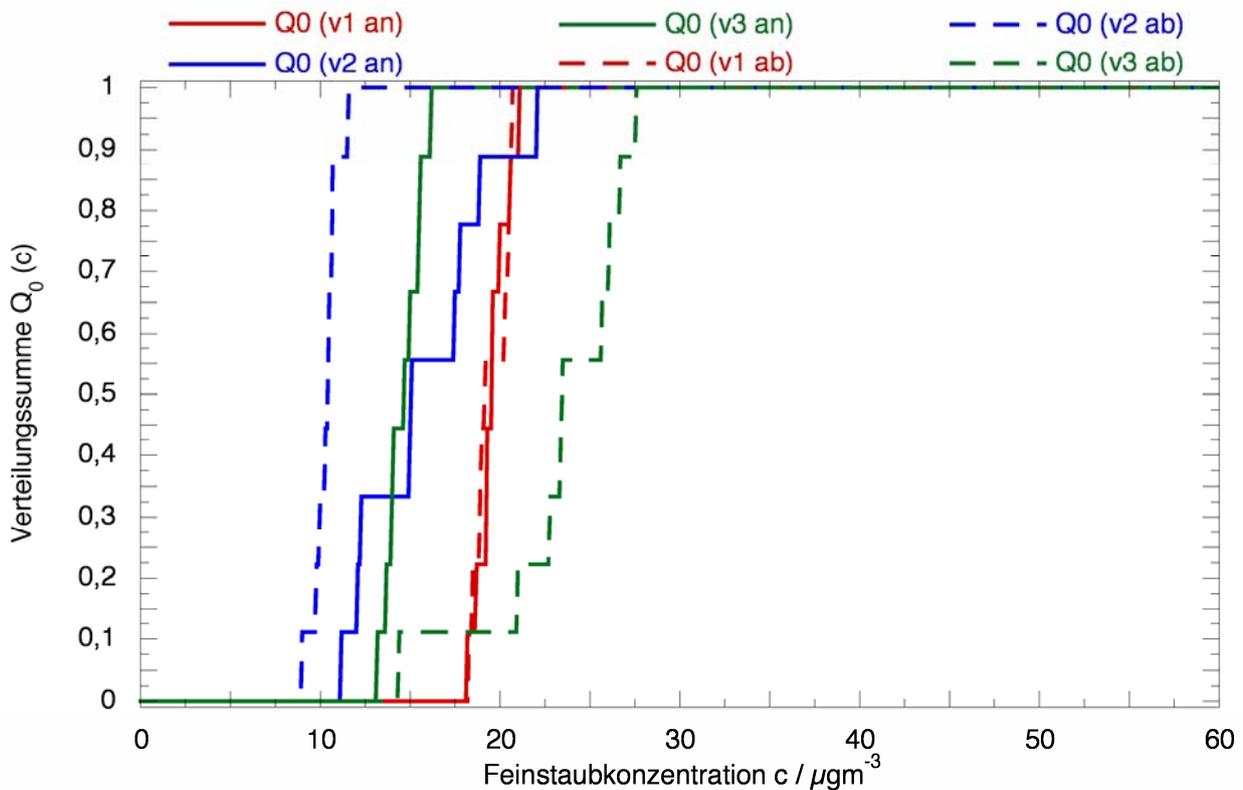


Bild 99: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Höhe 3

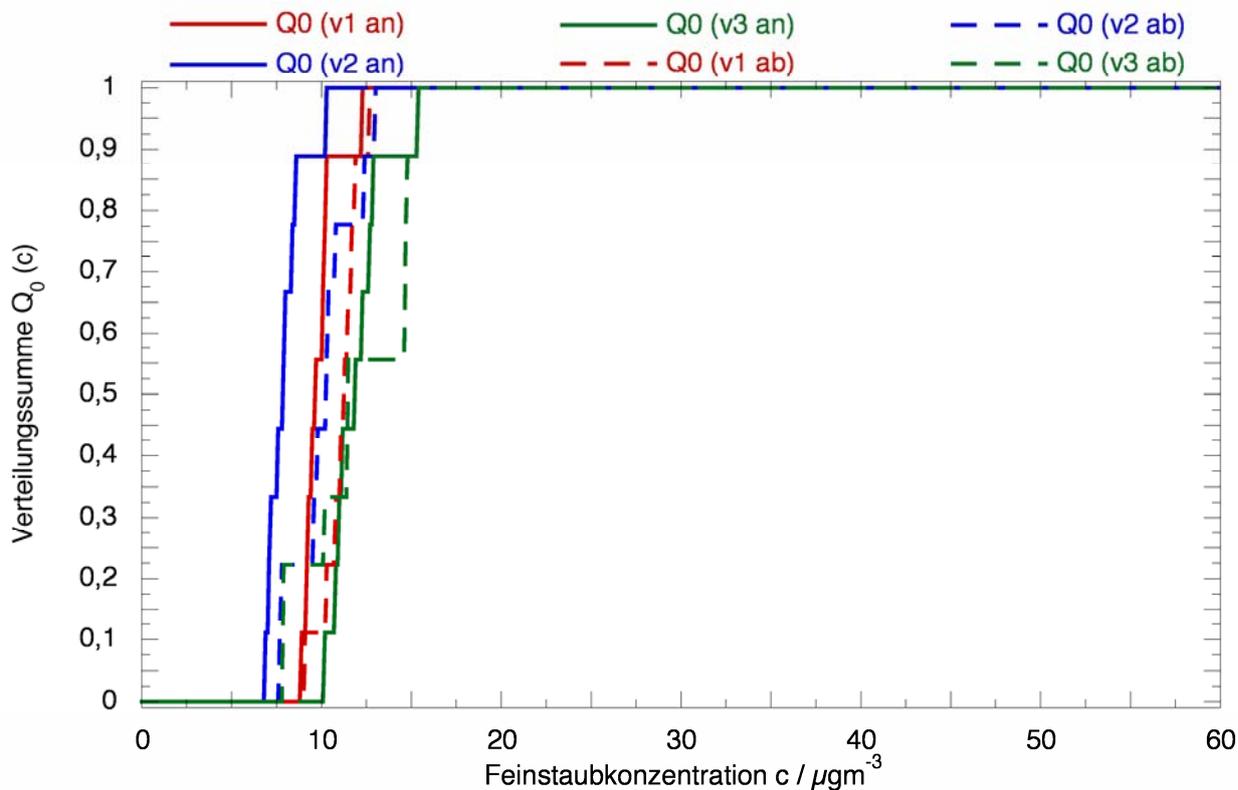


Bild 100: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Porosität 1

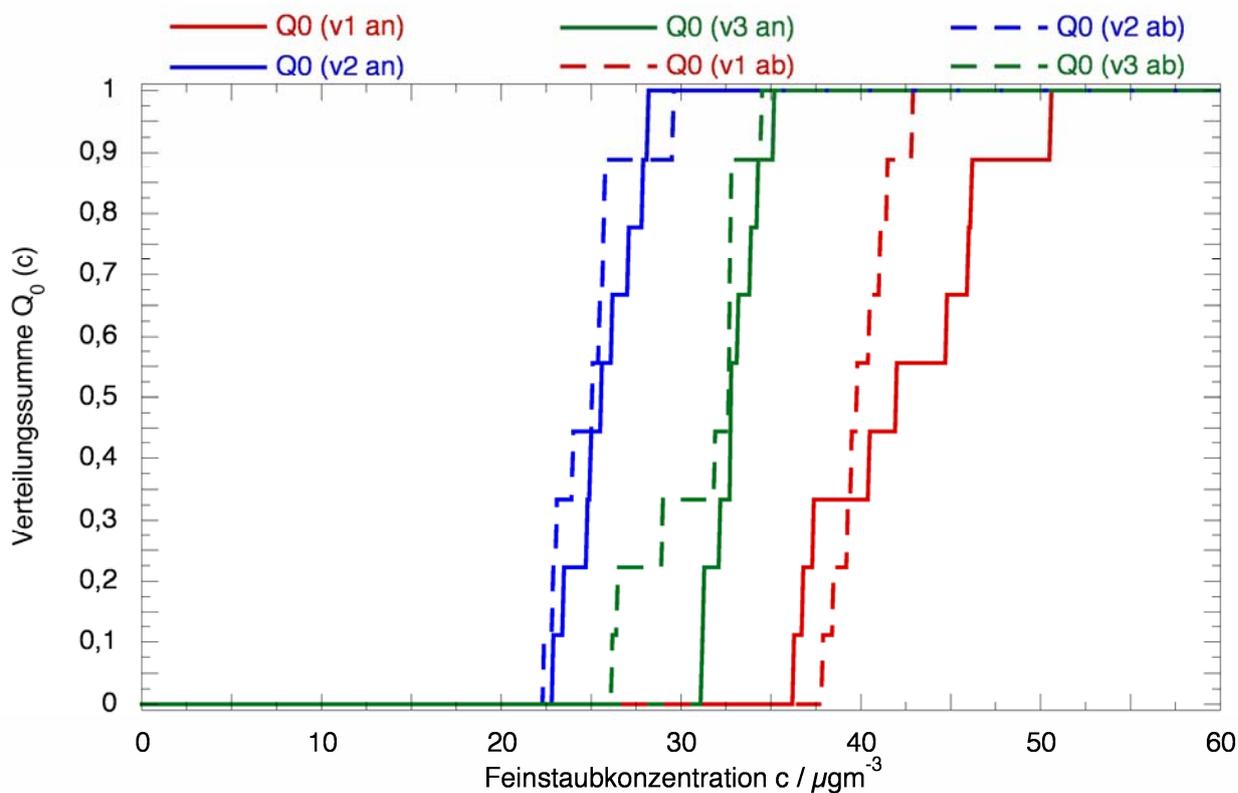


Bild 101: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Porosität 2

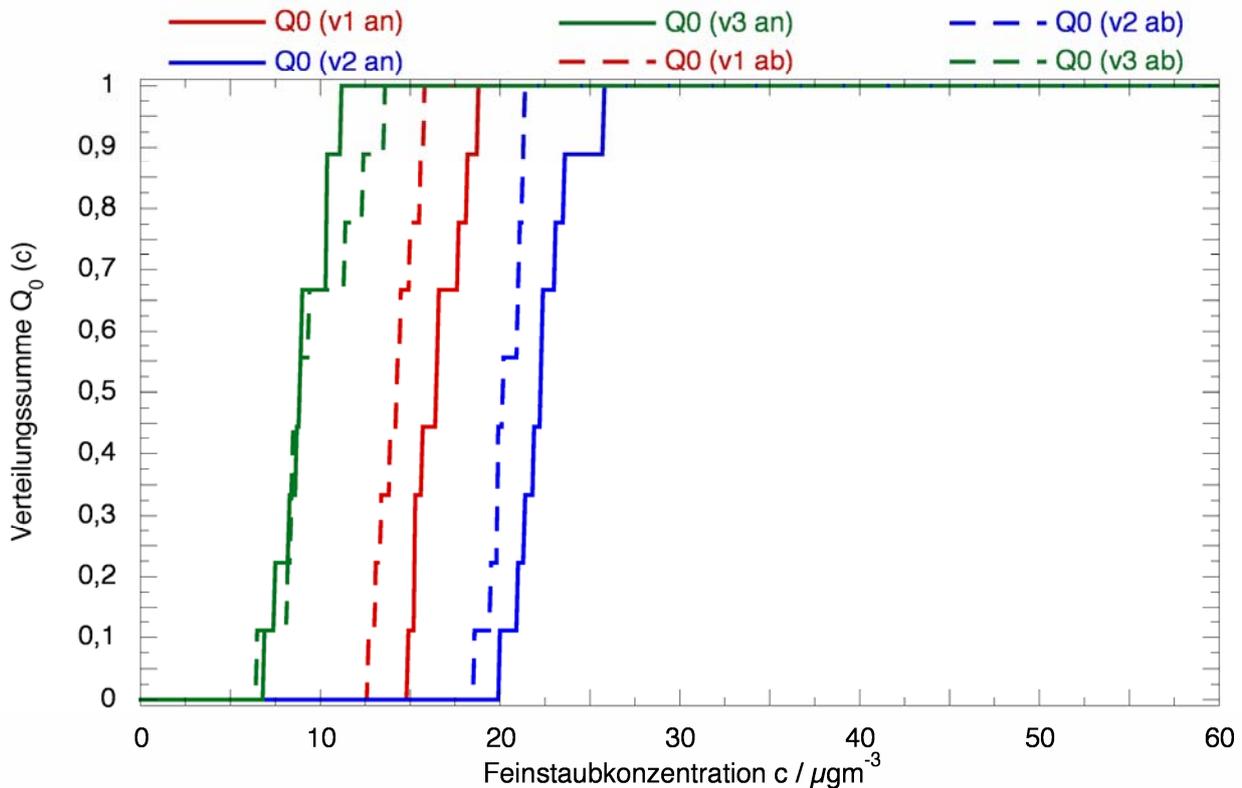


Bild 102: Konzentrationen der Fraktion PM10, Windschutznetz, Porosität 3

3.2.7 Zusammenfassung und Diskussion

Die Auswertung der Strömungsmessungen zeigt eine Veränderung der Strömung in Abhängigkeit von der angeströmten Fläche und Porosität der Versuchsobjekte im Windkanal. Hinter den Versuchsobjekten zeigte sich die Ausbildung eines Bereiches mit verminderter Strömungsgeschwindigkeit, während an den Rändern des Objektes die Strömungsgeschwindigkeit zunahm. Die Intensität der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit variierte mit der Höhe der Anströmungsgeschwindigkeit.

Eine eindeutige Aussage über die Abscheidung von Feinstaub an Pflanzen oder abiotischen Materialien kann hingegen nicht gemacht werden. Während sich bei den abiotischen Materialien überwiegend eine Verminderung der Staubkonzentration zeigte, traten bei den Pflanzen zum Teil starke Schwankungen auf. Dies liegt unter anderem an der Ausbildung eines Wirbels hinter den Versuchsobjekten, der durch die Strömungsmessung nicht erfasst wurde. Durch den Wirbel kam es zu starken Schwankungen der Feinstaubkonzentration hinter den Versuchsobjekten, so dass keine Aussage darüber gemacht werden kann, ob eine Abscheidung oder eine lokale Erhöhung der Konzentration stattgefunden hat. Zusätzlich führten Schwankungen in der Konzentration

der vermessenen Umweltaerosole zu den genannten Ungenauigkeiten.

Die Ergebnisse der Versuche im Windkanal zeigen die Notwendigkeit, die Strömung im Bereich von Pflanzen oder abiotischen Materialien, die zur Verminderung der Feinstaubkonzentration eingesetzt werden sollen, genauer zu untersuchen. So ist beispielsweise eine Messung der Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit in allen drei Raumrichtungen ebenso erforderlich, wie eine Messung in mehreren Abständen hinter und vor den Objekten. Darüber hinaus muss die Feinstaubkonzentration vor und hinter den Versuchsobjekten simultan mit zwei Messgeräten erfasst werden, um Schwankungen in der Ausgangskonzentration verlässlich bewerten zu können. Zusätzlich ist die Messung der Feinstaubkonzentrationen in einem größeren Abstand hinter den Objekten erforderlich, da nur so der Wirkungsbereich des Wirbels verlassen werden kann. Dann ist ein direkter Vergleich der Transportkonzentrationen der strömenden Luft vor und hinter den Versuchsobjekten und damit verbunden eine belastbare Aussage über eine mögliche Abscheidung von Feinstaub an den Versuchsobjekten möglich.

Für zukünftige Untersuchungen sollte zusätzlich anstelle des Umweltaerosols ein künstlich erzeugtes Aerosol verwendet werden. Die Konzentration

des künstlichen Aerosols muss dann deutlich über der des Umweltaerosols liegen, um die beobachteten Schwankungen ausgleichen zu können. Anhand der hier gemachten Erfahrungen muss die Konzentration oberhalb von 100 bis 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ liegen. Dies entspricht einem Eintrag von wenigstens 100 mg pro Minute an Aerosol in der höchsten Geschwindigkeitsstufe. Als mögliche Ausgangsstoffe für die Erzeugung eines künstlichen Aerosols kommen beispielsweise Kalkstein, Aluminiumoxid oder Arizona Testdust in Frage.

3.3 Pflanzenphysiologische Untersuchungen

3.3.1 Einleitung

Die Nutzung biologischer Indikatoren kann zeitabhängige Verläufe von Umweltbelastungen aufzeigen. So können Akkumulationen sowie eine Schädigung auf Pflanzen und damit eine Risikobewertung belasteter Standorte aufgezeigt werden.

Pflanzen werden als Abscheider für Feinstaub aus der Luft diskutiert. Was spezifische Pflanzenarten, Hecken oder Pflanzengruppen hier bewirken können, ist seit einigen Jahren zu einem Forschungsschwerpunkt geworden (BECKETT, 2000a, 2000b, JAZBEC und KLIPPEL 2009, SLINN 1982, THÖNNESEN und WERNER 1996, THÖNNESEN 2002).

Um die Belastung durch das Auftreten von Feinstaub auf verschiedene Pflanzen an Straßenrändern erfassen zu können, wurde an charakteristischen Standorten (Autobahn A1 und einem Kontrollstandort an der Bergischen Universität mit vergleichbaren Wettereinflüssen) ein Monitoring an ausgewählten Pflanzen durchgeführt. Bei den hier zu untersuchenden Pflanzen handelt es sich um Sträucher, die primär zur Begrünung von Straßenrändern eingesetzt werden:

- Kirschlorbeer (*Prunus laurocerasus* 'Caucasica')
- Hundsrose (*Rosa canina*)
- Kartoffelrose (*Rosa rugosa*)
- Purpurbeere (*Symphoricarpos chenaultii*)
- Rote Heckenkirsche (*Lonicera xylosteum*)
- Berg-Johannisbeere (*Ribes alpinum*)

3.3.2 Methoden

Spektralphotometrische Messungen

Diese Messungen zielen auf die Bestimmung der Aktivität verschiedener Enzyme in den Blättern der Pflanze ab. Dabei wird jedoch nicht die Konzentration der Enzyme direkt vermessen, sondern die eines, für das jeweilige Enzym spezifischen, Substrates. Untersucht wird die Aktivität der Enzyme Katalase und Glutathion, die in den pflanzlichen

Organismen eine Schutzfunktion gegen schädliche Einflüsse auf die Zellen ausüben. Eine Aussage über die Stoffwechselaktivität ist über das Enzym Malatdehydrogenase möglich. Zusätzlich hierzu wird die Summe aller Proteine in der Blattprobe bestimmt. Ebenfalls spektralphotometrisch vermessen wird die Pigmentkonzentration in den Blättern als ein Maß für die physiologische Aktivität der Pflanze. Bei den Untersuchungen wurden in jeder Messreihe drei Proben jeweils dreimal vermessen und daraus der Mittelwert bestimmt. Nachfolgend werden die einzelnen Untersuchungsmethoden vorgestellt.

Katalase

Katalase kommt praktisch in allen Zellen vor und schützt diese vor oxidativem Stress durch die Umwandlung von Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff.



Wasserstoffperoxid entsteht durch Stoffwechselfvorgänge in der Zelle und kann Schäden an Zellorganellen und Erbgut durch die Freisetzung von radikalen Sauerstoffspezies verursachen. Die Bestimmung der Enzymaktivität erfolgt nach dem Verfahren von Aebi (AEBI, 1974). Auch hier wird nicht die Konzentration des Enzyms direkt vermessen, sondern die Abnahme der Wasserstoffperoxid-Konzentration in der Probe. Die Bestimmung der Katalase-Aktivität wird dabei nach folgender Anleitung durchgeführt:

Das Pflanzenmaterial wird geerntet und sofort in flüssigem Stickstoff gefroren. Auf diese Weise werden weitere Stoffwechselprozesse unterbunden, die das Ergebnis verfälschen könnten. Anschließend erfolgt eine Pulverisierung des Probenmaterials ebenfalls in flüssigem Stickstoff. Für die weiteren Untersuchungen wird ein Extraktionspuffer aus folgenden Stoffen hergestellt:

- 50 mM Kaliumphosphatpuffer (pH 7,8)
- 1 mM DTT
- 1 mM EDTA

100 mg des pulverisierten Pflanzenmaterials werden nun in 300 bis 500 μL des Extraktionspuffers gegeben und durch intensives Schütteln durchmischt (vortexen). Die Mischung wird nun mit Micropistillen für 5 bis 10 Minuten homogenisiert und 30 Minuten bei einer Temperatur von 4 °C bei 14.000 min^{-1} zentrifugiert. Der dabei entstehende Überstand ist das Enzymextrakt, das für die weiteren Untersuchungen interessant ist. Der Überstand wird abgenommen und auf Eis gestellt. Für die photometrische Vermessung wird ein Ansatz bestehend aus

- 980 μL 50mM Kaliumphosphatpuffer (pH 7,0)

- 10 μ L Enzymextrakt
- 10 μ L 10 mM Wasserstoffperoxid

in einer Quarzküvette angesetzt. Für die Nullmessung des Photometers wird in einer zweiten Küvette ein identischer Ansatz ohne Enzymextrakt vorbereitet. Es folgt die photometrische Messung bei einer Wellenlänge von 240 nm. Nach der Nullmessung im Photometer wird die Abnahme der H_2O_2 -Konzentration im Ansatz mit dem Enzymextrakt verfolgt. Die Katalaseaktivität wird dann auf das Frischgewicht der Blattprobe bezogen.

Malatdehydrogenase

Das Enzym Malatdehydrogenase stellt einen wichtigen Bestandteil im sog. Citrat-Zyklus dar und ist für die Umwandlung von Oxalacetat zu Malat zuständig. Die MDH ist ein unverzichtbarer Bestandteil in mehreren Teilen des Stoffwechsels aller Eukaryoten, insbesondere im Citratzyklus, im Aspartat-Zyklus und beim Energietransport durch die Malatschleuse. Pilze und Pflanzen besitzen außerdem noch eine Form in den Glyoxisomen, die am Glyoxylat-Zyklus beteiligt ist. Zuletzt haben Pflanzen in ihren Chloroplasten noch eine Form des Enzyms, die essentielle Aufgaben im Calvin-Zyklus und dem spezialisierten C4-Zyklus übernimmt. Mithilfe der Bestimmung der Enzymaktivität kann die Stoffwechselaktivität der Zellen bestimmt werden. In Abhängigkeit von der Konzentration kann so ein Einfluss auf den Stoffwechsel dargestellt werden. Unter vergleichbaren Bedingungen gehaltene Pflanzen weisen dann bei niedrigeren Konzentrationen dieses Enzyms auf verminderte Stoffwechselaktivitäten hin, die wiederum ein Indiz auf schädigende äußere Einflüsse sein können. Bei der Bestimmung der Enzymaktivität wird die Konzentration des Enzyms nicht direkt vermessen, sondern vielmehr die Konzentration eines Reaktionsproduktes des Enzyms. Angewandt wird die Methode nach Möllering, wobei die Konzentration von $\text{NADH}+\text{H}^+$ photometrisch bestimmt wird (MÖLLERING, 1974).

Für die photometrische Untersuchung wird ein Ansatz bestehend aus folgenden Komponenten hergestellt.

- 900 μ L 0,1 M Kaliumphosphatpuffer (pH 7,0)
- 50 μ L 9 mM NADH
- 5400 μ L Probe (entspricht 10 mg Protein)

Die interessierende Reaktion wird durch die Zugabe von 50 μ L 14,5 mM Oxalacetat gestartet. Beobachtet wird die Konzentration von $\text{NADH}+\text{H}^+$ bei einer Wellenlänge von 340 nm. Die Konzentration wird über einen Zeitraum von drei Minuten in Messintervallen von 15 Sekunden Länge erfasst.

Glutathion

Dieses Enzym spielt eine wichtige Rolle beim Schutz der Zellen gegen verschiedene schädliche Umwelteinflüsse. Darüber hinaus ist es das wichtigste Transport- und Speichermittel für Schwefel in den Pflanzen. Beim Schutz der Zellen wirkt es in erster Linie gegen reaktive Sauerstoffspezies, kann aber auch bei der Entgiftung von Schwermetallen zum Einsatz kommen. Die Bestimmung der Aktivität dieses Enzyms gestaltet sich deutlich aufwändiger und wird im Folgenden beschrieben:

Nach der Ernte der Blattproben werden diese zunächst in flüssigem Stickstoff eingefroren und im Labor pulverisiert. Für die sich anschließenden Extraktionsschritte wird ein Extraktionspuffer aus folgenden Komponenten hergestellt.

- 80 mM Sulfosalicylsäure
- 15% w/v Natriumascorbat
- 1 mM EDTA

Für die Extraktion werden 0,5 g der pulverisierten Blattprobe in 10 mL Extraktionspuffer gegeben, auf Eis gestellt und homogenisiert. Die Lösung wird über Miracloth filtriert, in Zentrifugenröhrchen überführt und für 15 Minuten bei 4 °C und 30.000 g zentrifugiert. Der so erhaltene Überstand wird für die weiteren Untersuchungen abgenommen. Für die abschließende photometrische Untersuchung werden drei Ansätze A, B und C in Plastikvollküvetten vorbereitet.

Die drei Ansätze bestehen aus folgenden Stoffen:

Ansatz A

- 1,0 mL Enzymextrakt
- 2,0 mL 0,4 M Tris/HCl pH 8,0
- 0,1 mL 10 mM DTNB-Reagenz

Ansatz B

- 1,0 mL Enzymextrakt
- 2,0 mL 0,4 M Tris/HCl pH 8,0
- 0,1 mL Wasser

Ansatz C

- 1,0 mL Extraktionspuffer
- 2,0 mL 0,4 M Tris/HCl pH 8,0
- 0,1 mL 10 mM DTNB-Reagenz

Die photometrische Vermessung erfolgt bei einer Wellenlänge von 412 nm. Bei dieser Untersuchung wird der Gehalt an Thiol-Gruppen vermessen. Die Herstellung von drei Ansätzen ist erforderlich, um die Eigenabsorptionen der verwendeten Stoffe zu bestimmen und bei der Berechnung des Ergebnisses berücksichtigen zu können. Dazu wird zuerst eine Nullmessung mit Ansatz C durchgeführt, gefolgt von der Messung der Ansätze A und B. Die Absorption durch die Thiol-Gruppen ergibt sich aus

der Subtraktion der Absorption von Ansatz A und der Absorption von Ansatz B (DE KOK, 1989).

Proteinbestimmung nach Bradford

Abgerundet werden die Untersuchungen zu den Enzym-Aktivitäten durch die Bestimmung des Proteingehalts nach Bradford. Hier wird der Proteingehalt eines Extraktes gegen standardisierte Eichlösungen mit Albumin vermessen. Der zu vermessende Ansatz enthält folgende Bestandteile.

- 5 µL Enzymextrakt
- 15 µL Wasser
- 1 mL Bradford-Lösung

Diese Mischung wird intensiv durchmischt und nach einer Inkubationszeit von 5 Minuten bei einer Wellenlänge von 595 nm vermessen (BRADFORD, 1976).

Chlorophyllbestimmung

Der Gehalt an Chlorophyll in den Blättern gibt Aufschluss über die Gesundheit der Pflanze. Die hier beschriebenen Messungen wurden an Blättern vorgenommen, die zum Messzeitpunkt in gleicher Höhe, in unmittelbarer Nähe an der Pflanze mit vergleichbarer Wachstumsrichtung und Sonneneexposition wuchsen. Um den Chlorophyllgehalt bestimmen zu können, muss dieses zuvor aus den Blättern extrahiert werden. Dies geschieht am Besten mit organischen Lösemitteln, da Chlorophyll stark lipophil ist. Hierzu wird das Blattmaterial zunächst in flüssigem Stickstoff eingefroren, um eine Schädigung des Chlorophylls durch Licht und Luft-sauerstoff zu unterbinden sowie die nachfolgende Zerkleinerung zu erleichtern. Die gefrorenen Proben werden pulverisiert, davon 100 mg in 1 mL Aceton gegeben und kräftig durchmischt. Diese Mischung wird über Nacht bei 4 °C stehen gelassen. In dieser Zeit tritt das Chlorophyll in das Lösemittel über. Nach diesem Zeitraum wird die Mischung bei 13.000 min^{-1} für 20 Minuten zentrifugiert und der Überstand anschließend abgenommen. Im letzten Schritt erfolgt nun die photometrische Vermessung der Proben, nachdem das Photometer mit Aceton gegen Null abgeglichen wurde. Für diese Messung wird Licht mit der Wellenlänge 652 nm verwendet. Der Chlorophyllgehalt kann dann nach folgender Formel berechnet werden (ARNON, 1949).

$$E_{652\text{nm}} \cdot 34,2 = \text{Chlorophyllgehalt} / \mu\text{g} / \text{mL} \quad (18)$$

Messungen zur Photosyntheseaktivität

Die Messungen der Photosyntheseaktivität werden im Gegensatz zu den vorigen Methoden rein physikalisch durchgeführt. Hier erfolgt die Untersuchung direkt an der lebenden Pflanze mit einem Messgerät, dem sog. Fluorometer. Verwendet wird hier das Fluorometer Mini-PAM der Firma

Heinz Walz GmbH. Die Messung mit dem Fluorometer macht sich eine physikalische Eigenart des Photosyntheseapparates zu Nutzen, die sog. Fluoreszenz. Im Normalfall werden die Elektronen in den Pigmenten eines Blattes durch das Auftreffen von Lichtquanten auf ein höheres Energieniveau angehoben, ihnen wird also Energie zugeführt. Diese Energiedifferenz zwischen den beiden Niveaus geben die Elektronen bei der Rückkehr auf ihr ursprüngliches, niedrigeres Energieniveau wieder ab. Die freigesetzte Energie kann so entweder für die Photosynthese genutzt werden oder sie wird ungenutzt in Form von langwelligem Licht, der Fluoreszenz, emittiert. Im Normalfall ist das System für die Photosynthese sehr leistungsfähig und nur ein sehr geringer Anteil von ungefähr acht Prozent (WIKIPEDIA) der aufgenommenen Energie wird wieder in Form von Fluoreszenz emittiert. In diesem Fall spricht man von der photosynthetischen Fluoreszenzlöschung. Ist das Photosystem der Pflanze jedoch gestört, so kann die aufgenommene Energie nicht mehr vollständig verwertet werden, so dass der Anteil der Fluoreszenz darauf hin ansteigt.

Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des Photosystems treffen zu können, wird hier die sog. Sättigungspuls-Methode verwendet. Gemessen wird hier am lichtadaptierten, also normal belichteten Blatt einer Pflanze. Für die Bestimmung der Fluoreszenz sind zwei Einzelwerte erforderlich, die Grundfluoreszenz F_0' und die maximale Fluoreszenz F_m' . Die zu untersuchende Blattfläche wird mit einem starken Lichtimpuls bestrahlt, der zwischen einer und zwei Sekunden andauert. Durch diesen Lichtimpuls werden alle Elektronen in den Pigmenten auf das nächst höhere Energieniveau angehoben. Das Photosystem ist nun angeregt. Allerdings kann diese Energie nicht für die Photosynthese verwendet werden, so dass die Elektronen die Energie beim Rückfall auf ihr altes Niveau in Form von Fluoreszenz wieder abgeben. Diese Fluoreszenz stellt gleichzeitig die maximale Fluoreszenz dar. Zusammen mit der vorher bestimmten Grundfluoreszenz ergibt sich das sog. Yield (Ausbeute), als Maß für die Photosyntheseaktivität einer Pflanze im Grundzustand bezogen auf die Lichtintensität. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$\text{Yield} = \frac{F_m' - F_0'}{F_m'} \quad (19)$$

Ein weiteres Maß für die Leistungsfähigkeit des Photosystems ist die Elektronen-Transport-Rate (ETR). Diese berechnet sich aus dem vorher bestimmten Yield, der Lichtintensität und spezieller Faktoren, die den Wirkungsgrad der Photosynthese berücksichtigen.

$$\text{ETR} = 0,84 \cdot 0,5 \cdot \text{Yield} \cdot \text{Lichtintensität} \quad (20)$$

Der Faktor 0,84 steht für das Maß der Absorption der Lichtquanten von 84 % in den Blättern einer Pflanze. Da für den Transport eines Elektrons im Photosystem zwei Lichtquanten erforderlich sind, wird noch ein Faktor von 0,5 in die Berechnung mit einbezogen. Die ETR wird in der Einheit $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ angegeben.

3.3.3 Ergebnisse

Katalaseaktivität

Bild 103 zeigt, dass die Katalaseaktivitäten der verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich ausgeprägt sind und sich in ihren Konzentrationen auffallend unterscheiden. Gleichzeitig wird ersichtlich, dass über den gesamten Messzeitraum die Aktivitäten bei den Kontrollpflanzen höher liegen als bei den Probepflanzen an der A1. Hier scheinen spezifische Umweltbedingungen zu einem oxidativen Stress und damit zu einer Aktivierung des Enzyms zu führen. Analoge Ergebnisse zeigen die Analysen, die an denselben Pflanzen im Jahr 2008 vorgenommen wurden. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 104 dargestellt.

Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) und Rotbuche (*Fagus sylvatica*), die unabhängig vom Projekt zusätzlich analysiert wurden, zeigen hier die höchsten Abweichungen. Insbesondere in den Frühsommer- und Sommermonaten (Mai bis Juli) sind die höchsten Abweichungen zwischen den Pflanzen an der Autobahn und den Kontrollpflanzen messbar. Dieses Ergebnis lässt sich auch auf

die Heckenpflanzen übertragen, obwohl hier die Abweichungen nicht so stark ersichtlich sind. Aber diese Analysen zeigen auch die hohe Empfindlichkeit dieses Enzyms. In einigen Proben, unabhängig vom Standort konnte keine Enzymaktivität nachgewiesen werden. Hier wären *in vitro* Langzeitstudien sinnvoll, die unter kontrollierten Bedingungen den Einfluss von gezielten Feinstaubablagerungen auf den Blättern dieses Enzyms zeigen könnten. Die in Bild 105 zusammengefassten Mittelwerte und Standardabweichungen aus den Messreihen verdeutlichen das beschriebene Ergebnis noch einmal.

Auch hier zeigt sich, dass die Pflanzen an der Autobahn einem höheren oxidativen Stress ausgesetzt sind als die Kontrollpflanzen im Innenhof der Bergischen Universität. Insbesondere die zusammengefassten Mittelwerte in Bild 105 zeigen die Unterschiede zwischen den Werten der Kontrollpflanzen und der Autobahnpflanzen. Dabei wird deutlich, dass keiner der Sträucher, die üblicherweise an Straßen angepflanzt werden, durch auffallend höhere oder niedrigere Werte herausragt. Alle Pflanzen zeigen sowohl bei der Kontrolle als auch bei den Testpflanzen Unterschiede, deren Ursprung durch Langzeitstudien im Labor genauer analysiert werden sollten. Hypothetisch kann hier nur formuliert werden, dass durch verstopfte Spaltöffnungen das in der Photosynthese

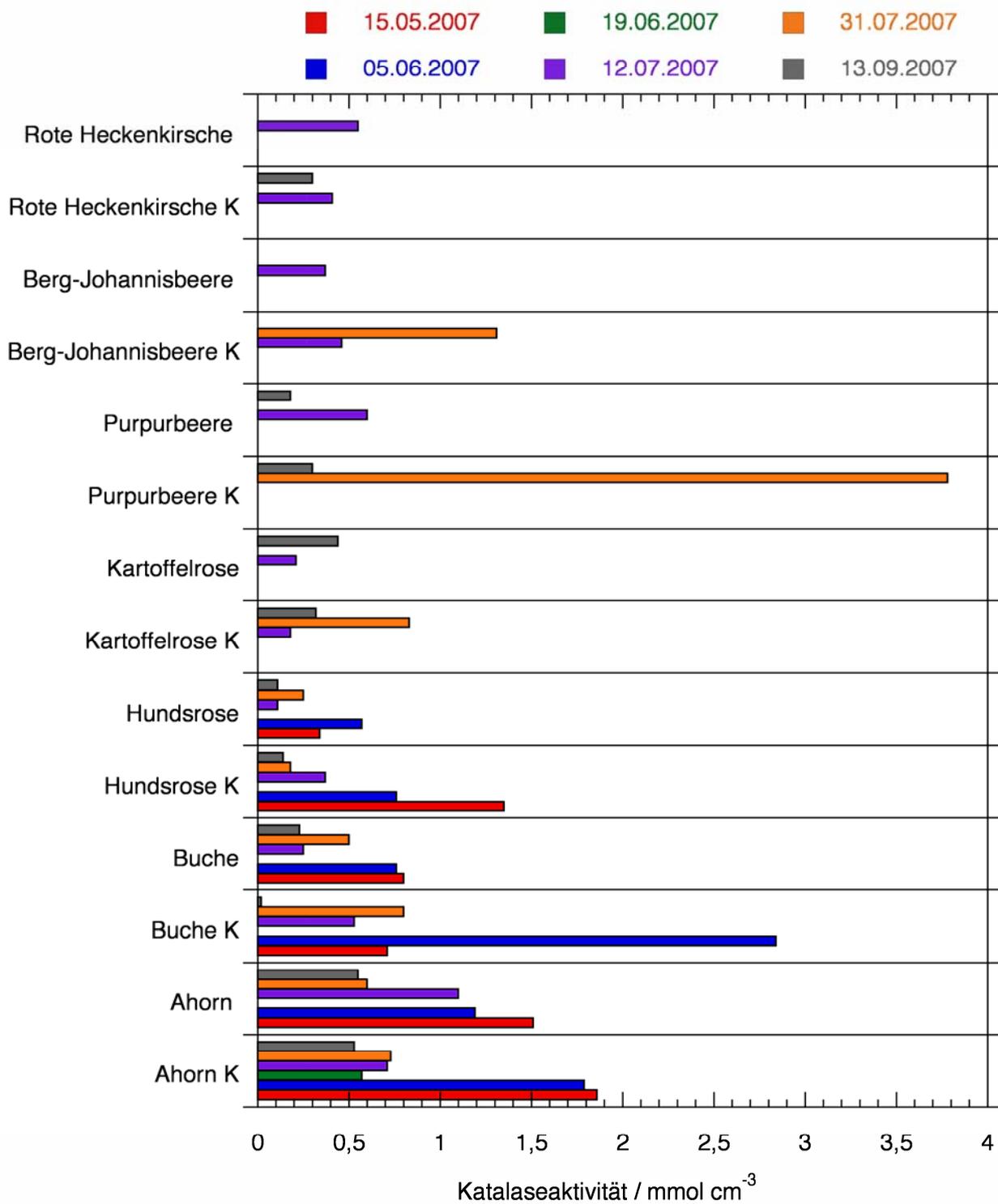


Bild 103: Katalaseaktivität von Pflanzen im Bereich der A1 und Kontrollpflanzen („K“), 2007

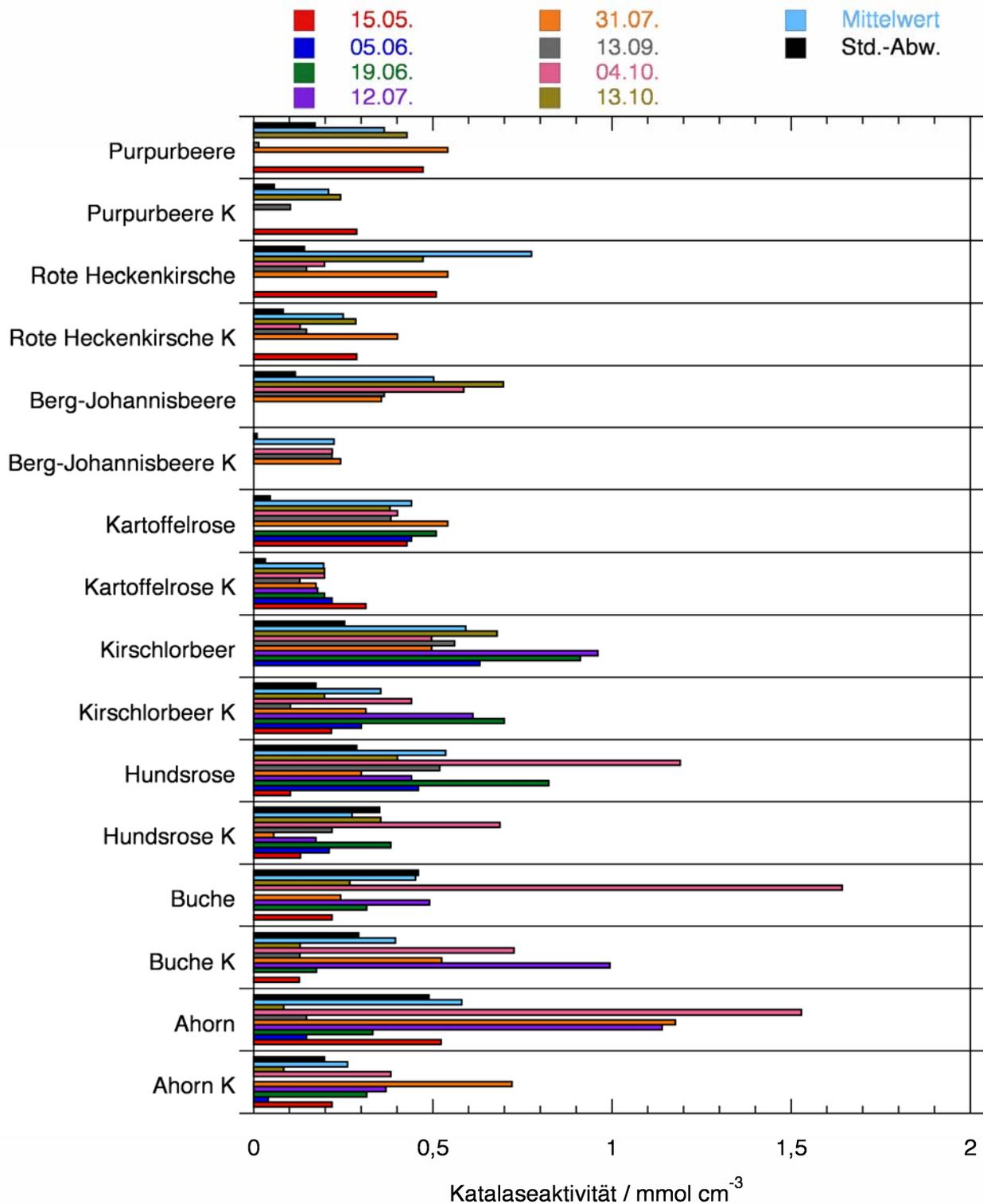


Bild 104: Katalaseaktivität von Pflanzen im Bereich der A1 und Kontrollpflanzen („K“), 2008

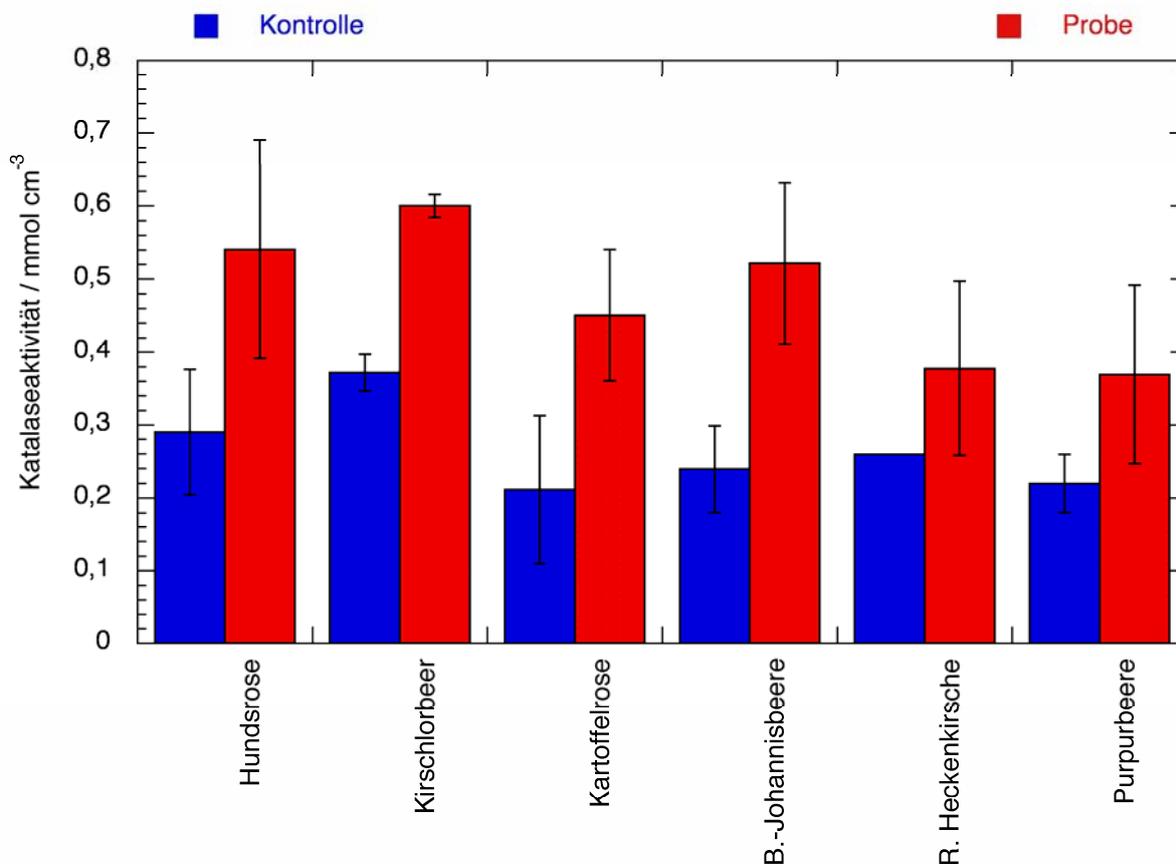


Bild 105: Mittelwerte der Katalaseaktivität von Pflanzen im Bereich der A1 und Kontrollpflanzen, 2008

Malatdehydrogenase-Aktivität

Auch die Stoffwechselaktivitäten im Kohlenhydratabbau scheinen bei den Pflanzen im Straßenbereich vergleichsweise verändert, wie aus Bild 106 hervorgeht. Dies lässt sich durch das Enzym Malatdehydrogenase (MDH) zeigen, das die chemische Reaktion von Malat zu Oxalacetat im Citratzyklus katalysiert. Bei den Probestpflanzen scheinen die Stoffwechselaktivitäten reduziert, da hier die MDH im Vergleich zu den unbelasteten Pflanzen nur in geringerer Konzentration nachgewiesen werden kann.

Wenn man jedoch einzelne Ergebnisse der Analysen zur MDH der drei Standortpflanzen im Vergleich zu den drei Kontrollpflanzen betrachtet, (Bilder 107 und 108) zeigt sich sowohl beim Kirschlorbeer (*Prunus laurocerasus* 'Caucasica') als auch bei der Hundsrose (*Rosa canina*), dass die Mittelwerte aus den Messungen zwar auf Un-

terschiede zwischen den Messpflanzen und Kontrollen hinweisen, die einzelnen Messdaten jedoch sehr eng zusammenliegen. Daher wurde dieser Parameter nicht mehr als Maß für die Beeinflussung der Pflanzen durch den Straßenverkehr herangezogen. Auch die entsprechenden Standardabweichungen weisen darauf hin, dass die probenspezifischen MDH-Messungen nur geringe Abweichungen aufweisen und grundsätzlich als Messparameter verwendet werden können, aber im Zusammenhang mit Feinstaubbelastung wenig aussagekräftig sind. Dies wird insbesondere deutlich, wenn man die vergleichenden Analysen zur MDH in Hundsrose und Kirschlorbeer betrachtet. Es wird deutlich, dass die einzelnen Messungen der drei Autobahn- und der drei Kontrollproben nur unwesentlich voneinander abweichen.

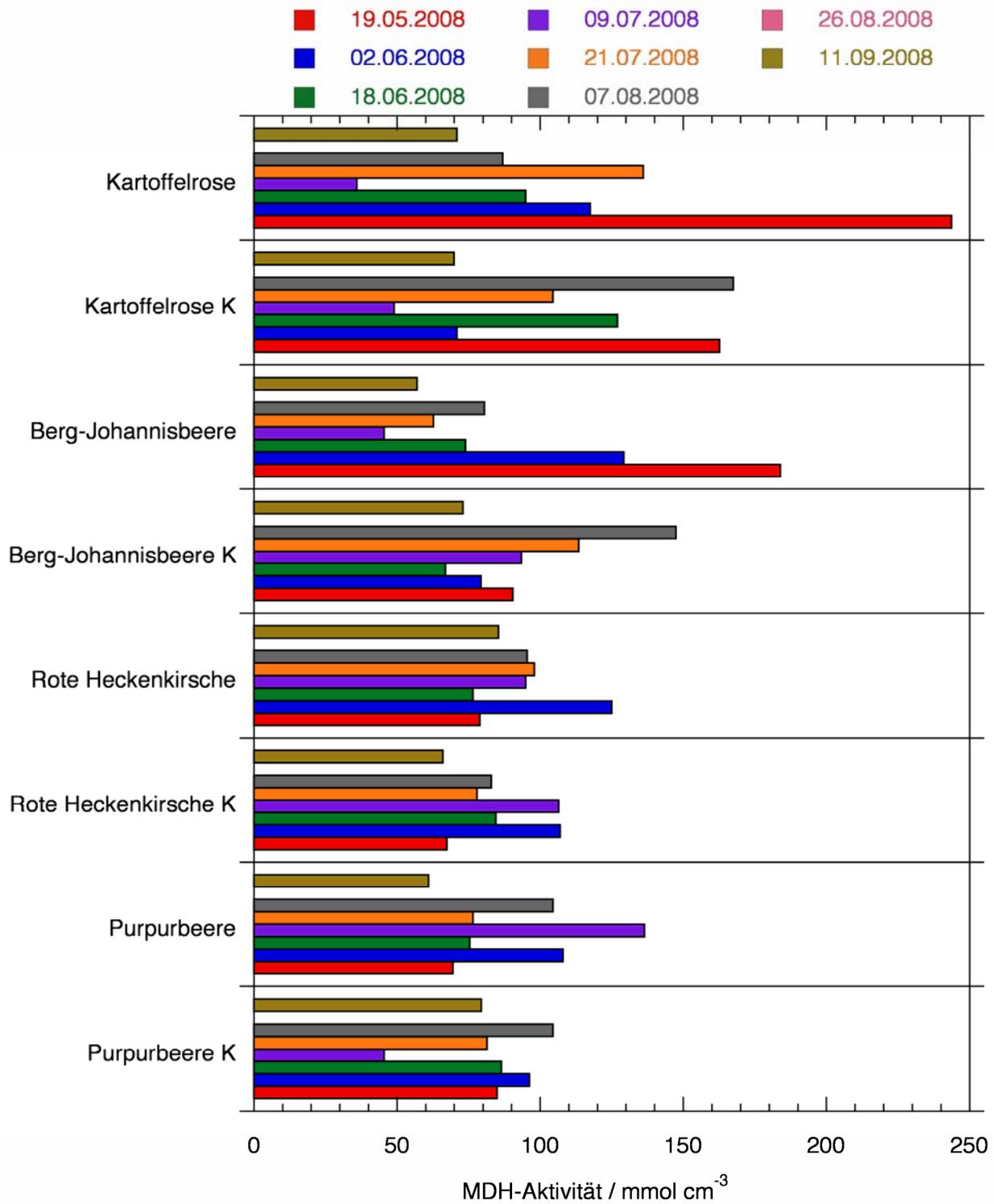


Bild 106: MDH-Aktivität von Pflanzen im Bereich der A1 und Kontrollpflanzen („K“), 2008

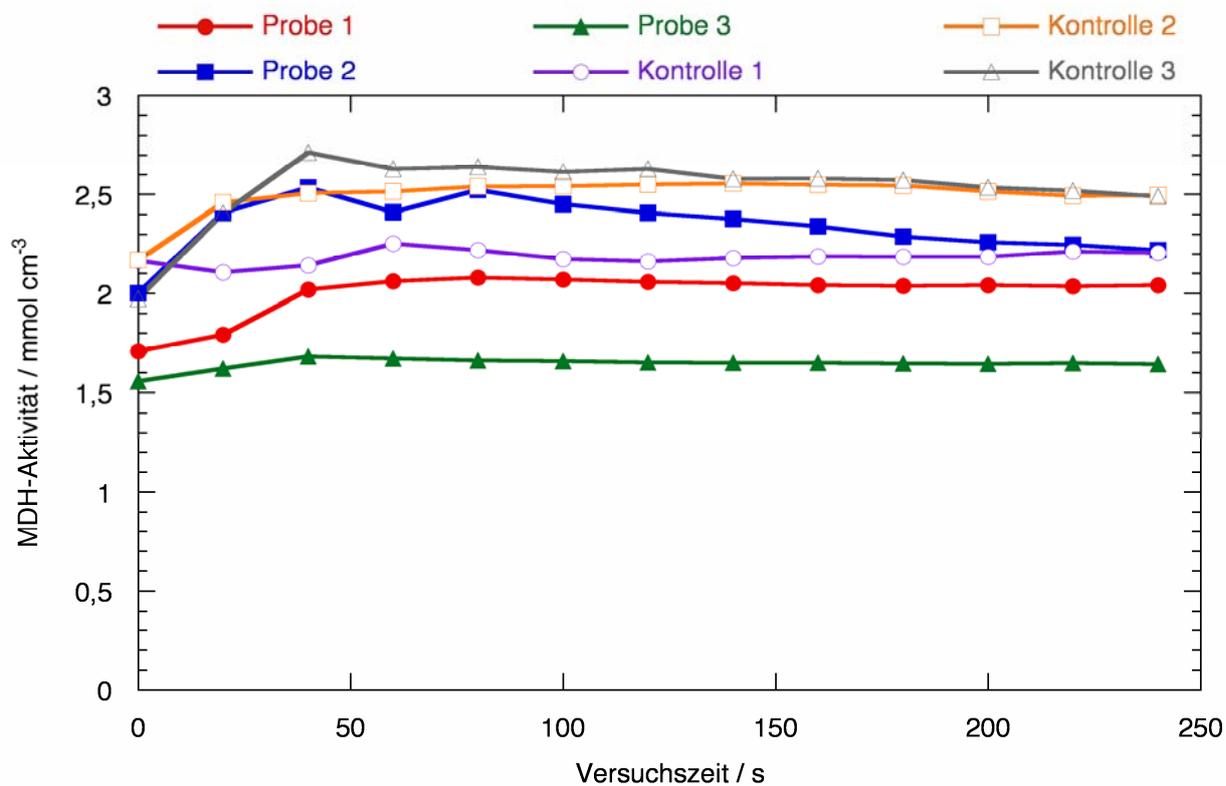


Bild 107: MDH-Aktivitäten von Hundsrose, Juni 2007

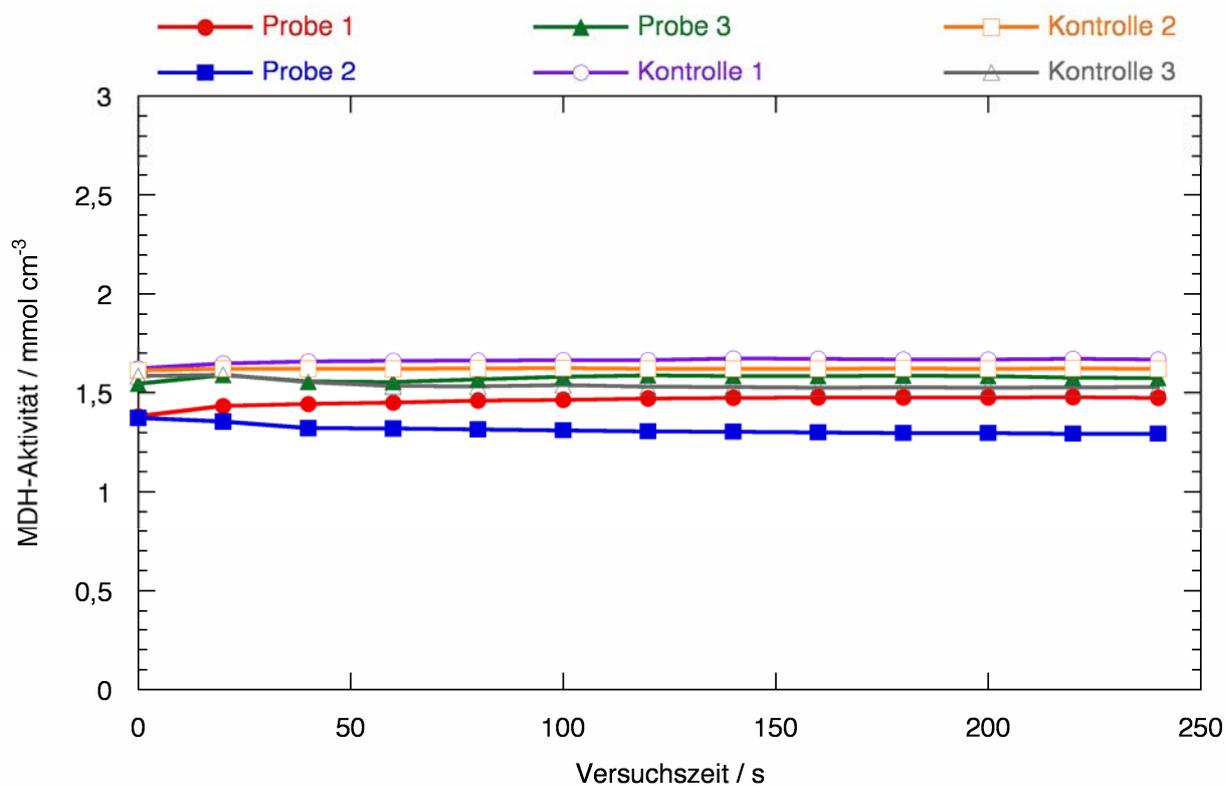


Bild 108: MDH-Aktivitäten von Kirschlorbeer, Juni 2007

Glutathion

Die Aktivität von Glutathion konnte 2007 in den Monaten Mai bis Juli und 2008 ebenfalls unterschiedlich, je nach Zustand der Pflanzen von Januar bis Oktober (Blattaustrieb, Blattabfall, Insektenbefall, Nekrosenbildung) bestimmt werden.

Die Messdaten von 2007 innerhalb der Monate Mai bis Juli weisen trotz der geringen Anzahl an Messungen (Diebstahl der Pflanzen) bereits darauf

hin, dass Glutathion ein geeigneter physiologischer Parameter zu sein scheint, um die Beeinträchtigungen von Pflanzen an Straßenrändern im Vergleich zu unbeeinflussten Pflanzen aufzeigen zu können. Die entsprechenden Werte der Messungen sind in Tabelle 26 wiedergegeben. Insgesamt lassen sich bei den Autobahnpflanzen immer höhere Messwerte feststellen als bei den Kontrollpflanzen.

Pflanze	Glutathion-Konzentration / mmol cm ⁻³		
	15.05.	12.06.	19.06.
Hundsrose (Probe)	0,042	0,046	0,046
Hundsrose (Kontrolle)	0,033	0,064	0,048
Kirschlorbeer (Probe)	0,097	0,179	0,046
Kirschlorbeer (Kontrolle)	0,067	0,115	0,048
Rote Heckenkirsche (Probe)	0,077	0,112	0,046
Rote Heckenkirsche (Kontrolle)	0,056	0,094	0,048
Purpurbeere (Probe)	0,048	0,053	0,046
Purpurbeere (Kontrolle)	0,032	0,044	0,048
Berg-Johannisbeere (Probe)	0,098	0,112	0,114
Berg-Johannisbeere (Kontrolle)	0,089	0,095	0,121
Kartoffelrose (Probe)	0,112	0,099	0,114
Kartoffelrose (Kontrolle)	0,099	0,084	0,121

Tab. 26: Glutathion-Gehalte der Pflanzen 2007

Die Analysen von 2008 unterstützen diese Ergebnisse aus dem Messzeitraum 2007, wie auf den Bildern 109 bis 114 zu sehen ist.

Hier sind zu den einzelnen Pflanzenarten die Messergebnisse über den Messzeitraum für die Autobahnpflanzen im Vergleich zu den Kontrollpflanzen an der Bergischen Universität dargestellt. Dabei zeigt sich, dass insgesamt die Autobahnpflanzen höhere Glutathion-Konzentrationen aufweisen als die Kontrollpflanzen, wobei die Kurvenverläufe fast immer parallel verlaufen und nur bei den Dezemberwerten vom Kirschlorbeer (*Prunus laurocerasus* 'Caucasica') Abweichungen zu erkennen sind. Eine abschließende Erklärung für

diese Abweichungen konnte bislang nicht gefunden werden. Dennoch zeigen sich auch hier im weiteren Verlauf der Messungen, dass die Kontrolle niedrigere Konzentrationen aufweisen als die Pflanzen, die an der Autobahn extremen Verkehrsbedingungen ausgesetzt sind.

Trotz des fehlenden Vergleiches der Beeinflussungen durch die verschiedenen Emissionsparameter wie Stickoxide, Kohlenstoffdioxid oder auch Staubpartikeln, zeigen die Veränderungen zwischen Kontrollpflanze und Straßenstrauch, dass der Parameter Glutathion-Konzentration für weitere Untersuchungen genutzt werden kann.

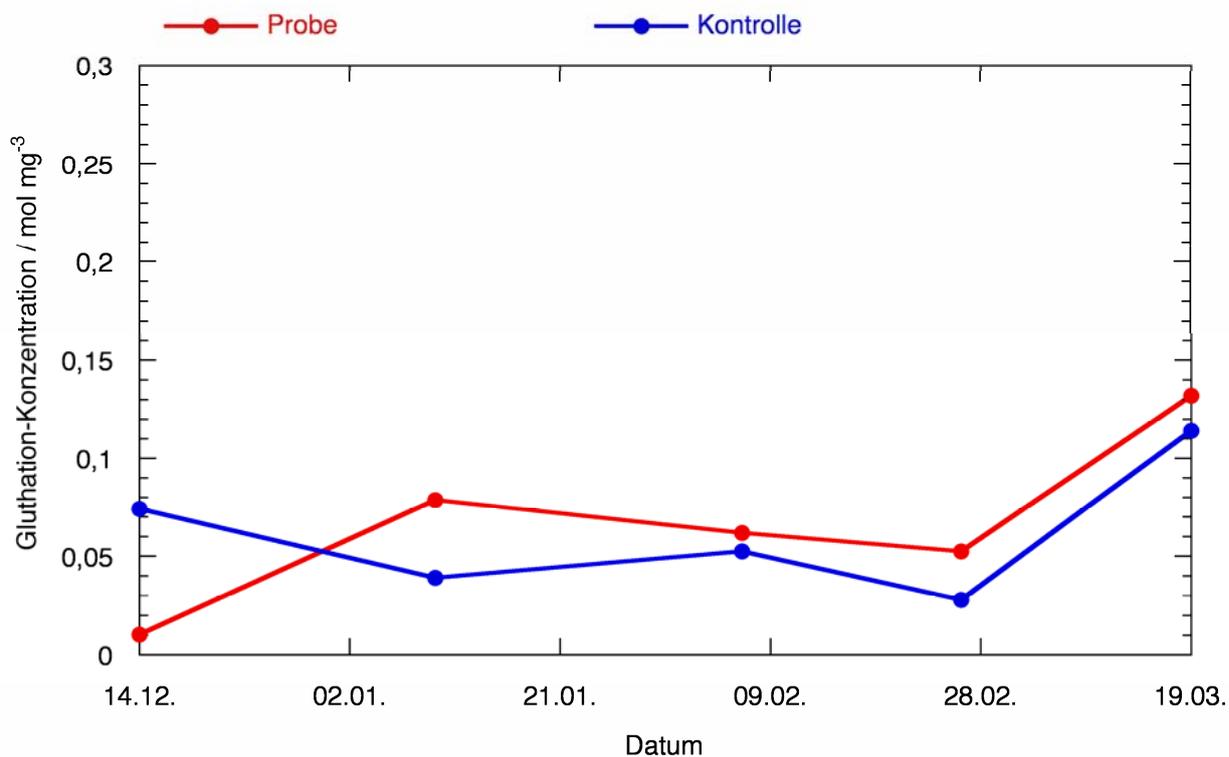


Bild 109: Glutathion-Gehalt von Kirschlorbeer, 2008

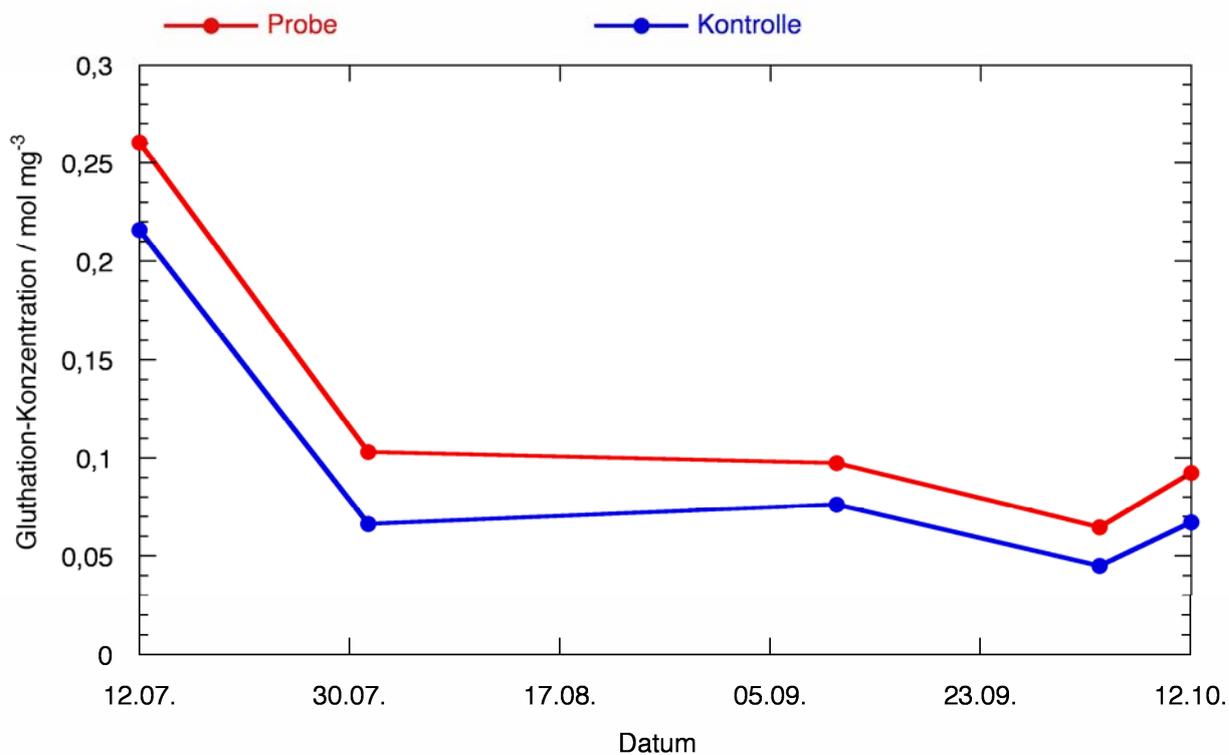


Bild 110: Glutathion-Gehalt von Kartoffelrose, 2008

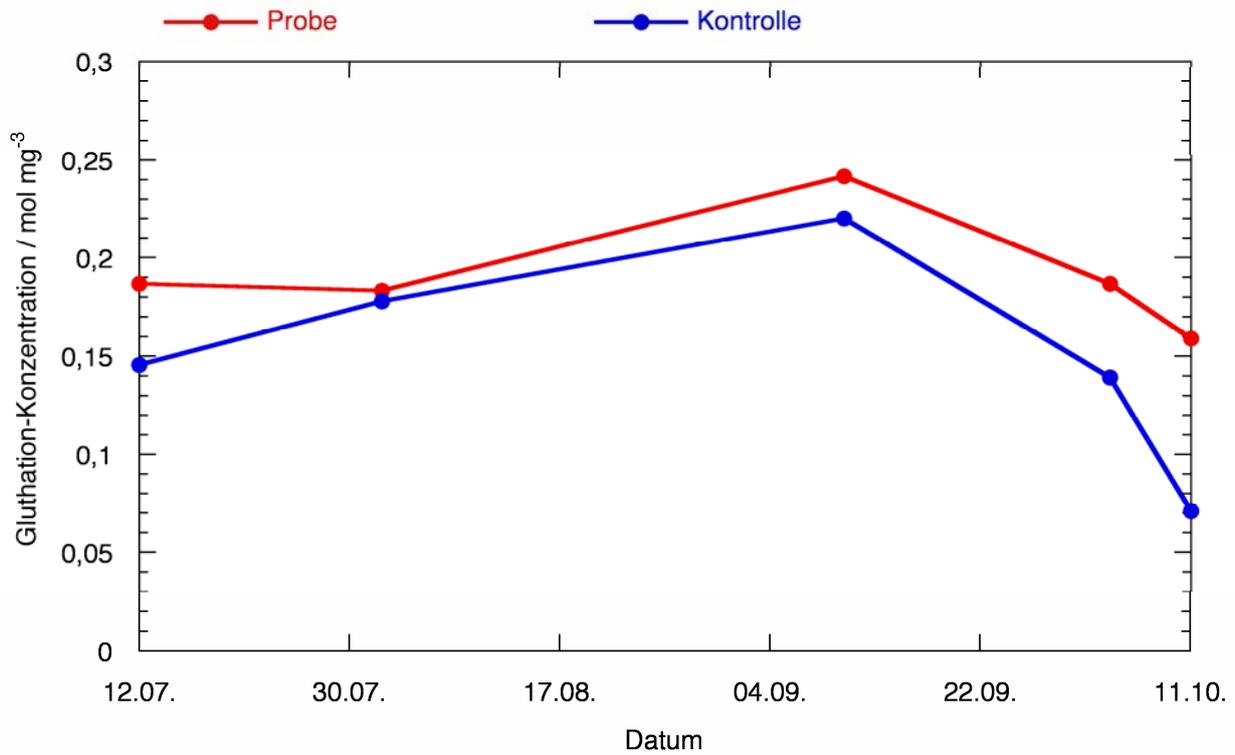


Bild 111: Glutathion-Gehalt von Purpurbeere, 2008

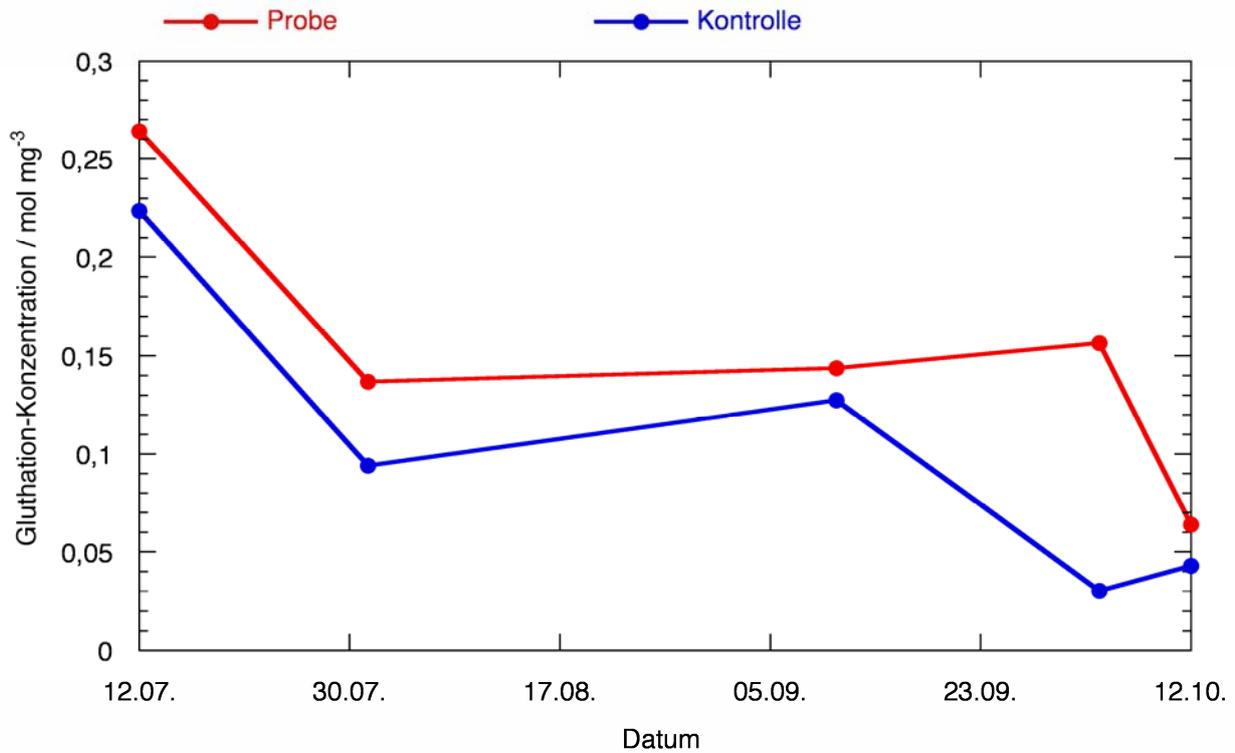


Bild 112: Glutathion-Gehalt von roter Heckenkirsche, 2008

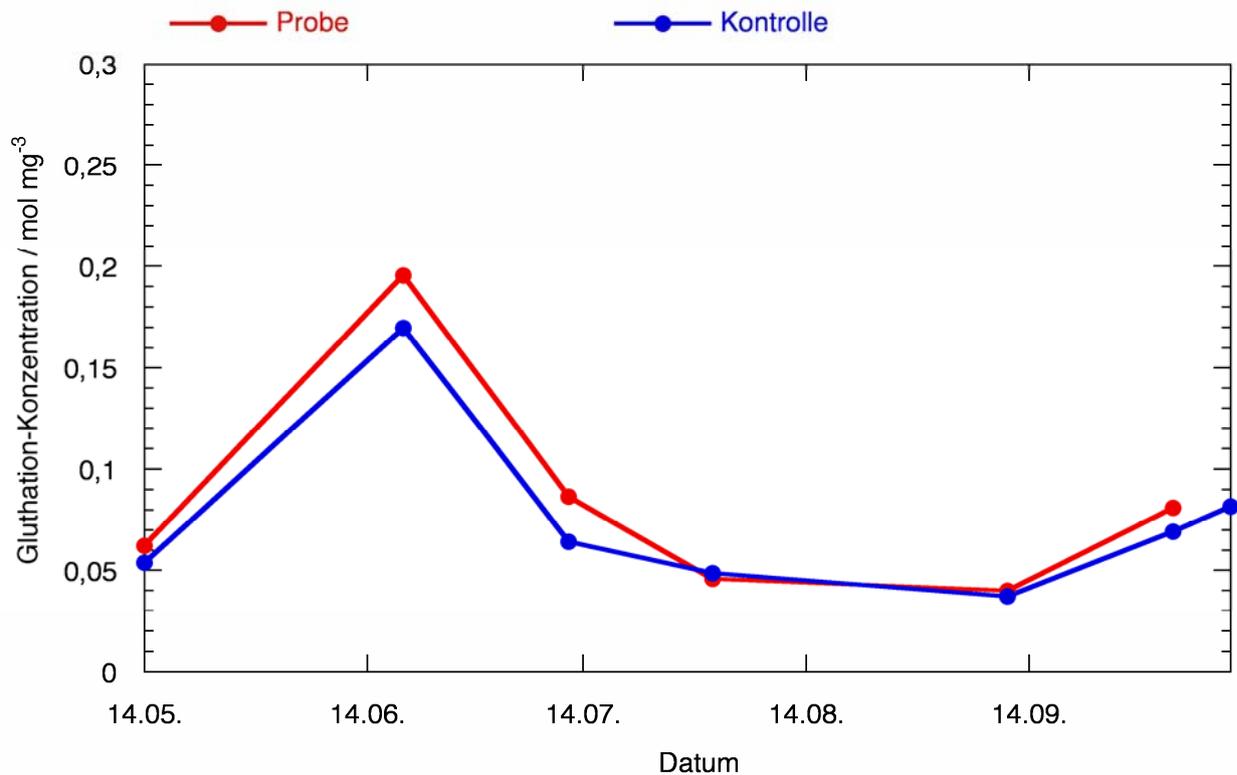


Bild 113: Glutathion-Gehalt von Hundrose, 2008

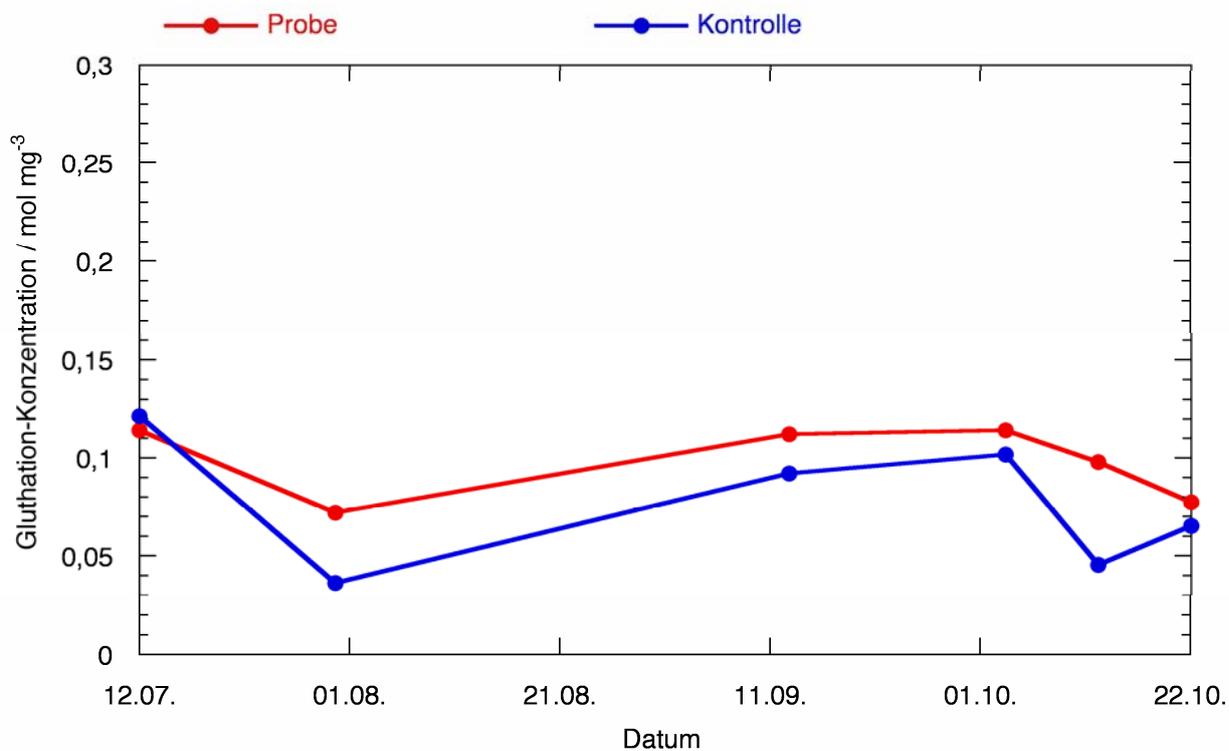


Bild 114: Glutathion-Gehalt von Berg-Johannisbeere, 2008

Photosyntheseaktivität/Chlorophyll

Die Photosynthese lässt sich durch Yield als Grundzustand der Photosyntheseaktivität auf die

Lichtintensität bezogen mit Hilfe der fluorometrischen Messungen bestimmen. Tabelle 27 zeigt die im Jahr 2007 erhaltenen Messergebnisse.

Pflanze	Yield		
	15.05.	12.06.	19.07.
Hundsrose (Probe)	1,081	0,682	0,733
Hundsrose (Kontrolle)	0,729	0,725	0,827
Kirschlorbeer (Probe)	0,718	0,625	0,738
Kirschlorbeer (Kontrolle)	0,775	0,477	0,814
Rote Heckenkirsche (Probe)	0,776	0,677	0,609
Rote Heckenkirsche (Kontrolle)	0,724	0,768	0,631
Purpurbeere (Probe)	0,823	0,882	0,639
Purpurbeere (Kontrolle)	0,889	0,887	0,562
Berg-Johannisbeere (Probe)	0,664	0,757	0,398
Berg-Johannisbeere (Kontrolle)	0,782	0,814	0,473
Kartoffelrose (Probe)	0,764	0,888	0,527
Kartoffelrose (Kontrolle)	0,756	0,845	0,709

Tab. 27: Photosyntheseaktivität der untersuchten Pflanzen gemäß Gleichung 19

Die in Tabelle 27 wiedergegebenen Werte veranschaulichen, dass die PAM Messungen nur wenige Unterschiede zwischen den Straßen- und Kontrollpflanzen zeigen. Es lassen sich mit Hilfe dieses Parameters nur punktuelle Messwerte zu einem bestimmten Messzeitpunkt bestimmen, so dass eine Veränderung durch Messungen an einzelnen Tagen zwischen denen längere Zeiträumen ohne Messungen liegen wahrscheinlich nicht dargestellt werden kann.

Dies wird besonders deutlich, wenn man die Messdaten von Hundsrose und Kirschlorbeer über einen Messzeitraum von mehreren Monaten vergleicht (Bilder 115 und 116). Hier wird deutlich, dass nur unwesentliche Unterschiede festgestellt werden konnten. Die Messwerte weichen nur wenig voneinander ab, auch wenn zu erkennen ist, dass an den Autobahnpflanzen durchgehend eine

niedrigere Rate gemessen worden ist als bei den Kontrollpflanzen. Da die Photosynthese auch von den Lichtverhältnissen abhängt, wird dieser Parameter durch den Tagesverlauf stark beeinflusst. Deshalb wurde an den Messtagen immer darauf geachtet, soweit möglich, immer zum selben Zeitpunkt die Photosyntheserate zu bestimmen.

Um dieses Ergebnis noch einmal zu bestätigen, wurden neben den PAM Bestimmungen auch die Chlorophyllgehalte (Chlorophyll a und b) ermittelt und die Korrelation zwischen diesen sich beeinflussenden Parametern dargestellt (Bilder 117 und 118). Bei beiden Pflanzenarten liegen die Korrelationswerte der Kontrollpflanzen niedriger als bei den Straßenpflanzen im Verlauf des Messzeitraumes.

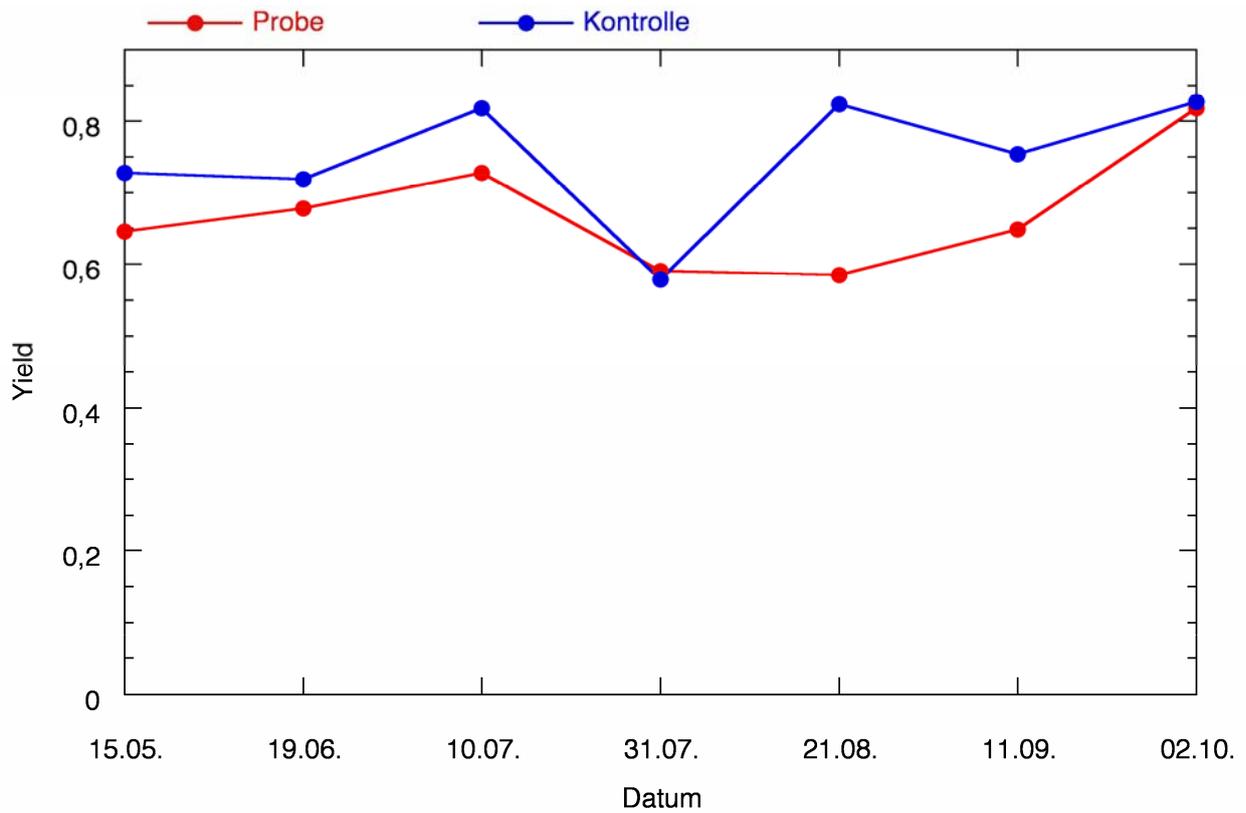


Bild 115: Yield von Hundsrose, A1 und Kontrollpflanze, 2007, nach Gleichung 15

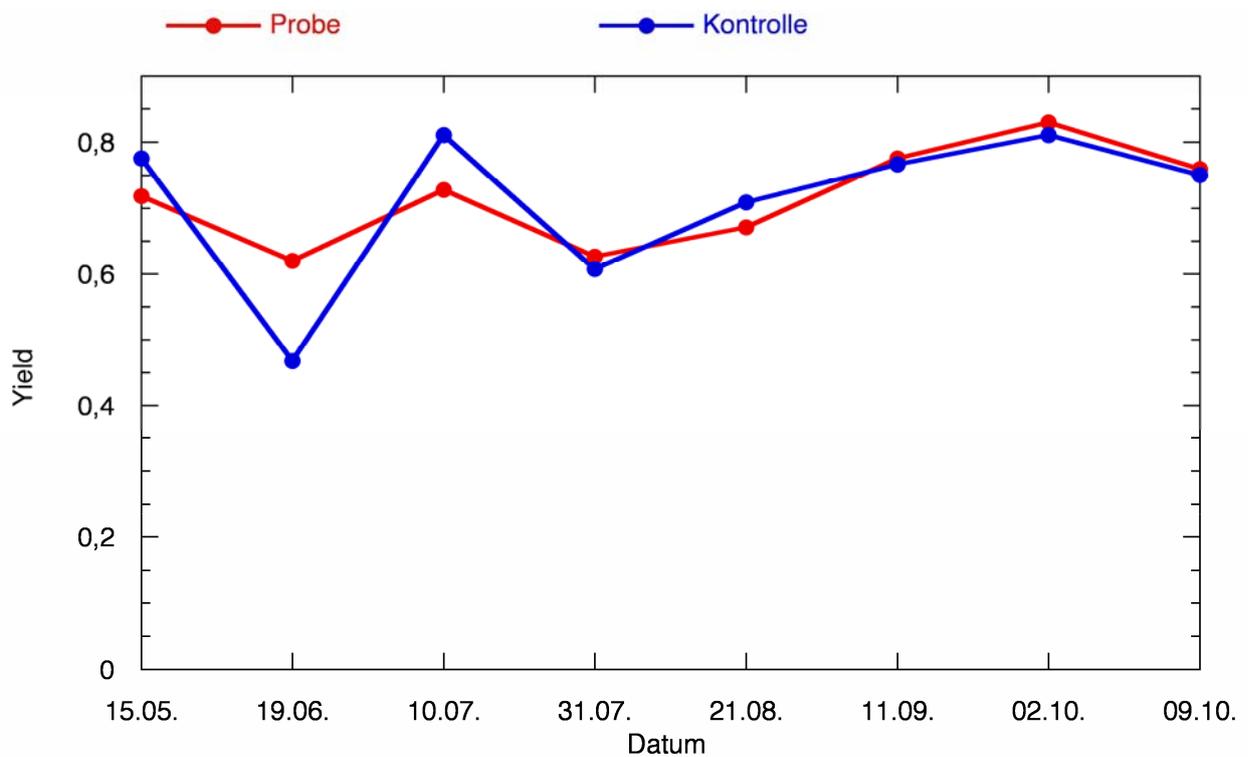


Bild 116: Yield von Kirschlorbeer, A1 und Kontrollpflanze, 2007, nach Gleichung 15

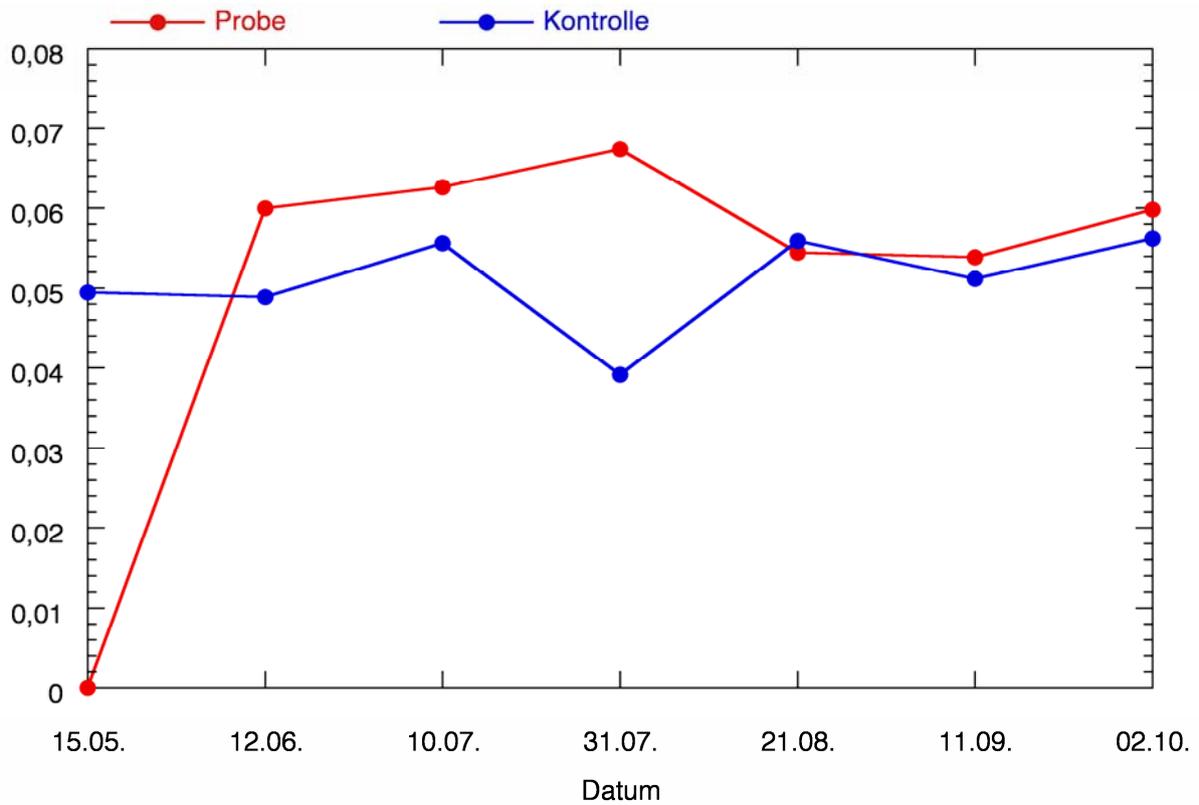


Bild 117: Korrelation von Yield und des Chlorophyll-Gehaltes von Hundsrose, A1 und Kontrollpflanze, 2007

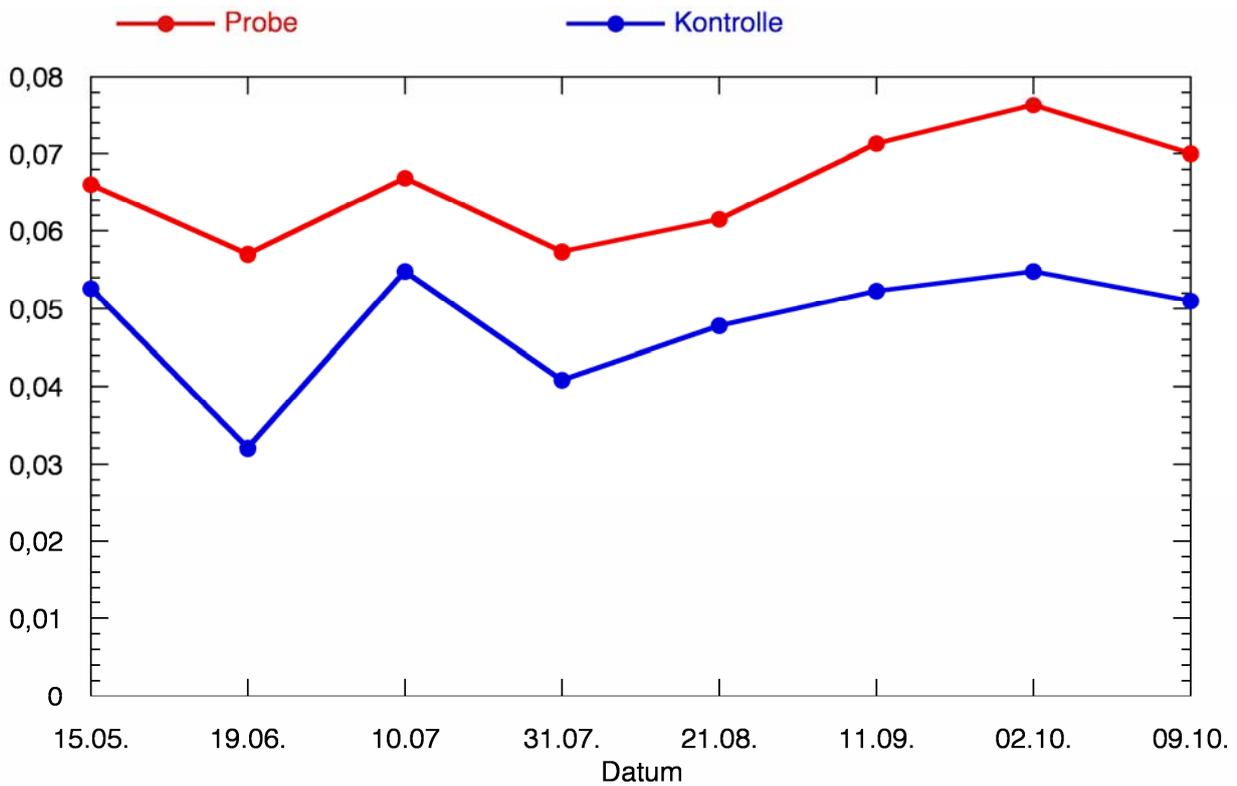


Bild 118: Korrelation von Yield und des Chlorophyll-Gehaltes von Kirschlorbeer, A1 und Kontrollpflanze, 2007

3.3.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die hier dargestellten Messergebnisse der verschiedenen physiologisch relevanten Substanzen, die zur Bestimmung von Stoffwechselaktivitäten bei Pflanzen beispielhaft herangezogen werden können, zeigen erste Versuche/Möglichkeiten zur physiologisch-biochemischen Nachweisbarkeit von Einflüssen durch den Straßenverkehr.

Diese Analysen sind einzigartig und finden in der Literatur keinen direkten Vergleich. Dennoch soll versucht werden, die Effizienz dieser Analysen im Hinblick auf die Thematik Feinstaub und Pflanzen zu diskutieren und zu evaluieren.

Durch einen Vergleich der Messparameter und Messdaten sollen die verschiedenen Stoffwechselfparameter detailliert dargestellt werden und im Hinblick auf ihren Einsatz zur Bewertung von Feinstaub-Einfluss auf Pflanzen bewertet werden. Im Hinblick auf die Thematik lässt sich die wichtigste Fachliteratur folgendermaßen zusammenfassen.

Pflanzen können Staub binden, was bereits Aloys Bernatzky im Jahre 1973 belegt hat, wobei er sich auf eine Untersuchung aus dem Jahre 1947 bezog. Staubfilterung durch Vegetation ist durch die Fähigkeit der Pflanzen ermöglicht, Partikeln aus der Luft zu adsorbieren. Diese Staubfilterung durch Pflanzen funktioniert nicht nach dem „Staubsaugerprinzip“, sondern basiert auf einer langsamen Diffusion entlang entsprechender Diffusionsgradienten. Dabei scheint auch eine wesentliche Rolle zu spielen, dass eine Reduktion von Gasen und Stäuben durch Vegetation nur dann effektiv ist, wenn die Bestände entweder nahe am Emittenten lokalisiert sind oder zumindest in Windrichtung von belasteten Luftpaketen durchströmt werden, (SLINN 1982).

Nach Beckett et al. (2000) wird die Reduktion der Anzahl an Staubpartikeln in bodennahen Luftschichten aber auch von den physikochemischen Eigenschaften der Partikeln, dem Abscheidevermögen der Pflanzenbestände sowie den mikroklimatischen Bedingungen bestimmt.

Die aktuelle Fachliteratur verweist allgemein auf den Beitrag von Vegetation zur Luftverbesserung und Staubleastung, insbesondere in den Städten. Dies impliziert, dass neben den notwendigen Abgasfiltern und restriktiven Verkehrseinschränkungen zur Minderung des Feinstaubproblems eine Neubewertung der Leistungen von Vegetation in der Stadt oder in Autobahnbereichen sowie eine Betrachtung ihrer Wirksamkeit in Bezug auf die aktuelle Problemstellung zukünftig wichtig sind (SLINN 1982, BECKETT 2000). Entscheidend für das Abscheidevermögen der Pflanzen sind neben der Oberflächenbeschaffenheit der Blätter wie z.B.

Relief, Rauigkeit, Behaarung, Benetzbarkeit, Blattgröße, usw. auch der Ansatzwinkel und die Blattstellung sowie Blattsteifigkeit, die Windbeweglichkeit und die Belaubungsdichte (LARCHER 2001).

Im Wesentlichen kann laut aktueller Untersuchungen zwischen der direkten Staubabscheidung (Akkumulation) durch Blattoberflächen und der Selbstreinigungsmöglichkeit der Blätter (Lotus-Effekt) unterschieden werden.

Je nach Blattoberflächenstruktur kann somit eine direkte Staubabscheidung der Pflanzen durch Absetzen der Stäube indirekt zur Reinigung der Luft beitragen. In diesem Zusammenhang erscheint die Bewertung des „Feinstaub-Kreislaufs“ als wichtig und erwähnenswert:

- In einem geschlossenen Pflanzenbestand kann herabfallendes Laub oder regenbedingte Blattwäsche in den Bodenbildungsprozess einbezogen und dauerhaft festgelegt werden.
- Auf versiegelten Flächen mit Solitärvegetation fehlt dieser Prozess einer „Entsorgung“. Hier wird herbstliches Laub dann oft durch den fließenden Verkehr selbst zermahlen und kann somit wieder zum Staubproblem beitragen.
- Bei selbst reinigenden Blättern hingegen kann die gefallene Wassermenge bei zu geringem Regen nicht bis zum nächsten Straßen-Gully reichen und es kommt zu lokalen Staubanreicherungen.

Somit spielen die Auswahl der Gehölze, die richtige Anordnung und Positionierung der Pflanzen eine entscheidende Rolle.

Wenn man die Hauptfraktion der Stäube innerhalb der Vegetationsbestände in der Straßenbahnmitte oder am Straßenrand auffangen möchte, muss eine gute Durchströmbarkeit der luvseitigen Bestandsränder gewährleistet sein.

Eine Sedimentation von Staub wird im Allgemeinen durch die Faktoren Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Temperatur beeinflusst.

Zum Beispiel kann neben der direkten Staubablagung auf der bodennahen Bepflanzung eine Verringerung der Windgeschwindigkeit bei gleichzeitig höherer Luftfeuchtigkeit und tieferen Temperatur bewirken, dass verschiedene Staubarten schneller zu größeren Partikeln agglomerieren und dadurch schwerkraftbedingt leichter sedimentieren. In verschiedenen Untersuchungen konnte dazu gezeigt werden, dass Vegetation im Straßenbereich nur dann windbremsende Wirkung hat, wenn sie bodennah (bis etwa 1 m Höhe) direkt am Straßenrand oder auf dem Mittelstreifen ange-

pflanzt wird. Direkt am Boden kann die Windgeschwindigkeit hier sogar bei Null liegen, was eine optimale Voraussetzung für die Sedimentation von Staub zu sein scheint (BECKET 1998, 2000; LARCHER 2001).

Die hier kurz dargestellte Zusammenfassung der wesentlichen Literatur zur Thematik zeigt, dass das wissenschaftliche und ökologische Interesse an Pflanzen zur Staubreduzierung von zunehmender Bedeutung ist. Eine Diskussion der Literatur mit den hier durchgeführten biochemischen Analysen kann an dieser Stelle nicht vorgenommen werden, da in keiner Untersuchung pflanzenphysiologische Parameter herangezogen wurden, mit deren Hilfe

- zum einen Effekte auf die Pflanzen,
- zum anderen aber Pflanzen verglichen werden,

um so eine optimale Vegetation im Straßenbereich zu erhalten.

Ein Eindringen der abgeschiedenen Partikel in das Innere der Blätter über die Spaltöffnungen ist als eher unwahrscheinlich anzusehen. Dies beruht auf der Tatsache, dass sich die Spaltöffnungen auf den Blattunterseiten befinden, der Feinstaub aber bevorzugt auf der Oberseite abgeschieden wird. Darüber hinaus bewegen sich die Blätter im Wind, so dass an den Spaltöffnungen angelagerte Partikeln durch die Bewegungen wieder entfernt werden.

H_2O_2 ist ein starkes Zellgift, das in den Peroxisomen der Pflanzenzellen gebildet wird, um giftige Peroxide unschädlich zu machen, die zum Beispiel auch dadurch entstehen können, dass durch Partikeln verstopfte Spaltöffnungen nicht mehr den Gasaustausch des Blattes regulieren können und somit ein Sauerstoffüberschuss in den Blättern entstehen kann. Überschüssiges H_2O_2 wird durch das Enzym Katalase schnell wieder zu Wasser und Sauerstoff abgebaut. Die hier durchgeführten Katalasemessungen zeigen, dass Pflanzen, die an der Autobahn wachsen, einem höheren oxidativen Stress ausgesetzt sind. Bei allen Pflanzenarten an diesem Standort zeigen sich höhere Katalaseaktivitäten als bei den Kontrollpflanzen. Dies kann durch Autoabgase, aber auch durch Feinstaubpartikeln verursacht werden. Dieses Enzym ist also ein Parameter, den man zur Beurteilung heranziehen kann. Es müssten jedoch noch genauere spezifische Analysen und Windkanalexperimente mit spezifischen Stäuben sowie Tagesgangmessungen durchgeführt werden, um hier eine konkrete Aussage treffen zu können.

Im Gegensatz dazu scheint die Malatdehydrogenase als Messparameter im Hinblick auf die gestellte Problematik nicht geeignet. Es handelt

sich um ein Enzym, das die chemische Reaktion von Malat zu Oxalacetat katalysiert und daher unverzichtbar in mehreren Teilen des Stoffwechsels, insbesondere im Citratzyklus, im Aspartatzyklus, und beim Energietransport durch die Malatschleuse ist. Die Ermittlung der Mittelwerte aus den jeweils drei Probenahmen lassen nur auf geringfügige bis keine Unterschiede zwischen den Kontrollpflanzen und den Straßensträuchern schließen. Dieser Parameter sollte somit erst dann hinzugezogen werden, wenn die Stoffwechselaktivitäten der Pflanzen in hohem Maße gestört sind und die Blätter bereits optisch sichtbare Erkrankungen (Nekrosen) ausweisen. Aus diesem Grunde wurde dieser Parameter im weiteren Verlauf der Analysen nicht mehr berücksichtigt.

Glutathion ist ein kleines Tripeptid aus den Aminosäuren Glutamat, Cystein und Glycin (Glu-Cys-Gly), das wie eine Art Redox-Puffer reagiert. Die hier durchgeführten Analysen zeigen, dass durchgehend die Pflanzen an der Autobahn höhere Glutathionkonzentrationen aufweisen als die entsprechenden Kontrollen. Offensichtlich besteht ein Zusammenhang zwischen der Menge des Antioxidans Glutathion und der Fähigkeit der Pflanze, den Stress durch den Straßenverkehr zu tolerieren. Hier würde ein Vergleich mit verschiedenen Emissionsparametern wie Stickoxide, Kohlenstoffdioxid oder ein direkter Vergleich mit der Beeinflussung durch Staubpartikeln im Windkanal konkretere Ergebnisse liefern. Dennoch weisen die Messergebnisse darauf hin, dass dieser Parameter für Vergleiche genutzt werden kann.

Ähnlich wie bei den Untersuchungen zur Malatdehydrogenase lassen sich die Analysen zur Photosyntheseaktivität durch die Bestimmung des Yield und der Chlorophyllmessungen darstellen. Auch hier zeigen sich zwar an einigen Messtagen auffallende Unterschiede, jedoch können mit den vorgenommenen punktuellen Messungen keine Aussagen über Belastungen vorgenommen werden. Aktuelle Messungen an Efeuhecken im innerstädtischen Straßenbereich, wo dieser Parameter über 20 Stunden gemessen wird, lassen dagegen negative Effekte des Straßenverkehrs auf Straßenpflanzen insbesondere innerhalb der rush-hour Phasen deutlich werden. PAM und Chlorophyll als Parameter für die Findung von besonders robusten Pflanzen scheinen dann sinnvoll. Auch dies könnte in Folgeexperimenten im Windkanal noch einmal detaillierter untersucht werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit Hilfe von biochemischen Untersuchungen die Beeinflussung von Pflanzen durch Straßenverkehr analysiert werden kann. Glutathion scheint bis dato ein geeigneter Parameter, um den Stress der Pflanzen durch den Straßenverkehr wiederzugeben. Die anderen, eher verzögert

auftretenden Einflüsse auf den pflanzlichen Stoffwechsel können sicherlich mit Hilfe von Malatdehydrogenase, Katalase, PAM und Chlorophyll bestimmt werden; hier müssen zukünftige Untersuchungen detailliert geplant werden. Die durchgeführten Messungen liefern somit erste Ergebnisse, auf die aufbauend weiterführende Analysen durchgeführt werden können. Ergänzende Analysen im Windkanal, wo zusätzliche Stressparameter – Stickoxide, Ozon, Kohlenstoffoxide – ausgeschlossen werden können, können spezifisch auf den Feinstaub abgestimmte Beeinflussungen des Stoffwechsels aufzeigen und sind für die Zukunft geplant.

Langzeitversuche, vergleichend am Außenstandort und unter Laborbedingungen

- zum Abscheidepotential und
- zur physiologischen Belastbarkeit

sollen ebenfalls zur Auswahl besonders robuster Straßenpflanzen beitragen. Die zukünftigen Untersuchungen werden auf den hier vorgenommenen Analysen aufbauen.

4 Feldmessungen

4.1 Einleitung

Die Feldmessungen sollten den realen Einfluss von Pflanzen entlang der Autobahnen auf die Feinstaubkonzentration aufzeigen und stellen gleichzeitig den größten Maßstab der durchgeführten Untersuchungen dar. Um einen möglichen Effekt der Pflanzen auf die Feinstaubkonzentration erkennen zu können, mussten Messgeräte vor und hinter der Hecke platziert werden. Vor der Hecke bedeutet in diesem Fall, auf der dem Verkehr zugewandten Seite, auch Luv genannt. Die dem Verkehr abgewandte Seite der Hecke wird im Folgenden mit Lee bezeichnet. Als Messgeräte kamen laseroptische Aerosolspektrometer der Modelle EnvironCheck 107 und DustMonitor 1.108 der Firma Grimm Aerosoltechnik zum Einsatz. Die Messgeräte des Typs EnvironCheck 107 wurden zum Schutz gegen äußere Einflüsse in einem Wetterschutzgehäuse untergebracht, das gleichzeitig der Aufnahme zusätzlicher Sensoren für die Erfassung klimatischer Parameter dient. An klimatischen Parametern wurden Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck sowie Windrichtung und -geschwindigkeit erfasst. Für die Geräte des Typs DustMonitor 1.108 standen keine Wetterschutzgehäuse zur Verfügung, so dass diese nur bei günstigen Witterungsverhältnissen ohne Niederschläge eingesetzt werden konnten.

Im Raum Wuppertal konnten zwei geeignete Messplätze für die Durchführung der Feldmessungen gefunden werden. Als Kriterien für die

Auswahl eines Messplatzes wurden im Vorfeld unter anderem die gute Erreichbarkeit mit Fahrzeugen, ein ausreichendes Platzangebot für die Aufstellung der Messgeräte und eine bereits vorhandene Hecke als Messobjekt aufgestellt. Nach einer umfangreichen Suche wurde jeweils ein Messplatz an der Autobahn 1 und an der Autobahn 46 ausgewählt.

4.2 Messplatz Autobahn A1

Der erste Messplatz liegt an der A1 unterhalb der Blombachtalbrücke in Fahrtrichtung Köln zwischen den Anschlussstellen Wuppertal-Langerfeld und Ronsdorf. Dieser Abschnitt wird täglich von rund 62.000 Fahrzeugen benutzt, wobei der Anteil des Schwerverkehrs bei 16,6 % liegt (BAST, 2007). In diesem Bereich teilen sich die Richtungsfahrbahnen auf, wodurch ein bis zu 300 m breiter Zwischenraum entsteht. Das Niveau des Zwischenraums ist gegenüber den Fahrbahnen um bis zu 15 Metern erniedrigt, so dass sich an beiden Seiten unterschiedlich steile Böschungen ergeben. Der Zwischenbereich wird durch mehrere Zufahrten erschlossen und bietet ausreichend freie Flächen für die Aufstellung von Pflanzen und Messgeräten. Die Fahrbahn wird zur Zwischenfläche mit einer ungefähr einen Meter hohen Betongleitwand abgegrenzt. Somit konnten Messgeräte nahe an der Fahrbahn aufgestellt und gleichzeitig eine Gefährdung durch den fließenden Verkehr verhindert werden. Die Aufstellung der Messgeräte am Messplatz ist auf den Bildern 119 und 120 zu sehen. Das Luv-Messgerät wurde stets hinter der Betongleitwand in einem seitlichen Abstand von rund 1,2 Metern aufgestellt. Die Ansaugung der Probenluft erfolgte in einer Höhe von einem Meter über dem Boden. Das Lee-Messgerät wurde in einem Abstand von rund 20 Metern zum Luv-Messgerät aufgestellt. Die Ansaugung der Probenluft erfolgte in einer Höhe von zwei Metern über dem Boden, lag aber aufgrund der Geländebeschaffenheit ungefähr einen Meter unter der Ansaughöhe des Luv-Messgerätes. Die Erfassung der klimatischen Parameter erfolgte bei allen Messungen nur mit dem Lee-Messgerät.

Die Betongleitwand entlang des Messplatzes wurde im Zuge von Messungen hinsichtlich ihres möglichen Einflusses auf die Feinstaubkonzentration untersucht. Es wurde vermutet, dass die Betongleitwand zu einer Umlenkung der Luftströme führt, die vom Fahrzeugverkehr verursacht werden und so einen Einfluss auf ermittelte Feinstaubkonzentrationen ausübt. Die erste Messung zur Überprüfung dieser Annahme wurde mit zwei Messgeräten durchgeführt, die in zwei unterschiedlichen Höhen an der Betongleitwand Probenluft angesaugt haben. Ein

Messgerät analysierte die Luft in einer Höhe von einem Meter über dem Boden, während das zweite Messgerät die Luft in einer Höhe von zwei Metern über dem Boden untersuchte. Die Aufstellung dieses Gerätes ist in Bild 121 abgebildet. Um in einer Höhe von zwei Metern Luft ansaugen zu können, wurde das Messgerät mit einem entsprechend langen Aluminiumrohr ausgestattet, das mit dem pilzförmigen Probennahmekopf der Firma Grimm abgeschlossen wurde. Gleichzeitig erfolgte wieder der Einsatz des Lee-Messgerätes in 20 Metern Entfernung.

Bei dieser Messreihe zeigte sich ein deutlicher Unterschied in den Konzentrationen der drei Fraktionen PM₁₀, PM_{2,5} und PM₁ zwischen den beiden Messgeräten an der Betongleitwand. Die Fraktionen PM_{2,5} und PM₁ waren in zwei Metern Höhe leicht erniedrigt, während die Fraktion PM₁₀ um den Faktor 2,4 höher lag als in einem Meter Höhe. Auf den Bildern 124 bis 126 sind die Verläufe der ermittelten Feinstaubkonzentrationen in den Fraktionen PM₁₀, PM_{2,5} und PM₁ zu sehen. Um diesen Sachverhalt genauer erklären und detailliertere Informationen gewinnen zu können, wurden die Messungen an der Betongleitwand ausgeweitet und modifiziert. Dazu wurde ein Messgerät hinter der Gleitwand in verschiedenen Höhen und Entfernungen positioniert und die Feinstaubkonzentration an diesen einzelnen Messpunkten ermittelt; es wurde ein Profil der Feinstaubkonzentration erstellt. Um das Messgerät in den verschiedenen Positionen und Höhen sicher fixieren zu können, wurde eine spezielle Vorrichtung gebaut. Zusätzlich kann die Höhe der Probennahme über verschieden lange Ansaugrohre weiter variiert werden. Damit können Messhöhen zwischen 25 Zentimetern und zwei Metern über dem Boden realisiert werden. Da die Fahrbahn direkt bis zur Betongleitwand reicht, konnte kein Messgerät vor dieser Wand aufgestellt werden, eine Aussage über die entsprechenden Feinstaubkonzentrationen vor der Wand konnte daher nicht gemacht werden. Das Mittelungsintervall des Messgerätes wurde auf sechs Sekunden eingestellt um Konzentrationsänderungen möglichst schnell erfassen zu können. An jedem Messpunkt wurde für eine Dauer von vier Minuten gemessen. Insgesamt erstreckte sich damit der Zeitraum für die Erstellung eines einzelnen Profils auf über zwei Stunden.

Bild 122 zeigt die verwendete Profilmesseinrichtung an der Betongleitwand, während Bild 123 die Verteilung der Messpunkte der Profilmessung schematisch darstellt. Bei der Auswertung der Profilmessungen fällt auf, dass die Konzentrationen von der Höhe über dem Boden und der Partikelgröße abhängen. Der seitliche

Abstand zur Betongleitwand scheint eine nur untergeordnete Rolle zu spielen. So ergibt sich für die Messungen am 22. April 2008 eine deutliche Ausprägung des Profils mit einem Minimum bei einer Höhe von rund 55 Zentimetern, das besonders bei Partikeln mit einer Größe zwischen 0,23 und 0,5 µm auffällt. Für die anderen Partikelgrößen fällt ein solches Muster nicht auf, da die größeren Partikeln an dieser Stelle kaum vorhanden sind. Diese Ausprägungen sind einem Abstand von 10, 40 und 80 Zentimetern zu erkennen und unterscheiden sich jeweils nur geringfügig voneinander, wie in den Bildern 127 bis 132 zu erkennen ist.

Am Folgetag, dem 23. April 2008, stellte sich die Situation vollkommen anders dar. Besonders auffällig ist der starke Unterschied der Konzentration von Partikeln in einer Größe von 0,23 bis 0,4 µm. Dieser Anteil ist gegenüber dem Vortag stark erniedrigt und auch das auffällige Muster ist im Profil nicht mehr zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist der Anteil an Partikeln größer 2 µm etwas erhöht. Auch hier zeigen die Bilder 133 bis 138 die aufgenommenen Profile in Abständen von 10, 40 und 80 Zentimetern.

Die Ergebnisse zweier weiterer Messungen am 05. und 06. Mai 2008 zeigen die Bilder 139 bis 142. Hier wurden Profile in einem konstanten Abstand von 80 Zentimetern von der Betongleitwand in einer Höhe zwischen 25 und 155 Zentimetern erstellt. Mit diesen Messungen sollte die Frage nach der Verteilung der Feinstaubkonzentration in größeren Höhen über dem Boden beantwortet werden. Der konstante Abstand von 80 Zentimetern wurde gewählt um eine Gefährdung des Verkehrs auf der Autobahn durch die Messeinrichtung unter allen Umständen zu vermeiden. Das Mittelungsintervall für die Messungen betrug wiederum sechs Sekunden bei einer Messdauer von vier Minuten pro Messpunkt.

Besonders auffällig ist der Konzentrationsverlauf für die Partikeln mit einem Durchmesser zwischen 0,23 und 0,5 µm. Dieser ähnelt in seinem Verlauf sehr stark dem vom 22. April 2008, gleichzeitig ist der Anteil der Partikeln größer 2 µm erhöht. Wie aus Tabelle 28 zu entnehmen ist, weichen die Temperatur, relative Luftfeuchte und der Luftdruck zum Zeitpunkt der Messungen nur geringfügig voneinander ab. Die Windverhältnisse sind dagegen an beiden Tagen deutlich verschieden. Jedoch ist die niedrigere Windgeschwindigkeit am 05. Mai mit der am 23. April zu vergleichen, was als Erklärung für den erhöhten Anteil größerer Partikeln dienen kann. Am 22. April herrschte eine höhere Windgeschwindigkeit vor, die für eine Verwehung dieser Partikeln und damit zu einer Nichterfassung geführt haben kann.

Die Ausbildung von besonders auffälligen Mustern an zwei unterschiedlichen Messtagen bei vergleichbaren klimatischen Bedingungen lässt den Schluss zu, dass es im Bereich der Betongleitwand zu Strömungseffekten kommt, die einen direkten Einfluss auf die Feinstaubkonzentration in der unmittelbaren Nähe haben. Bei diesen Strömungseffekten kann es sich beispielsweise um Wirbel handeln, die so zu den unterschiedlich großen Konzentrationen an Feinstaub führen. Allerdings ist dieses Ergebnis

nur bedingt verwertbar, da zum einen die genauen Strömungsverhältnisse im Bereich der Betongleitwand nicht bekannt sind und zum anderen die Konzentration des Feinstaubes vor der Betongleitwand aufgrund des Straßenverkehrs nicht gemessen werden konnte. Daher ist keine abschließende Aussage möglich, ob die beobachteten Konzentrationsverläufe durch die Betongleitwand selber oder durch eine veränderte Emission auf Seiten des Verkehrs oder anderer diffuser Quellen zu Stande gekommen sind.

Parameter	22. April 2008	23. April 2008	05. Mai 2008	06. Mai 2008
Lufttemperatur / °C	10,5	12,0	12,5	20,3
Relative Luftfeuchte / %r.F.	66	59	58	46,2
Luftdruck / hPa	994	1004	1015	1017
Windgeschwindigkeit / ms ⁻¹	1,34	0,51	0,49	1,01
Windrichtung / °	204	145	181	205

Tab. 28: Meteorologische Parameter während der Profilmessungen im April und Mai 2008

Um die Feinstaubkonzentration am Messplatz A1 ohne Verkehrseinflüsse messen zu können, wurde eine zusätzliche Messung am Samstag, den 24. Mai 2008 durchgeführt. Für die Durchführung umfangreicher Bauarbeiten wurde die A1 vom Abend des 23. Mai 2008 bis zum Mittag des 25. Mai 2008 für den Verkehr in beiden Richtungen zwischen den Autobahnkreuzen Leverkusen und Wuppertal-Nord gesperrt und wurde nur vereinzelt von Baustellenfahrzeugen befahren. Damit konnte die permanent vorhandene Feinstaubkonzentration ohne Verkehrseinflüsse bestimmt werden. Die Messung wurde am 24. Mai zwischen sechs und acht Uhr Morgens durchgeführt, um Störungen durch den Baustellenverkehr und einen angekündigten Wetterwechsel ausschließen zu können. Zum Zeitpunkt der Messungen herrschte nahezu Windstille, so dass ein Transport von Feinstaub aus entfernten Quellen zum Messplatz weitgehend ausgeschlossen werden konnte. Bedingt durch die frühe Tageszeit war es noch kühl und es herrschte eine hohe relative Luftfeuchte vor. Die durchschnittlichen klimatischen Bedingungen während der Messung sind in Tabelle 29 wiedergegeben.

Parameter	Wert
Temperatur	9,4 °C
Relative Luftfeuchte	80,5 %
Luftdruck	1001 hPa
Windgeschwindigkeit	0,32 ms ⁻¹

Tab. 29: Meteorologische Parameter am 25. Mai 2008

Die Messungen ergaben geringfügig erniedrigte Feinstaubwerte am Lee-Messgerät im Vergleich zu Messungen während normaler Verkehrssituationen. Im Durchschnitt ergaben sich für die Fraktion PM10 21,1 µgm⁻³, für die Fraktion PM2,5 18,5 µgm⁻³ und für PM1 17,0 µgm⁻³. Der zeitliche Verlauf der Feinstaubkonzentration während der Messung ist in Bild 143 zu sehen.



Bild 119: Luv-Messgerät an der A1



Bild 121: Luv-Messgerät mit Ansaugung in 2 Metern Höhe



Bild 120: Lee-Messgerät an der A1



Bild 122: Profilmesseinrichtung

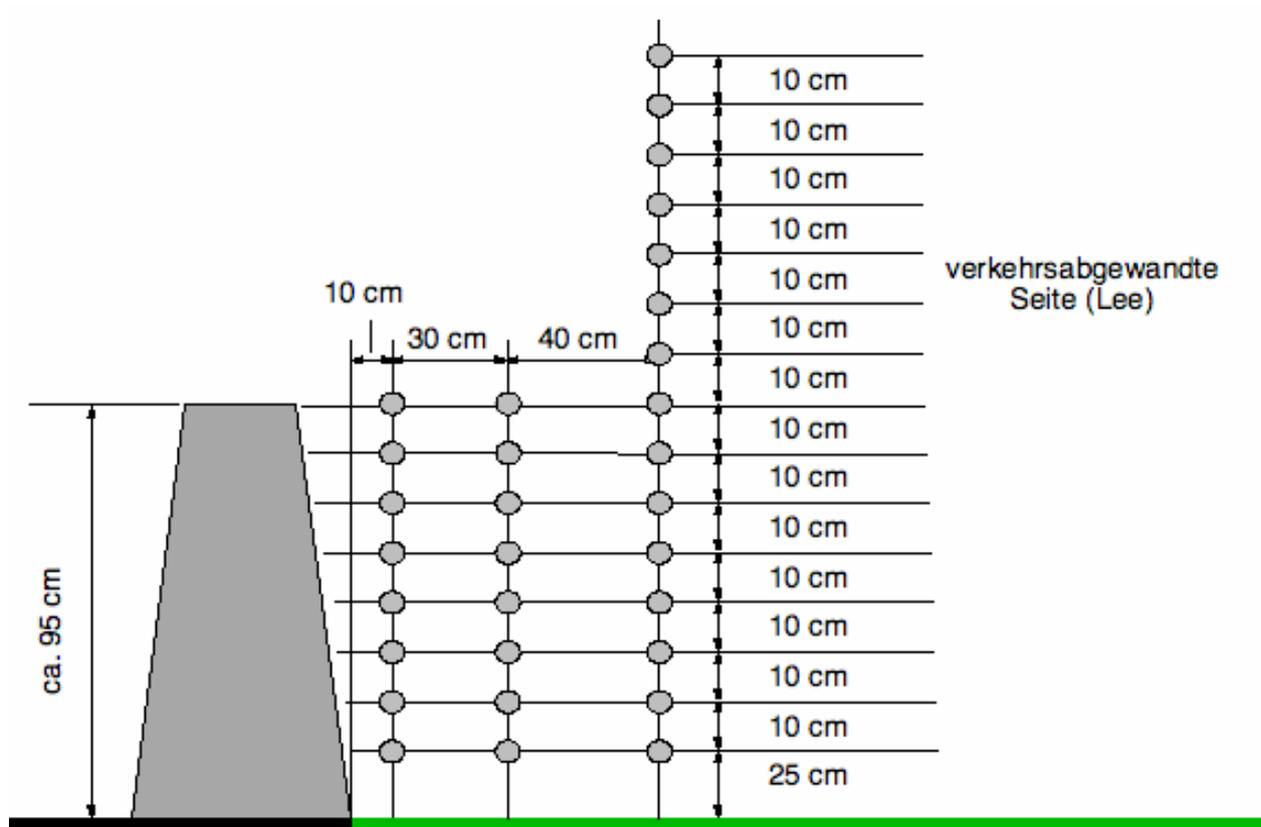


Bild 123: Verteilung der Messpunkte zur Erstellung eines Konzentrationsprofils

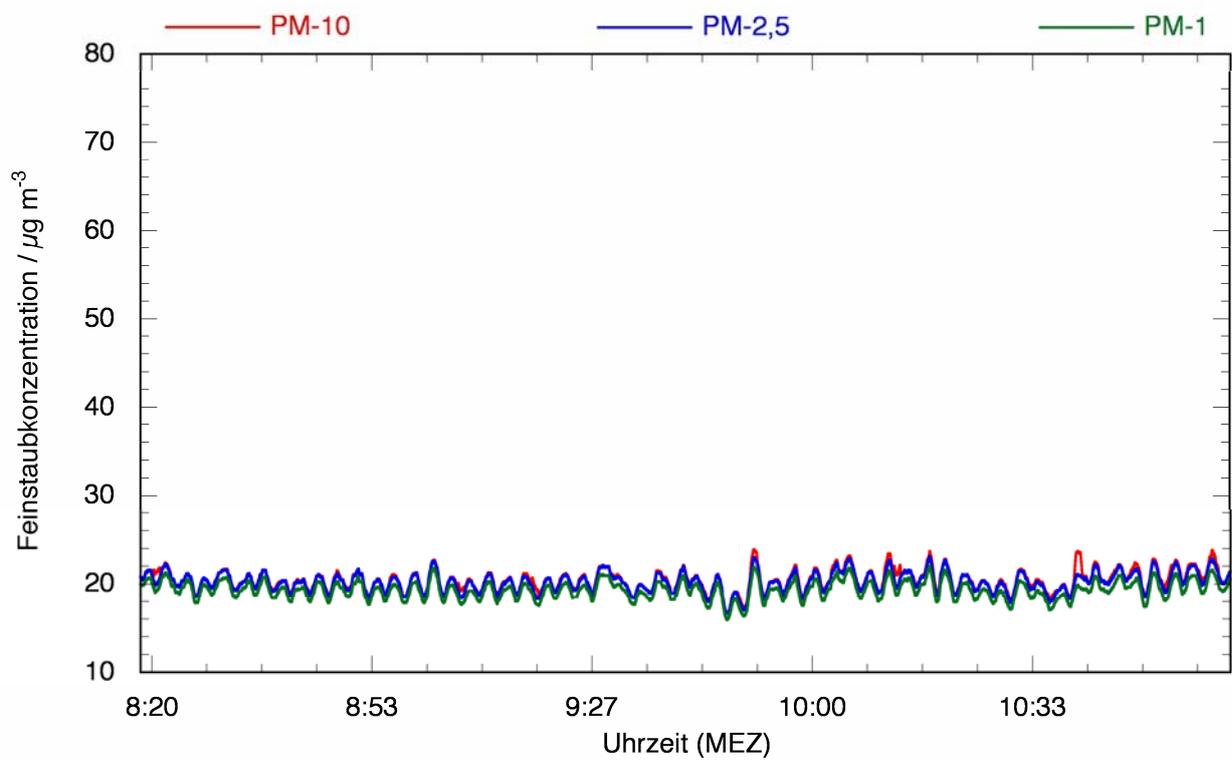


Bild 124: Feinstaubkonzentration an der Fahrbahn in 1 Meter Höhe, 14. Februar 2008

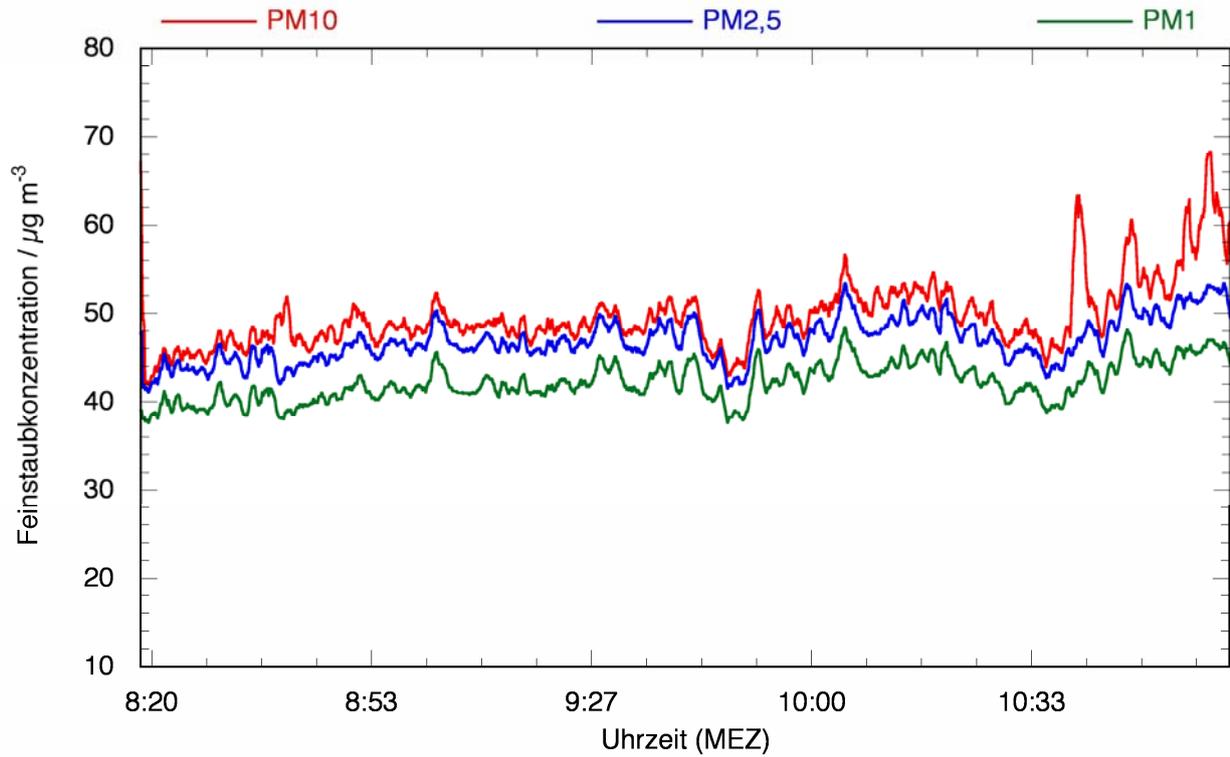


Bild 125: Feinstaubkonzentration in 2 Metern Höhe, 14. Februar 2008

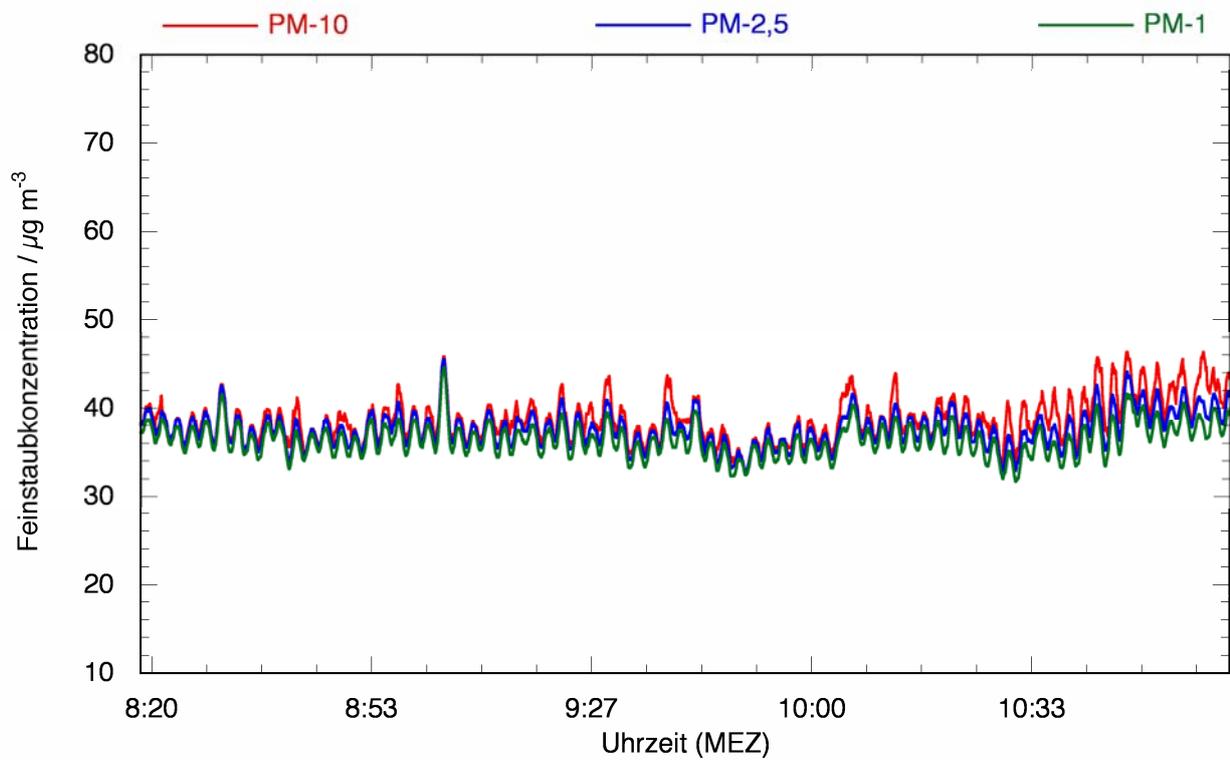


Bild 126: Feinstaubkonzentration im Lee, 14. Februar 2008

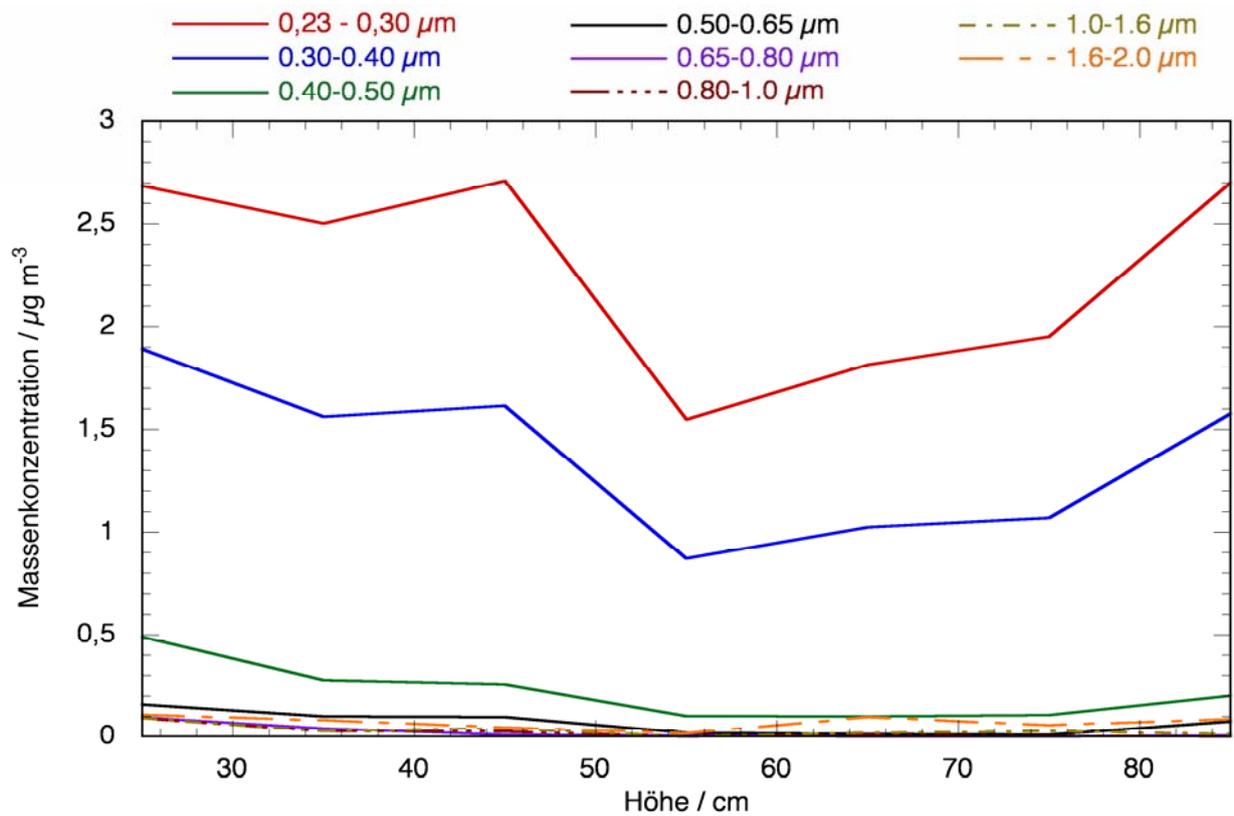


Bild 127: Profil vom 22. April 2008, Abstand 10 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 μm

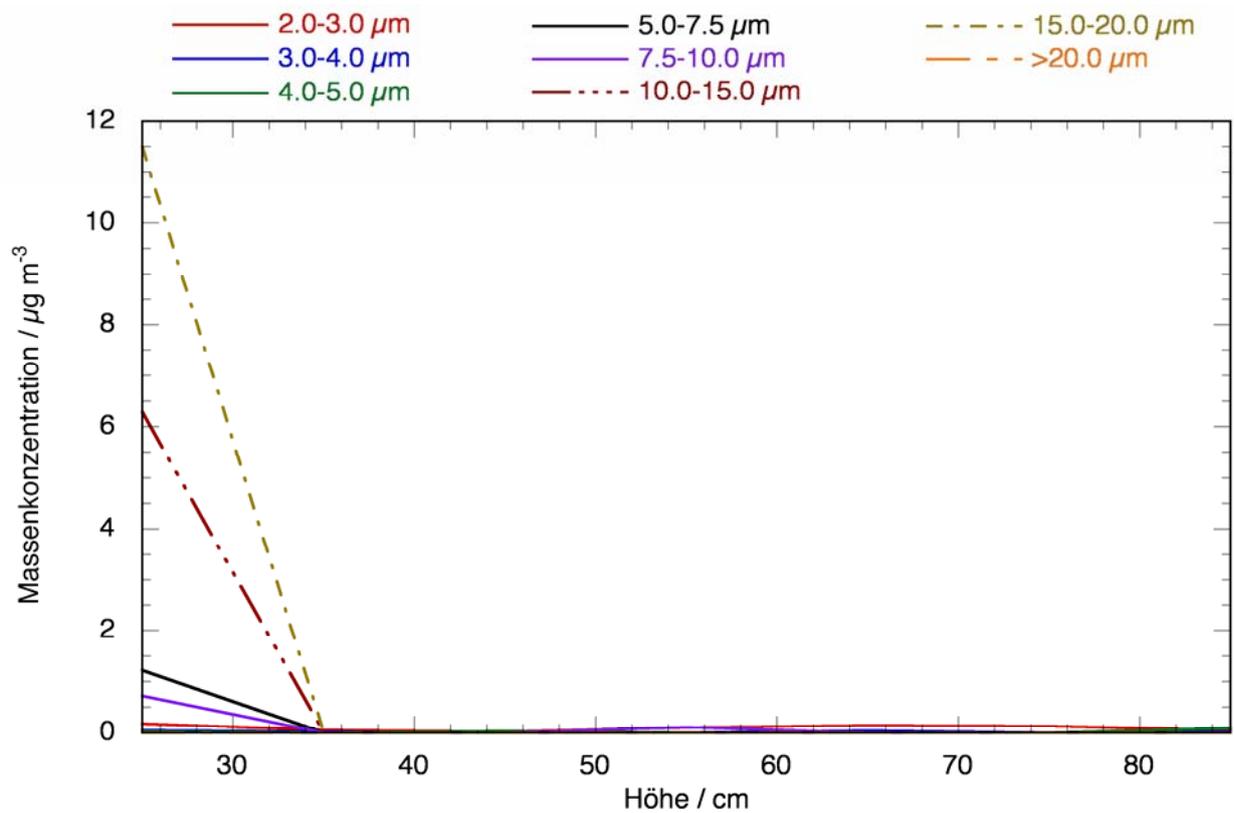


Bild 128: Profil vom 22. April 2008, Abstand 10 cm, Partikelgröße 2 bis 20 μm

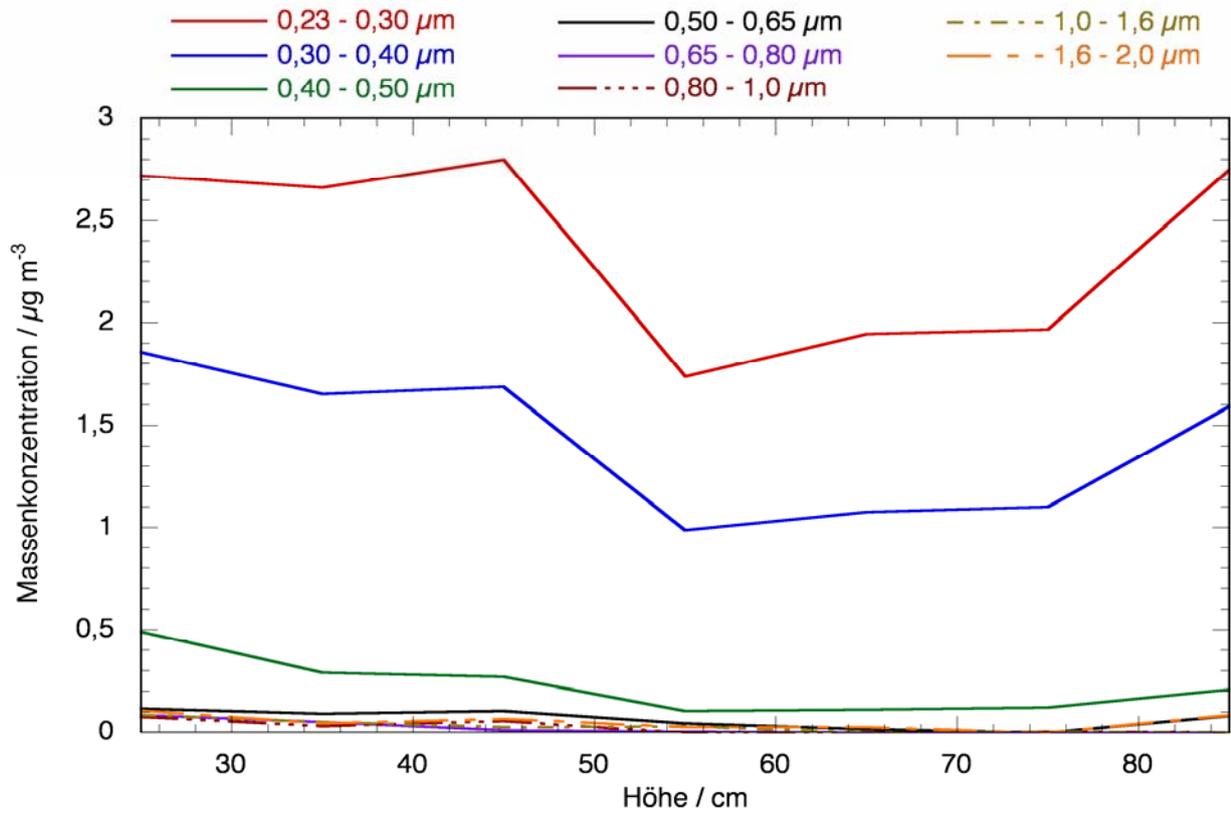


Bild 129: Profil vom 22. April 2008, Abstand 40 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 μm

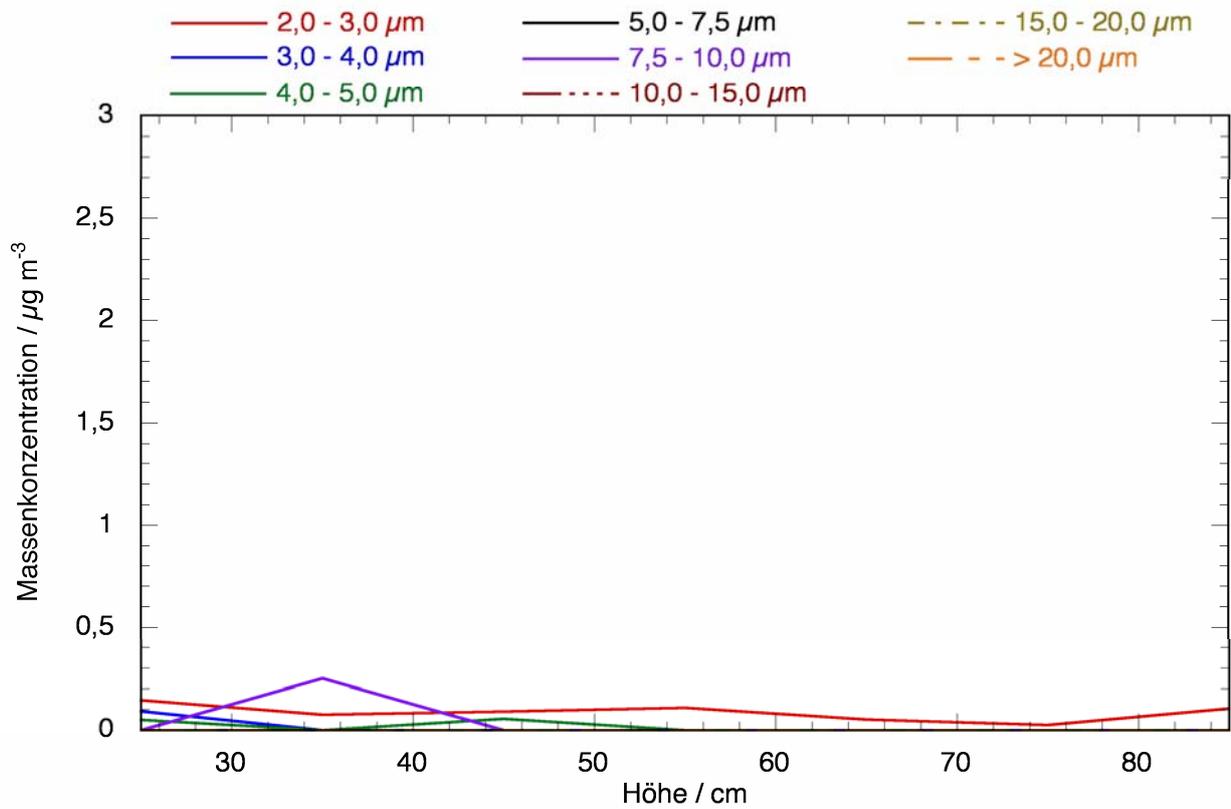


Bild 130: Profil vom 22. April 2008, Abstand 40 cm, Partikelgröße 2 bis 20 μm

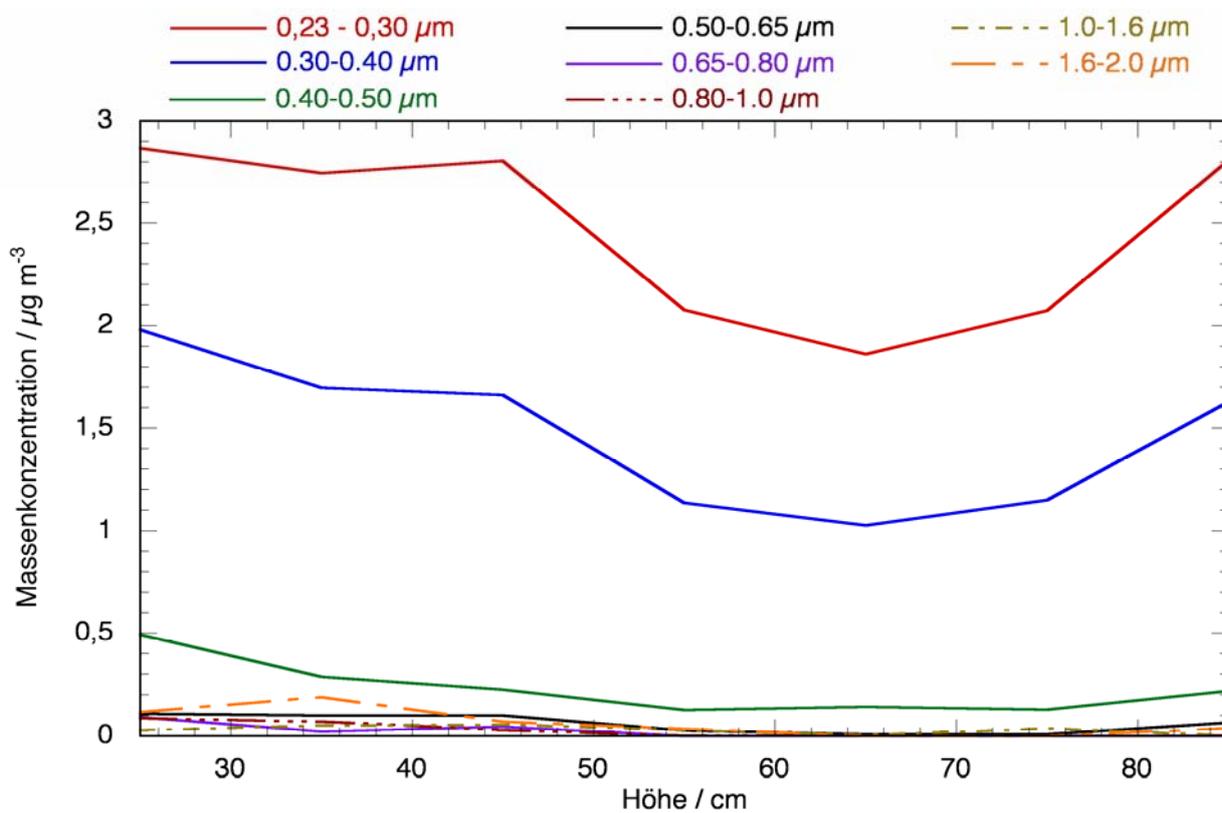


Bild 131: Profil vom 22. April 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 μm

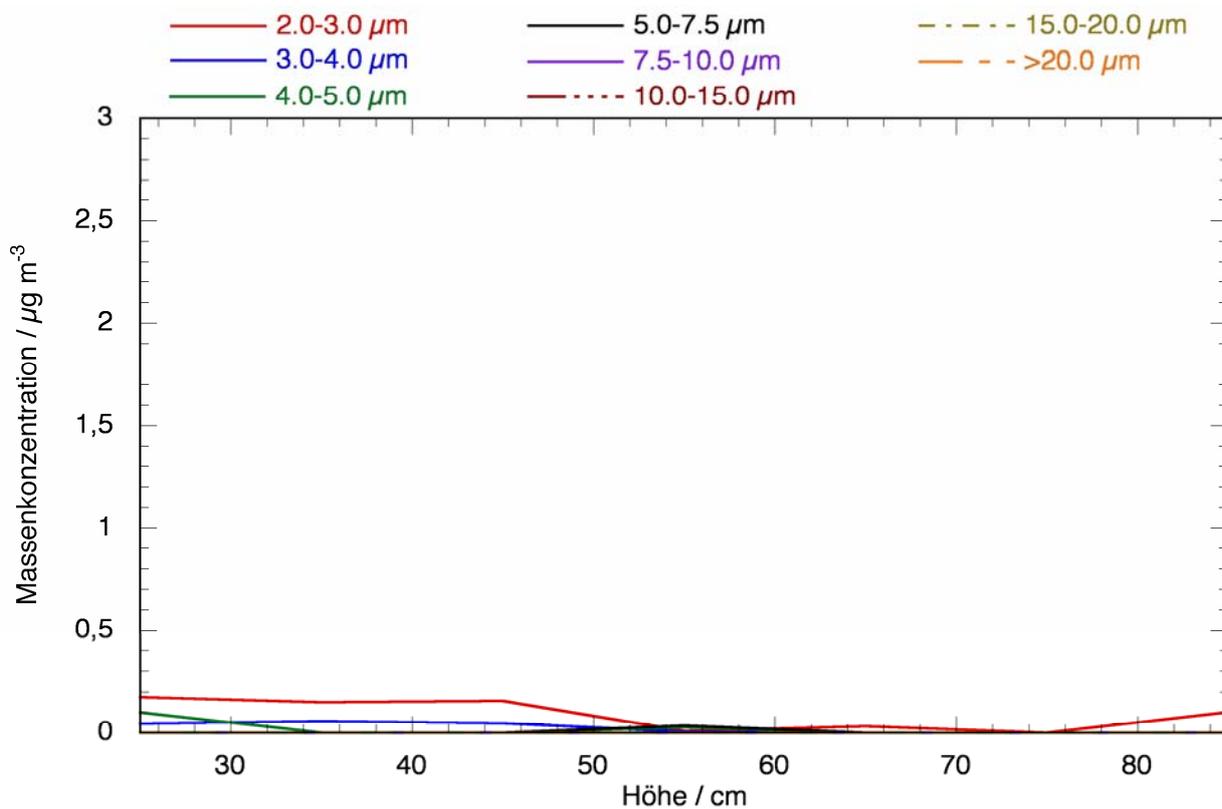


Bild 132: Profil vom 22. April 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 2 bis 20 μm

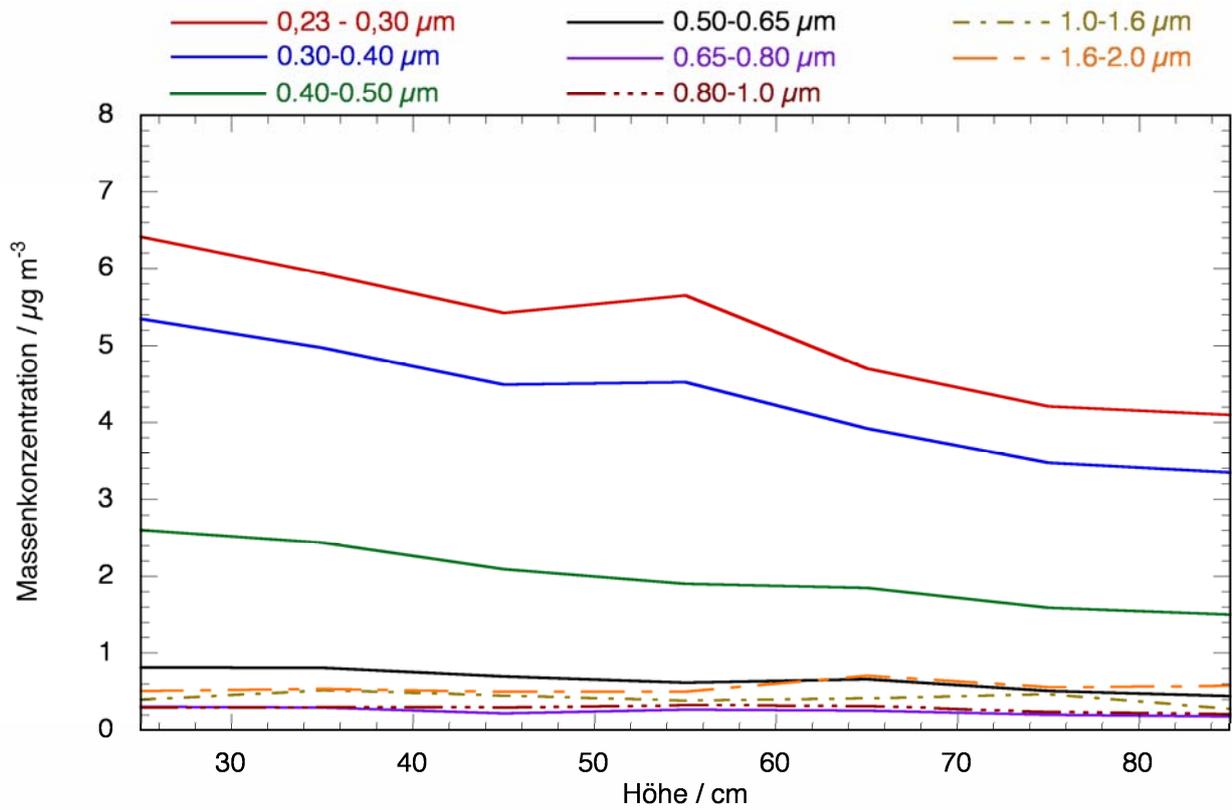


Bild 133: Profil vom 23. April 2008, Abstand 10 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 µm

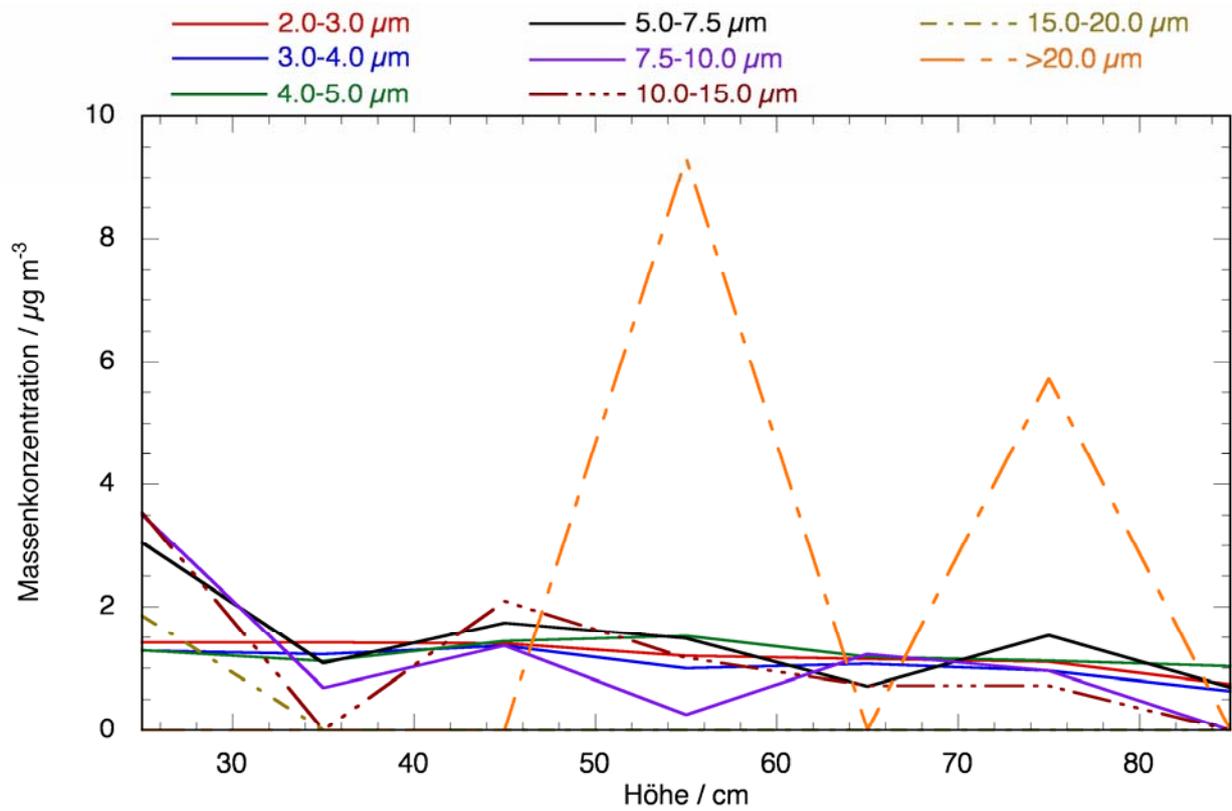


Bild 134: Profil vom 23. April 2008, Abstand 10 cm, Partikelgröße 2 bis 20 µm

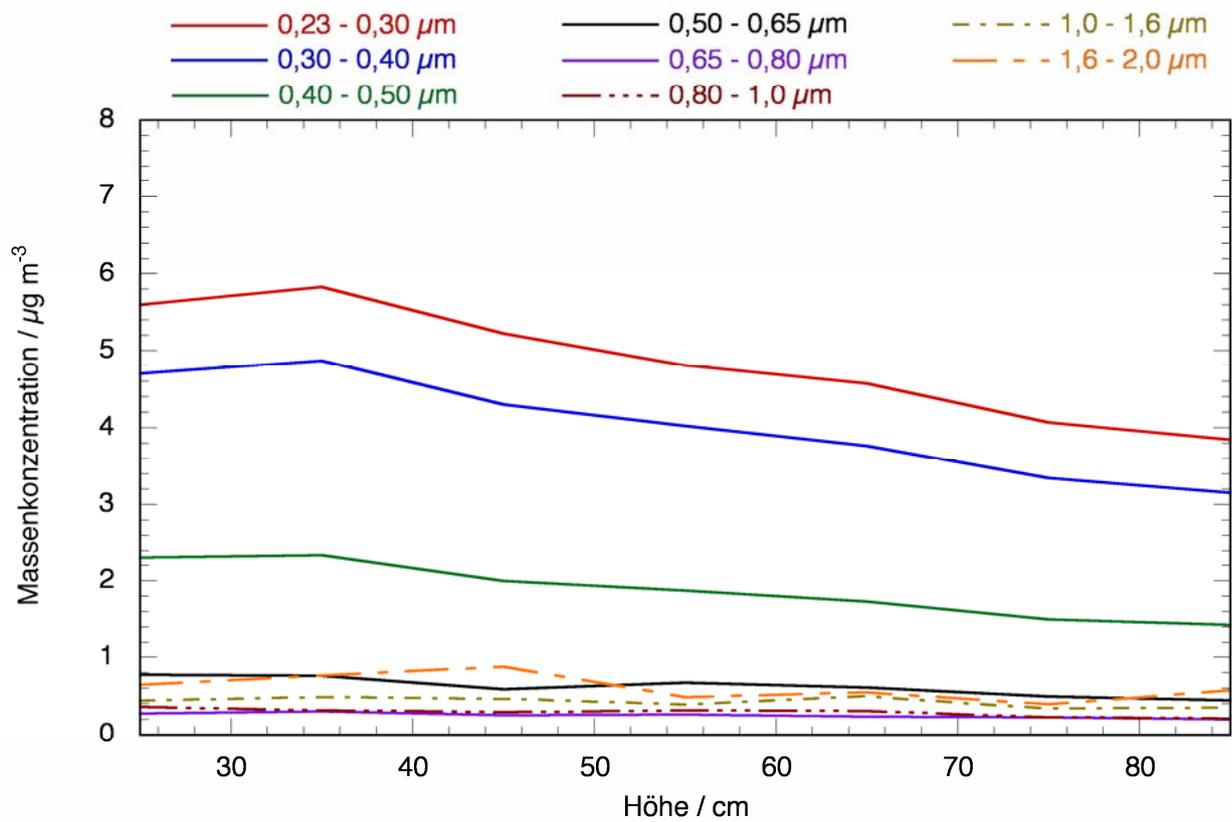


Bild 135: Profil vom 23. April 2008, Abstand 40 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 μm

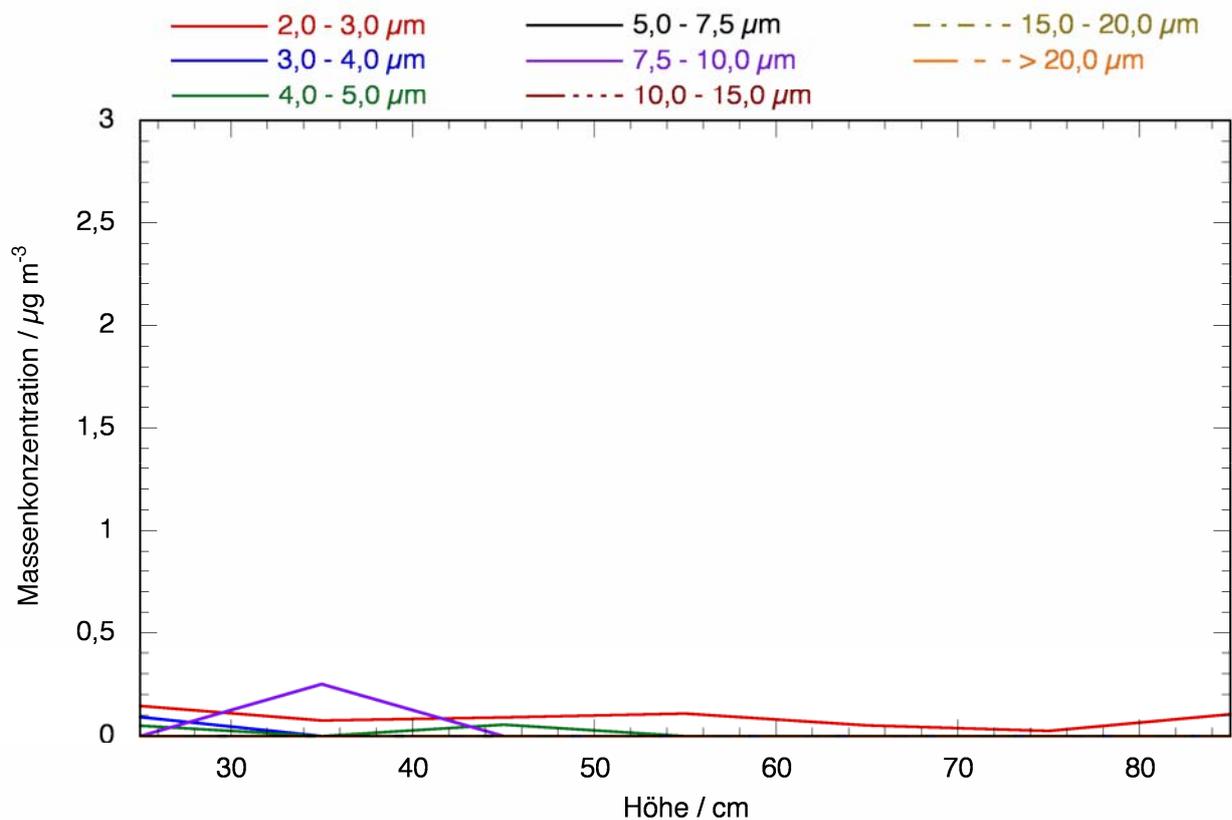


Bild 136: Profil vom 23. April 2008, Abstand 40 cm, Partikelgröße 2 bis 20 μm

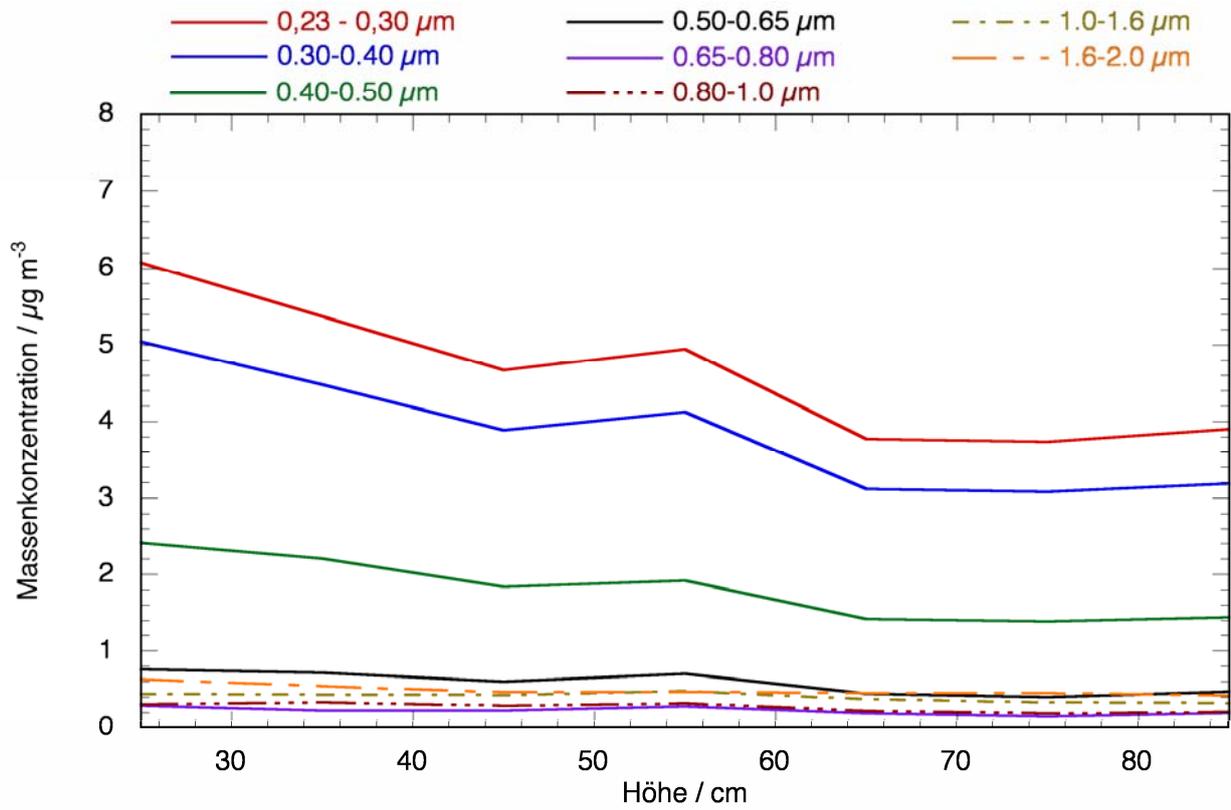


Bild 137: Profil vom 23. April 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 μm

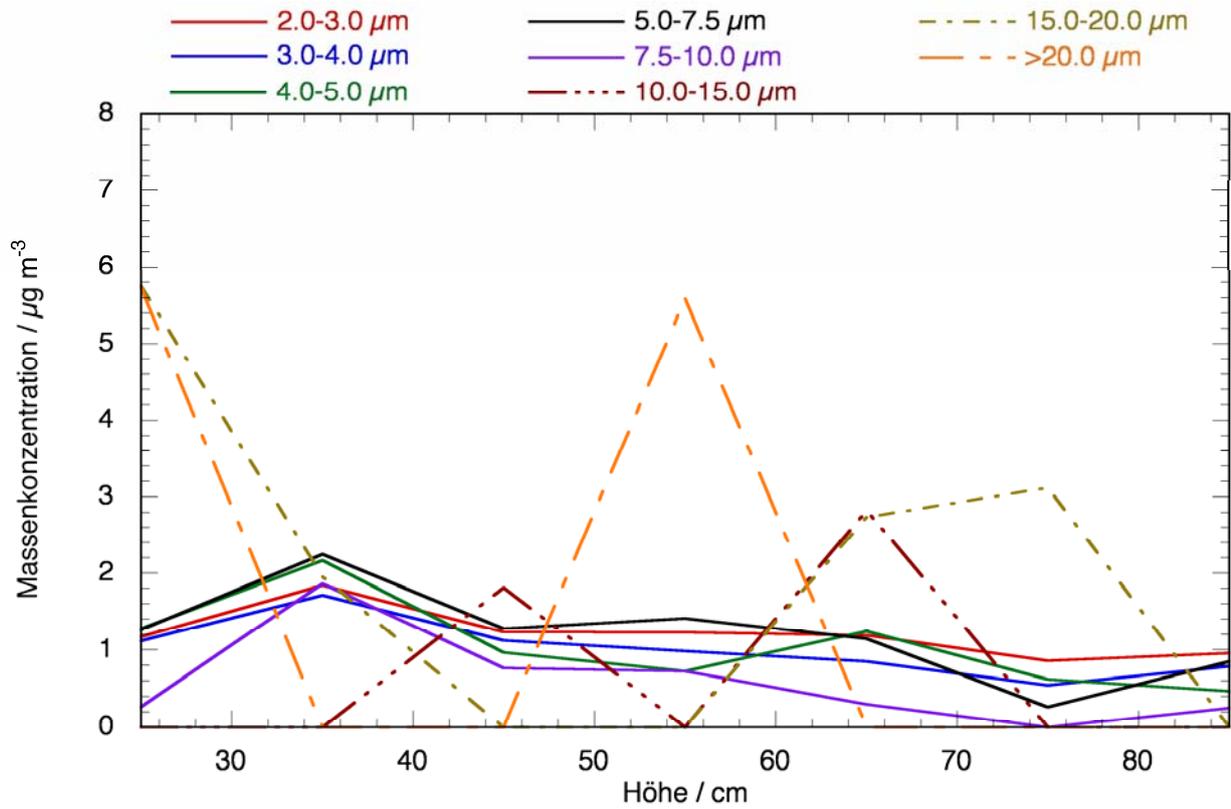


Bild 138: Profil vom 23. April 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 2 bis 20 μm

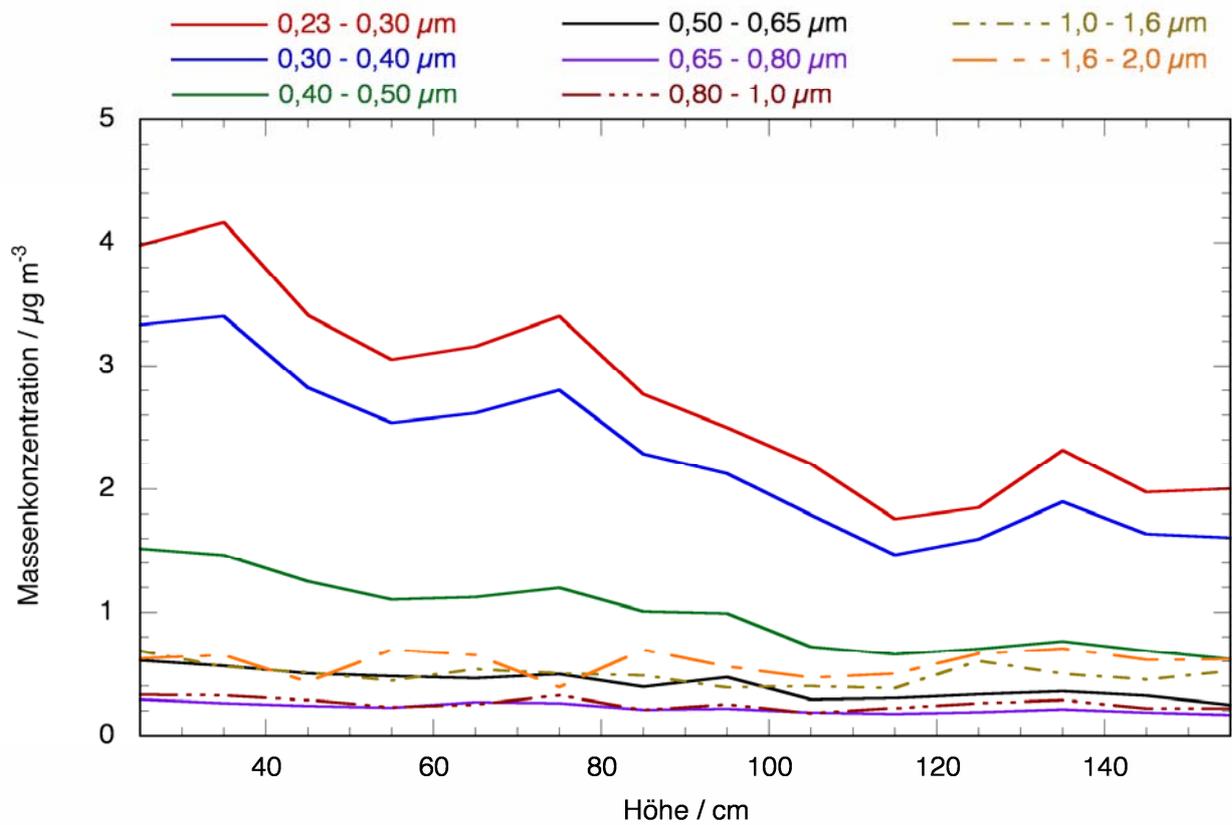


Bild 139: Profil vom 05. Mai 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 μm

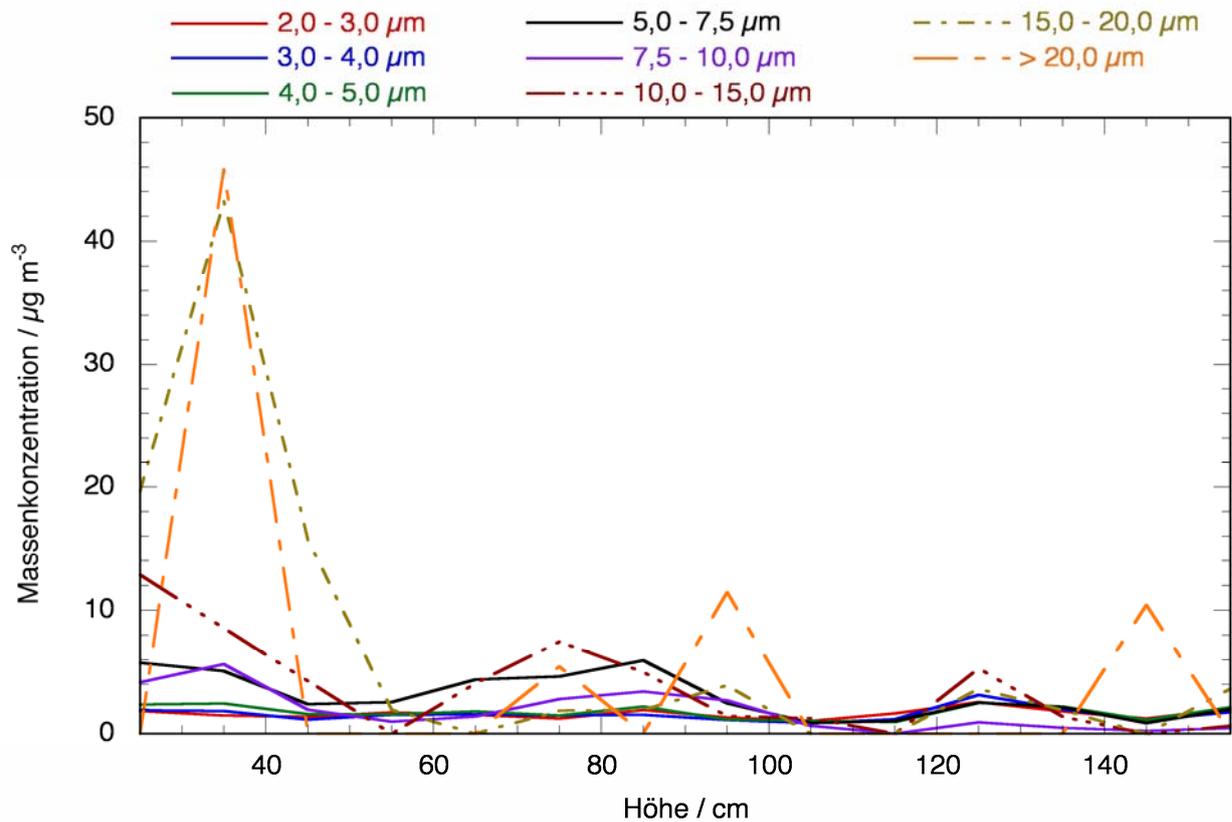


Bild 140: Profil vom 05. Mai 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 2 bis 20 μm

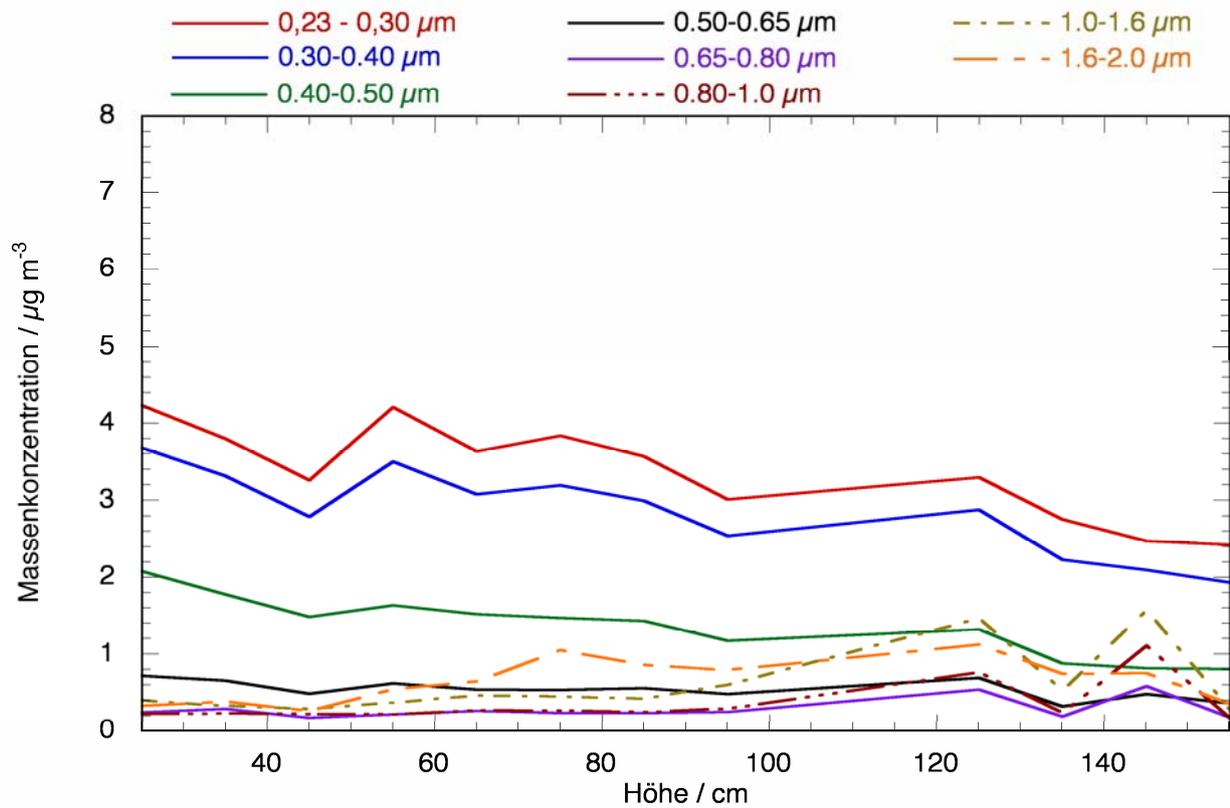


Bild 141: Profil vom 06. Mai 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 0,23 bis 2 μm

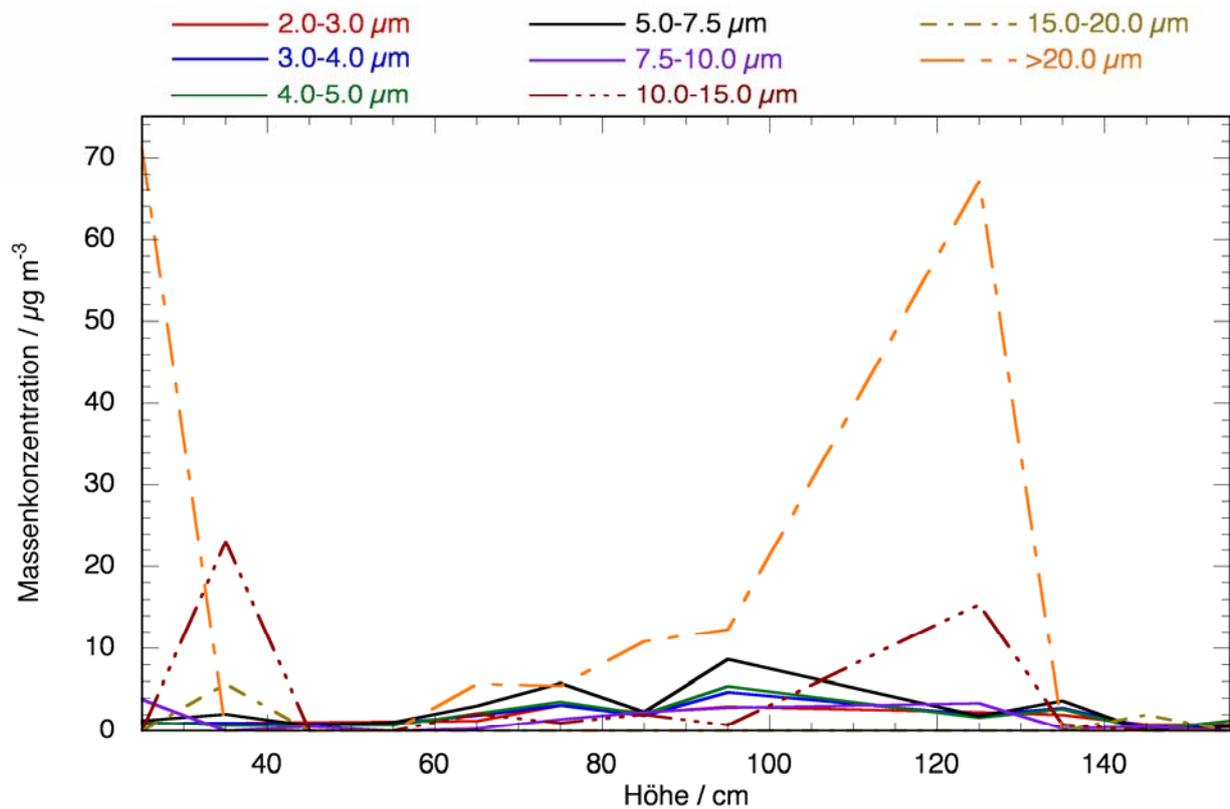


Bild 142: Profil vom 06. Mai 2008, Abstand 80 cm, Partikelgröße 2 bis 20 μm

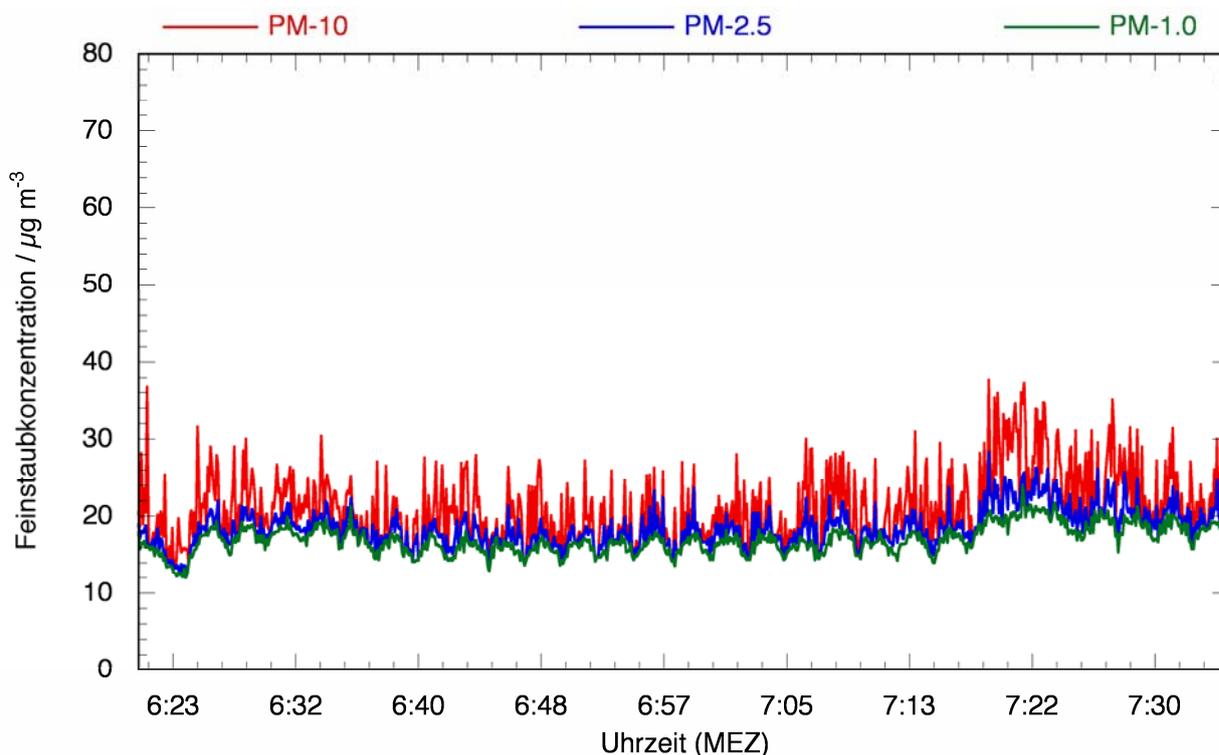


Bild 143: Feinstaubkonzentration an der A1 während der Vollsperrung am 24. Mai 2008

4.3 Messplatz Autobahn A46

Bei dem zweiten Messplatz handelt es sich um den ehemaligen Rastplatz „Winchenbach“ an der A46 in Fahrtrichtung Hagen, in Höhe Streckenkilometer 108,8 zwischen den Anschlussstellen Wuppertal-Barmen und Wichlinghausen. Jeden Tag nutzen rund 78.000 Fahrzeuge diesen Streckenabschnitt bei einem Schwerverkehrsanteil von 10,9 % (BAST, 2007). Der Rastplatz wird seit seiner Schließung von der Autobahnmeisterei als Arbeits- und Abstellplatz genutzt. Aufgrund dieser Nutzung sind die Fahrbahn und die Parkplätze überwiegend nicht mit Pflanzen überwuchert, sondern bieten eine sehr gute und weitläufige Fläche für die Durchführung der Messungen. Im Gegensatz zum Messplatz an der A1 weist das Gelände praktisch keine Höhenunterschiede zwischen Fahrbahn und Messplatz auf. Die Zufahrt zum Rastplatz erfolgt über den Standstreifen und die ehemalige Ausfahrt des Rastplatzes. Die nutzbare Länge beträgt etwa 300 Meter bei einer Breite von bis zu 20 Metern. Zwischen der Fahrbahn und dem Rastplatz hat sich eine dichte Vegetation entwickelt, die aus einer Vielzahl unterschiedlicher Pflanzenarten besteht, darunter

- Blutroter Hartriegel,
- Brombeere,
- Ahorn,

- Buche,
- Hundsrose,
- Rote Heckenkirsche (nur Fahrbahnseite),
- Japanischer Knöterich,
- verschiedene Gräser und Brennnesseln.

Die Hecke weist eine Höhe von bis zu vier Metern auf, einzelne Bäume weisen eine Höhe von rund sechs Metern auf. Die Breite der Hecke schwankt zwischen drei und fünf Metern.

Auch an diesem Messplatz wurden jeweils ein Messgerät fahrbahnseitig im Luv und ein Messgerät im Lee auf dem Rastplatz aufgestellt. Das Luv-Messgerät wurde in einem seitlichen Abstand von rund zwei Metern zur Standspur und einem Meter zur Hecke aufgestellt. Das Lee-Messgerät wurde ebenfalls in einem seitlichen Abstand von rund einem Meter zur Hecke aufgestellt. Zusätzlich wurden an einigen Tagen mit einem dritten Messgerät ergänzende Profilmessungen im Bereich des Rastplatzes durchgeführt. Diese zusätzlichen Messungen dienen der Feststellung, wie sich die Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit zur Entfernung von der Hecke und der Höhe über dem Boden verhält. Hierfür wurde ein laseroptisches Aerosolspektrometer vom Typ DustMonitor 1.108 in einer Entfernung von bis zu acht Metern von der Hecke und einer Höhe von bis zu zwei Metern

über dem Boden im Lee positioniert. Bild 144 stellt die Verteilung der Messpunkte schematisch dar.

Neben diesen Profilmessungen sollte auch die Feinstaubkonzentration in der Hecke bestimmt werden. Dazu wurde das dritte Messgerät in einer Aushöhlung aufgestellt, die sich in der Hecke befindet. Dabei steht das dritte Messgerät zwischen dem Luv- und dem Lee-Messgerät, dabei allerdings standortbedingt sehr nahe am Lee-Messgerät. Die Bilder 145 bis 147 zeigen die Messgeräte bei ihrem Einsatz an der A46.

Um Verfälschungen der Messergebnisse durch Abweichungen der Messgeräte untereinander zu verhindern, wurden so genannte Nullmessungen durchgeführt. Dazu wurden die verwendeten Messgeräte in einem Abstand von höchstens einem Meter zu einander aufgestellt und eine Messung über einen Zeitraum von 15 Minuten durchgeführt. Aufgrund des geringen räumlichen Abstands zwischen den Geräten wurde davon ausgegangen, dass jedes der Geräte die gleiche Feinstaubkonzentration erfasste. Abweichungen in den Messergebnissen mussten somit auf die Geräte selber zurückzuführen sein. Um die festgestellten Abweichungen kompensieren zu können, wurde aus den Werten jeweils ein Korrekturfaktor für die Fraktion PM10, PM2,5 und PM1 berechnet. Die Ergebnisse des Luv-Messgerätes wurden als Referenz herangezogen und die Ergebnisse der anderen Messgeräte entsprechend

mit dem Korrekturfaktor multipliziert. Die Aufstellung der Messgeräte während einer Nullmessung ist auf Bild 148 dargestellt. Bei der Betrachtung der Nullmessungen fallen deutliche Unterschiede zwischen den verwendeten Messgeräten auf. Darüber hinaus sind die Abweichungen starken Schwankungen unterworfen und reichen im Durchschnitt vom Faktor 0,6 bis zum Faktor 1,93. Auch variiert die Abweichung zwischen den einzelnen Nullmessungen eines Tages.

Werden die Messwerte in der zuvor beschriebenen Weise mit dem Korrekturfaktor korrigiert, so ergeben sich die durchschnittlichen Abscheideraten der untersuchten Hecke. Diese reichen von einer Abscheidung von 40 % bis hin zu einer Konzentrationserhöhung von über 30 %. Dieses Phänomen der stark unterschiedlichen Abscheidung tritt bei allen drei Fraktionen auf. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass eine gemessene Erhöhung der PM10-Konzentration im Lee nicht automatisch auch eine Zunahme der Fraktionen PM2,5 und PM1 bedeutet. Im umgekehrten Fall kann es jedoch trotz einer Erniedrigung der PM10-Konzentration im Lee zu einer Erhöhung der beiden anderen Fraktionen kommen. Die Tabellen 30 bis 36 stellen die durchschnittlichen Messwerte, die ermittelten Korrekturfaktoren und die korrigierten Messwerte exemplarisch von sieben Messtagen vergleichend gegenüber.

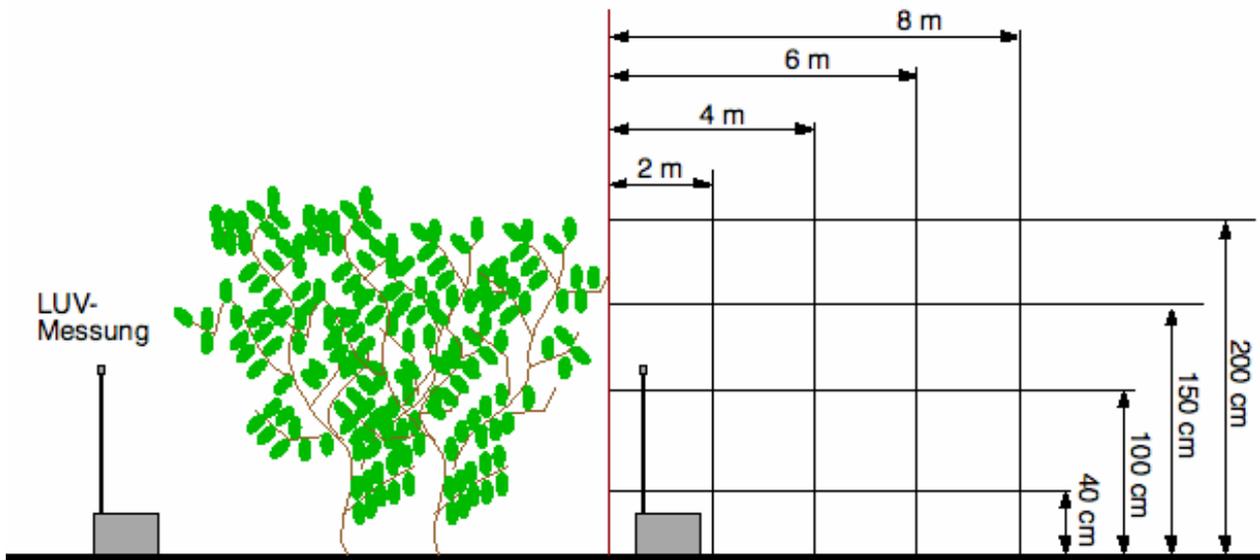


Bild 144: Anordnung der Messpunkte der Profilmessung an der A46



Bild 145: Luv-Messgerät, A46



Bild 147: Profilmessung, A46



Bild 146: Lee-Messgerät, A46

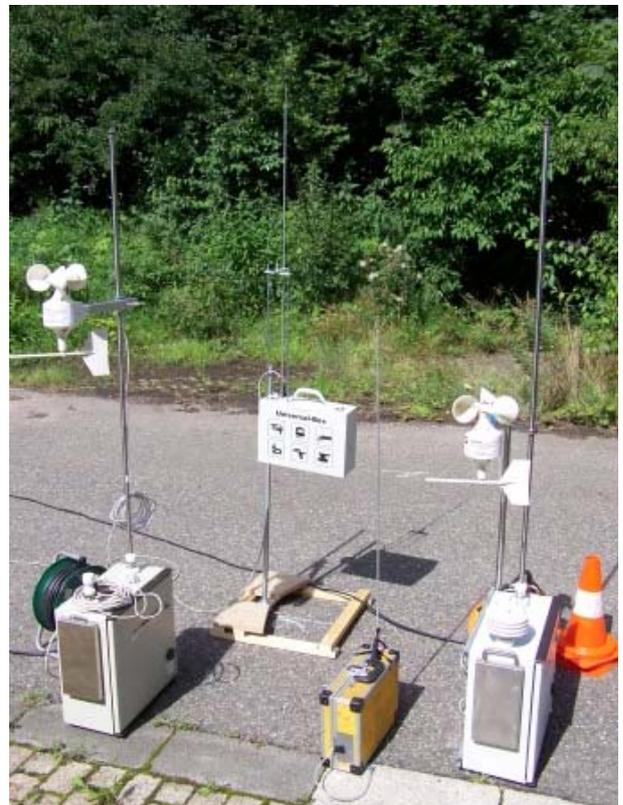


Bild 148: Nullmessung, A46

	PM10	PM2,5	PM1
LUV	18,17 μgm^{-3}	9,10 μgm^{-3}	6,38 μgm^{-3}
LEE	17,79 μgm^{-3}	9,74 μgm^{-3}	7,40 μgm^{-3}
Korrekturfaktor	0,90	0,88	0,93
LEE (korr.)	16,01 μgm^{-3}	8,57 μgm^{-3}	6,88 μgm^{-3}
LEE/LUV	0,88	0,94	1,08

Tab. 30: Messwerte und Korrekturfaktoren der Messung vom 25. Juli 2008

	PM10	PM2,5	PM1
LUV	15,09 μgm^{-3}	10,82 μgm^{-3}	6,12 μgm^{-3}
LEE	12,74 μgm^{-3}	8,78 μgm^{-3}	4,79 μgm^{-3}
Korrekturfaktor	0,71	0,87	0,84
LEE (korr.)	9,08 μgm^{-3}	7,62 μgm^{-3}	4,05 μgm^{-3}
LEE/LUV	0,6	0,7	0,66

Tab. 31: Messwerte und Korrekturfaktoren der Messung vom 14. August 2008

	PM10	PM2,5	PM1
LUV	21,43 μgm^{-3}	16,65 μgm^{-3}	13,02 μgm^{-3}
LEE	26,13 μgm^{-3}	21,86 μgm^{-3}	19,92 μgm^{-3}
Korrekturfaktor	0,94	1,44	1,66
LEE (korr.)	24,56 μgm^{-3}	31,48 μgm^{-3}	33,07 μgm^{-3}
LEE/LUV	1,15	1,89	2,54

Tab. 32: Messwerte und Korrekturfaktoren der Messung vom 17. September 2008

	PM10	PM2,5	PM1
LUV	22,59 μgm^{-3}	19,97 μgm^{-3}	16,87 μgm^{-3}
LEE	37,32 μgm^{-3}	32,90 μgm^{-3}	30,84 μgm^{-3}
Korrekturfaktor	1,51	1,57	1,72
LEE (korr.)	56,35 μgm^{-3}	31,35 μgm^{-3}	53,04 μgm^{-3}
LEE/LUV	2,49	1,57	3,14

Tab. 33: Messwerte und Korrekturfaktoren der Messung vom 25. September 2008

	PM10	PM2,5	PM1
LUV	20,80 $\mu\text{g m}^{-3}$	16,24 $\mu\text{g m}^{-3}$	12,46 $\mu\text{g m}^{-3}$
LEE	32,99 $\mu\text{g m}^{-3}$	25,86 $\mu\text{g m}^{-3}$	22,22 $\mu\text{g m}^{-3}$
Korrekturfaktor	1,65	1,60	1,69
LEE (korr.)	54,43 $\mu\text{g m}^{-3}$	41,38 $\mu\text{g m}^{-3}$	37,55 $\mu\text{g m}^{-3}$
LEE/LUV	2,62	2,55	2,60

Tab. 34: Messwerte und Korrekturfaktoren der Messung vom 26. September 2008

	PM10	PM2,5	PM1
LUV	23,31 $\mu\text{g m}^{-3}$	12,61 $\mu\text{g m}^{-3}$	8,48 $\mu\text{g m}^{-3}$
LEE	17,53 $\mu\text{g m}^{-3}$	11,49 $\mu\text{g m}^{-3}$	8,94 $\mu\text{g m}^{-3}$
Korrekturfaktor	1,12	1,13	0,96
LEE (korr.)	19,63 $\mu\text{g m}^{-3}$	12,98 $\mu\text{g m}^{-3}$	8,58 $\mu\text{g m}^{-3}$
LEE/LUV	0,84	1,03	1,01

Tab. 35: Messwerte und Korrekturfaktoren der Messung vom 13. Mai 2009

	PM10	PM2,5	PM1
LUV	20,35 $\mu\text{g m}^{-3}$	11,94 $\mu\text{g m}^{-3}$	7,32 $\mu\text{g m}^{-3}$
LEE	13,09 $\mu\text{g m}^{-3}$	7,77 $\mu\text{g m}^{-3}$	4,81 $\mu\text{g m}^{-3}$
Korrekturfaktor	1,55	1,32	1,29
LEE (korr.)	20,29 $\mu\text{g m}^{-3}$	10,25 $\mu\text{g m}^{-3}$	6,2 $\mu\text{g m}^{-3}$
LEE/LUV	1,00	0,86	0,85

Tab. 36: Messwerte und Korrekturfaktoren der Messung vom 07. Juli 2009

Im Juli, August und September 2008 wurden insgesamt vier Profilmessungen im Lee der Hecke durchgeführt. Die Durchführung verlief vergleichbar den Messungen an der A1 mit einem Mittelungsintervall von sechs Sekunden und einer Messdauer von drei Minuten pro Messpunkt. Somit lag der Zeitrahmen für die Erstellung eines einzelnen Profils bei über zwei Stunden. Die hier gewonnenen Ergebnisse widersprechen sich jedoch teilweise. So zeigen sie für drei der durchgeführten Messungen über weite Bereiche konstante Werte für die Fraktionen PM1 und PM2,5. Die Werte für PM10 sind bei allen Messungen, verglichen mit den anderen beiden Fraktionen, stärkeren Schwankungen unterworfen. Allerdings liegen auch hier die Werte in einem engen Konzentrationsbereich und auch eine gemeinsame Grundtendenz ist erkennbar. Weiterhin liegen die Mittelwerte der Konzentrationen in den vermessenen Höhen in einem engen Bereich bei-

einander. Hiervon weicht allerdings die Messung vom 26. September 2008 deutlich ab. Die Konzentrationen aller drei Fraktionen streuen in einem sehr weiten Bereich und weisen keine einheitliche Tendenz auf. Aus den erhaltenen Zahlenwerten der Profilmessungen kann abgeleitet werden, dass sich hinter einer Hecke ein Bereich konstanter Feinstaubkonzentrationen ausbilden kann. Die Messungen wurden unter unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen durchgeführt, wie anhand von Tabelle 37 zu erkennen ist. Der genaue Einfluss der einzelnen klimatischen Parameter konnte jedoch bislang nicht endgültig geklärt werden. Allerdings können die klimatischen Einflüsse als ein Faktor für die Schwankungen in den Konzentrationen der Fraktion PM10 herangezogen werden. Nachfolgend zeigen die Bilder 149 bis 160 die aufgenommenen Konzentrationsprofile vom 25. Juli, 14. August sowie 25. und 26. September 2008.

Parameter	25. Juli 2008	14. August 2008	25. September 2008	26. September 2008
Lufttemperatur / °C	21,6	14,7	10,85	7,72
Relative Luftfeuchte / % r.F.	62,4	71,9	85,5	88,5
Luftdruck / hPa	1012	1007	1020	1021
Windgeschwindigkeit / ms ⁻¹	0,27	0,79	0,3	0,05
Windrichtung / °	89,1	183,5	129,6	173,3

Tab. 37: Meteorologische Parameter während der Profilmessungen an der A46

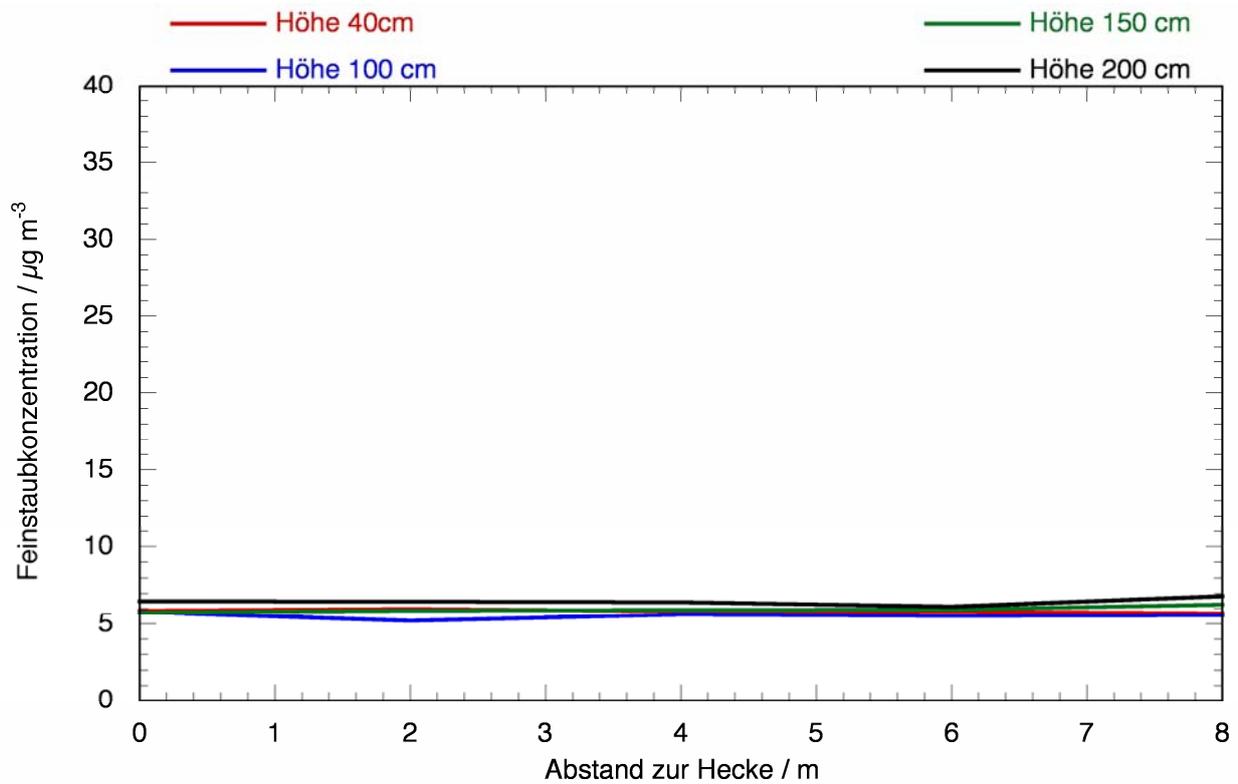


Bild 149: Konzentrationsprofil der Fraktion PM1, 25. Juli 2008

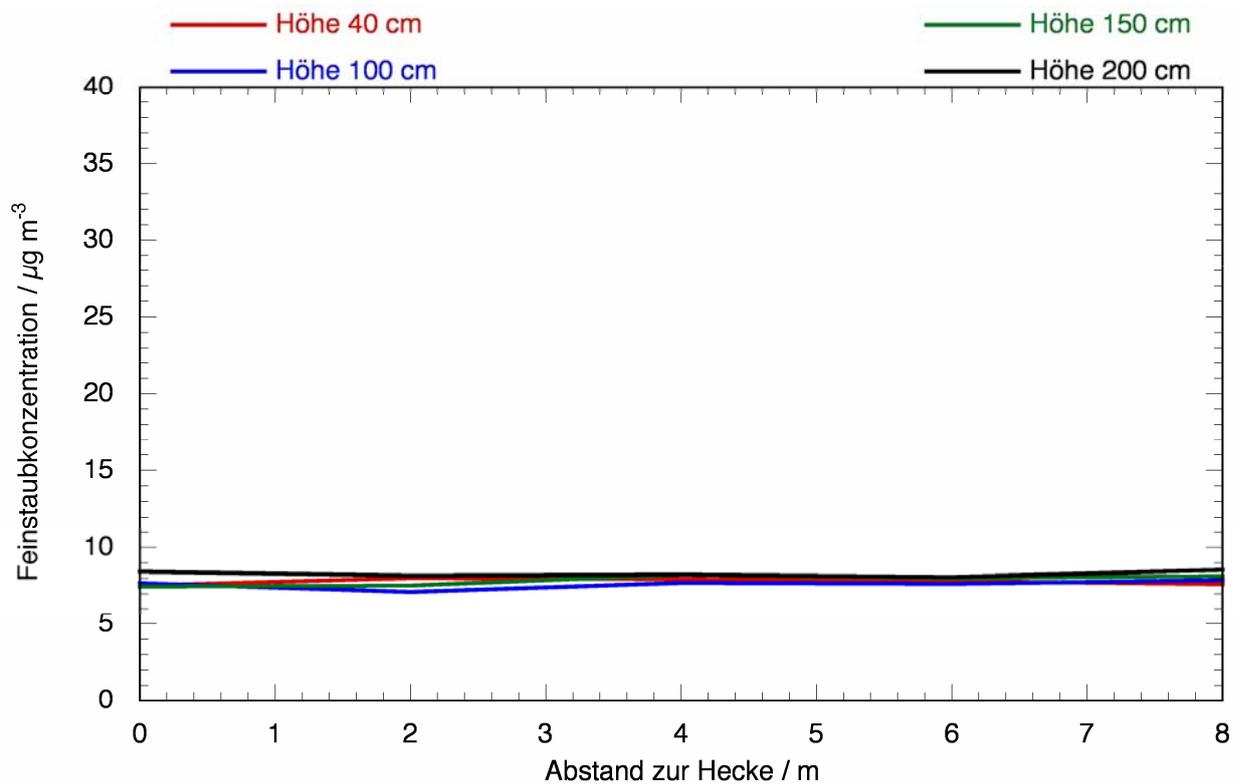


Bild 150: Konzentrationsprofil der Fraktion PM_{2,5}, 25. Juli 2008

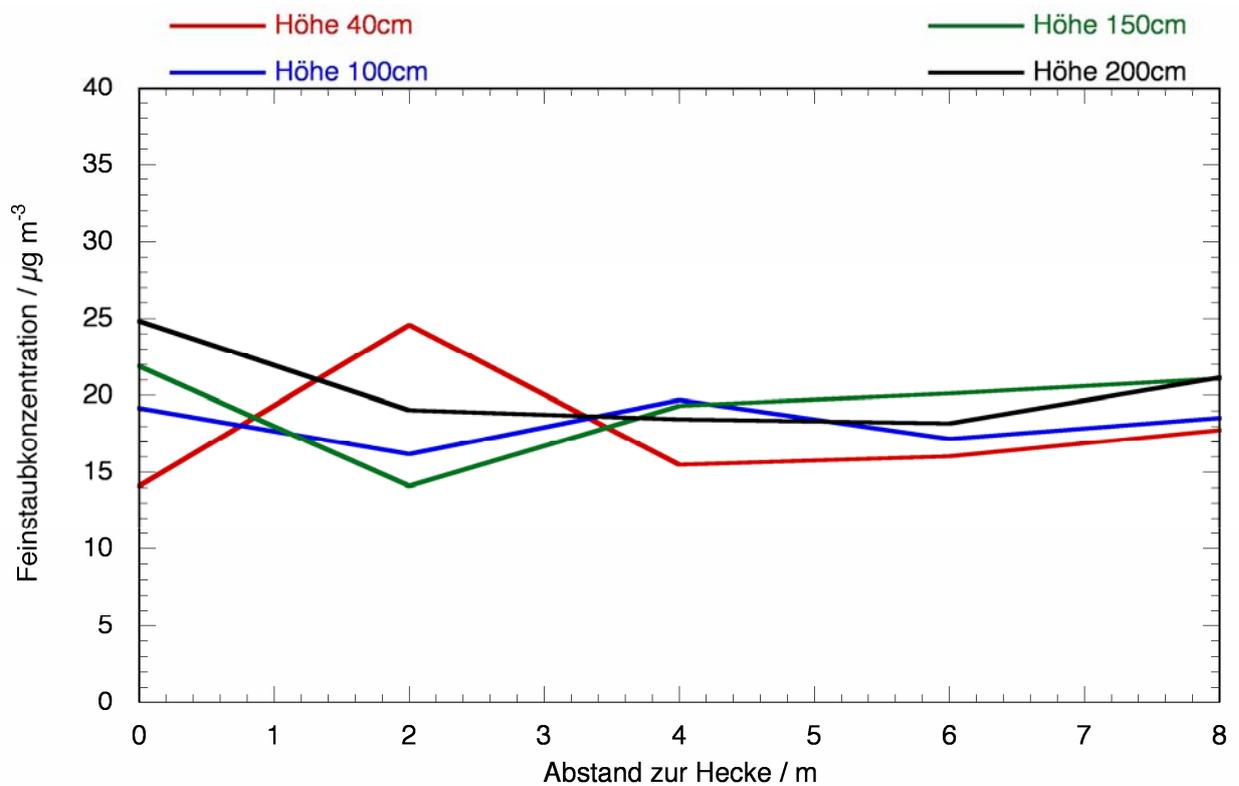


Bild 151: Konzentrationsprofil der Fraktion PM₁₀, 25. Juli 2008

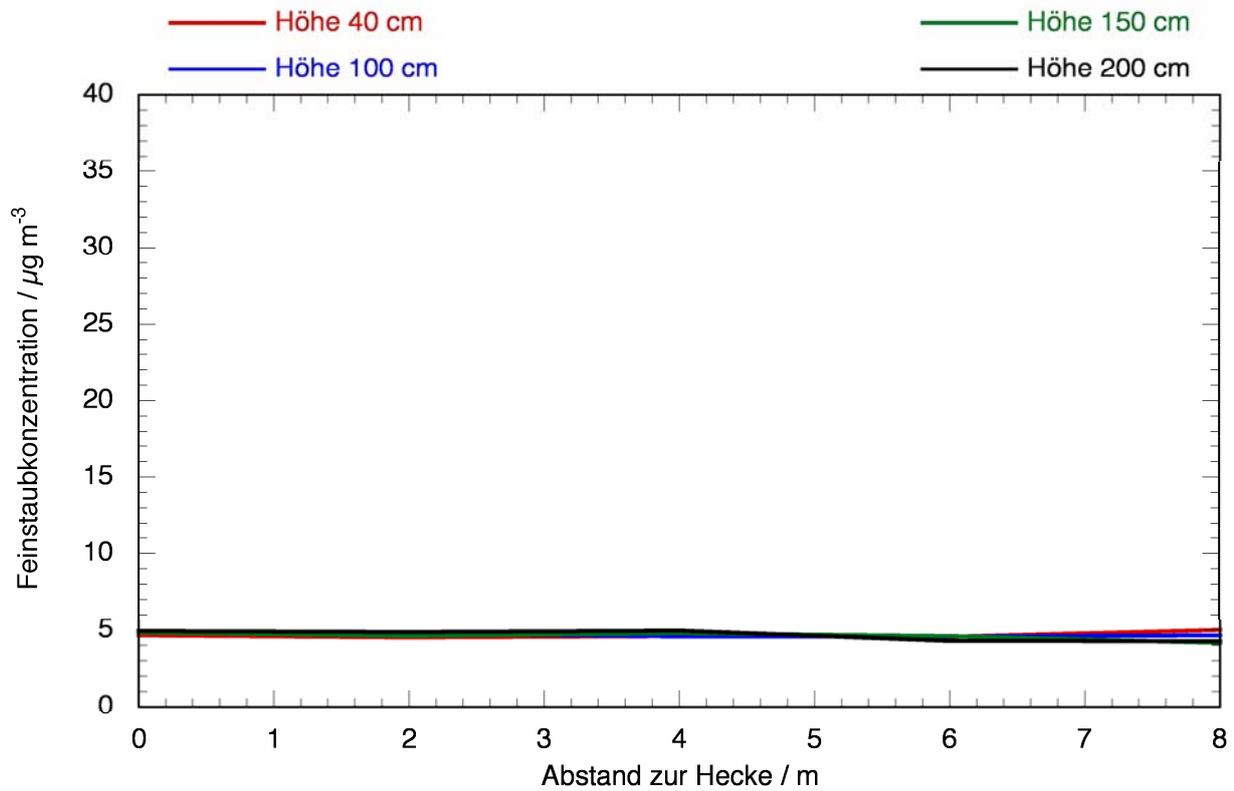


Bild 152: Konzentrationsprofil der Fraktion PM1, 14. August 2008

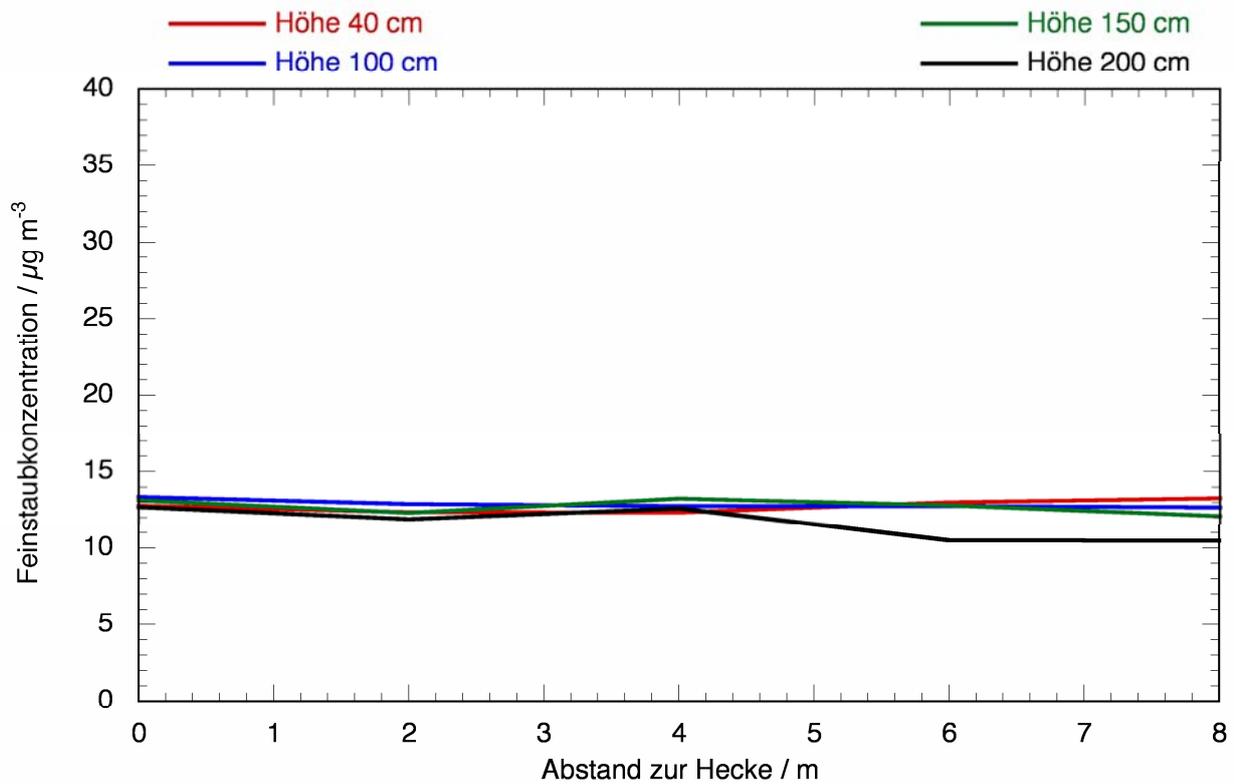


Bild 153: Konzentrationsprofil der Fraktion PM2,5, 14. August 2008

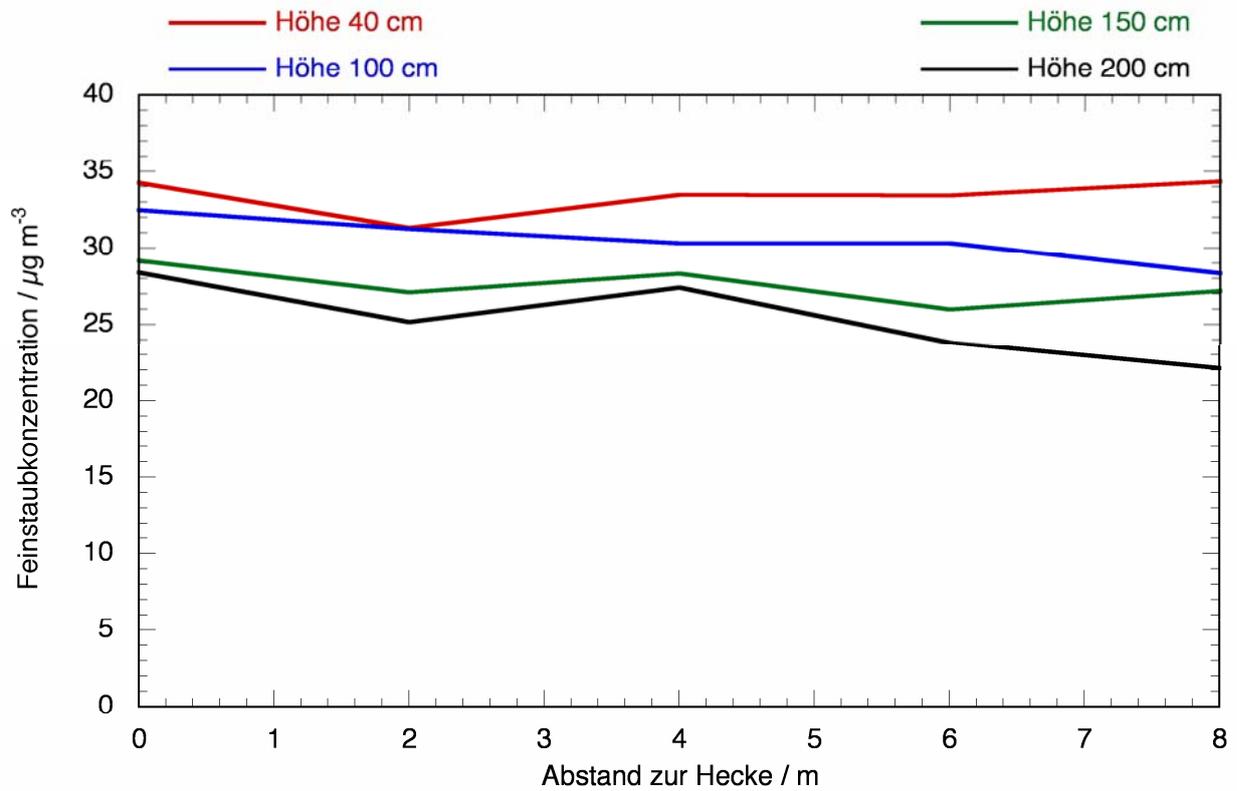


Bild 154: Konzentrationsprofil der Fraktion PM10, 14. August 2008

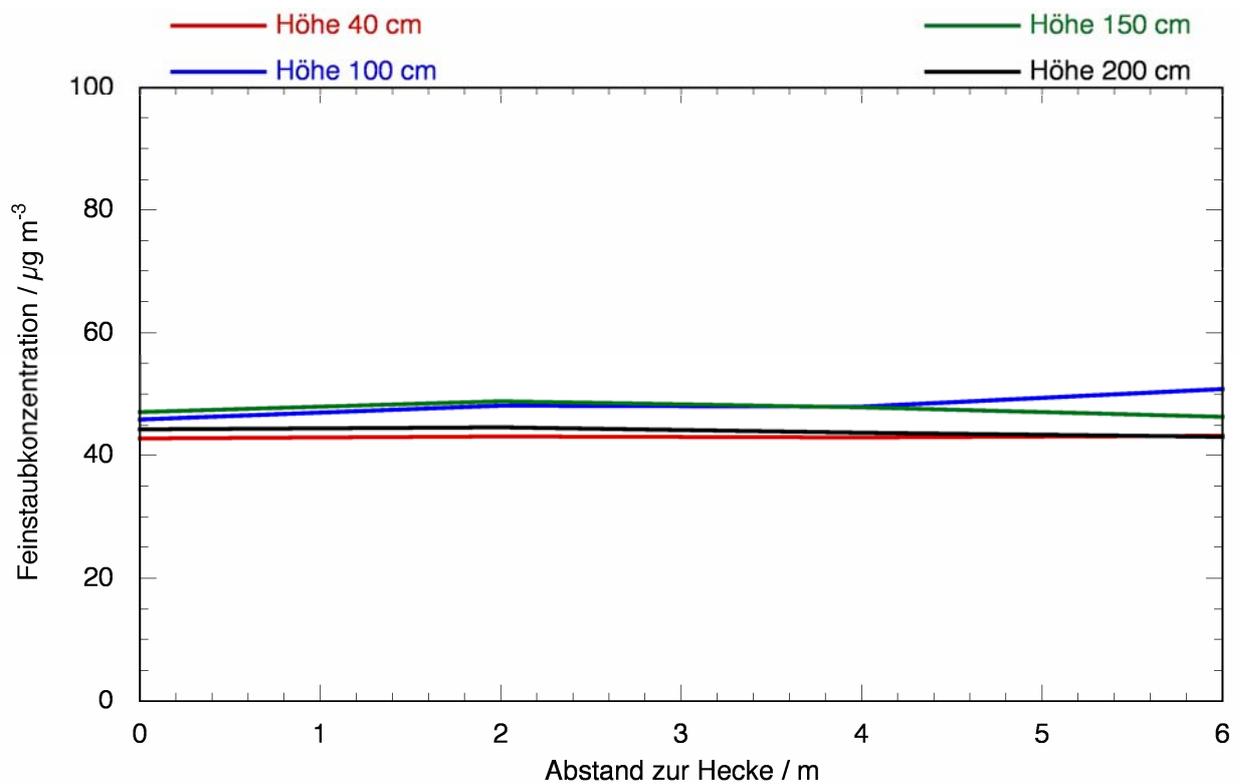


Bild 155: Konzentrationsprofil der Fraktion PM1, 25. September 2008

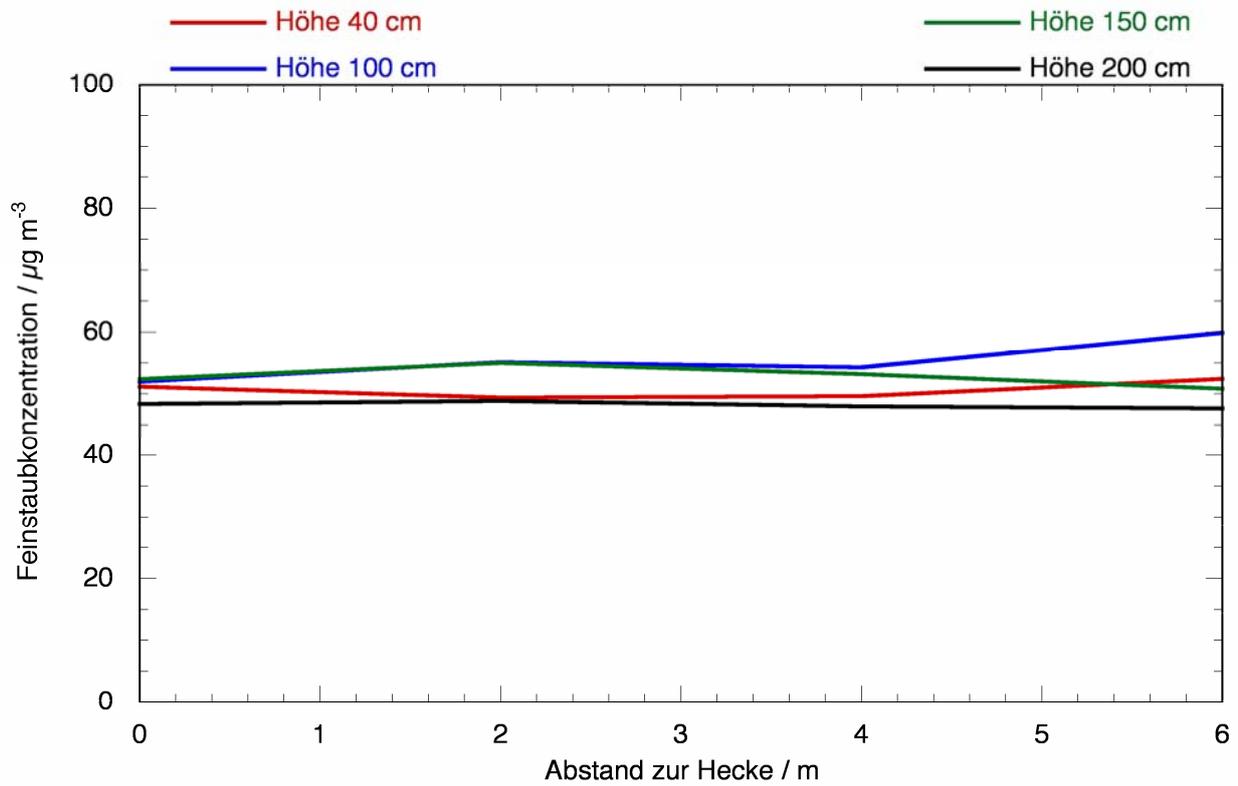


Bild 156: Konzentrationsprofil der Fraktion PM_{2,5}, 25. September 2008

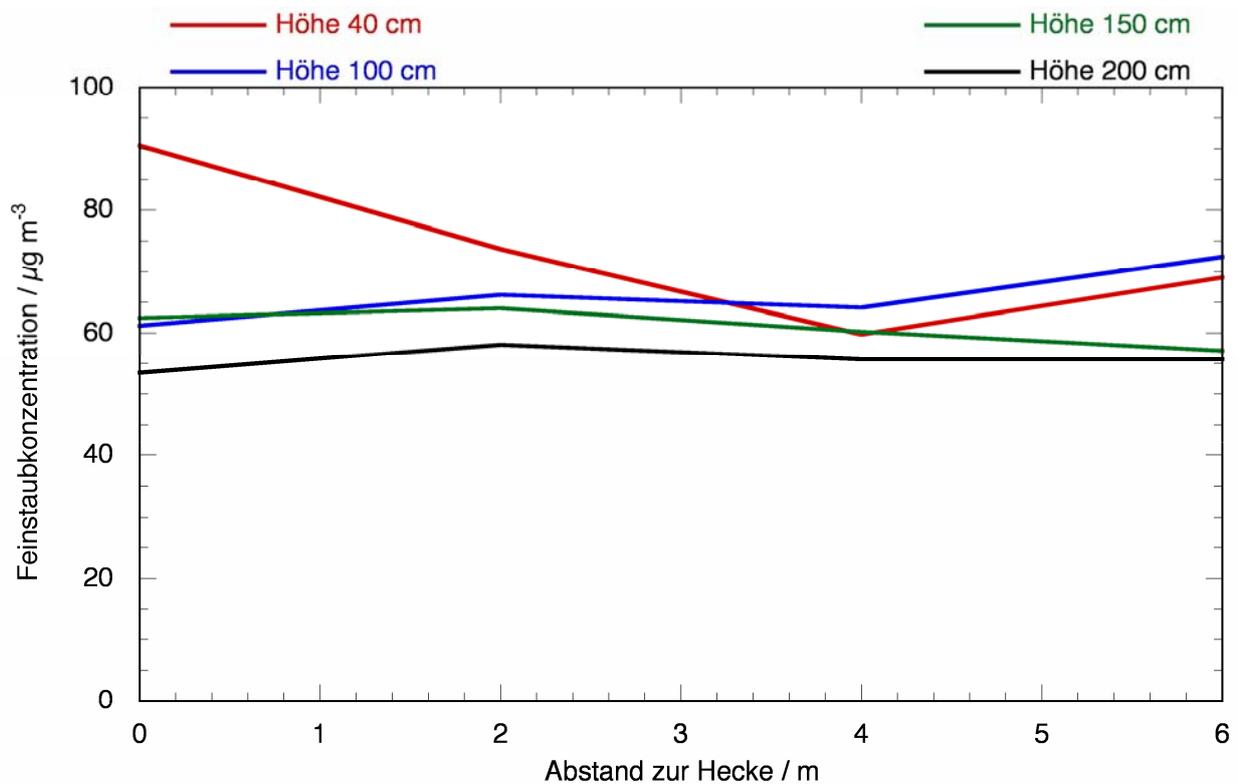


Bild 157: Konzentrationsprofil der Fraktion PM₁₀, 25. September 2008

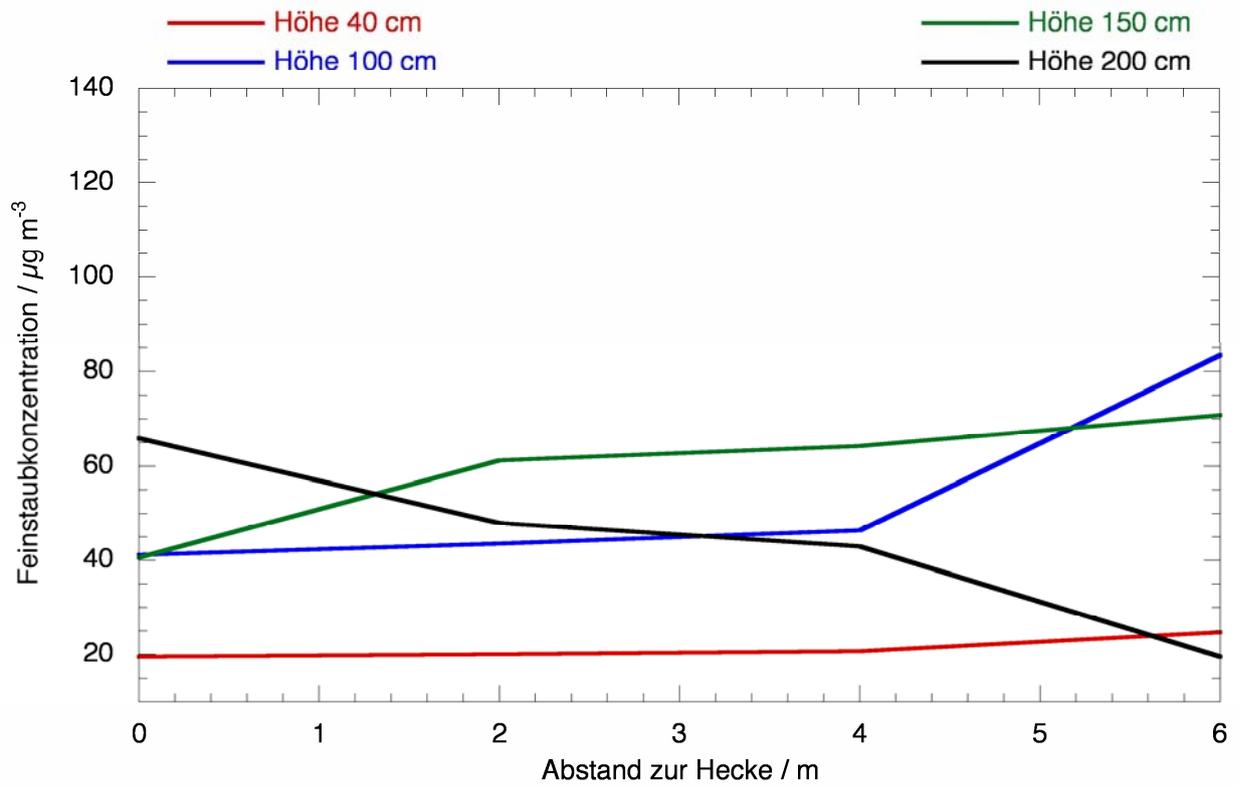


Bild 158: Konzentrationsprofil der Fraktion PM1, 26. September 2008

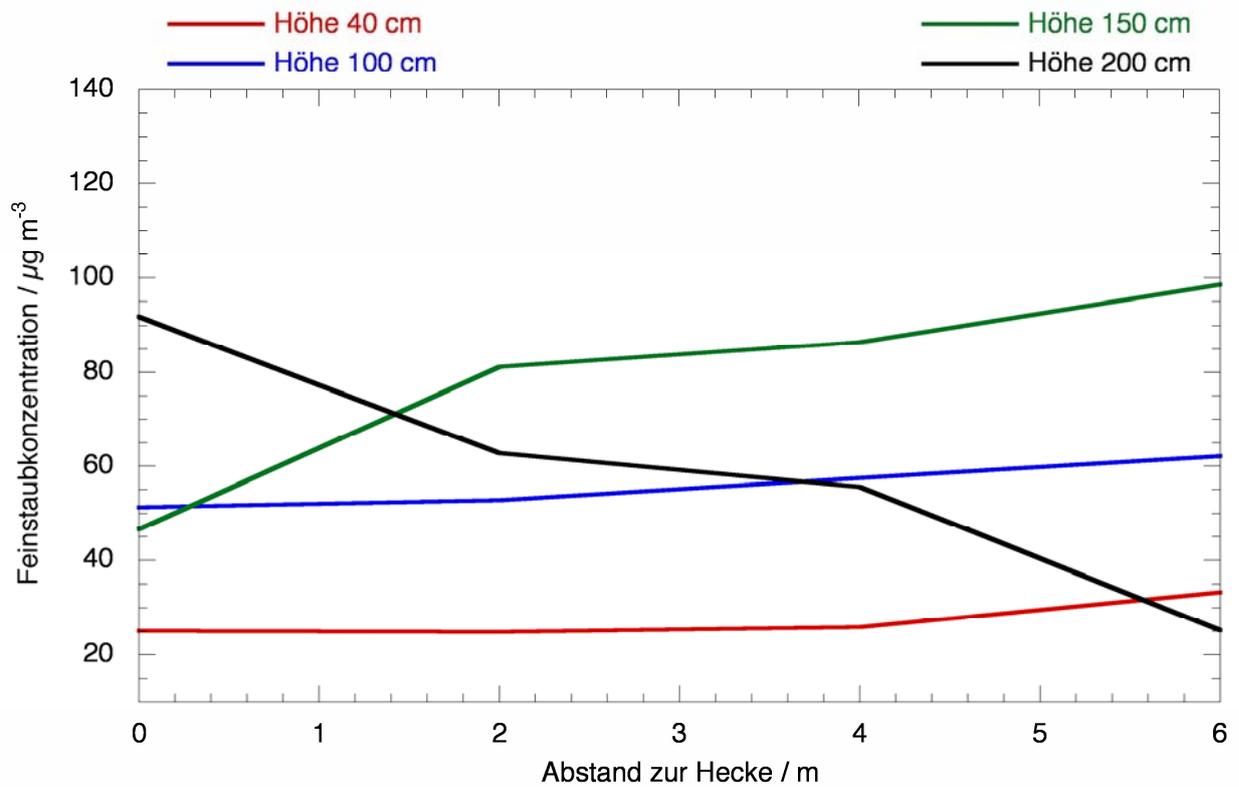


Bild 159: Konzentrationsprofil der Fraktion PM2,5, 26. September 2008

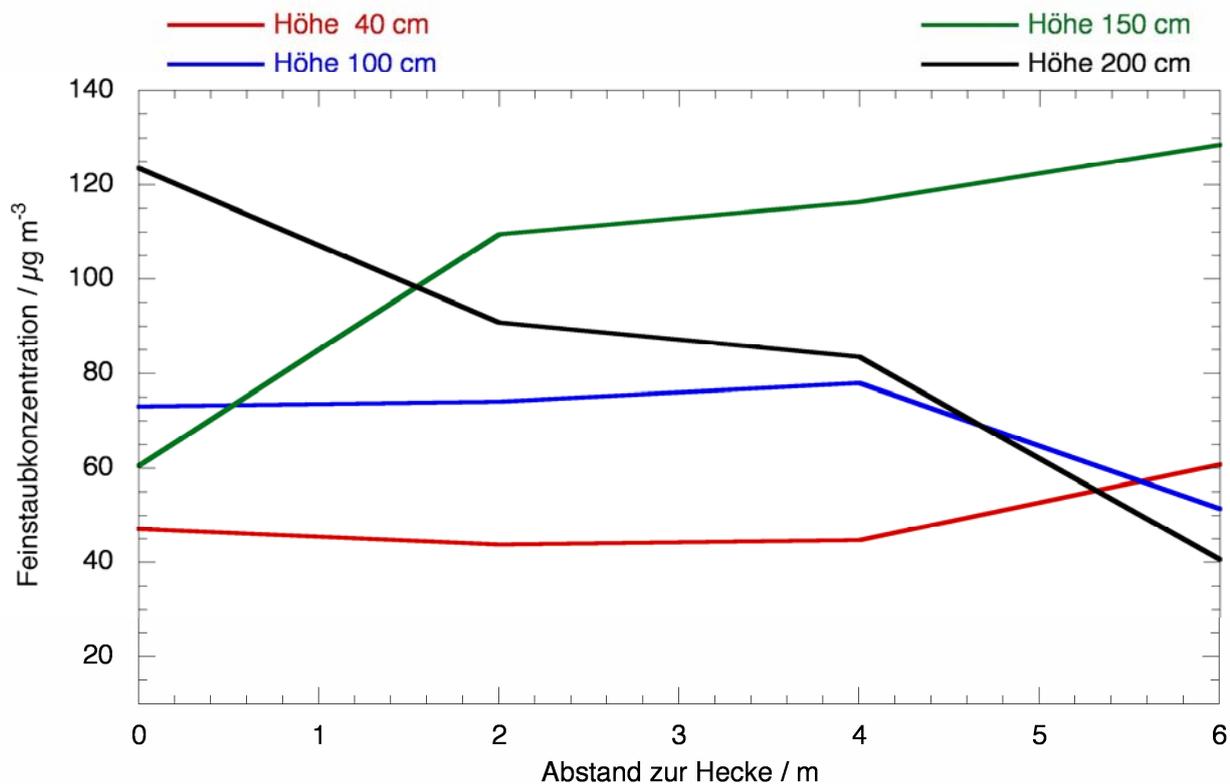


Bild 160: Konzentrationsprofil der Fraktion PM10, 26. September 2008

Am 09. und 10. Juli 2009 konnten Messungen in der Hecke, zwischen dem Luv- und Lee-Messgerät durchgeführt werden. An den anderen Messtagen verhinderte schlechtes Wetter bzw. die Nichtverfügbarkeit von Messgeräten diese ergänzenden Messungen.

Unter Berücksichtigung der Nullmessungen der Messgeräte kann man feststellen, dass in der Hecke an beiden Tagen eine deutlich höhere Konzentration aller drei Fraktionen vorlag als am Luv- und Lee-Messgerät. Für die überhöhten Werte kann als Erklärungsansatz die hohe Luftfeuchte an beiden Messtagen herangezogen werden. Dies trifft in erster Linie auf den 10. Juli zu, da hier die relative Luftfeuchte bei durchschnittlich 85 % lag. Hinzu kommen am diesen Tag Regenereignisse

während der Messung. Am 09. Juli lag die durchschnittliche relative Luftfeuchte bei rund 60 % und damit deutlich niedriger als am Folgetag. Es ist bekannt, dass eine hohe Luftfeuchte zu einer Verfälschung der Messwerte führen kann. Die Wetterschutzgehäuse stellen daher bei einer hohen Luftfeuchte getrocknete Luft zur Verfügung, die der Probenluft zugemischt wird. Diese Zumischung wird in der Regel ab einer Luftfeuchte von 75 % aktiviert. Da das Messgerät in der Hecke nicht mit einem Wetterschutzgehäuse ausgestattet werden konnte, konnte auch keine Korrektur der hohen Luftfeuchte erfolgen. In den nachfolgenden Tabellen 38 und 39 sind die Verhältnisse der gemessenen Feinstaubkonzentrationen der drei Messgeräte aufgeführt.

Fraktion	LUV / $\mu\text{g m}^{-3}$	LEE (korr.) / $\mu\text{g m}^{-3}$	Hecke (korr.) / $\mu\text{g m}^{-3}$	Hecke (korr.) / LUV	Hecke (korr.) / LEE (korr.)
PM10	18,56	17,65	21,39	1,15	1,21
PM2,5	11,72	9,37	12,44	1,06	1,33
PM1	7,11	5,39	7,01	0,98	1,3

Tab. 38: Feinstaubkonzentrationen der Messungen vom 09. Juli 2009 im Luv, Lee und in der Hecke

Fraktion	LUV / $\mu\text{g m}^{-3}$	LEE (korr.) / $\mu\text{g m}^{-3}$	Hecke (korr.) / $\mu\text{g m}^{-3}$	Hecke (korr.) / LUV	Hecke (korr.) / LEE (korr.)
PM10	26,28	37,39	53,09	2,02	1,42
PM2,5	20,8	23,84	42,27	2,03	1,77
PM1	15,27	16,03	27,46	1,8	1,71

Tab. 39: Feinstaubkonzentrationen der Messungen vom 10. Juli 2009 im Luv, Lee und in der Hecke

Eine mögliche Erklärung für diese Messwerte ist in der Windverteilung der beiden Tage zu sehen. In den Bildern 161 und 162 ist die Windverteilung nach VDI 3786 Blatt 2 dargestellt. Im Luv (rote Linie) liegt der Schwerpunkt auf Windrichtungen aus Süd-West. Vergleicht man diese Darstellungen mit einem Luftbild der Messstelle, so erkennt man, dass der überwiegende Teil des Windes im Luv parallel zur Fahrbahn weht. Im Gegensatz dazu

herrschen im Lee (blaue Linie) Strömungen aus Nord-Ost vor. Allerdings können am 09. Juli im Lee 67 % der Messwerte nicht verwertet werden, da sie aufgrund einer zu geringen Windgeschwindigkeit ($< 1 \text{ ms}^{-1}$) als unbestimmte Windrichtung gewertet werden müssen. Am 10. Juli trifft dies auf sogar auf 78 % zu. Dem gegenüber sind im Luv nur rund 20 % der Messwerte nicht in die Verteilung mit eingeflossen.

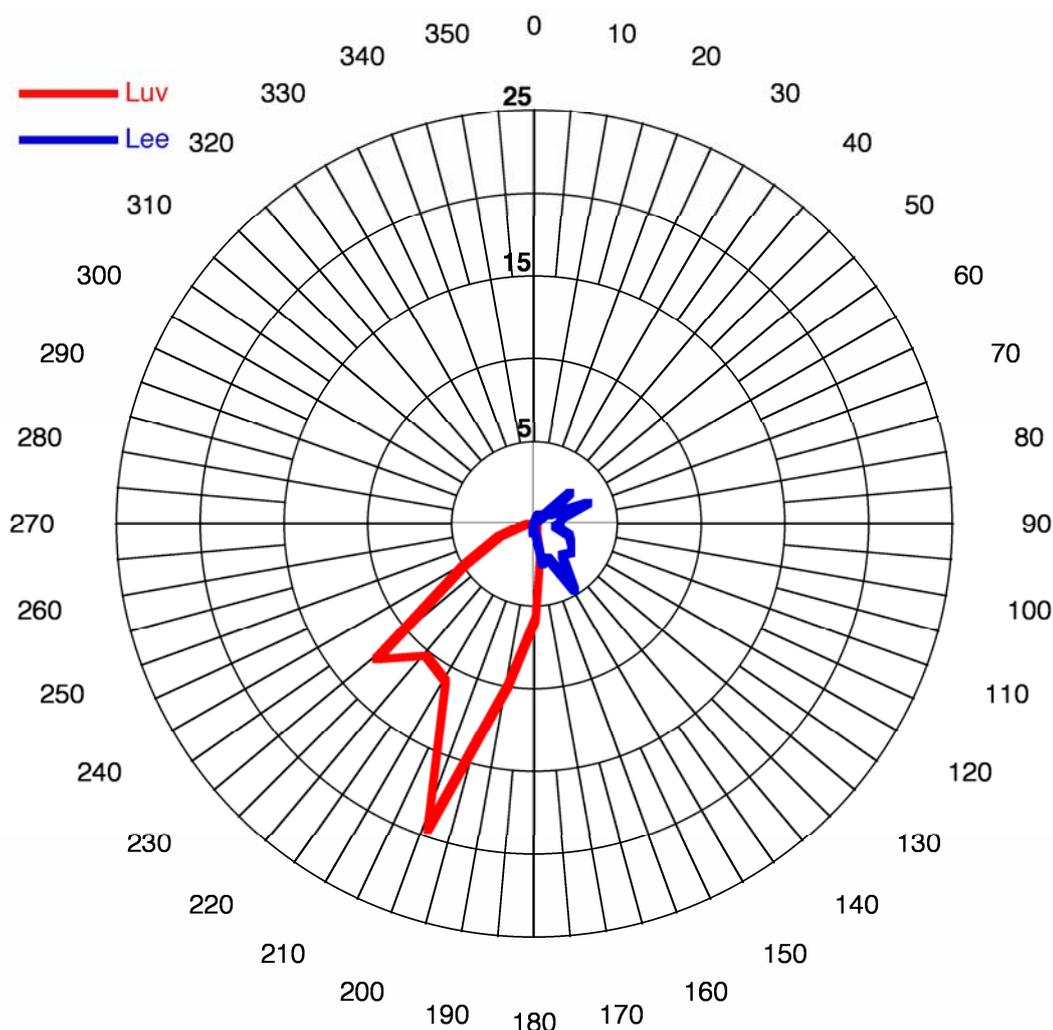


Bild 161: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen im Luv und Lee, A46, 09. Juli 2009

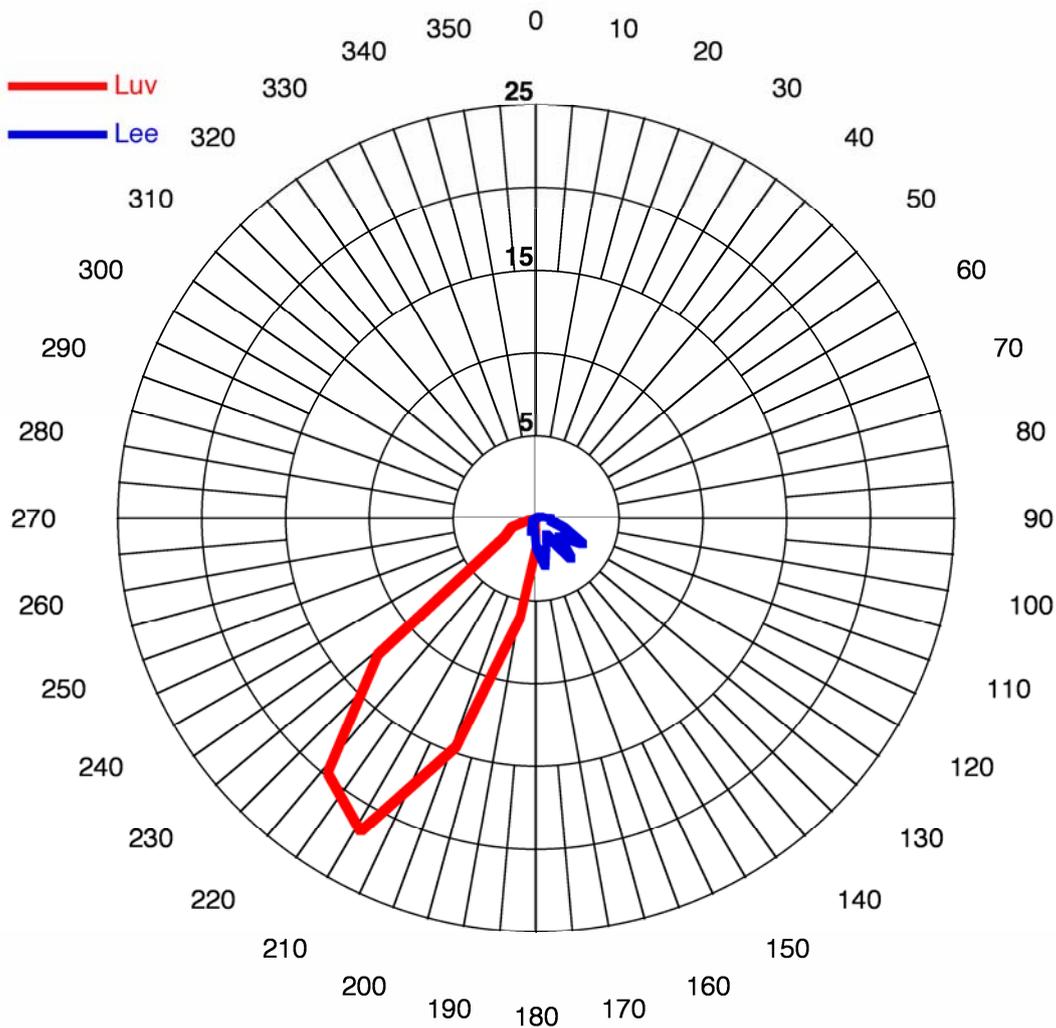


Bild 162: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen im Luv und Lee, A46, 10. Juli 2009

Zusätzlich können auch die unterschiedlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten in Luv und Lee zu einer Beeinflussung der Messwerte geführt haben. Am 09. Juli lag die durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Luv bei $1,21 \text{ ms}^{-1}$, im Lee jedoch nur bei $0,63 \text{ ms}^{-1}$. Am Folgetag zeigte sich ein vergleichbares Bild. Hier wurden im Luv im Mittel $1,28 \text{ ms}^{-1}$, im Lee nur $0,48 \text{ ms}^{-1}$ erreicht.

4.4 FTIR-Messungen

4.4.1 Einleitung

Bei allen bisher durchgeführten Feldmessungen zeigten sich Schwächen bei der Darstellung der vorherrschenden Luftströmungen entlang der Fahrbahnen. Da die Kenntnisse der Luftströmungen für eine umfassende Aussage und Beurteilung zum Abscheideverhalten von Pflanzen für Feinstaub notwendig sind, sollten die Strömungen mit geeigneten Mitteln sichtbar gemacht werden. Als eine Möglichkeit bietet sich

dafür eine Kombination aus einem Schwergas und einem bildgebenden Verfahren an. Als Schwergas wurde das ungiftige Schwefelhexafluorid (SF_6) gewählt, welches rund fünfmal schwerer als Luft ist. Tabelle 40 gibt eine kurze Übersicht über die Eigenschaften des Gases.

Parameter	Wert
Dichte (0°C , 1013 hPa)	$6,626 \text{ kgm}^{-3}$
Siedepunkt	$-63,8^\circ\text{C}$
Molmasse	$146,05 \text{ gmol}^{-1}$
Farbe	farblos
Geruch	geruchslos

Tab. 40: Eigenschaften des Schwefelhexafluorids

Die Verteilung und Strömung des Gases wurde mit einem Fourier-Transformation Infrarotspektrometer (FTIR) sichtbar gemacht. Bei dem FTIR handelt

sich um das System „Rapid“ der Firma Bruker Daltonics GmbH. Eine kurze Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften des Gerätes zeigt die Tabelle 41.

Parameter	Wert
Nachweisgrenze SF ₆	0,3 mgm ⁻³
Wellenlängenbereich für Messungen	700 bis 1300 cm ⁻¹
Abtastwinkel	30 mrad = 1,7°
Betriebsspannung	18 bis 36 V
Gewicht	30 kg

Tab. 41: Eigenschaften des FTIR-Systems Rapid

Die gewählte Kombination aus Gas und FTIR bietet sich aus mehreren Gründen an. Das Gas SF₆ wird zur Simulation von Schadstoffaustritten verwendet, so dass das FTIR besonders gut auf die Detektierung dieses Stoffes abgestimmt ist. Eine falsche Erfassung anderer Luftbestandteile ist somit praktisch ausgeschlossen. Für die Durchführung der Messungen wurde das FTIR in den hinteren Teil des Messbusses eingebaut, so dass die Messung bei geöffneten Türen aus dem Fahrzeug heraus erfolgen konnte. Im vorderen Teil des Fahrzeuges befand sich die Stromversorgung für das FTIR und die benötigte Peripherie (z.B. Laptop, Netzwerktechnik). Gesteuert wurde das System über die Software „GeDetekt“ der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH). Diese Software ermöglicht das Steuern und Kalibrieren des FTIR sowie das Erfassen der gesuchten Stoffe.

Das SF₆ wurde mit einem Druckminderer einer Druckgasflasche entnommen und über eine Düse freigesetzt. Der Düse war zur Feineinstellung der freigesetzten Gasmenge ein Ventil vorgeschaltet. Freigesetzt wurde das Gas in einer Höhe von ca. 1,5 Metern über dem Erdboden und in einer Entfernung von 20 Metern zum Messgerät. Bild 163 zeigt die Freisetzungsvorrichtung bei den Versuchen an der Autobahn A1 im Januar 2008. Nachdem ein konstanter Gasfluss eingestellt war, wurden die Messungen gestartet. Das FTIR scannt den vorgegebenen Messbereich zeilenweise ab. Ist der Bereich vollständig gescannt worden, so beginnt automatisch ein neuer Durchlauf. Mit dem Programm „GeDetekt“ ist neben der Steuerung und Dokumentation der Messung auch die zeitnahe Darstellung der Gasausbreitung auf dem Bildschirm möglich, so dass die Versuchsbedingungen, wenn nötig, sofort angepasst werden können.



Bild 163: Freisetzungsvorrichtung

4.4.2 Autobahn A1

Unterschiedliche Formen von Ausbreitungen zeigen die Bilder 164 bis 167. Zu erkennen ist insbesondere der Einfluss des Windes. Bild 164 zeigt die Gaswolke bei nahezu Windstille. Die aufsteigende Form der Wolke ist auf den Fahrtwind der Fahrzeuge zurückzuführen. Bild 165 zeigt die Ausbreitung bei Ostwind, Bild 166 bei Westwind und 167 bei Südwind. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Geländeform auf die Luftströmung und damit die Ausbreitung. Bei Ostwind (Bild 165) trägt der Luftstrom das SF₆ die Böschung zur Fahrbahn herauf. Weht der Wind in der entgegengesetzten Richtung (Bild 166), so wird das Gas zuerst in Richtung Osten transportiert. Da sich dort jedoch die Fahrbahn Richtung Norden auf einer sehr steilen Böschung befindet, wird der Luftstrom vollständig umgelenkt und oberhalb des ursprünglichen Luftstroms zurück getragen.



Bild 164: SF₆-Wolke bei Windstille



Bild 167: SF₆-Wolke bei Südwind



Bild 165: SF₆-Wolke bei Ostwind (Wind im Bild von links)



Bild 166: SF₆-Wolke bei Westwind (Wind im Bild von rechts)

4.4.3 Autobahn A46

Ergänzend zu den Feldmessungen zur Bestimmung der Feinstaub-Konzentration wurden am 26. und 27. Februar 2009 Messungen mit dem Fourier-Transformation Infrarotspektrometer (FTIR) auf dem Rastplatz Winchenbach an der A46 durchgeführt. Die Durchführung dieser Versuche erfolgte analog zu den ersten an der Autobahn A1 im Januar 2008. Um festzustellen, ob an verschiedenen Stellen der Hecke unterschiedliche Strömungsverhältnisse vorherrschen, wurde das Tracergas an verschiedenen Stellen freigesetzt. Die Freisetzung erfolgte sowohl am Rand der Hecke, als auch in der Hecke selbst. Zusätzlich wurde am 27. Februar die Ausrichtung des Messfahrzeuges geändert, so dass eine Erfassung an der alten Ausfahrt des Rastplatzes möglich war. Auf den Bildern 168 und 169 ist die räumliche Anordnung von Freisetzungsvorrichtung und Messfahrzeug an den beiden Versuchstagen dargestellt.

An beiden Versuchstagen herrschten widrige Wetterbedingungen mit stark böigem Wind und teilweise lang anhaltenden Regenfällen. Eine Verschiebung der Messung bis zum Eintritt günstigerer Verhältnisse war nicht möglich, da das Gerät zum Hersteller zurück geschickt werden musste und eine erneute Ausleihe nicht möglich war. Zur Aufzeichnung der klimatischen Bedingungen an den beiden Versuchstagen wurde ein Grimm EnvironCheck 107 auf der Seite des Rastplatzes aufgestellt. Am 27. Februar wurde ein zusätzliches Gerät auf der verkehrszugewandten Seite der Hecke für eine Luv-Lee-Messung der Feinstaub-konzentration aufgestellt. Tabelle 42 gibt die durchschnittlichen klimatischen Werte der beiden Tage wieder.

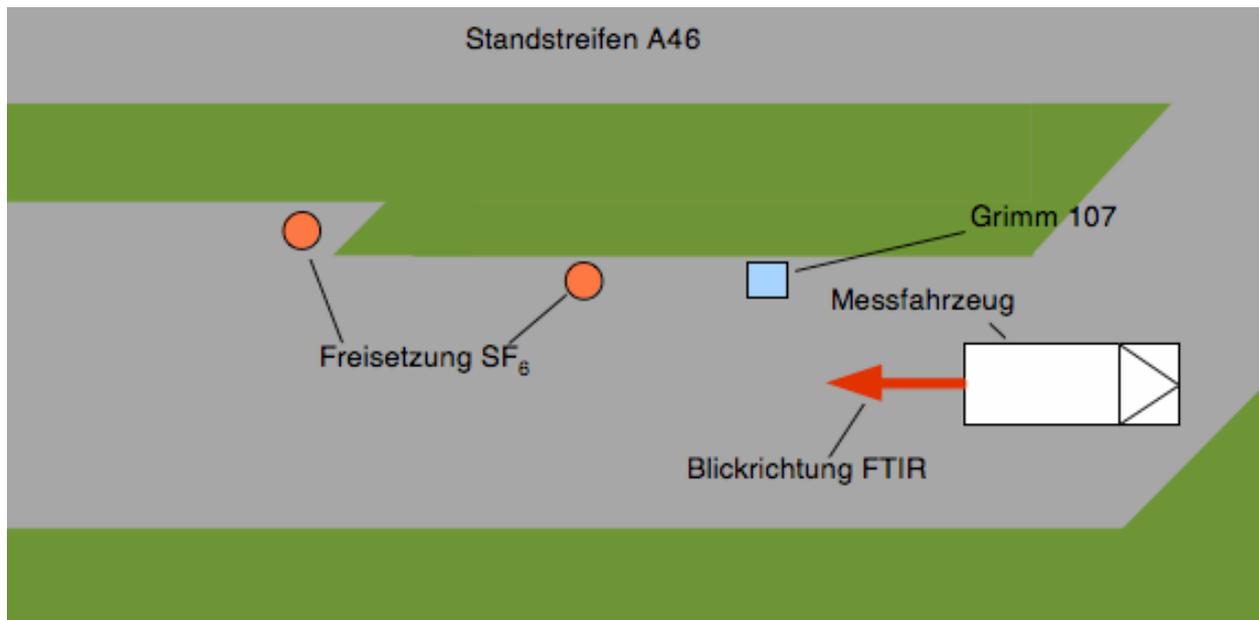


Bild 168: Aufbau der Messstelle am 26. Februar 2009

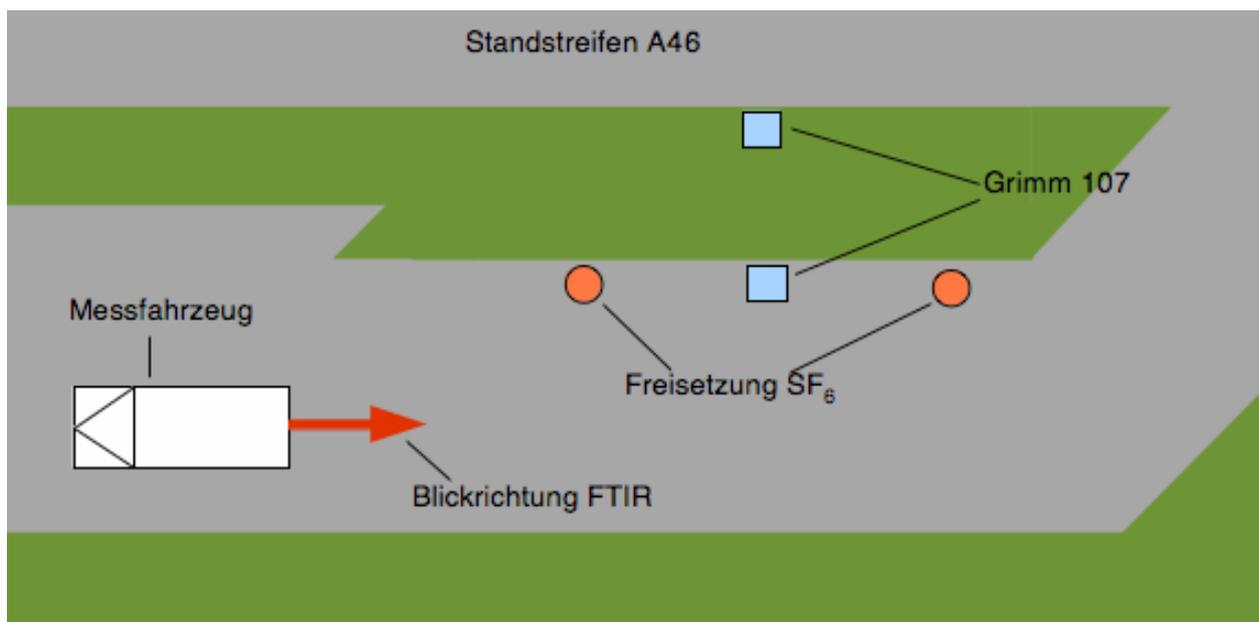


Bild 169: Aufbau der Messstelle am 27. Februar 2009

Meteorologischer Parameter	26. Februar 2009	27. Februar 2009
Lufttemperatur / °C	6,5	5,1
Relative Luftfeuchte / % r.F.	82,0	93,4
Luftdruck / hPa	1001	997
Windgeschwindigkeit / ms ⁻¹	1,0	1,1
Windrichtung / °	182	232

Tab. 42: Vergleich der meteorologischen Parameter vom 26. und 27. Februar 2009

Trotz der ungünstigen Wetterbedingungen konnte die Ausbreitung des Tracergases erfasst und visualisiert werden. Jedoch mussten die Verwehungen durch den Wind und die Auswaschungen durch den Regen mit einer erhöhten Freisetzung des Gases kompensiert werden, was zu einem schnellen Aufbrauchen des Gasvorrats führte.

Bei den Messungen zeigte sich durchweg eine Strömung parallel zu der vorhandenen Hecke. Der Ort der Freisetzung des Tracergases hatte keinen feststellbaren Einfluss hierauf. Dieses Ergebnis war zwar bereits im Vorfeld erwartet worden, konnte aber nun auch visuell bestätigt werden. Auf den Bildern 170 und 171 sind typische Verteilungen des Tracergases entlang der Hecke dargestellt, während die Bilder 172 und 173 das Bild bei einer teilweisen Auswaschung durch Regen und Verwehung des Tracergases zeigen.



Bild 170: SF₆-Wolke am 26. Februar 2009



Bild 171: SF₆-Wolke am 26. Februar 2009



Bild 172: Verwehung der SF₆-Wolke am 27. Februar 2009



Bild 173: Verwehung der SF₆-Wolke am 27. Februar 2009

4.5 Staubproben

Im Zuge der Feldmessungen an der A46 wurden Staubproben von den Blättern der Pflanzen abgenommen. Anhand dieser Proben sollte der Ursprung der abgelagerten Partikeln erkannt werden.

Der Einsatz von Abziehlacken erschien aufgrund der umständlichen Form der Aufbringung und der Trocknungszeiten für eine Anwendung an der Autobahn als ungeeignet. Ein Transport von ganzen Blättern kann hingegen zu einem starken Verlust von Partikeln führen, weshalb eine Sicherung der Partikeln mit Hilfe von Klebefolien vorgenommen werden sollte. In mehreren Vorversuchen stellte sich heraus, dass handelsübliches Klebeband nicht verwendet werden konnte, da es bei ungleichmäßigem Abrollen zu Verfärbungen des Klebebandes kommt. Diese Stellen sind dann für eine nachfolgende mikroskopische Betrachtung unbrauchbar. Als eine Alternative wurde dann selbstklebende Folie zum Einschlagen von Büchern getestet. Diese Folie

bleibt beim Abziehen von ihrem Trägermaterial transparent und kann nach Entnahme der Staubprobe wieder auf ihm aufgebracht werden. So wurden die Staubproben für die weitere Untersuchung fixiert.

Die Klebefolie wurde von ihrem Trägermaterial abgezogen und auf die Blattoberfläche aufgedrückt. Anschließend wurde die Folie wieder auf das Trägermaterial aufgedrückt, um die Proben für die weiteren Untersuchungen zu sichern. Beprobte wurden Pflanzen im Luv und Lee. Zusätzlich wurde eine Probe von der Schutzplanke genommen, um die Probennahme von abiotischen Oberflächen zu testen.

Die Untersuchung der Staubproben erfolgte unter einem digitalen Auflichtmikroskop der Firma Keyence bei bis zu 500-facher Vergrößerung. Bei der Betrachtung der Staubproben fiel auf, dass die Oberflächen von Klebefolie wie Trägermaterial im Bild deutlich zu erkennen sind und die Arbeit mit den Proben deutlich erschweren. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass vornehmlich grobe Partikel mit einer Größe über 10 μm mit der Folie von den Blättern abgenommen werden konnten, weniger kleinere Partikel. Trotz der Verwendung eines leistungsstarken Mikroskopes konnten keine eindeutigen Aussagen über die Herkunft der Partikel gemacht werden. Es waren lediglich ungleichmäßig geformte Objekte zu erkennen, die schwarz oder rot-braun gefärbt waren. Die Bilder 174 bis 176 zeigen mikroskopische Aufnahmen der Partikel bei 200-facher Vergrößerung.

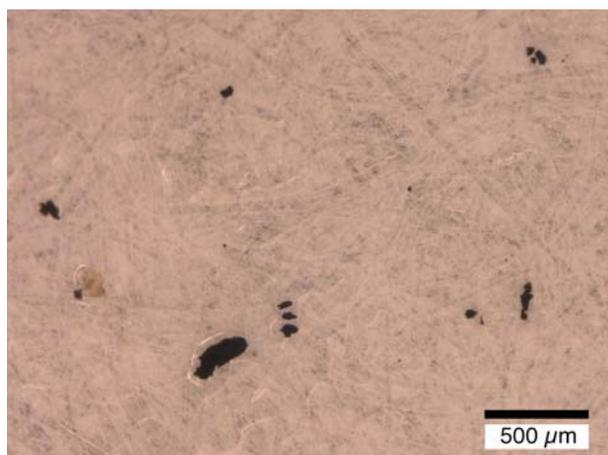


Bild 174: Staubprobe rote Heckenkirsche, Luv

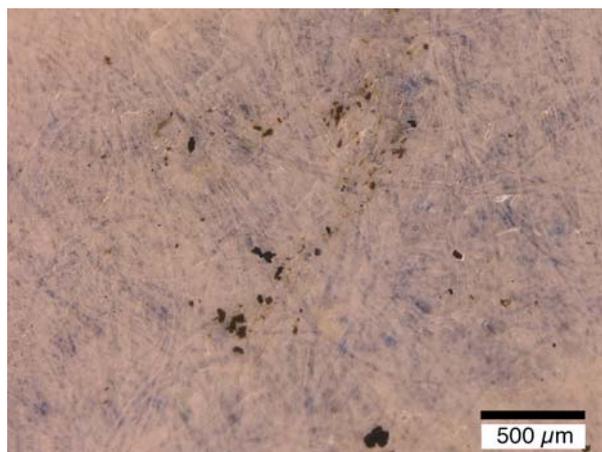


Bild 175: Staubprobe Ahorn, Luv

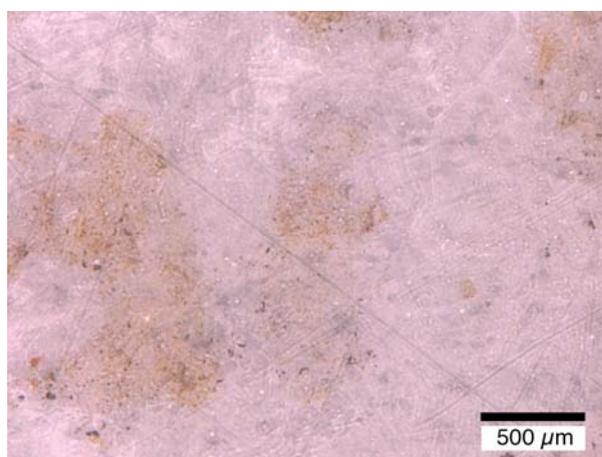


Bild 176: Rost-Partikeln Schutzplanke

4.6 Zusammenfassung und Diskussion

Ein Großteil der Messungen an der Autobahn A1 beschäftigte sich mit der Frage nach einem möglichen Einfluss der Betongleitwand auf die Luftströmung und damit auf die Partikelkonzentration abseits der Fahrbahn. Durch die Profilmessungen konnte gezeigt werden, dass tatsächlich eine Beeinflussung der Partikelkonzentration auftritt. Allerdings deuten die erhaltenen Ergebnisse darauf hin, dass es sich hierbei nicht um einen stabilen Zustand handelt, sondern um einen dynamischen Vorgang, der durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Insbesondere die Konzentrationen von Partikeln mit einer Größe von mehr als 2 μm scheinen starken Schwankungen unterworfen zu sein. Dies ist beispielsweise in den Bildern 134 und 140 zu sehen, während die Konzentrationen der kleineren Partikeln geringeren Schwankungen unterliegen (Bilder 133 und 139). Dem gegenüber kann es aber auch dazu kommen, dass die Konzentration der größeren Partikeln über einen langen Zeitraum nahezu gegen Null sinkt, wie beispielsweise auf den Bildern 132 und 136 zu sehen ist. Die zur Zeit einzige Erklärung für

diese Ergebnisse liegt in einer starken Beeinflussung des Strömungsfeldes durch die Betongleitwand. Diese veränderte Strömung führt dazu, dass es lokal zu starken Konzentrationsunterschieden der unterschiedlich großen Partikeln kommt. Um diesen Fragen und ihren möglichen Konsequenzen für einen wirksamen Immissionschutz an Autobahnen vertiefend nachgehen zu können, sind weitere umfangreiche Untersuchungen erforderlich. In diesen Untersuchungen sollte zum einen die Strömung visualisiert werden und zum anderen die Partikelgrößenverteilung in der Nähe der Betongleitwand simultan in mehreren Höhen und mit hoher Frequenz vermessen werden.

An der Autobahn A46 wurden an einer natürlich gewachsenen Hecke Luv/Lee-Messungen der Feinstaubkonzentration durchgeführt. Bei der Auswertung der Messungen zeigten sich starke Unterschiede im Vergleich der Konzentrationen vor und hinter der Hecke. Auch unter Berücksichtigung der Abweichungen der einzelnen Messgeräte untereinander konnte keine abschließende Aussage darüber getroffen werden, ob die untersuchte Hecke zu einer wirksamen Abscheidung von Feinstaub geführt hat. Es zeigten sich sowohl geringere wie auch stark erhöhte Konzentrationen im Lee, die teilweise um mehr als das Dreifache über der Konzentration im Luv lagen. Ein Ansatz zur Erklärung dieser Ergebnisse liegt in Wirbelschleppen, durch vorbeifahrende Fahrzeuge verursacht wurden. Wie auf Bild 145 zu sehen ist, steht das Messgerät im Luv am rechten Rand der Fahrbahn und ist damit den direkt Wirbeln ausgesetzt, die in erster Linie durch die vorbeifahrenden LKW verursacht werden. Diese Wirbel können zu einer Verminderung der Partikelkonzentration durch Verdünnung und Durchmischung der Luftmassen führen. Im Lee fehlen diese Einflüsse und das Messgerät erfasst dadurch eine höhere Partikelkonzentration.

Unabhängig von den vorbeifahrenden Fahrzeugen und den dadurch verursachten Wirbel zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Windrichtungen, dass Winde aus süd-westlicher Richtung dominieren. Wie aus den Bildern 161 und 162 hervorgeht, trifft dies aber in erster Linie für die Situation vor der Hecke zu. Im Lee dominieren Winde aus nord-östlicher Richtung und transportieren damit Partikeln zum Lee-Messgerät, die nicht durch die Hecke getreten sein können. Dadurch kommen Messwerte zu Stande, die teilweise deutlich über denen im Luv liegen.

In Ergänzung zu den Luv/Lee-Messungen wurden an der A46 mehrfach Konzentrationsprofile hinter der dort wachsenden Hecke gemessen. Auch bei diesen Profilmessungen zeigte sich die Ausbildung stabiler Konzentrationen in einem weiten Bereich

hinter der Hecke. Dies traf allerdings nur für die feinen Fraktionen PM1 und PM2,5 zu. Diese Profile sind beispielsweise auf den Bildern 155 und 156 zu sehen. Die Fraktion PM10 war hingegen stets Schwankungen unterworfen, wie aus den Bildern 157 und 160 hervorgeht. Dem gegenüber steht allerdings das Profil vom 26. September 2008, in dem alle Fraktionen starke Schwankungen aufweisen. Eine Erklärung für dieses auffällige Verhalten liegt möglicherweise in den meteorologischen Bedingungen an diesem Tag, jedoch konnten im Vergleich zum Vortag keine wesentlichen Änderungen erkannt werden, was aus Tabelle 37 hervorgeht. Somit ergeben sich ergänzend zu den oben aufgeführten Forderungen für zukünftige Profilmessungen noch die Forderung nach einer umfassenderen Aufzeichnung und Auswertung der meteorologischen Parameter, insbesondere einer hochfrequenten und mehrdimensionalen Messung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung. Insbesondere die Aufklärung von Turbulenzen im Lee der Hecke ist für die weiterte Betrachtung von großer Bedeutung.

Die Angabe einer Massenstrombilanz oder einer Materialflussdichte auf Grundlage der erhaltenen Messwerte ist derzeit nicht möglich. Die Messgeräte können nur eine punktuelle Konzentration an einer Stelle der Hecke erfassen. Dieser Bereich ist sehr klein im Vergleich zur Größe der gesamten Hecke. Erschwerend kommt hinzu, dass die erfassten Konzentrationen nicht zwangsläufig durch Partikeln verursacht wurden, die von der Fahrbahn in Richtung der Hecke und dann durch diese hindurch strömten. Angesichts der vorherrschenden Strömungsbedingungen an den Messplätzen ist davon auszugehen, dass die Partikeln hauptsächlich parallel an der Hecke vorbei transportiert wurden und damit die Konzentration der Partikeln von der Hecke kaum beeinflusst wurde. Eine Aussage über den Ursprung der detektierten Partikeln ist somit nur schwer möglich. Ein Massenstrom durch die Hecke kann daher unter diesen Voraussetzungen nicht bestimmt werden. Aus diesem Grund scheidet auch die Angabe davon abgeleiteter Größen wie beispielsweise einer spezifischen Materialflussdichte aus. Damit kann abschließend auch keine Abschätzung einer möglichen Staubrückhaltung bzw. -freisetzung gemacht oder ein Flächenbedarf zur Konzentrationsminderung angegeben werden.

Der Einsatz des FTIR sollte Aufschluss über die Strömungsverhältnisse entlang der Autobahnen und Hecken geben, was teilweise gelungen ist. An der A1 konnten verschiedene Windverhältnisse visualisiert werden und an der A46 konnte eine Strömung parallel zur vorhandenen Hecke identifiziert werden. Allerdings zeigten sich bei der Durchführung der Messungen die Schwächen des

Systems, die in erster Linie in der geringen Arbeitsgeschwindigkeit und der Einstellung der richtigen Gasmenge liegen. Hier muss bei zukünftigen Untersuchungen ein Gerät verwendet werden, dass in der Lage ist den schnellen Änderungen der Strömungsverhältnisse zeitnah zu folgen. Grundsätzlich bietet die Kombination aus FTIR und Tracergas aber eine interessante Möglichkeit die Strömungsverhältnisse an Hecken und anderen Bauwerken entlang von Strassen aufzuklären.

Für die Verwendung des stark klimaschädlichen SF_6 als Tracergas gab es zum Zeitpunkt der Messungen keine akzeptable Alternative. Mögliche Ersatzstoffe weisen entweder eine hohe akute Toxizität oder Reizwirkung auf (z.B. Ammoniak), sind in Form einer Wolke sichtbar oder haben einen unangenehmen Geruch. Eine Verwendung dieser Stoffe entlang von Autobahnen war daher auch in geringen Konzentrationen von vornherein ausgeschlossen. Neuere FTIR-Systeme erlauben allerdings auch den Einsatz von CO_2 , das zum einen preiswerter und deutlich weniger klimaschädlich als das verwendete SF_6 ist. Bei weiteren Untersuchungen sollte daher auf solche Systeme zurückgegriffen werden, die den Einsatz weniger schädlicher Tracergase ermöglichen.

Eine Aussage über die Art und Verteilung der Inhaltsstoffe des abgeschiedenen Feinstaubes auf den Blättern anhand der durchgeführten Beprobung ist nicht möglich. Die Abnahme der Partikeln von den Blättern mit Hilfe der Klebefolien kann als erfolgreich angesehen werden und bietet sich auch bei zukünftigen Untersuchungen an. Allerdings ergibt sich bei der anschließenden Untersuchung das Problem, dass sich die abgenommenen Partikeln nur in einem geringen Maß in ihrem Aussehen von einander unterscheiden und somit eine Aussage über die jeweiligen Inhaltsstoffe nicht durchgeführt werden kann. Einzig die charakteristische Färbung der Rostpartikeln konnte für eine Abgrenzung zu anderen Stoffen herangezogen werden. Bei künftigen Untersuchungen kann die Benutzung eines Elektronenmikroskops hier bessere Resultate bezüglich Partikelgrößen und Stoffbestimmung liefern. So ist es dann beispielsweise möglich die Probe automatisch abtasten zu lassen und so eine Karte der abgeschiedenen Stoffe und Partikeln zu erstellen. Dies kann dann auch dazu genutzt werden, die Abscheidung in Abhängigkeit von der Blattform besser zu verstehen.

5 Simulationen

5.1 Einleitung

Parallel zu den durchgeführten Versuchen im Labor und an der Autobahn wurden Simulationen zur Abscheidung von Feinstaub auf Blättern durchgeführt. Zusätzlich wurde bereits begonnen, den Maßstab zu vergrößern und Hecken zu simulieren. Dabei sollten die Ergebnisse der Simulationen mit denen des Windkanals verglichen werden.

5.2 Simulationen einzelner Blätter und Blattkombinationen

Um zunächst die Grundlagen zu verstehen, wurden keine realen Blätter als Ganzes simuliert, sondern nur vereinfachte Modelle. Berechnet wurden die Abscheidegrade für unterschiedlich große Partikeln auf runden Scheiben mit den Durchmessern 10, 20, 30 und 40 Millimetern. Zusätzlich wurde die Ausrichtung dieser Scheiben zur Strömung in den Winkeln 45, 60 und 90 Grad variiert. Im nächsten Schritt wurden Kombinationen von Blättern simuliert, die senkrecht zu ihrer Fläche angeströmt wurden. Die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten lagen dabei zwischen $0,1$ und 10 ms^{-1} . Die Bilder 177 und 178 stellen die Anströmung einer Scheibe grafisch dar, während die Bilder 179 und 180 die Veränderungen der Geschwindigkeit und der Druckverhältnisse vor und nach der Umströmung einer solchen Scheibe beispielhaft zeigen. Für die Berechnung der Abscheidung auf einer einzelnen Scheibe sind Rechenzeiten von bis zu einer Woche erforderlich. Dies folgt aus den Umständen, dass eine Vielzahl von Partikeln auf ihrem Weg zur Scheibe und in ihrem Verhalten im Nahbereich der Scheibe berechnet werden müssen.

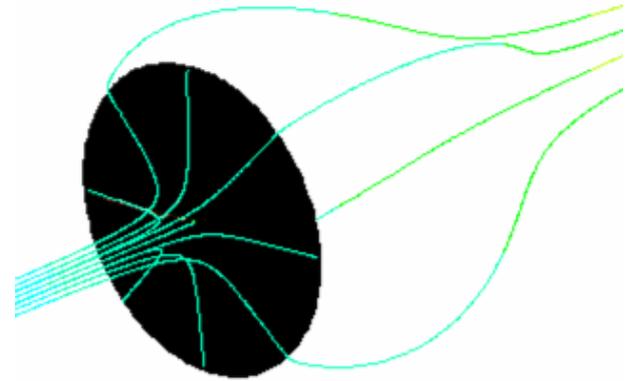
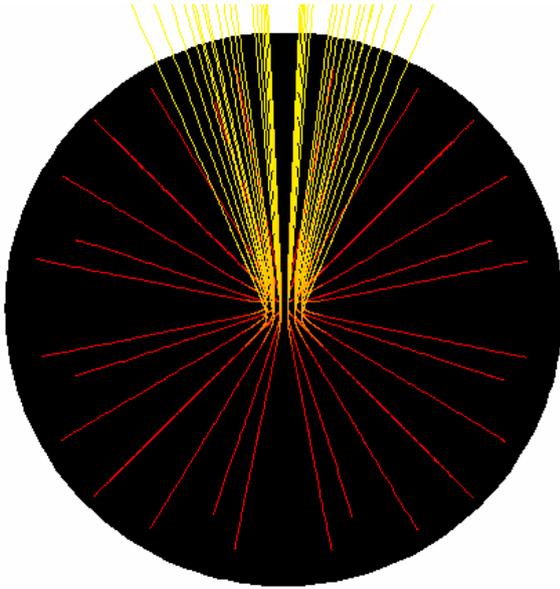


Bild 178: Simulierte Anströmung einer Scheibe

Bild 177: Simulierte Anströmung einer Scheibe

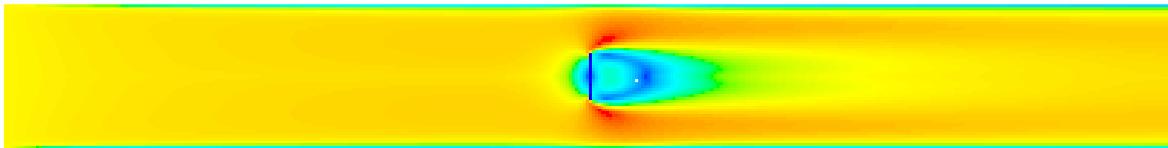


Bild 179: Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit bei der simulierten Umströmung einer Scheibe

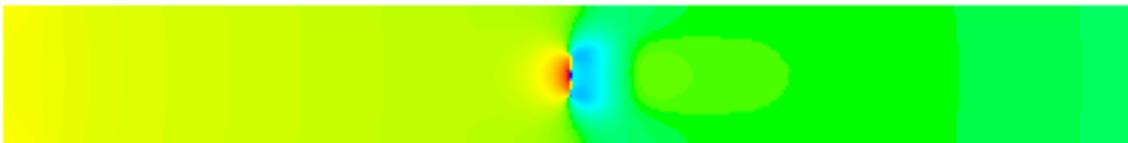


Bild 180: Druckdifferenzen bei der simulierten Umströmung einer Scheibe

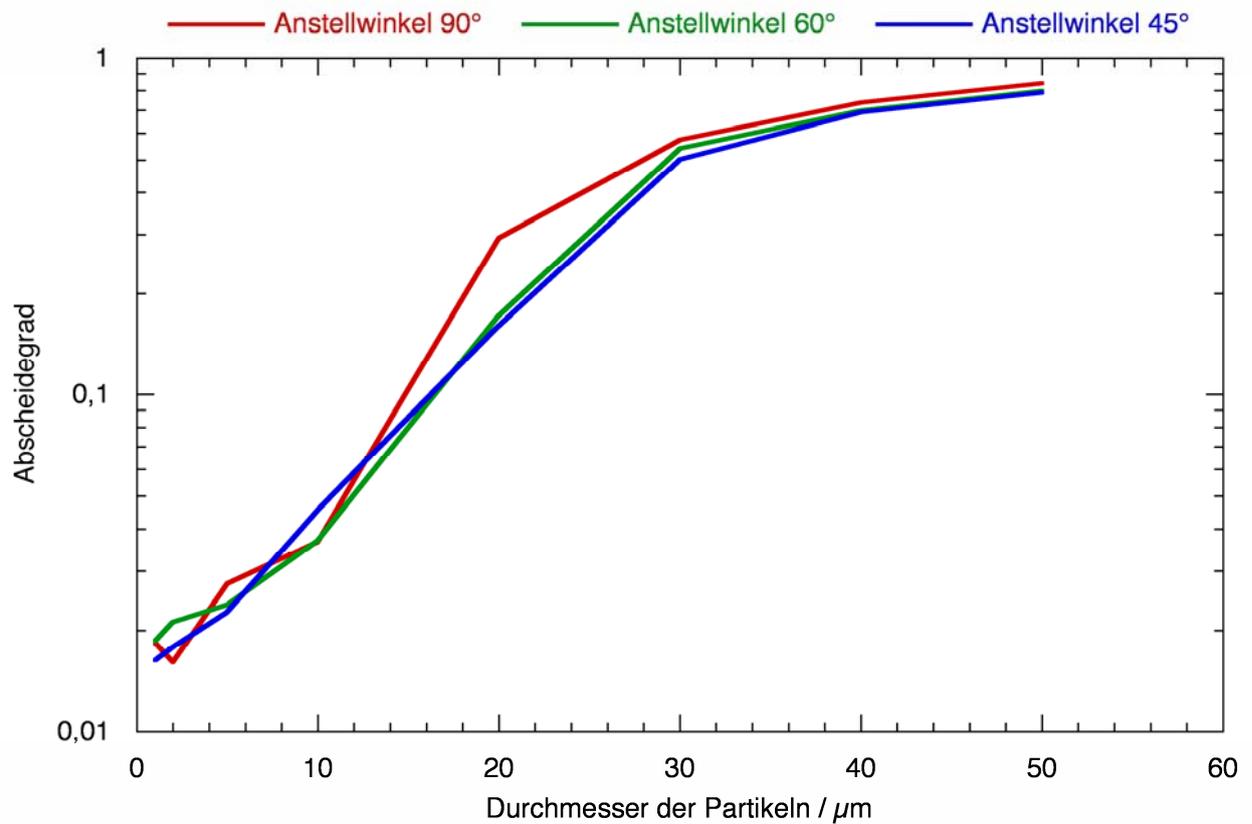


Bild 181: Simulierte Abscheidegrade, Scheibe mit 10 mm Durchmesser, verschiedene Anstellwinkel

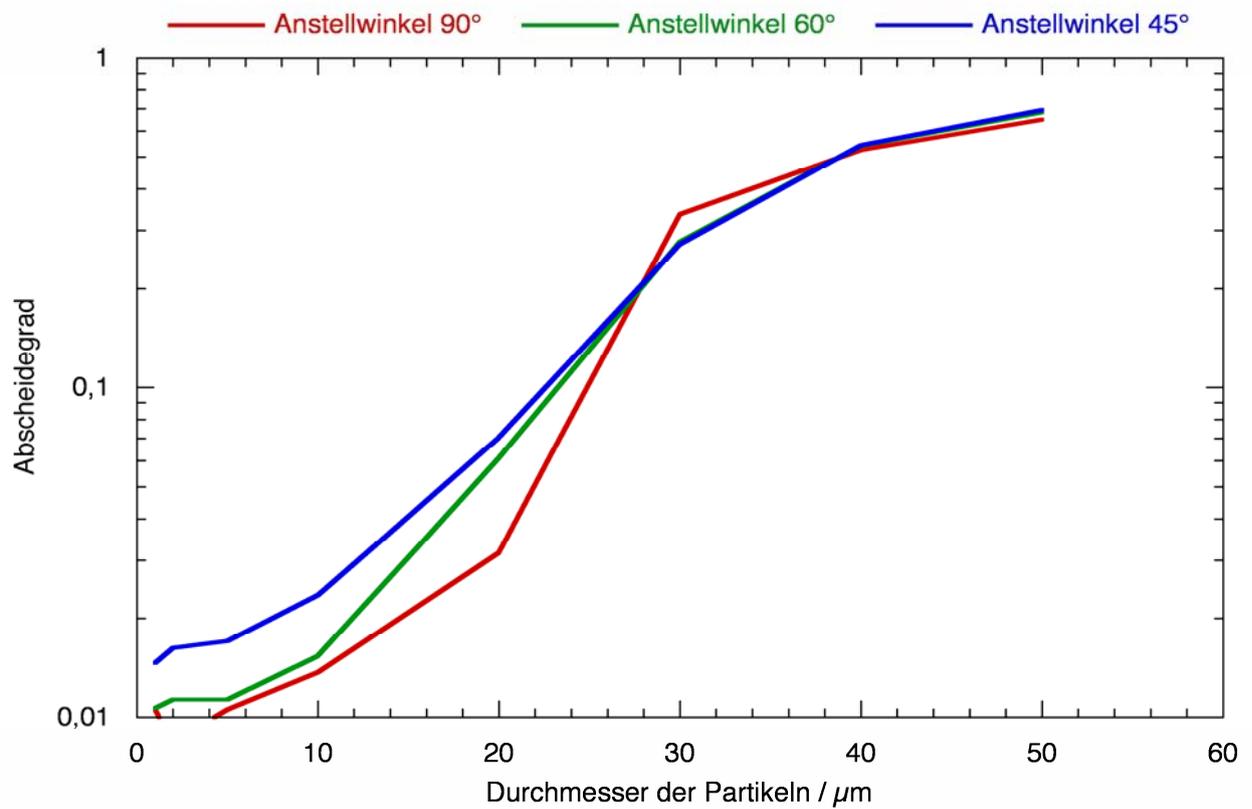


Bild 182: Simulierte Abscheidegrade, Scheibe mit 20 mm Durchmesser, verschiedene Anstellwinkel

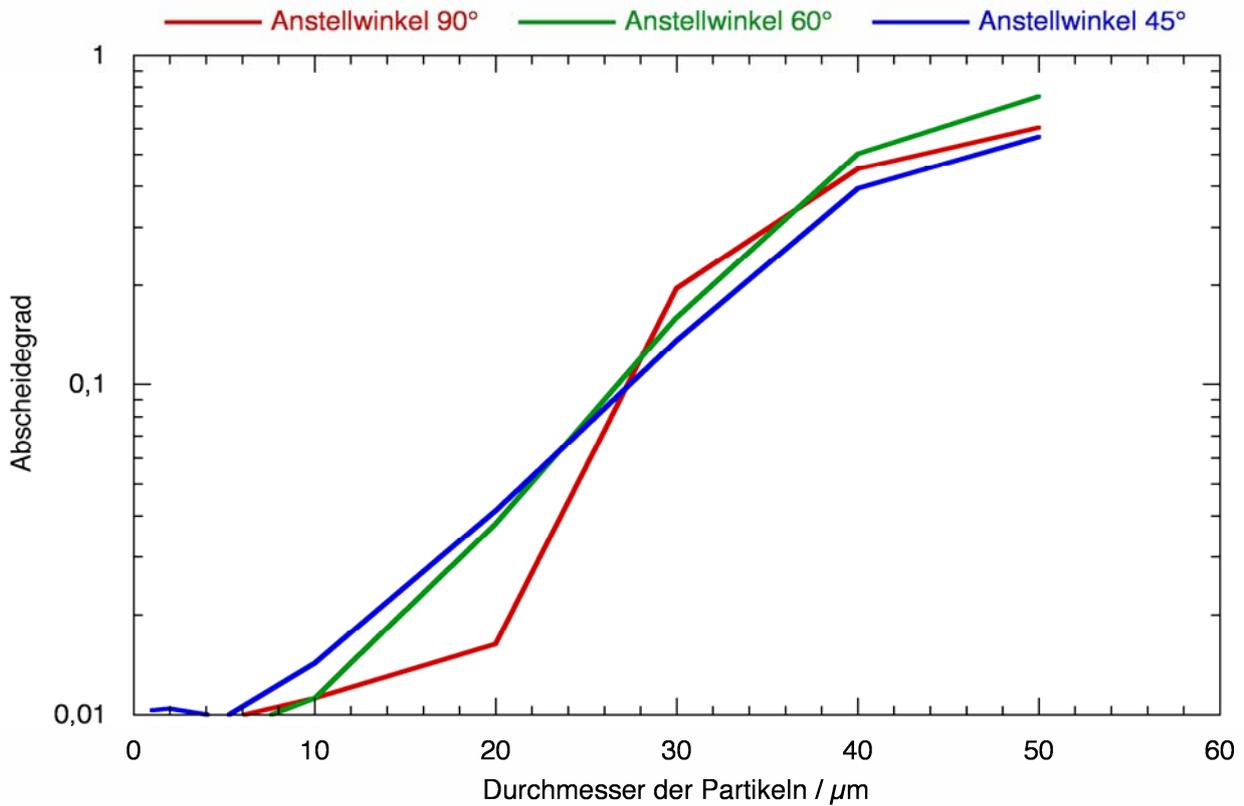


Bild 183: Simulierte Abscheidegrade, Scheibe mit 30 mm Durchmesser, verschiedene Anstellwinkel

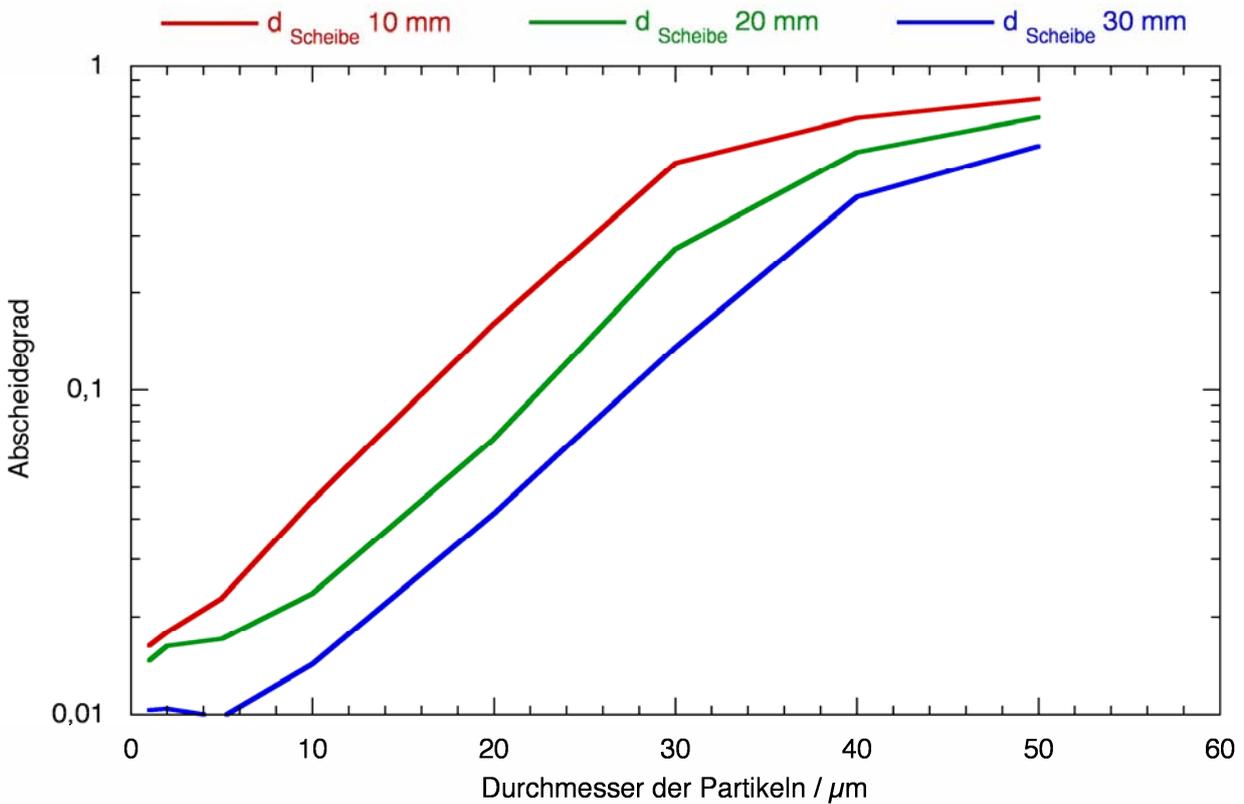


Bild 184: Simulierte Abscheidegrade, Anstellwinkel 45°, verschiedene Durchmesser der Scheibe

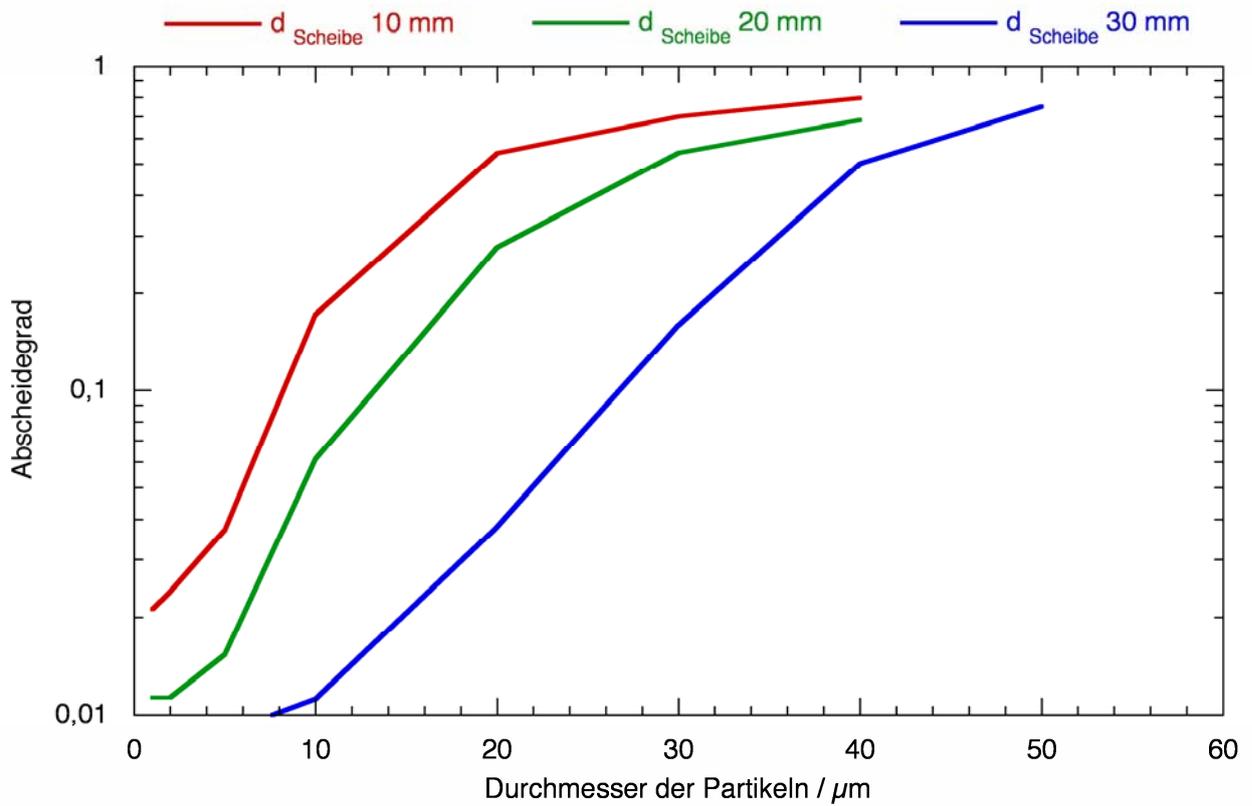


Bild 185: Simulierte Abscheidegrade, Anstellwinkel 60° , verschiedene Durchmesser der Scheibe

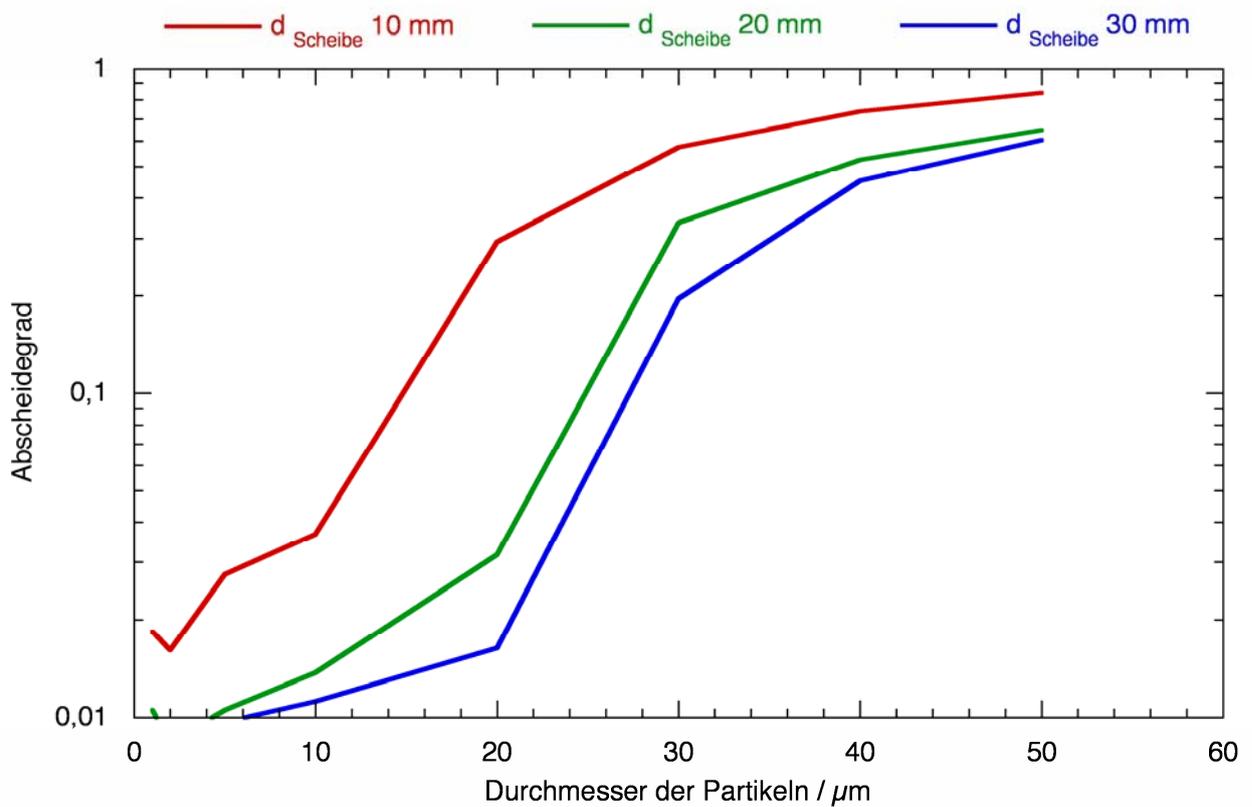


Bild 186: Simulierte Abscheidegrade, Anstellwinkel 90° , verschiedene Durchmesser der Scheibe

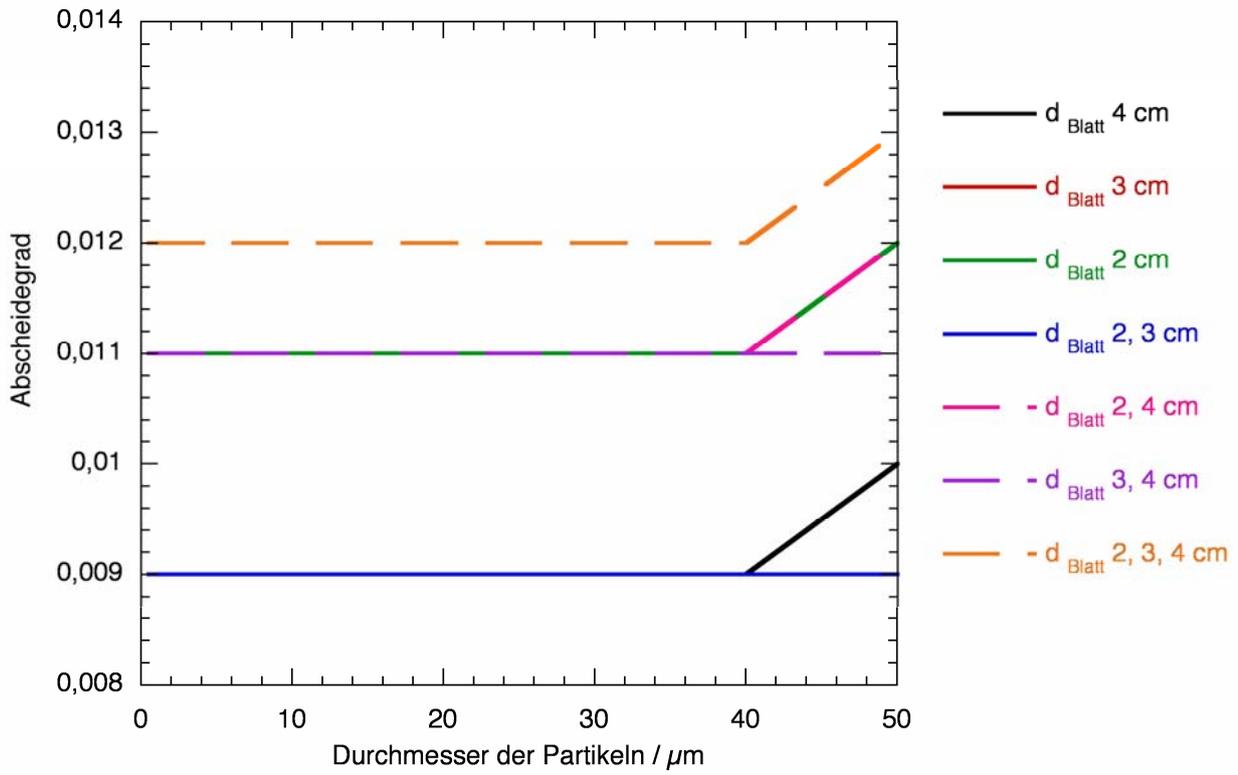


Bild 187: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen bei $v = 0,1 \text{ ms}^{-1}$

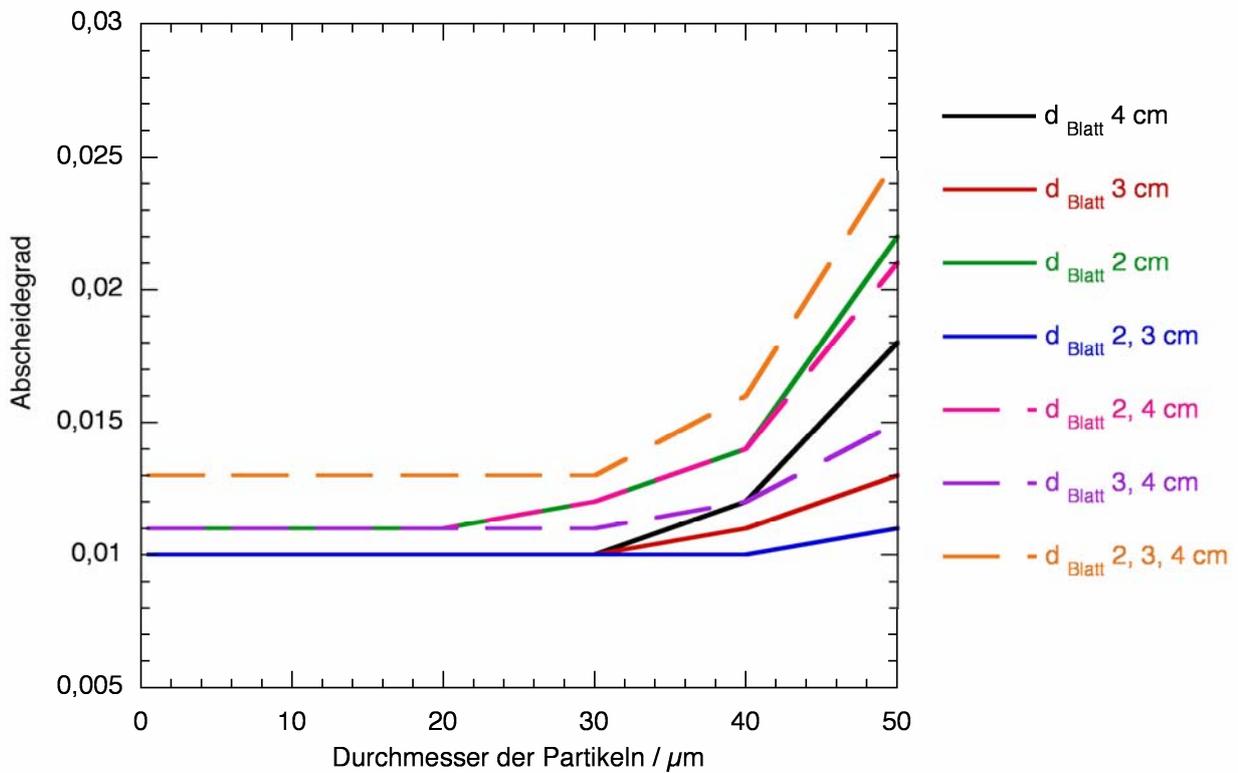


Bild 188: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen bei $v = 0,2 \text{ ms}^{-1}$

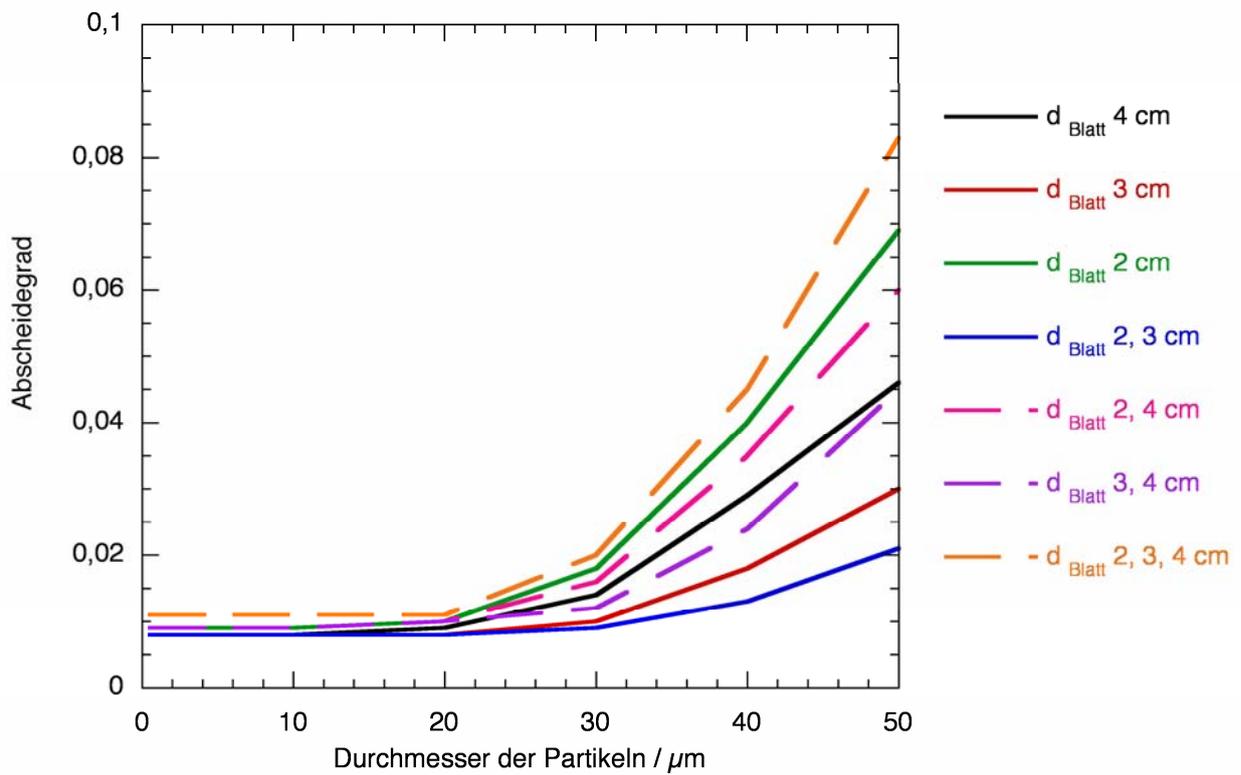


Bild 189: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen bei $v = 0,5 \text{ ms}^{-1}$

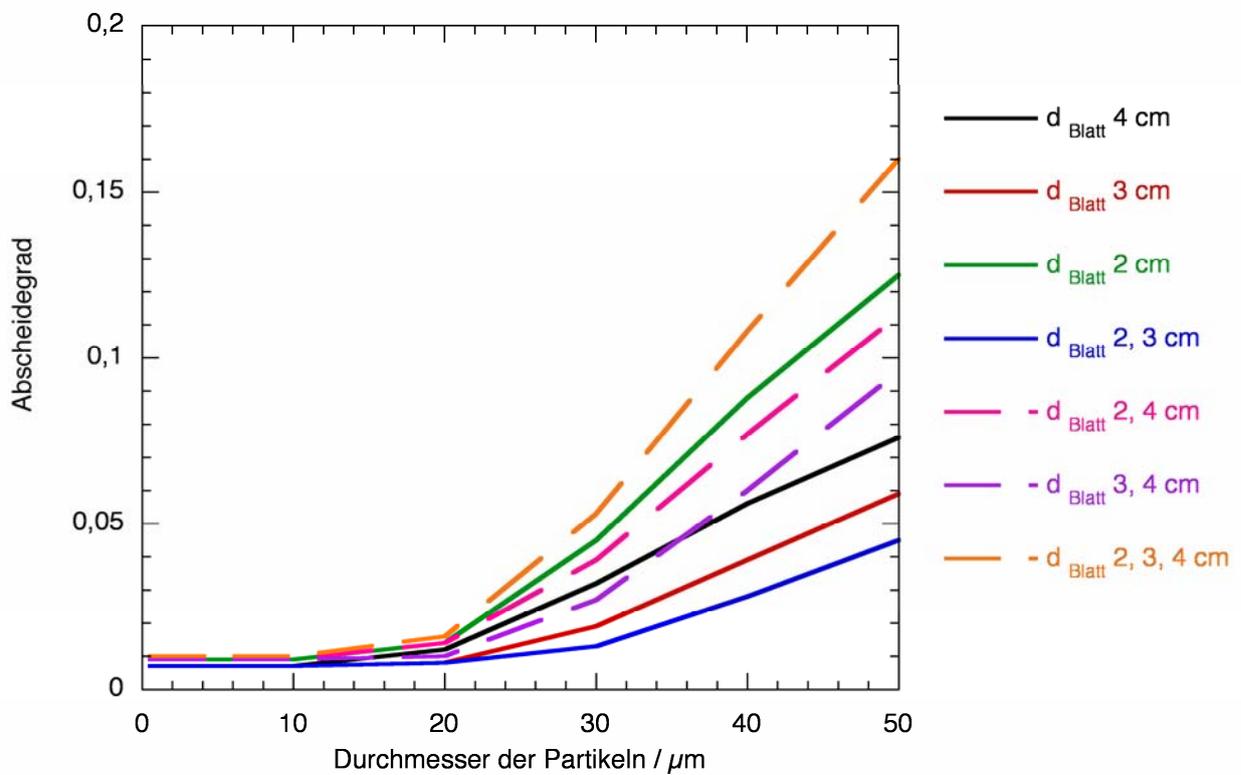


Bild 190: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen bei $v = 1 \text{ ms}^{-1}$

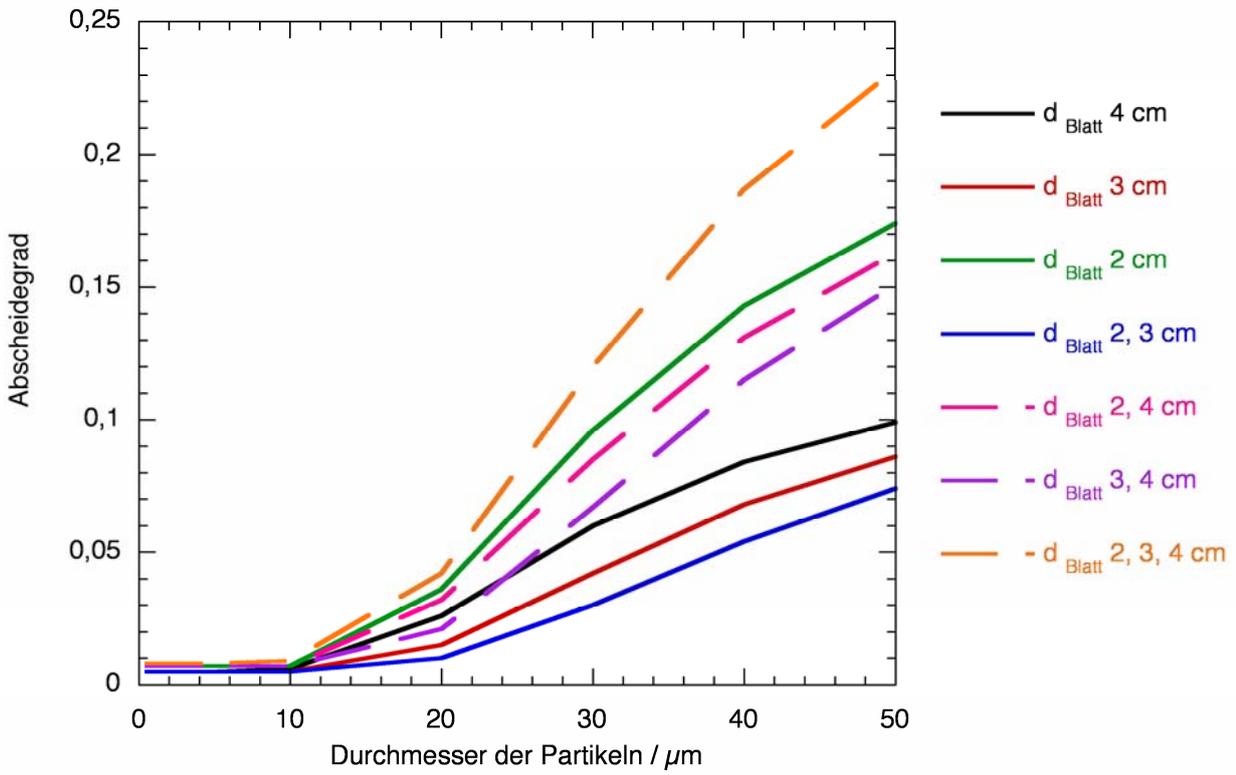


Bild 191: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen bei $v = 2 \text{ ms}^{-1}$

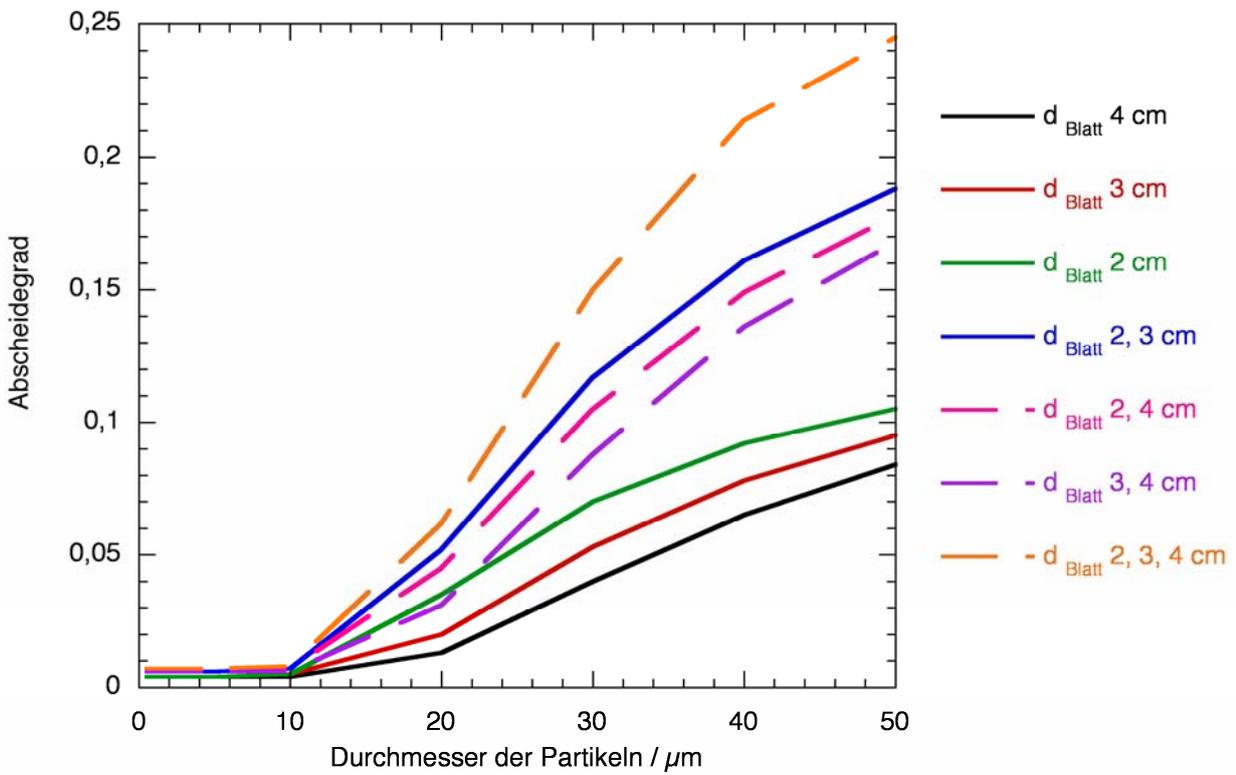


Bild 192: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen, $v = 2,6 \text{ ms}^{-1}$

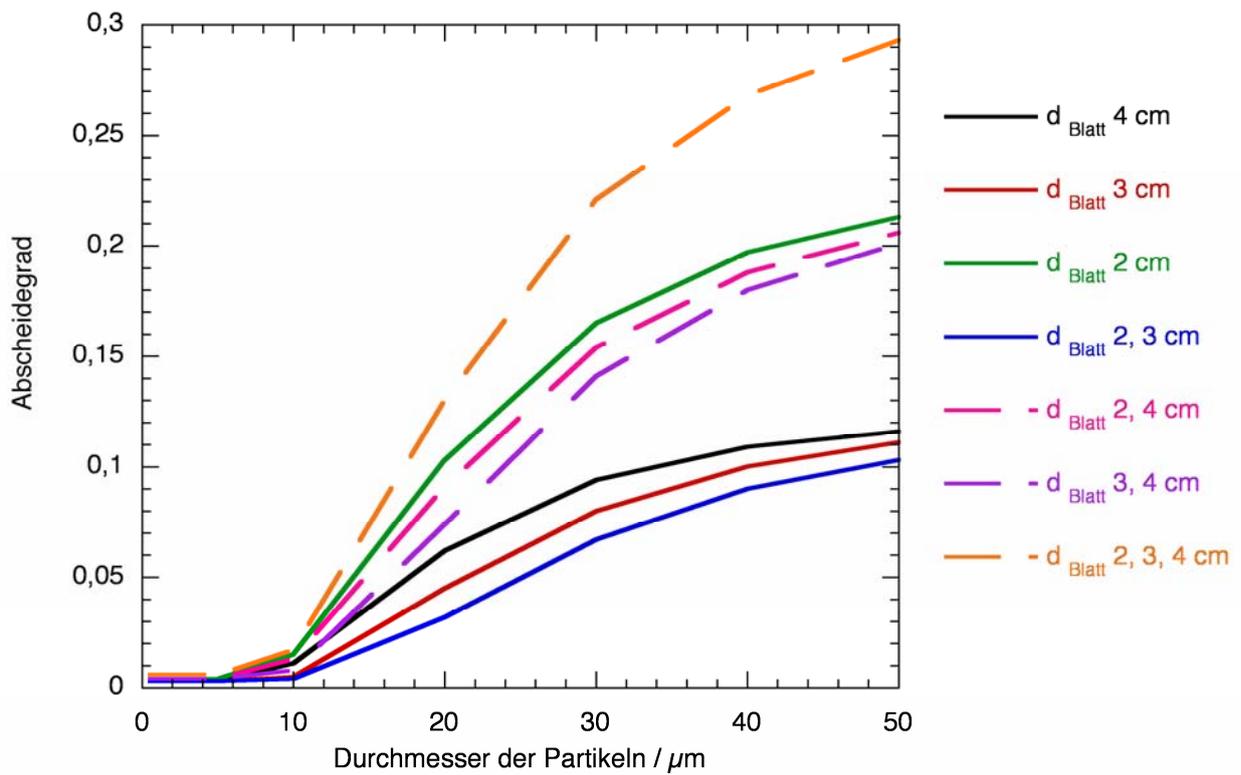


Bild 193: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen, $v = 5 \text{ ms}^{-1}$

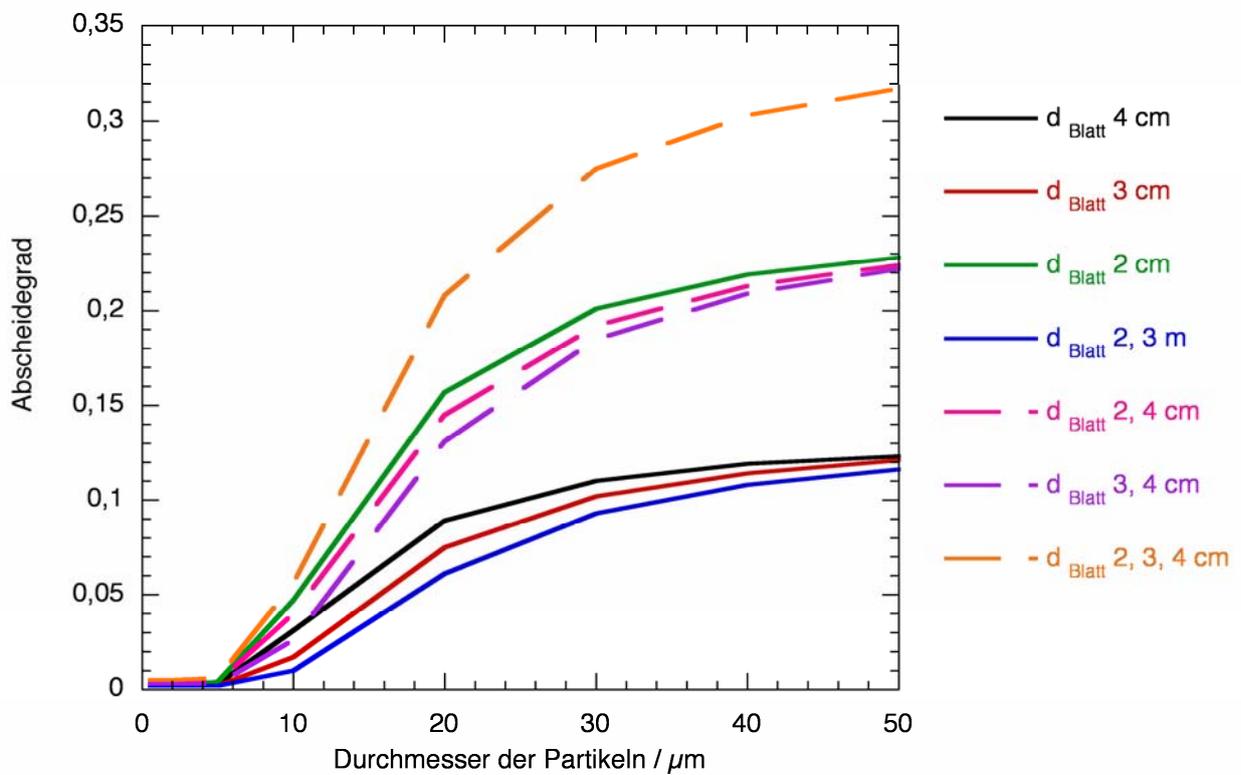


Bild 194: Simulierte Abscheidegrade an Blattkombinationen, $v = 10 \text{ ms}^{-1}$

Den in den Bildern 181 bis 186 abgebildeten Diagrammen kann der Einfluss des Durchmessers der simulierten Scheiben und der jeweiligen Anströmwinkel auf die Abscheidegrade entnommen werden. Die Abscheidung für Partikeln unterschiedlicher Größe ist bei einem Durchmesser der Scheibe von 10 Millimetern am größten, unabhängig vom betrachteten Anstellwinkel der Scheibe. Allerdings zeigen die Simulationen auch, dass für Partikeln im Größenbereich von bis zu 10 μm nur eine sehr geringe Abscheidung zu erwarten ist. Diese liegt in einer Größenordnung von bis zu 10% und steigt erst mit zunehmender Partikelgröße stark an. Für Partikeln ab einer Größe von rund 50 μm ist eine vollständige Abscheidung zu erwarten. Eine Kombination aus kleinen Blättern in einem flachen Anstellwinkel scheint daher im Moment die wirksamste Kombination zur Abscheidung von Feinstaub darzustellen.

Die Bilder 187 bis 194 zeigen die Ergebnisse der später durchgeführten Simulationen mit einzelnen Scheiben und Kombinationen aus Scheiben mit unterschiedlichen Durchmessern. Wie man den Diagrammen entnehmen kann, werden die zuvor erzielten Ergebnisse in Bezug auf die Abscheidegrade der Partikeln bestätigt. Trotz der geringen Abscheidung insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine Kombination mehrerer Blätter verglichen mit einzelnen Blätter zu einer geringfügig besseren Abscheidung führt. Die Kombination aus Scheiben mit den Durchmessern zwei, drei und vier Zentimetern führte stets zu den höchsten berechneten Abscheidegraden, wie man anhand der obigen Bilder erkennen kann.

Die Ergebnisse der Berechnungen müssen jedoch in zwei Punkten eingeschränkt werden. Bislang wurde bei den Simulationen nur die Trägheit der Partikeln modelliert. Diffusive Effekte wurden noch nicht im Modell berücksichtigt. Die Berücksichtigung diffusiver Effekte kann zu abweichenden Ergebnissen führen, da die Diffusion besonders bei kleineren Partikeln zum Tragen kommt. Weiterhin gilt eine Partikel in diesem Modell bereits dann als abgeschieden, wenn sie die Oberfläche der Scheibe berührt hat. Eine weitere Betrachtung über den Verbleib der abgeschiedenen Partikeln wurde nicht angestellt. Der Verbleib der abgeschiedenen Partikeln wird jedoch in zukünftige Berechnungsmodelle mit einfließen.

5.3 Strömungskanal

Ein wesentlicher Parameter bei der Durchführung der Simulationen ist der Druckverlust, der durch den simulierten Körper in einer Strömung verursacht wird. Da es sich hierbei um einen Eingangswert der Berechnungen handelt, kann dieser nicht durch das Programm berechnet werden, sondern muss diesem vorgegeben werden.

Je genauer diese Eingaben sind, desto genauer und belastbarer werden die erhaltenen Ergebnisse. Um die Druckverluste der simulierten Scheiben oder der Kombination mehrerer Scheiben bestimmen zu können, wurde ein kleiner Strömungskanal gebaut. Dieser Strömungskanal besteht aus Kunststoffrohren mit einem Innendurchmesser von 150 mm. In die Mitte des Kanals können nun mit speziellen Einsätzen runde Scheiben aus Pappe in den Luftstrom eingebracht werden, welche die gleiche Größe wie die simulierten Scheiben aufweisen. Mit Hilfe eines Manometers ist es nun möglich, die Druckdifferenzen zu ermitteln, die von Scheiben verursacht werden. Diese Werte fließen dann in die oben beschriebenen Simulationen der Abscheidegrade ein. Bild 195 zeigt den Aufbau des Strömungskanals mit den Einsätzen. Bild 196 zeigt die Einsätze mit den Anschlüssen für die Druckmessungen, während Bild 197 eine Nahaufnahme eines Einsatzes zeigt. Die Drähte des Einsatzes dienen der Fixierung der Scheiben im Luftstrom.



Bild 195: Strömungskanal

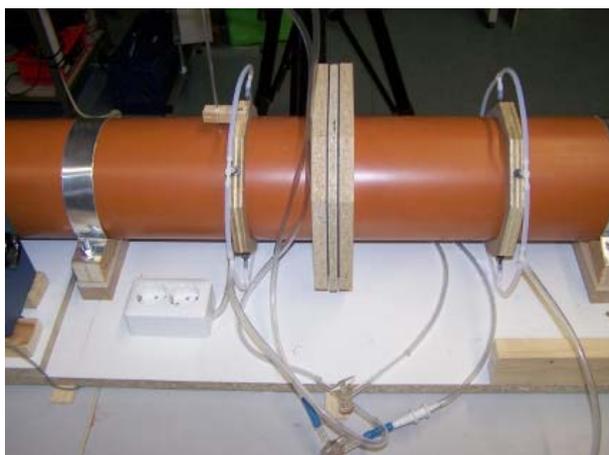


Bild 196: Druckmessung am Strömungskanal

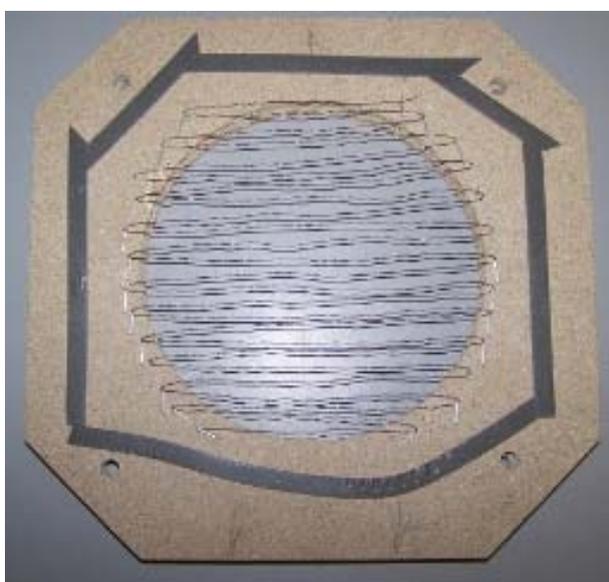


Bild 197: Einsatz

5.4 Bestimmung von Blattoberflächen

Um die Simulationen der Umströmung und Partikelabscheidung zu verbessern wurde begonnen, die Blattoberfläche der im Windkanal vermessenen Pflanzen zu bestimmen. Dazu wurde ein Drahtwürfel mit einer Kantenlänge von zehn Zentimetern und damit einem Volumen von 1000 cm^3 oder einem Liter hergestellt. Dieser Drahtwürfel wird nun dazu benutzt, die Anzahl der Blätter und die Blattoberfläche bezogen auf eine Volumeneinheit zu bestimmen.

Um diese Bestimmung durchzuführen, wird der Drahtwürfel an einer Stelle der Pflanze über die Blätter gestülpt und die Blätter abgeschnitten, die sich im Inneren des Würfels befinden. So ergibt sich sofort die Blattanzahl pro Volumeneinheit. Dieser Vorgang wird nun mehrfach wiederholt. Dieses Verfahren kommt besonders dann zum

Einsatz, wenn die Anzahl der Blätter für eine nachfolgende Messung verändert werden soll. Summiert man nach Abschluss aller Messungen die Anzahl der Blätter und der Volumina auf, so erhält man die durchschnittliche Blattanzahl für das Gesamtvolumen der Pflanze.

Um die Blattoberfläche bestimmen zu können, wurden die abgetrennten Blätter gesammelt. Da die Blätter je nach Pflanzenart sehr unterschiedliche Formen aufweisen, ist eine einfache Bestimmung durch Ausmessen nicht möglich. Es muss stattdessen auf computergestützte Verfahren zurückgegriffen werden.

Zu diesem Zweck werden die gesammelten Blätter auf einen Tisch mit einer weißen oder sehr hellen Oberfläche ausgebreitet. Die Verwendung einer hellen Oberfläche verbessert den Kontrast für die nachfolgende Bildverarbeitung. Anschließend werden die ausgebreiteten Blätter senkrecht von oben mit einer Digitalkamera fotografiert. Für eine spätere Größenbestimmung wird zusätzlich ein Maßstab zwischen die Blätter gelegt und mit fotografiert. Bild 198 zeigt diesen Maßstab.

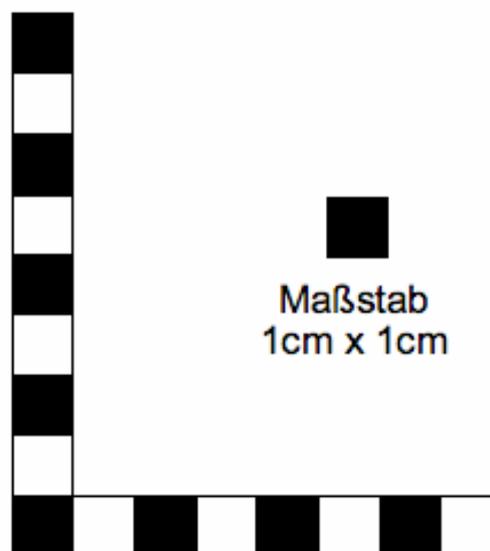


Bild 198: Maßstab

Die erhaltenen Aufnahmen werden nun auf einem Computer mit dem Bildbearbeitungsprogramm GIMP geladen und weiter verarbeitet. Mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms werden vier Arbeitsschritte erledigt. Der erste Schritt besteht aus der Bestimmung des Bildmaßstabs. Dazu wird die Größe des abfotografierten Maßstabs im digitalen Bild bestimmt. Daraus ergibt sich ein Zusammenhang zwischen den realen Abmessungen der Blätter und der korrespondierenden Anzahl der Pixel im Bild. Dieser Vorgang wird für die horizon-

tale wie vertikale Komponente des Maßstabs durchgeführt. Dadurch werden beispielsweise unterschiedliche Abstände zwischen Kameraobjektiv von den Blättern ausgeglichen. Nachfolgend werden störende Bildbestandteile, wie zum Beispiel der Maßstab, Schatten und die Tischoberfläche so weit wie möglich aus dem Bild entfernt. Dies ist entscheidend für den nächsten Arbeitsschritt, die Umwandlung in ein reines schwarz-weißes Bild. Die Farbpalette des Bildes wird nun zuerst indiziert, das heißt die Anzahl der Farben wird eingeschränkt. Im ersten Schritt wird die Palette des Bildes auf 25 Farben reduziert. So wird sichergestellt, dass gelb verfärbte Bereiche auf den Blättern durch das Programm nicht fälschlicherweise weiß eingefärbt werden. Die endgültige Reduktion auf die beiden Farben Schwarz (Blattoberfläche) und weiß (Hintergrund) erfolgt nun manuell, in dem jede einzelne der 25 Farben entweder zu schwarz oder weiß abgeändert wird. Die vorher angewandte Umwandlung in einem Schritt hat besonders bei gelb verfärbten Blättern zu zahlreichen Fehlern und einer umfangreichen Nachbearbeitung geführt. Das so umgewandelte Bild wird nun im letzten Schritt manuell aufgeteilt und jedes einzelne Blatt als separate Datei gespeichert. Um den Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte nachvollziehen zu können, zeigen die Bilder 199 bis 201 die Veränderungen, die ein Bild während der Bearbeitung durchläuft.

Die Bestimmung der Blattoberfläche erfolgt mit einem separaten Programm. Dem Programm werden der Name der entsprechenden Bilddatei sowie die ausgemessenen Größenverhältnisse als Parameter übergeben. Das Programm zählt nun die Anzahl der schwarzen Pixel im Bild. Aus der Angabe des Größenverhältnisses wird die Fläche eines einzelnen Pixels des Bildes berechnet und mit der Anzahl der schwarzen Pixel multipliziert. Am Ende der Berechnung steht als Ergebnis die Projektionsfläche des Blattes. Multipliziert man diesen Wert mit dem Faktor zwei, so ergibt sich eine Annäherung an die Blattoberfläche. Mehr als eine Annäherung an die tatsächliche Blattoberfläche kann auf diesem Wege nicht erzielt werden,

da eine mögliche Wölbung des Blattes ebenso unbeachtet bleibt, wie die Einflüsse von Blattstrukturen wie zum Beispiel Nervenbahnen oder Vertiefungen.

Die Bestimmung der Blattoberfläche der Fichten konnte hingegen nicht auf diese Weise durchgeführt werden, da die Nadeln für eine Digitalisierung zu klein sind. Darüber hinaus ist der Aufwand für die Anwendung des Verfahrens bei der großen Anzahl an Nadeln unverhältnismäßig hoch. Stattdessen wurde ein anderes Verfahren angewandt, das im Folgenden beschrieben wird.

Aus der Literatur ist ein Wert bekannt, der die Oberfläche von Fichtennadeln mit ihrer Trockenmasse korreliert (SCHMIDT-VOGT, 1977). Es wurde eine zunächst unbestimmte Menge an Nadeln der hier untersuchten Fichten entnommen und an der Luft getrocknet. Anschließend wurde dieser Gesamtheit eine Stichprobe von zehn Nadeln entnommen und mit einer Feinwaage vom Typ AG285 der Firma Mettler Toledo drei Mal gewogen. Dieses Vorgehen wurde zwei Mal wiederholt. Nach den drei Messungen wurde die durchschnittliche Masse einer Nadel zu $2,32 \cdot 10^{-6}$ kg bestimmt. Zusammen mit den Angaben aus der Literatur wurde als mittlere Oberfläche einer Fichtennadel $0,2784 \text{ cm}^2$ berechnet.

Im nächsten Schritt wurde die Anzahl der Nadeln bezogen auf die Länge eines Zweiges bestimmt. Hierzu wurden jeder der Fichten drei Zweige an unterschiedlichen Stellen entnommen, die Länge bestimmt und die Nadeln gezählt. Auf diese Weise konnte die mittlere Anzahl der Nadeln pro Zentimeter Zweiglänge ermittelt werden.

Abschließend wurden die Längen sämtlicher Äste und Zweige der Fichten bestimmt, die im Laufe der Untersuchungen entnommen wurden. Nach Abschluss aller Messungen konnten die Längen aufsummiert und jeder Messung die Anzahl und Oberflächen der Fichtennadeln zugeordnet werden. Die für den Kirschlorbeer und die Fichten ermittelten Blattanzahlen und Blattoberflächen werden in den Tabellen 43 und 44 wiedergegeben.



Bild 199: Unveränderte Aufnahme von Blättern des Kirschlorbeer



Bild 200: Aufnahme nach Reduktion der Farben



Bild 201: Aufnahme nach der Umwandlung in einer schwarz-weiße Palette

Messreihe	Abmessungen	Anzahl Blätter	Blätter/Volumen / m ⁻³	Oberfläche / cm ²	Oberfläche/Volumen / cm ² m ⁻³
Breite 1	H: 77 cm B: 50 cm T: 50 cm	518	2690,91	12609,12	65501,92
Breite 2	H: 77 cm B: 70 cm T: 50 cm	829	3076,06	21219,88	78737,96
Breite 3	H: 77 cm B: 100 cm T: 50 cm	1149	2984,42	28955,24	75208,42
Höhe 1	H: 40 cm B: 100 cm T: 60 cm	563	2345,83	26300,14	109583,91
Höhe 2	H: 75 cm B: 100 cm T: 60 cm	922	2048,88	52575,2	116833,77
Höhe 3	H: 110 cm B: 100 cm T: 60 cm	1131	1713,63	70143,33	106277,77
Porosität 1	H: 77 cm B: 100 cm T: 50 cm	920	2389,61	17644,62	45830,18
Porosität 2		1091	2833,76	23413,26	60813,66
Porosität 3		1237	3212,99	30812,56	80032,62

Tab. 43: Eigenschaften des Kirschlorbeers während der Messreihen im Windkanal

Messreihe	Abmessungen	Anzahl Nadeln	Nadeln/Volumen / m ⁻³	Oberfläche / cm ²	Oberfläche/Volumen / cm ² m ⁻³
Breite 1	H: 108 cm B: 72 cm T: 66 cm	155545	303079	43304	84378
Breite 2	H: 108 cm B: 40 cm T: 66 cm	203737	714566	56720	198934
Breite 3	H: 108 cm B: 100 cm T: 50 cm	231730	429130	64514	119470
Höhe 1	H: 40 cm B: 100 cm T: 72 cm	230556	800542	64187	222872
Höhe 2	H: 70 cm B: 100 cm T: 72 cm	350805	696042	97664	193778
Höhe 3	H: 108 cm B: 100 cm T: 72 cm	359282	462040	100024	128632
Porosität 1	H: 77 cm B: 100 cm T: 50 cm	141061	366391	39271	102003
Porosität 2		189107	491186	52647	136746
Porosität 3		228015	592247	63479	164882

Tab. 44: Eigenschaften der Fichten während der Messreihen im Windkanal

5.5 Simulation von Hecken

Nachdem die Abscheidung von Partikeln an einzelnen, vereinfachten Blättern simuliert wurde, sollte die Abscheidung von Partikeln an vereinfachten Heckenstrukturen simuliert werden.

Um den Aufwand bei der Erstellung der Simulationen gering zu halten und Schritt für Schritt Erfahrungen zu sammeln, wurde eine Reihe von Vereinfachungen vorgenommen. Die Geometrie der simulierten Hecke war stets quaderförmig mit einem Querschnitt von 80 x 100 Zentimetern und einer Tiefe von 60 Zentimetern. Zur weiteren Verfeinerung wurde der Quader in drei Scheiben mit einer Tiefe von jeweils 20 Zentimetern unterteilt. Diese Scheiben wurden dann in ein Raster von 5 x 5 Zellen aufgeteilt, wie in Bild 202 zu sehen ist. In diesem Raster sind jedoch nur die unteren vier Reihen mit Blättern gefüllt, die obere Reihe wird frei durchströmt.

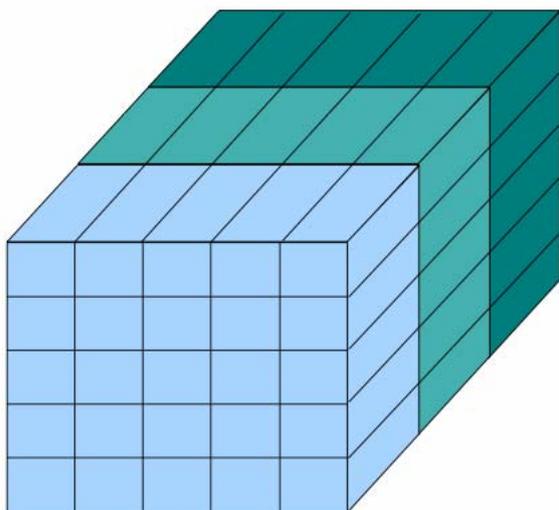


Bild 202: Aufteilung der simulierten Hecke

Auf die Festlegung der äußeren Parameter der simulierten Hecke folgte die Spezifizierung der Eigenschaften der Blätter. Wie in den vorangegangenen Simulationen auch wurden die Blätter in Form von runden Scheiben modelliert. Aufgrund der Erfahrungen wurde ein Durchmesser der Scheiben zwischen 5 und 5,5 Zentimetern gewählt und in das Modell eingefügt. Vor Durchführung der Simulation mussten in einem weiteren Schritt die Strömungswiderstände der vereinfachten Blätter berechnet werden. Hierfür wurde von einer homogenen Blattdichte ausgegangen. Die Werte für die Blattdichte wurden den Windkanal-Messreihen entnommen, die mit Kirschlorbeer durchgeführt wurden. Als Strömungswiderstand für eine Menge von 1000 Blättern wurde für die nachfolgenden Berechnungen ein c_w -Wert von 0,8 eingesetzt.

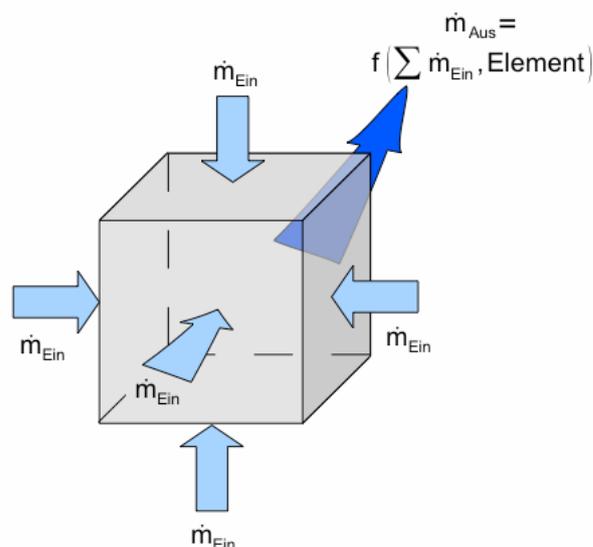


Bild 203: Bilanzierung der Stoffströme

Die mit diesen Vorgaben durchgeführten Simulationen sollten Abscheidegrade für die Fraktionen PM10, PM2,5 und PM1 ergeben, die mit den Ergebnissen der Messungen im Windkanal verglichen werden sollten. Vereinfacht wurden die Fraktionen durch Partikeln der Größen 1 μm , 2,5 μm und 10 μm dargestellt. Simuliert wurden gleichförmige Anströmungen der simulierten Hecke mit Strömungsgeschwindigkeiten von 1 ms^{-1} , 2 ms^{-1} und 3 ms^{-1} .

Bei den ersten Berechnungen mit diesem Modell ergaben sich teilweise negative Abscheideraten, also Zunahmen der Partikelkonzentration hinter der Hecke. Daher wurde der verwendete Algorithmus einer Prüfung unterzogen, um eine mögliche Ursache hierfür zu finden. Im Laufe der Prüfung stellte sich heraus, dass in erster Linie die Näherungen und Vereinfachungen aufgrund des groben Modells zu den fragwürdigen Ergebnissen geführt haben. Wie in Bild 202 zu sehen ist, wird das Modell in einzelne Elemente aufgeteilt, die in drei Ebenen hintereinander angeordnet sind. Für die Berechnung der Abscheidung werden nun Stoffströme simuliert, die in die einzelnen Elemente ein- und wieder austreten, was schematisch in Bild 203 dargestellt ist. Innerhalb der einzelnen Elemente werden die Stoffströme durch Abscheidungen verändert. Es wird für jedes Element eine Bilanz der Stoffströme aufgestellt, welche in Form eines neuen Stoffstroms wiederum als Eingangswert für das nächste Element in der nachfolgenden Ebene des Modells dient. Aufgrund der groben Aufteilung des Modells müssen die Stoffströme angenähert und gemittelt werden. Dadurch wird ein Fehler in die Berechnungen eingebracht. Werden nun die einzelnen Stoffströme eines Elementes bilanziert, so ergibt sich aus den Einzelfehlern ein Gesamtfehler

in der Bilanz. Diese fehlerbehaftete Bilanz dient nun aber als ein Eingangswert für die Berechnungen in der nachfolgenden Ebene des Modells, der Fehler pflanzt sich also innerhalb des Modells fort. Durch diese Fortpflanzung der Fehler innerhalb der Bilanzen ergibt am Ende auch ein fehlerbehafteter Endwert für die Abscheidegrade. Es handelt sich hierbei zwar nur um einen sehr geringen Fehler, tritt aber bei den geringen Abscheidegraden kleinerer Partikeln besonders hervor. Bei den höheren Abscheideraten der größeren Partikeln über $10\ \mu\text{m}$ ist dieser Fehler zwar auch enthalten, fällt aber aufgrund der größeren Werte nicht auf.

Da es sich um einen systemimmanenten Fehler handelt, musste ein neuer Ansatz für die Berechnung der Abscheidegrade des Gesamtsystems gefunden werden. Betrachtet werden jetzt alle Stoffströme, die in das Modell eintreten und die Abscheidungen, die in jedem einzelnen Element auftreten. Die eintretenden Stoffströme werden zu einem Gesamtstoffstrom aufsummiert, der alle Partikeln darstellt, die in das Modell der Hecke

eintreten. Gleichzeitig werden mit den Abscheideraten der einzelnen Elemente die Massen berechnet, die in jedem einzelnen Element abgeschieden werden. Diese einzelnen Massen werden ebenfalls aufsummiert und liefern die Masse, die im Modell abgeschieden wird und nicht wieder austritt. Der Gesamtabscheidegrad der simulierten Hecke ergibt sich nun aus dem Verhältnis der abgeschiedenen Masse zur Summe der Masse, die über die Stoffströme in das Modell eintritt.

Allerdings zeigten auch die neuen Berechnungen unterhalb einer Partikelgröße von $10\ \mu\text{m}$ praktisch keinerlei Abscheidung durch die simulierte Hecke. Daraufhin wurden zusätzliche Berechnungen mit Partikeln der Größen 10 , 20 und $50\ \mu\text{m}$ durchgeführt. Die für diese Partikelgrößen ermittelten Abscheideraten können den Tabellen 45 bis 47 für die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit entnommen werden. Die dort aufgeführten Abscheideraten stellen einen Gesamtabscheidegrad für das gesamte Heckenmodell dar.

		Abscheideraten		
Blattdichte / m^{-3}	Blattgröße / cm	d = $10\ \mu\text{m}$	d = $20\ \mu\text{m}$	d = $50\ \mu\text{m}$
1500	5	0	0	0,016
1750	5	0	0	0,019
2000	5,5	0	0	0,02

Tab. 45: Simulierte Abscheideraten bei einer Anströmgeschwindigkeit von $1\ \text{ms}^{-1}$

		Abscheideraten		
Blattdichte / m^{-3}	Blattgröße / cm	d = $10\ \mu\text{m}$	d = $20\ \mu\text{m}$	d = $50\ \mu\text{m}$
1500	5	0	0,001	0,163
1750	5	0	0,001	0,184
2000	5,5	0	0,001	0,214

Tab. 46: Simulierte Abscheideraten bei einer Anströmgeschwindigkeit von $2\ \text{ms}^{-1}$

		Abscheideraten		
Blattdichte / m^{-3}	Blattgröße / cm	d = $10\ \mu\text{m}$	d = $20\ \mu\text{m}$	d = $50\ \mu\text{m}$
1500	5	0	0,012	0,294
1750	5	0	0,014	0,326
2000	5,5	0	0,013	0,378

Tab. 47: Simulierte Abscheideraten bei einer Anströmgeschwindigkeit von $3\ \text{ms}^{-1}$

Bei einer Partikelgröße von $10\ \mu\text{m}$ tritt unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit eine kaum feststellbare Abscheidung auf. Selbst bei einer Partikelgröße von $20\ \mu\text{m}$ tritt eine Abscheidung

von über einem Prozent erst bei Anströmgeschwindigkeiten von $3\ \text{ms}^{-1}$ auf, unabhängig von Blattdichte und -größe der Hecke. Bei einer Partikelgröße von $50\ \mu\text{m}$ dagegen tritt eine

Abscheidung von über einem Prozent bereits bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1 m/s auf und steigt kontinuierlich mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit. Die Abscheideraten nehmen auch mit steigender Blattdichte zu, so dass die größte Abscheiderate von rund 37 Prozent bei einer Blattdichte von 2000 Blättern/m³ und einer Anströmgeschwindigkeit von 3 ms⁻¹ erreicht wird. Diese Ergebnisse werden durch die Simulationen einzelner Blätter und Blattkombinationen gestützt, bei denen sich erst bei Partikelgrößen von über 10 µm eine deutliche Abscheidung zeigte, wie man anhand der Bilder 181 bis 194 erkennen kann.

Eine Bestätigung der berechneten Abscheideraten mit den Ergebnissen der Messreihen im Windkanal konnte bislang nicht durchgeführt werden, da die Werte der Feinstaubmessungen aus den bereits ausgeführten Gründen nicht verwendet werden können.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Die im Laufe des Projekts erzielten Ergebnisse zeigen unterschiedliche Tendenzen auf. Durch die Untersuchungen in der Bestäubungskammer konnte gezeigt werden, dass Pflanzen prinzipiell in der Lage sind, Partikeln an den Blattoberflächen zumindest temporär zu binden. Auch konnte in diesem Zusammenhang gezeigt werden, dass die Partikeln durch Regen wieder von den Blattoberflächen abgewaschen werden können. Das Vermögen, Partikeln zu binden und durch Regen wieder frei zu setzen, ist dabei von der Pflanzenart und damit von der Beschaffenheit der Blattoberflächen abhängig. Generell scheint die Abscheidung mit der Gesamtblattoberfläche zuzunehmen. Jedoch erfolgten die Untersuchungen bei sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und mit hohen Staubkonzentrationen, die für das Verständnis der zu Grunde liegende Transport- und Abscheidemechanismen erforderlich waren. Allerdings schränkten diese Versuchsbedingungen eine Übertragung der Versuchsergebnisse in die Praxis stark ein.

Die Versuche im Windkanal zeigten eine massive Beeinflussung des Strömungsfeldes sowohl durch die Pflanzen wie auch durch die abiotischen Materialien. Dabei spielten sowohl die Strömungsgeschwindigkeit wie auch die geometrischen Parameter der Versuchsobjekte eine Rolle. Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten sind die Eigenschaften der Versuchsobjekte nur von geringer Bedeutung, da den Luftmassen genügend Zeit blieb, an den Hindernissen vorbei zu strömen. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten kommt es aber in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Versuchsobjektes zur Ausbildung eines Windschattens und einer verstärkten Umströmung in den Randbereichen. Es konnte auch festgestellt werden, dass mit zunehmender Verblockung des Kanalquerschnitts die absolute Geschwindigkeitsdifferenz im Windschatten genau so zunahm, wie die Strömungsgeschwindigkeit in den Randbereichen des Versuchsobjektes. Diese Beobachtungen stimmen auch mit den Ergebnissen anderer Versuche überein, die in der Literatur beschrieben werden (HUCHO, 2002).

Bei den Untersuchungen zur Staubabscheidung an den Versuchsobjekten im Windkanal konnte kein eindeutiges Ergebnis erzielt werden. Es wurden durch die Objekte sowohl Erhöhungen wie auch Erniedrigungen der Staubkonzentrationen hervorgerufen. Für diese Beobachtungen sind in erster Linie Strömungsphänomene wie Wirbelablösungen und Turbulenzen im Windschatten der Objekte verantwortlich. Diese führten zu einer lokalen Konzentrationsüberhöhung hinter den Objekten, die dann zu überhöhten Messwerten führten. Damit ist

keine abschließende Aussage über die Abscheidung von Feinstaub an den Versuchsobjekten möglich. Bei zukünftigen Untersuchungen muss die Staubmessung hinter den Versuchsobjekten aus dem direkten Windschatten heraus verlegt werden. Damit kann dann ausgeschlossen werden, dass eine lokale Konzentrationsüberhöhung zu verfälschten Messwerten führt.

Es konnte durch die pflanzenphysiologischen Untersuchungen festgestellt werden, dass Pflanzen an Verkehrsstandorten vermehrt Stressfaktoren ausgesetzt sind als Pflanzen, die nicht an Straßen wachsen. Allerdings können die Untersuchungen keinen Aufschluss darüber geben, ob der Feinstaub die alleinige Ursache für den Stress der Pflanzen ist oder ob andere Luftschadstoffe oder ungünstige Wachstumsbedingungen einen Beitrag geleistet haben. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Aktivität des Enzyms Malatdehydrogenase als Parameter für Stressreaktionen künftig nicht mehr genutzt werden sollte. Die festgestellten Unterschiede zwischen Proben- und Kontrollpflanzen waren für eine belastbare Aussage zu gering.

Die Feldmessungen an den Autobahnen A1 und A46 im Raum Wuppertal führten zu keinen eindeutigen Resultaten. Dies ist in erster Linie auf ungünstige meteorologische Bedingungen zurückzuführen, so dass ein direkter Transport der Partikeln von der Fahrbahn zur Hecke nicht zu Stande kam. Es herrschte vielmehr eine Strömung parallel zur Fahrbahn vor, so dass nicht bestimmt werden konnte, welcher Anteil der detektierten Partikeln vom Verkehr oder aus anderen Quellen stammte. Zusätzlich war hinter der Hecke an der A46 eine teilweise deutliche überhöhte Konzentration im Vergleich zur Fahrbahn festzustellen. Neben den meteorologischen Bedingungen können hier Wirbelschleppen der Fahrzeuge als mögliche Ursachen angeführt werden, die zu einer Verdünnung und Durchmischung der Luftmassen und somit zu einer zu gering gemessenen Konzentration geführt haben. Im Vergleich dazu fehlte dieser Einfluss hinter der Hecke, was zu überhöhten Konzentrationen führte. Da es sich hierbei um unvermeidliche Einflüsse an Autobahnen handelt, sollten diese in künftigen Projekten mittels geeigneter Messtechnik genauer aufgeklärt und in die Bewertung eingebracht werden. Auffällig war auch die Ausbildung von Konzentrationsprofilen hinter der Hecke, die zumindest für die Fraktionen PM1 und PM2,5 in einem weiten Bereich zu stabilen Konzentrationen führte. Dem gegenüber war die Konzentration an PM10 stets Schwankungen unterworfen. Auch hier sollte in zukünftigen Projekten eine verstärkte Erfassung der Strömungsparameter erfolgen.

Der hier durchgeführte Versuch dies mittels FTIR und eines Tracergases umzusetzen war nur in Teilen erfolgreich. Allerdings zeigte sich bereits, dass diese Kombination eine Möglichkeit zur Visualisierung der Strömung entlang von Autobahnen und Hecken sein kann. Mit der Weiterentwicklung der FTIR-Systeme ist bei zukünftigen Messungen mit besseren Resultaten zu rechnen.

Die durchgeführten Simulationen haben eine Daten- und Erfahrungsgrundlage für zukünftige Untersuchungen geschaffen. Bislang konnte durch die Simulationen gezeigt werden, dass einzelne Blätter wie auch Kombinationen von Blättern Partikeln abscheiden können. Allerdings zeigen die Simulationen im interessanten Größenbereich bis 10 μm nur eine geringe Abscheideleistung. Erst bei Partikeln oberhalb von 10 μm tritt eine deutliche Zunahme der Abscheiderate zu Tage.

Die durchgeführten Simulationen an vereinfachten Heckenmodellen bestätigen eine mögliche Abscheidung von Partikeln unterschiedlicher Größe, bestätigen aber auch, dass eine signifikante Abscheidung erst bei Partikelgrößen von mehr als 10 μm zu erwarten ist. Die hier erzielten Ergebnisse stimmen in diesem Punkt auch mit bereits durchgeführten Berechnungen aus anderen Forschungsprojekten überein. In diesen ist für Partikeln unter 4 μm nur eine sehr geringe Abscheidung im unteren Prozentbereich vorhergesagt worden (TIWARY, 2005). Im umgekehrten Fall wurde auch eine relevante Abscheidung erst für Partikeln mit einer Größe von mehr als 10 μm erwartet (TIWARY, 2005), was ebenfalls mit den hier gewonnenen Ergebnissen der Simulationen übereinstimmt.

Die Versuche in der Staubkammer und die durchgeführten Simulationen zeigen deutlich, dass Feinstaub auf pflanzlichen Oberflächen abgeschieden werden kann. Allerdings wird auch gezeigt, dass die Abscheidung sehr stark von Partikelgröße und Pflanzenart abhängt. Für kleinere Partikeln ist generell eine geringere Abscheidung zu erwarten als für größere, wobei einige Pflanzenarten in den Versuchen im geringen Größenbereich eine bessere Abscheidung gezeigt haben. Sollte dies der Fall sein, so bietet sich eine Kombination verschiedener Pflanzenarten an, um ein möglichst breites Spektrum an Partikelgrößen abscheiden zu können. Erste Ansätze von Staubschutzpflanzungen wurden bereits vor längerer Zeit beschrieben, wenn auch für Stäube mit größeren Partikeln (FELLENBERG, 1977). Diese Arbeiten könnten aber als Grundlage für die Entwicklung angepasster Staubschutzpflanzungen dienen, wofür jedoch systematische Untersuchungen von Pflanzenarten bezüglich der Abscheidung von Partikeln erforderlich wären.

An Standorten mit einem zu geringen Platzangebot für die Anlegung von Pflanzungen könnten stattdessen abiotische Materialien zur Anwendung gelangen. Hier stehen bislang jedoch keine praktisch verwertbaren Erkenntnisse zur Verfügung, da insbesondere das Langzeitverhalten und die Umweltverträglichkeit der verwendeten Produkte mit in Betracht gezogen werden muss. Hier bieten sich beispielsweise Produkte an, die bereits im Bereich der Filtertechnik zum Einsatz kommen wie zum Beispiel Filze oder Fasermatten. Denkbar ist aber auch der Einsatz von Materialien, die aus Pflanzen gewonnen werden. Darüber hinaus ist eine Kombination mit bereits vorhandenen oder noch zu errichtenden Lärmschutzmaßnahmen denkbar.

Unabhängig von der Art der Staubschutzmaßnahme, die realisiert werden soll, müssen die meteorologischen Bedingungen am künftigen Einsatzort beachtet werden. Wie die Feldmessungen gezeigt haben, ist die Strömung an der Fahrbahn ein entscheidender Faktor. Wird der Staubschutz an der Fahrbahn falsch ausgerichtet, so verliert der Staubschutz an Wirkung, weil beispielsweise ein Großteil der Luft an ihm vorbei streicht, ohne dass die Partikel in die Nähe der Kollektoroberfläche gelangen können, um dort abgeschieden zu werden.

7 Ausblick

Das Projekt konnte einige grundlegende Fragestellungen zur Abscheidung von Partikeln auf pflanzlichen Oberflächen klären. Gleichzeitig wurden jedoch weitere Fragestellungen aufgeworfen, die in zukünftigen Projekten untersucht werden sollten. Nur dann können verlässliche und belastbare Aussagen über das Abscheidevermögen von Feinstäuben durch Pflanzen gemacht und Pflanzen gezielt zur Verbesserung der Luftqualität eingesetzt werden. Das Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz wird auch zukünftig selbstständig oder in Kooperation mit privaten oder öffentlichen Projektpartnern auf diesem Gebiet Forschungen betreiben. So sollen beispielsweise zusätzliche Messungen im Windkanal einen besseren Aufschluss über die Abscheideleistungen von Pflanzen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten liefern, während durch Feldmessungen verstärkt Daten von realen Hecken gewonnen werden sollen.

Zusätzlich bieten sich auf dem Gebiet der abiotischen Alternativen vielfältige Forschungsmöglichkeiten. Dies betrifft sowohl die hier vorgestellten Materialien in Form von Filzen, Netzen oder Matten als auch mineralische Produkte, die beispielsweise in Lärmschutzwände integriert werden können.

Im Bereich der Simulationen müssen der Grad der Komplexität erhöht und die vorgenommenen Vereinfachungen Schritt für Schritt reduziert werden, um am Ende wirklichkeitsnahe Simulationen der Abscheidung von Partikeln an Pflanzen durchführen zu können.

8 Glossar

Aerosol	Feste und/oder flüssige, in einem Gas schwebende Partikel im Partikelgrößenbereich zwischen 0,001 µm und 100 µm. (VDI)	Partikelgrößenverteilung	Verteilung eines das Partikelkollektiv beschreibenden Häufigkeitsmaßes (einer Menge) über der Merkmalsgröße Partikelgröße bzw. Partikeldurchmesser. (VDI)
DTT	Dithiothreitol, auch Clelands-Reagenz. Dient der Fixierung von Proteinen im Zellinneren bei biologischen Untersuchungen. (WIKIPEDIA)	Partikelmassenkonzentration	Gesamtmasse aller dispergierten Partikel pro Volumeneinheit des Trägergases. (VDI)
EDTA	Ethylendiamintetraacetat, Komplexbildner. Wird unter anderem zur quantitativen Bestimmung von Schwermetall-Ionen verwendet. (WIKIPEDIA)	PMX	Sammelbezeichnung für die Fraktionen PM10, PM2,5 und PM1.
ETR	Elektronentransportrate. Maß für die Beweglichkeit von Elektronen im Photosystem von Pflanzen.	Reingas	Hier die mit Partikeln beladene Luft nach Um- oder Durchströmung einer Pflanze.
GIMP	GNU Image Manipulating Programm. Freies Bildbearbeitungsprogramm.	Rohgas	Hier die mit Partikeln beladene Luft vor Um- oder Durchströmung einer Pflanze.
Lee	Dem Wind abgewandte Seite, hier Messung hinter einer Hecke oder einem Hindernis.	Tracergas	Freigesetztes Spurengas zur Untersuchung von Luftströmungen.
Luv	Dem Wind zugewandte Seite, hier Messung vor einer Hecke oder einem Hindernis.	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
NAD	Reduzierte Form von NADH.	XSane	Freies Programm für die Ansteuerung von Scannern.
NADH	Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid, Koenzym mit zahlreichen Beteiligungen an Stoffwechselfvorgängen in nahezu allen Organismen. (WIKIPEDIA)	Yield	Maß für die Ausbeute bzw. Effizienz der Photosynthese einer Pflanze.
Partikel	Festes oder flüssiges Teilchen mit definierten physikalischen Grenzen und einer Partikelgröße zwischen 0,001 µm und 100 µm. (VDI)		
Partikelanzahlkonzentration	Gesamtanzahl aller dispergierten Partikel pro Volumeneinheit des Trägergases. (VDI)		

9 Formelzeichen

A_p	Partikelprojektionsfläche, arithmetisch gemittelt.	$q_{0,\text{rein}}(x)$	Anzahlbezogene Verteilungsdichte im Reingas.
A_{Probe}	Probenfläche	$q_{0,\text{roh}}(x)$	Anzahlbezogene Verteilungsdichte im Rohgas.
B	Feinstaubflächenbelegung	Q_0	Verteilungssumme
$C_{A,\text{rein}}(x)$	Partikelkonzentration im Reingas, leere Bestaubungskammer.	$R_i(x_i)$	Partikelgrößenbezogener Reinigungsgrad
$C_{A,\text{roh}}(x)$	Partikelkonzentration im Rohgas, leere Bestaubungskammer.	S_{Blatt}	Durchschnittliche Oberfläche eines Blattes
$C_{E,\text{rein}}(x)$	Partikelkonzentration im Reingas, Bestaubungskammer mit Pflanze.	S_{Pflanze}	Gesamte Blattoberfläche einer Pflanze
$C_{E,\text{roh}}(x)$	Partikelkonzentration im Rohgas, Bestaubungskammer mit Pflanze.	$T^*_{\text{Pfl.allein}}(x)$	Fraktionsabscheidegrad einer Pflanze
C_{roh}	Partikelkonzentration im Rohgas.	$T(x)$	Fraktionsabscheidegrad
$C_{r,\text{roh}}$	Konzentration im Rohgas, von der Mengenart abhängig.	V_p	Äquivalentvolumen einzelnes Partikel
$C_{r,\text{rein}}$	Konzentration im Reingas, von der Mengenart abhängig.	$\Delta v_{\text{Absolut}}$	Absolute Geschwindigkeitsdifferenz
f_0	Anzahlbezogener Gesamtdurchlassgrad.	$\Delta v/v_0$	Relative Geschwindigkeitsdifferenz
f_r	Gesamtdurchlassgrad	$\bar{v}_{\text{Anstr.}}$	Mittelwert der einzelnen Anströmgeschwindigkeiten
F_0'	Grundfluoreszenz	$\bar{v}_{\text{Abstr.}}$	Mittelwert der einzelnen Abströmgeschwindigkeiten
F_m'	Maximale Fluoreszenz	$v_{\text{Abstr.,Lokal}}$	Lokale Abströmgeschwindigkeit
$g_{0,\text{ges}}$	Anzahlbezogener Gesamtab-scheidegrad von Bestaubungskammer und Pflanze.	$v^*_{\text{Abstr.,Lokal}}$	Lokale Abströmgeschwindigkeit, normiert
$g_{0,\text{Anl}}$	Anzahlbezogener Gesamtab-scheidegrad der Bestaubungskammer.	x_i	Partikelgröße
$g_{0,\text{Pfl.allein}}$	Anzahlbezogener Gesamtab-scheidegrad der Pflanze.	x_p	Äquivalentpartikeldurchmesser
g_r	Gesamtab-scheidegrad		
k	Korrekturfaktor		
m_{rest}	Partikelrestmasse		
m	Mittlere Aufnahmekapazität		
m_n	Normierte Restmasse		
N_p	An der Probenfläche abge-schiedene Partikelanzahl		
N_{ivorher}	An der Probenfläche abge-schiedene Partikelanzahl, der Partikelgröße x_i .		
N_{inachher}	Restanzahl der Partikeln der Größe x_i an der Probenfläche nach der Abwaschung.		

Literatur

- GEHRING, 2003 Gehring, R., Weingartner E., Buchmann, B., Baltensperger, U., Verifikation von PM10-Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf **2003**
- AEBI, 1974 Aebi, H.; In: Bergmeyer HU, ed. Methods of enzymatic analysis, Vol. 1; Verlag Chemie-Academic Press; New York; 636 – 647; **1974**
- ARNON, 1949 Arnon, D.J., Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*, *Plant Physiology*. 24: 1 – 15, **1949**
- BAST, 2005 Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), PM₁₀-Emissionen an Außerortsstraßen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft V 125, Bergisch Gladbach **2005**
- BAST, 2006 Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), PMX-Belastungen an BAB, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft V 137, Bergisch Gladbach **2006**
- BAST, 2007 Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Manuelle Straßenverkehrszählung 2005, Bergisch Gladbach, **2007**
- BECKETT, 2000a Beckett, K. P., Freer-Smith P.H., et al., The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Journal of Arboriculture*, 24(2-3): 209-230, **2000**
- BECKETT, 2000b Beckett, K.P., Freer-Smith, P.H. and Taylor, G.; Effective tree species for local air quality management. *Journal of Arboriculture*, 26: 13-19, **2000**
- BERNATZKY, 1949 Bernatzky A. (1978), *Tree Ecology and Preservation*. Elsevier Scientific Publ., Amsterdam **1949**
- BGIA, 2008 BGIA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (Hrsg.), *Gefahrstoffinformationssystem der gewerblichen Berufsgenossenschaften*, Sankt Augustin **2008**
- BRADFORD, 1976 Bradford, M.M., A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. In: *Anal. Biochem.* Bd. 72, S. 248 – 254., **1976** PMID 942051 doi: 10.1016/0003-2697(76)90527-3
- BRUKER Bruker Daltonics (Hrsg.), *Passive Infrared Remote Detection of CWA – RAPID*
- DE KOK, 1989 De Kok et al.; Effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 99(3): 347-360 *New Phytology* 112: 533-542, **1989**
- DST, 2006 Deutscher Städtetag (Hrsg.), *Positionspapier des Deutschen Städtetages zur Thematik Feinstaub*, Köln **2006**
- ENDLICHER, 2007 Endlicher, W., Gorbachevskaya O., Kappis, C., Langner, M. (Hrsg.), *Ta-gungsband zum Workshop über den wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotenzial (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen am 1. Juni 2007 in Berlin/Adlershof*, Geographisches Institut der Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin **2007**
- FELLENBERG, 1977 Fellenberg, G., *Umweltforschung – Einführung in die Probleme der Umweltverschmutzung*; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York **1977**

- FELLENBERG, 1999 Fellenberg, G., Umweltbelastungen – Eine Einführung; B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig **1999**
- FGSV, 1993 Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Landschaftspflege, Abschnitt 2: Landschaftspflegerische Ausführung RAS-LP 2, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln **1993**
- GROMKE, 2007 Gromke, C., Ruck, B., Strömungsfelder in Strassenschluchten mit und ohne Baumpflanzungen – Vergleich zwischen LDA-Messungen und CFD-Simulationen, Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, Rostock **2007**
- HUCHO, 2002 Hucho, W.-H., Aerodynamik der stumpfen Körper – Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis, Vieweg, Wiesbaden, **2002**
- IME, 2004 Fraunhofer Institut Molekularbiologie und angewandte Oekologie, Verbleib von Platingruppenelementen in der Umwelt, Literaturstudie und Ergebnisse von ersten Untersuchungen im Rahmen der Umweltprobenbank des Bundes, Schmallenberg **2004**
- INFRAS, 2006 INFRAS, www.hbefa.net, Handbook Emission Factors for Road Transport, Bern **2007**
- JAZBEC, 2009 Jazbec, R., Klippel, N.; Pflanzen filtern Feinstaub und Stickoxide. Umwelt Perspektiven, S. 5, **2009**
- KAPPIS, 2007 Kappis, C., et al., Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen, Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin **2007**
- LANGNER, 2002 Langner, M., Analysen zur Staubaufgabe auf Bäumen (Acer platanoides) innerstädtischer Standorte, Karlsruher Berichte zur Geographie und Geoökologie Heft 15, Karlsruhe **2002**
- LANGNER, 2006 Langner, M., Exponierter innerstädtischer Spitzahorn (Acer platanoides) – eine effiziente Senke für PM10?, Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie Band 21, Karlsruhe **2006**
- LARCHER, 2001 Larcher, W., Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Aufl. Verlag Eugen, Ulmer. Stuttgart, 408, **2001**
- MÖLLERING, 1974 Möllering, H., L-malate. Bestimmung mit Mataldehydhydrogenase und Glutamat-Oxalacetat-Transaminase. In: Bergmeyer HW, ed. Methoden der enzymatischen Analyse, Vol. 25. 1636 – 1639, Verlag Chemie, Weinheim **1974**
- PALAS, 1997 Partikelzähler und -größenanalysator PCS-2000. Bedienungsanleitung, Palas GmbH (Hrsg.), Karlsruhe **1997**
- PUCHELT, 1995 Puchelt, H., Eckhardt J.-D., Schäfer J., Einträge von Platingruppenelementen aus Kfz-Abgaskatalysatoren in straßennahe Böden, Sachstandsbericht anhand ausgewählter Standorte, Karlsruhe **1995**
- REZNIK, 2008 Reznik, G., Schmidt, E., Abscheidung von Feinstaub an Pflanzen bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Chem.-Ing.-Tech., 12, **2008**
- SCHMIDT, 2001 Schmidt, E., Kurzgefasste Grundlagen der Partikelcharakterisierung und der Partikelabscheidung, Shaker Verlag, Aachen, **2001**
- SCHMIDT-VOGT, 2007 Schmidt-Vogt, H., et al.; Die Fichte – Ein Handbuch in zwei Bänden. Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey, **1977**
- SCHWISTER, 2005 Schwister, K. u.a., Taschenbuch der Chemie; Fachbuchverlag Leipzig im

- Carl Hanser Verlag, München, Wien **2005**
- SCINEXX, 2007 Pressemitteilung Scinexx; Moose als Feinstaub-Killer Pflanzen sollen Luftverschmutzung in Städten und an Autobahnen reduzieren, idw - Universität Bonn, 03.08.2007 – DLO), **2007**
- SLINN, 1982 Slinn, W. G. N., Predictions for particle deposition to vegetative surfaces. Atmos. Environ., 16:1785–1794, **1982**
- SURES, 2005 Sures B., Zimmermann S., Untersuchungen zur Toxizität der Platingruppenelemente Pt, Pd, Rh, Abschlussbericht, Karlsruhe **2005**
- THÖNNESEN, 1996 Thönnessen, M., Werner, W.; Die fassadenbegründende Dreispitzige Jungfernebe als Akkumulationsindikator. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 56(8): 351-357, **1996**
- THÖNNESEN, 2002 Thönnessen, M.; Elementdynamik in fassadenbegründendem Wilden Wein (*Parthenocissustricuspidata*). Nährelemente, Anorganische Schadstoffe, Platin-Gruppen-Elemente, Filterleistung, Immissions-historische Aspekte, Methodische Neu- und Weiterentwicklungen. Universität zu Köln, Geographisches Institut. Kölner Geographische Arbeiten, Heft 78, **2002**
- THÖNNESEN, 2005 Thönnessen, M., Feinstaub und innerstädtisches Grün – Bemerkungen zu den Filtereigenschaften von Fassadenbegründung, Universität zu Köln, Geografisches Institut, Forschungsgruppe Fassadenbegründung, Köln **2005**
- THÖNNESEN, 2005b Thönnessen M., Hellack, B.; Staubfilterung durch Gehölzblätter. Anreicherung und Vermeidung von Stäuben bei Wildem Wein und Platane. Stadt und Grün / Das Gartennam Jg.: 54, Nr.12, 10-15, **2005**
- TIWARY, 2005 Tiwary A., Morvan H.P., Colls, J., Aerosol Science **2005**, 37, 990 – 1015
- TMLNU, 2006 Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Pressemitteilung 72/05, Als Biofilter bei Feinstaub: Mehr Bäume pflanzen!, Erfurt **2006**
- VDI, 2006 VDI 3876 Blatt 1: 2006-02 Messen von Partikeln in der Außenluft, Charakterisierung von Prüfaerosolen, Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung, Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag, **2006**
- WIKIPEDIA Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. (Hrsg.), <http://de.wikipedia.org>
- WOOD, 2001 Wood R., Orwell R., Tarran J.; Pot-plants really do clean indoor air. The Nursery Papers — Issue n° 2001/2,1, **2001**

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2007

- V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge
Hübelt, Schmid € 17,50
- V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50
- V 135: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00
- V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00
- V 137: PM_x-Belastungen an BAB
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO_x)- und Ozon (O₃)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50
- V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00
- V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 15,50
- V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003
Lensing € 15,00
- V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen
Fischer, Brannolte € 17,50
- V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50
- V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50
- V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland
Baier, Klemps, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50
- V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie –
Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger € 16,50
- V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung
Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig € 18,50
- V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst
Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin € 18,00

- V 151: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO
Böhl, Mause, Kloppe, Brückner € 16,50
- V 152: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer
Gerlach, Oderwald € 15,50
- V 153: Standstreifenfreigabe – Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen
Lemke € 13,50
- V 154: Autobahnverzeichnis 2006
Kühnen € 22,00
- V 155: Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie in Deutsches Recht
Bartolomaeus € 12,50
- V 156: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen
Badelt, Seliger, Moritz, Scheurl, Häusler € 13,00
- V 157: Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317
Klöckner, Fleisch, Balzer-Hebborn, Ellmers, Friedrich, Kübler, Lukas € 14,50
- V 158: Zustandserfassung von Alleebäumen nach Straßenbaumaßnahmen
Wirtz € 13,50
- V 159: Luftschadstoffe an BAB 2006
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 160: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 25,50
- V 161: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen – Infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe
Listl, Otto, Zackor € 14,50
- V 162: Ausstattung von Anschlussstellen mit dynamischen Wegweisern mit integrierter Stauinformation – dWiSta
Grahl, Sander € 14,50
- V 163: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrsabhängigen Steuerungen
Brilon, Wietholt, Wu € 17,50
- V 164: Straßenverkehrszählung 2005 – Ergebnisse
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,00

2008

- V 165: Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM₁₀-Emissionen von Straßen
Quass, John, Beyer, Lindermann, Kuhlbusch, Hirner, Sulkowski, Sulkowski, Hippler € 14,50
- V 166: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 26,00
- V 167: Schadstoffe von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung
Kocher, Brose, Siebertz € 14,50
- V 168: Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit
Frost, Schulze € 15,50
- V 169: Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen
Wermuth, Wulff € 15,50
- V 170: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen
Roos, Zimmermann, Riffel, Cypra € 16,50

- V 171: Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)**
Weinert, Vengels € 17,50
- V 172: Luftschadstoffe an BAB 2007**
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 173: Bewertungshintergrund für die Verfahren zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge**
Altreuther, Beckenbauer, Männel € 13,00
- V 174: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Düring, Lohmeyer, Moldenhauer, Knörr, Kutzner, Becker, Richter, Schmidt € 29,00
- V 175: Maßnahmen gegen die psychischen Belastungen des Personals des Straßenbetriebsdienstes**
Fastenmeier, Eggerdinger, Goldstein € 14,50
- 2009**
- V 176: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw**
Schulze, Hübel € 13,00
- V 177: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A24**
Lerner, Hegewald, Löhe, Velling € 13,50
- V 178: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen**
Fitschen € 26,00
- V 179: Straßenverkehrszählung 2005: Methodik**
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,50
- V 180: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn**
Hausmann € 14,50
- V 181: Voraussetzungen für dynamische Wegweisung mit integrierten Stau- und Reisezeitinformationen**
Hülsemann, Krems, Henning, Thieme € 18,50
- V 182: Verkehrsqualitätsstufenkonzepte für Hauptverkehrsstraßen mit straßenbündigen Stadt-/Straßenbahnkörpern**
Sümmermann, Lank, Steinauer, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen € 17,00
- V 183: Bewertungsverfahren für Verkehrs- und Verbindungsqualitäten von Hauptverkehrsstraßen**
Lank, Sümmermann, Steinauer, Baur, Kemper, Probst, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen, Jachtmann, Hebel € 24,00
- V 184: Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern**
Alrutz, Bohle, Müller, Prahlow, Hacke, Lohmann € 19,00
- V 185: Möglichkeiten zur schnelleren Umsetzung und Priorisierung straßenbaulicher Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit**
Gerlach, Kesting, Thiemeyer € 16,00
- V 186: Beurteilung der Streustoffverteilung im Winterdienst**
Badelt, Moritz € 17,00
- V 187: Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes**
Kirschfink, Aretz € 16,50
- 2010**
- V 188: Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb**
Kocher, Brose, Feix, Görg, Peters, Schenker € 14,00
- V 189: Einfluss von verkehrsberuhigenden Maßnahmen auf die PM₁₀-Belastung an Straßen**
Düring, Lohmeyer, Pöschke, Ahrens, Bartz, Wittwer, Becker, Richter, Schmidt, Kupiainen, Pirjola, Stojiljkovic, Malinen, Portin € 16,50
- V 190: Entwicklung besonderer Fahrbahnbeläge zur Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Lank, Steinauer, Busen € 29,50
- V 191: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2008**
Fitschen, Nordmann € 27,00
Dieser Bericht ist als Buch und als CD erhältlich oder kann ferner als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
- V 192: Anprall von Pkw unter großen Winkeln gegen Fahrzeugrückhaltesysteme**
Gärtner, Egelhaaf € 14,00
- V 193: Anprallversuche an motorradfahrerfreundlichen Schutzeinrichtungen**
Klöckner € 14,50
- V 194: Einbindung städtischer Verkehrsinformationen in ein regionales Verkehrsmanagement**
Ansorge, Kirschfink, von der Ruhren, Hebel, Johanning € 16,50
- V 195: Abwasserbehandlung an PWC-Anlagen**
Londong, Meyer € 29,50
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
- V 196: Sicherheitsrelevante Aspekte der Straßenplanung**
Bark, Kutschera, Baier, Klemps-Kohnen € 16,00
- V 197: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2008**
Lensing € 16,50
- V 198: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2005/2006**
Kocher, Brose, Chlubek, Karagüzel, Klein, Siebertz € 14,50
- V 199: Stoffeintrag in Straßenrandböden - Messzeitraum 2006/2007**
Kocher, Brose, Chlubek, Görg, Klein, Siebertz € 14,00
- V 200: Ermittlung von Standarts für anforderungsgerechte Datenqualität bei Verkehrserhebungen**
Bäumer, Hautzinger, Kathmann, Schmitz, Sommer, Wermuth € 18,00
- V 201: Quantifizierung der Sicherheitswirkungen verschiedener Bau-, Gestaltungs- und Betriebsformen auf Landstraßen**
Viets, Dohmen, Dürhager, Legge (in Vorbereitung)
- V 202: Einfluss innerörtlicher Grünflächen und Wasserflächen auf die PM₁₀-Belastung**
Endlicher, Langner, Dannenmeier, Fiedler, Herrmann, Ohmer, Dalter, Kull, Gebhardt, Hartmann (in Vorbereitung)
- V 203: Bewertung von Ortsumgehungen aus Sicht der Verkehrssicherheit**
Dohmen, Viets, Kesting, Dürhager, Funke-Akbiyik (in Vorbereitung)
- V 204: Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM₁₀-Belastung**
Bracke, Reznik, Mölleken, Berteil, Schmidt € 22,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
-
- Alle Berichte sind zu beziehen beim:
- Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de
- Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.